

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 6, 2021

К вопросу о механизмах пробоя в микроструктурных
газовых детекторах (*обзор*)

В. И. Разин

5

Приборы и методы измерения ^{14}C (*обзор*)

*Е. И. Назаров, А. В. Кружалов, А. А. Екидин,
М. Е. Васянович, В. В. Пархомчук, С. А. Растигеев,
П. Н. Калинин, Е. В. Пархомчук*

8

ЭЛЕКТРОНИКА И РАДИОТЕХНИКА

Прецизионный малошумящий источник
высокого напряжения

В. В. Колобов, М. Б. Баранник

15

Особенности работы коммутаторов на основе транзисторов
в полумостовой схеме для формирования высоковольтных
прямоугольных импульсов с высокой скоростью нарастания

*Я. Е. Жарков, И. Е. Ребров,
В. Ю. Хомич, В. А. Ямищиков*

25

Дискретные поляризационные модуляторы
радиолокационных сигналов

Е. Л. Шошин

33

Стенд для исследования обратного рассеяния
радиочастотных импульсов

*Е. И. Тренкаль, В. С. Поздняков,
А. Г. Лоцилов, Н. Д. Малютин*

41

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Генератор газа на основе пористого титана в составе
отпаянных камер плазменного фокуса

*Д. И. Юрков, В. А. Лавренин, Б. Д. Лемешко,
Ю. В. Михайлов, И. А. Прокуратов, А. К. Дулатов*

47

Эффективный импульсно-периодический химический HF(DF)-лазер

*В. Я. Агроскин, Б. Г. Бравый, Г. К. Васильев,
В. И. Гурьев, С. А. Кашианов, Е. Ф. Макаров,
С. А. Сотниченко, Ю. А. Чернышев*

53

К анализу характеристик лазерного осветительного устройства

С. М. Зуев, Д. О. Варламов, В. В. Кукса

57

Цифровой детектор рентгеновских изображений

А. А. Трубицын, Е. Ю. Грачев

63

Термостабилизация частоты протонного релаксометра на основе ядерного магнитного резонанса с магнитной системой на постоянных магнитах

А. А. Мысик, И. В. Бызов, С. В. Жаков

70

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

Термолюминесцентные дозиметры на основе керамики из оксида и нитрида алюминия

*Н. Л. Алукер, А. С. Артамонов,
Т. И. Гимадова, А. С. Зверев*

75

Выбор ускоряющей структуры малогабаритного линейного ускорителя электронов для лучевой терапии

С. В. Куцаев

84

Использование лазерного интерференционного микроскопа для оценки флуктуаций и эквивалентной константы упругости мембран клеток

*А. И. Юсипович, Е. Ю. Паршина, А. А. Байжуманов,
С. К. Пирутин, А. Д. Иванов, В. Л. Минаев,
Г. Г. Левин, Г. В. Максимов*

93

ЛАБОРАТОРНАЯ ТЕХНИКА

Низкотемпературная ячейка для проведения высокочастотных электрофизических измерений полупроводниковых устройств

*К. П. Аймаганбетов, А. У. Алдияров, С. Р. Жантуаров,
Н. Ж. Алмасов, Е. И. Теруков, Н. С. Токмолдин*

102

Установка для формирования трехмерных структур методом двухфотонной фемтосекундной полимеризации с использованием пространственно-временной фокусировки

*Е. О. Епифанов, Е. А. Мигаль, Ф. В. Потемкин,
А. А. Антошин, В. И. Юсупов, Н. В. Минаев*

107

Измерение мгновенных значений температуры газов газотурбинного двигателя с использованием акустических мультивибраторов

*А. В. Артюхов, В. Г. Марков,
Ж. А. Сухинец, А. И. Гулин*

114

Криогенная очистка гелия и его использование для подготовки поляризационных ячеек и проведения неоптической поляризации ядер ^3He

*А. С. Макаrenchенко, В. В. Кузьмин, К. Р. Сафиуллин,
Д. В. Кан, М. С. Тагиров*

120

Криомагнитная система со сверхпроводниковыми обмотками для магнитного сепаратора

*Д. В. Варюхин, Н. В. Таряник,
П. Н. Постол, Д. О. Федюк*

126

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ В ЛАБОРАТОРИЯХ

Трехканальный фурье-спектрометр

В. А. Вагин, А. И. Хорохорин

130

Аппаратно-программный комплекс для экспериментального исследования поведенческих реакций лабораторных животных

*С. П. Драган, И. А. Веселовский,
Д. Б. Комаров, А. В. Богомолов*

131

Щитовой измеритель напряжения и силы постоянного тока повышенной точности

Ю. А. Андреев, С. Ю. Буров, Ю. А. Кремзуков

133

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ ЖУРНАЛА “ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА” ЗА 2021 ГОД

Алфавитный указатель

136

Предметный указатель

148

СИГНАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Аннотации статей, намечаемых к публикации в журнале ПТЭ 162

Правила публикации в ПТЭ 165

УДК 539.107.422

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМАХ ПРОБОЯ В МИКРОСТРУКТУРНЫХ ГАЗОВЫХ ДЕТЕКТОРАХ (обзор)

© 2021 г. В. И. Разин*

Институт ядерных исследований РАН
Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а

*e-mail: razin@inr.ru

Поступила в редакцию 22.04.2021 г.

После доработки 07.06.2021 г.

Принята к публикации 15.06.2021 г.

Представлены результаты исследования причин возникновения пробоев в микроструктурных газовых детекторах. Согласно экспериментальным данным, основу такого процесса составляют три независимых источника: коронный разряд, стримерный разряд и поляризация диэлектрика при протекании зарядов внутри детектора. Показаны несколько способов повышения стойкости приборов данного типа к разрушениям от действия искр.

DOI: 10.31857/S0032816221060057

1. ВВЕДЕНИЕ

Микроструктурные газовые детекторы (Micro-Pattern Gas Detector – MPGD) широко применяются в технике ядерно-физического эксперимента и для решения других прикладных задач, что обусловлено целым рядом таких их привлекательных черт, как высокие пространственное и временное разрешения, способность работать в более интенсивных пучках по сравнению с проволочными устройствами, а также возможность промышленного воспроизводства на основе новейших достижений в области микроэлектроники [1–3].

Вместе с тем приборы данного типа имеют существенный недостаток, связанный с уменьшенным расстоянием между электродами, что приводит к увеличению вероятности искрового пробоя. Этот процесс достаточно подробно исследован в работе [4], где также показано, что одной из особенностей детекторов MPGD является возможность работать в каскадном режиме. Часть лавинного заряда из одного газового электронного умножителя (GEM – Gas Electron Multiplier) может быть перенаправлена в другой. Таким способом общий коэффициент размножения электронов A может быть доведен до значения $5 \cdot 10^3$ в обычной газовой смеси без пробоя [5].

В некоторых устройствах с детектирующей поверхностью большой площади (порядка нескольких квадратных метров) электрические пробои происходят при освобождении энергии, запасен-

ной на этих плоскостях, как на конденсаторах большой емкости. Этот разряд может привести к деструктивному эффекту, распространяясь к аноду и разрушая элементы считывающей электроники [6]. Предложенный в работе [6] метод разделения чувствительной поверхности на ряд секторов, подключаемых через высокоомные резисторы к системе питания, позволяет значительно снизить энергию разряда. Таким способом можно достичь более равномерного сигнального отклика со всей площади MPGD, что обеспечит возможность применения этого метода в физических приложениях, где имеется высокая вероятность электрических пробоев при больших нагрузках.

Особое место в методике борьбы с пробоями в MPGD занимает микросеточный газовый детектор (MICROMEGAS – Micro-MEsh Gaseous Structure), описанный Ж. Шарпаком в 1996 г. в работе [7]. Практически этот прибор представляет собой плоскопараллельный лавинный счетчик с очень узким (50–100 мкм) зазором между катодной сеткой и анодной плоскостью в виде печатной платы. Благодаря такому решению из конструкции MICROMEGAS практически исключены (или сведены в ней к минимуму) диэлектрические элементы во избежание их поляризации и возникновения спонтанного искрового разряда. Точность ширины зазора выдерживается при помощи системы растяжек катодной сетки, изготовленной путем навивки резистивной проволоки круглого сечения без применения спейсера. Высокие пространственное, временное и энергетическое

тическое разрешения (30 мкм, 70 пс, 20%) при регистрации минимально ионизирующих частиц делают этот прибор более предпочтительным при решении многих экспериментальных задач. Следует отметить также слабое звено в конструкции MICROMEGAS: вследствие малого зазора между катодом и анодом не удается получить коэффициент размножения электронов A выше $5 \cdot 10^3$ из-за высокой вероятности выбивания вторичных электронов из катода ультрафиолетовыми фотонами и возникновения самостоятельного разряда, согласно правилу Рэтера [8].

2. ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПРЕДПРОБОЙНЫХ И ПРОБОЙНЫХ ЯВЛЕНИЙ В MPGD

2.1. Самостоятельный коронный разряд

В ИЯИ РАН накоплен существенный опыт в исследовании механизма предпробойных и пробойных явлений в газовых детекторах различных конструкций. В работе [9] предложена методика тренировки многопроволочных пропорциональных камер на воздухе. Она основана на опыте применения формулы Пика для определения предельной напряженности электрического поля в районе анодного электрода с малым радиусом кривизны при таундсендовском лавинном размножении электронов до возникновения коронного разряда [10]. Оказалось, что данная методика вполне применима при определении напряженности электрического поля в MPGD различных конструкций, например: в GEM, толстых газовых электронных умножителях (TGEM – Thick Gas Electron Multiplier), а также в MICROMEGAS, электроды которых имеют острые края с радиусом $R \leq 5$ мкм. При этом коронный разряд в данных устройствах возникает гораздо раньше, чем они произведут сигнал от детектируемой частицы. В результате коронный разряд распространяется вдоль поверхности с острыми краями в виде светящегося слоя за счет фотоионизации молекул газа при соответствующей напряженности электрического поля.

2.2. Самостоятельный стримерный разряд

Другим инициатором пробойных явлений в газовых детекторах может быть самостоятельный стримерный разряд. Он происходит в результате электростатического взаимодействия между положительным зарядом ионов, движущихся от анодного электрода, и наведенным отрицательным зарядом на катодном электроде, что соответствует условиям пробоя, выведенным Рэтером в работе [8].

Процесс распространения ионизационной волны от такого взаимодействия внутри газового

объема имеет длительность порядка нескольких наносекунд. После его прохождения в газовом детекторе наблюдается светящийся столб или шнур благодаря фотонам с энергией порядка 1.5 эВ, возникающим в результате рекомбинации положительных и отрицательных ионов. Вероятность перехода стримерного газового разряда в искровую пробой можно существенно снизить при использовании газовой смеси с электроотрицательными добавками и резистивных электродов круглого сечения диаметром 30–50 мкм с $\rho = 10^7$ Ом/см.

2.3. О влиянии диэлектрического материала на пробой в конструкциях MPGD

В конструкциях MPGD часто находят применение диэлектрические материалы или подложки в виде спейсеров, служащие в качестве изоляторов между электродами. Однако при длительном протекании разрядного тока и тока утечки они подвергаются нагреванию, что приводит к значительному изменению их структуры, а также к образованию поляризационных зон или доменов. Такие образования могут служить источниками взрывной ионизации, ухудшающими изоляционные свойства диэлектрика с переходом в искровой пробой. Пока этот процесс исследован мало по сравнению с действием коронного или стримерного разряда, но он также является источником негативных воздействий на MPGD при длительной эксплуатации приборов в условиях высоких пучковых нагрузок.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕСТИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК TGEM

Исходя из вышеизложенного, можно сделать следующие выводы:

а) в одноступенчатой конструкции TGEM с электродами из стеклотекстолита с отверстиями, изготовленными механическим сверлением, не удастся получить коэффициент размножения электронов $A \geq 10^2$ из-за коронного разряда по поверхности отверстия;

б) коэффициент размножения электронов $A \leq 10^4$ достигается в одноступенчатой конструкции TGEM с круглыми металлическими электродами, имеющими радиус $R \geq 20$ мкм, без применения диэлектрических спейсеров [11];

в) в конструкции резистивного TGEM со стрипами из проводящей краски с $\rho = 20$ кОм/см, нанесенной на поливинилхлоридную основу, был достигнут коэффициент $A \leq 10^4$, ограничение процесса размножения электронов было связано с развитием стримерного разряда [12];

г) хороший результат, с коэффициентом электронного размножения $A \leq 5 \cdot 10^4$, был получен в одноступенчатой конструкции TGEM с сеточны-

ми электродами из бериллиевой бронзы толщиной 50 мкм без диэлектрического спейсера, сетки были изготовлены методом химического травления во избежание появления острых кромок; более высокого значения A достичь не удалось из-за появления стримерных явлений [13].

4. ВЫВОДЫ

Целесообразны следующие пути улучшения рабочих характеристик MPGD:

1) стойкость к пробоям и утечкам заряда в плоских микростриповых газовых детекторах типа MSGD можно значительно повысить при нанесении на края стрипов по всей их длине круглых подложек из нержавеющей стали или меди с радиусом $R = 20\text{--}30$ мкм при изготовлении стрипов из этого материала;

2) вероятность коронного разряда в дырочных микроструктурных газовых детекторах типа GEM, TGEM, MICROMEGAS можно свести к минимуму, применяя металлические сеточные структуры круглой формы с $R \geq 20$ мкм;

3) стримерную моду разряда, а также спонтанный всплеск разрядного тока из-за стекания заряда из доменов диэлектрика можно существенно ограничить, применяя резистивные круглые электроды с $R \geq 20$ мкм и $\rho \geq 50$ кОм/см;

4) применение диэлектрических материалов в газоразрядных промежутках в качестве спейсеров следует свести к минимуму.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sauli F.* // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. Sect. A. 1997. V. 386 (2). P. 531.
2. *Francke T., Peskov V.* Innovative Applications and Developments of Micro-Pattern Gaseous Detectors. IGI global, 2014. <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-6014-4>
3. *Garcia F., Brunbauer F.M., Lisowska M., Muller H., Oliveri E., Pfeiffer D., Ropelewski L., Samarati J., Sauli F., Scharenberg L.* // Journal of Instrumentation. 2021. V. 16(1). T01001. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/01/T01001>
4. *Fonte P., Peskov V., Ramsey B.D.* // IEEE Trans. Nucl. Scie. 1999. V. 46. P. 321. doi . 775537 <https://doi.org/10.1109/23>
5. *Ketzer B., Weitzel Q., Paul S., Sauli F., Ropelewski L.* // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. A. 2004. V. 535. P. 314. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.07.146>
6. *Marques A.P., Brunbauer F.M., Miller H., de Oliveira R., Oliveri E., Pfeiffer D., Ropelewski L., Samarati J., Sauli F., Sharenberg L., Shang L., van Stenis M., Williams S., Zhou Y.* // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. A. 2020. V. 961. Article 163673. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.163673>
7. *Giomataris Y., Reburgard Ph., Robert J.P., Charpak G.* // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. A. 1996. V. 376. P. 29.
8. *Raether H.* Electron Avalanches and Breakdown in Gases. London: Butterworths, 1964.
9. *Пантуев В.С., Разин В.И.* Препринт ИЯИ П-0571. Москва, 1987.
10. *Лик Ф.В.* Диэлектрические явления в технике высоких напряжений. Коронный разряд на проводах / Пер. с англ. Под общ. ред. Г.А. Эпштейна. М.: Госэнергоиздат, 1934.
11. *Ovchinnikov B.M., Razin V.I., Reshetin A.I., Filippov S.N.* // Presented at the RD51 Collaboration Meeting, CERN, November 2009. arXiv: 0911.4807 [physics.ins-det]. 2009.
12. *Разин В.И., Решетин А.И., Филиппов С.Н.* // ПТЭ. 2011. № 5. С. 115
13. *Разин В.И.* // ПТЭ. 2019. № 1. С. 66. <https://doi.org/10.1134/S003281621901021X>

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ^{14}C (обзор)

© 2021 г. Е. И. Назаров^{a,*}, А. В. Кружалов^a, А. А. Екидин^b, М. Е. Васянович^b,
В. В. Пархомчук^c, С. А. Растигеев^c, П. Н. Калинин^d, Е. В. Пархомчук^{e,f}

^aУральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19

^bИнститут промышленной экологии УрО РАН
Россия, 620219, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20

^cИнститут ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

^dИнститут катализа им. Г.К. Борескова СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 5

^eИнститут археологии и этнографии СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 17

^fНовосибирский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

*e-mail: e.i.nazarov@urfu.ru

Поступила в редакцию 17.06.2021 г.

После доработки 28.06.2021 г.

Принята к публикации 16.07.2021 г.

Рассмотрены основные способы измерения ^{14}C : счетчик Либби, пропорциональный газовый счетчик, метод жидкостного сцинтилляционного счета и метод ускорительной масс-спектрометрии. Для каждого представленного метода описана специфика проведения измерений, показаны преимущества и недостатки. Представлены результаты измерения концентрации радиоуглерода с помощью метода ускорительной масс-спектрометрии в годовых кольцах сосны, выросшей в Академгородке г. Новосибирска. Полученная концентрация ^{14}C в измеренных образцах варьируется от 95.4 ± 0.2 рМС до 191.5 ± 2.2 рМС.

DOI: 10.31857/S0032816221060185

ВВЕДЕНИЕ

^{14}C является радиоактивным изотопом углерода с атомным ядром, содержащим 6 протонов и 8 нейтронов. В настоящее время актуальной является задача получить метрологически обоснованные данные об активности радиоуглерода в исследуемом образце. Это обусловлено несколькими факторами. Во-первых, использование ^{14}C в радиоизотопном датировании позволяет установить возраст исследуемых биоматериалов до 60000 лет [1–6]. Данное исследование наиболее часто применяется в археологии, ледниковой геологии, физике атмосферы, гляциологии и других науках для датировок, но также может выступать и в качестве метки различных природных процессов. Во-вторых, ^{14}C применяется в медицине, например, для проведения дыхательных тестов на *Helicobacter Pylori* [7–9]. В-третьих, ^{14}C вносит вклад в облучение населения, так как присутствует в атмосферных выбросах ядерных реакторов

различного типа, а также заводов по переработке топлива [10, 11].

^{14}C был впервые экспериментально обнаружен в 1936 г. британскими физиками W.E. Burcham и M. Goldhaber, облучавшими ядра ^{14}N медленными нейтронами в фотоэмульсии по реакции $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ [12]. Период полураспада ^{14}C , согласно [13], составляет 5700 ± 30 лет. ^{14}C является β -излучателем и образует в процессе распада ^{14}N :



Максимальная энергия β -излучения составляет 156 кэВ, средняя – 45 кэВ [14].

^{14}C образуется как естественным, так и антропогенным путем. Естественный путь образования основан на взаимодействии ^{14}N , входящего в состав атмосферы Земли, и нейтронов, являющихся

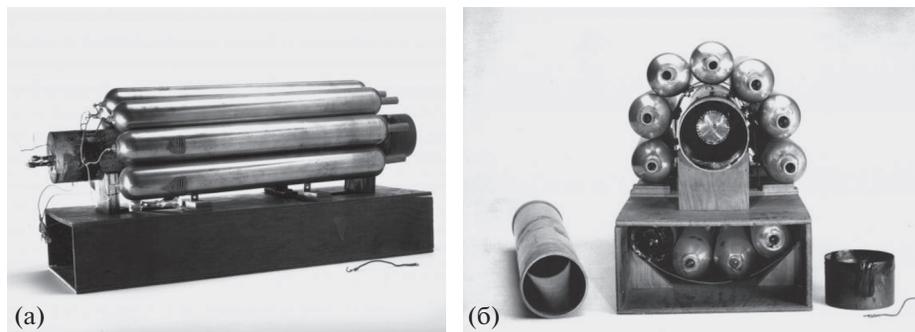
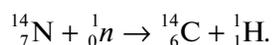


Рис. 1. Внешний вид счетчика Либби: а — с закрытой крышкой, б — с открытой [21].

продуктами реакции космических лучей и различных веществ атмосферы:



Ежегодно таким образом образуется около $1.4 \cdot 10^6$ ГБк радиоуглерода, а общее количество ^{14}C в атмосфере оценивается в $1.4 \cdot 10^8$ ГБк. Наибольшее количество ^{14}C заключено в мировом океане — около $1.0 \cdot 10^{10}$ ГБк [15].

К антропогенным источникам относятся испытания ядерного оружия с 1945 по 1980 гг., в результате которых в окружающую среду поступило $2.2 \cdot 10^8$ ГБк ^{14}C [16], а также выбросы предприятий ядерного топливного цикла. Во время работы ядерного реактора ^{14}C образуется в основном путем нейтронной активации ^{17}O , ^{14}N , ^{13}C и в меньшей степени ^{15}N и ^{16}O , присутствующих в тепловыделяющих элементах, конструкционных материалах, замедлителе и теплоносителе, а также за счет реакций тройного деления урана и плутония в ядерном топливе [17]. По оценкам [18], на действующих атомных электростанциях по всему миру ежегодно образуется около $1.1 \cdot 10^6$ ГБк ^{14}C , и из этого количества примерно $1.1 \cdot 10^5$ ГБк/год ^{14}C выбрасывается в атмосферу в газообразной форме, в то время как около $3.7 \cdot 10^5$ ГБк/год ^{14}C выбрасывается заводами по переработке ядерного топлива как в газообразной, так и в жидкой форме. Способ образования ^{14}C на атомных элек-

тростанциях зависит от типа ядерного реактора [19], а именно: от степени обогащения урана в топливе, концентрации кислорода и азота в топливе, конструкционных материалах, замедлителе и теплоносителе.

Измерение активности ^{14}C связано с трудностями регистрации β -частиц, поскольку их максимальная энергия составляет 156 кэВ. Для β -частиц с такой энергией не подойдут обычные твердотельные детекторы (сцинтилляционные, полупроводниковые). Вдобавок малая энергия β -частиц не позволяет использовать для измерения образцы большого объема ввиду самопоглощения. В связи с этим методы измерения радиоуглерода должны обладать: высокой эффективностью регистрации слабопроникающего β -излучения, низким значением фоновой составляющей приборов и хорошей стабильностью аппаратуры.

В данной статье рассмотрены основные методы измерения ^{14}C , начиная от первых — газоразрядных счетчиков и заканчивая современными методами — ускорительной масс-спектрометрией. Приведены преимущества и недостатки каждого метода, а также описано практическое применение метода ускорительной масс-спектрометрии.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ^{14}C

Счетчик Либби

В 1946 г. американский физик У. Либби разработал первую аппаратуру для измерения ^{14}C . Для этого он использовал специальную систему, в которой счетчик Гейгера—Мюллера с латунными стенками был окружен другими счетчиками, включенными с ним в схему антисовпадений (рис. 1, 2). Образец чистого углерода в виде сажи наносился на тонкостенный цилиндр и помещался внутрь центрального счетчика. Применение внешних счетчиков позволило избежать регистрации ложных импульсов, и центральный счетчик регистрировал только частицы, испускаемые счетным образцом [20].

В настоящее время данный метод не применяется, так как имеет ряд недостатков: низкую эф-

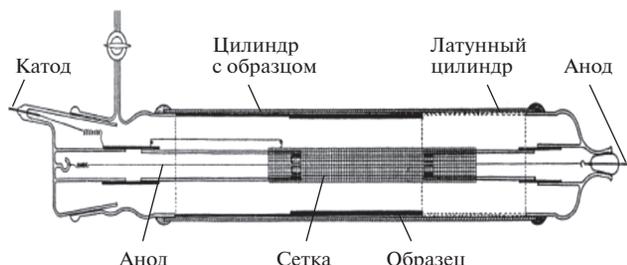


Рис. 2. Устройство счетчика Либби [22].

фективность регистрации (~5.5%), трудность получения химически чистого углерода (свободного от радикалов и примесей), большую вероятность загрязнения приготовленного счетного образца радиоактивными веществами, находящимися в воздухе.

Пропорциональные газовые счетчики

В 50-е годы 20-го века на смену методу, предложенному Либби, пришел метод измерения ^{14}C с использованием газовых пропорциональных счетчиков. Главным их отличием было то, что выделенный из образца газ $^{14}\text{CO}_2$ помещался непосредственно в чувствительный объем детектора. В работе [23] вместо кольца из счетчиков Гейгера—Мюллера использовались 2 концентрические трубки, между которыми на равных расстояниях были размещены 11 анодных нитей (рис. 3). Преимущество данной конструкции перед кольцом из отдельных счетчиков состоит в том, что она обеспечивает устойчивую систему и одинаковый пусковой потенциал всех счетчиков.

Катоды пропорциональных счетчиков чаще всего изготавливались из материалов, содержащих малое количество радиоактивных примесей, например меди или нержавеющей стали. Внутреннюю поверхность катода покрывали веществами, не вступающими в реакцию с газами, чтобы снизить вероятность осаждения части пробы на стенках камеры. Для повышения чувствительности метода могут применяться либо счетчики большого объема, до 10 л, либо счетчики с повышенным давлением рабочего газа (2–10 атм).

Несмотря на все достоинства пропорциональных счетчиков (высокая эффективность регистрации, низкий фон), они имеют ряд недостатков. Существуют трудности очистки счетного газа от радиоактивных примесей и удаления осажденных частиц пробы со стенок камеры для последующих измерений. Кроме того, применение пропорциональных счетчиков большого объема приводит к увеличению размеров и массы элементов защиты.

Как правило, для счетчика объемом 1 л, заполненного CO_2 при атмосферном давлении, требуется 0.5 г углерода в образце. Данное требование является критичным для многих областей исследования, особенно археологии, где обычно доступны миллиграммовые образцы. Поэтому актуальной стала разработка микросчетчиков объемом несколько миллилитров, которым требовались единицы миллиграммов углерода в образце. Недостатком таких счетчиков было время измерения — до 1 месяца. Микросчетчики не получили широкого распространения ввиду быстроразвивающегося метода ускорительной масс-спектрометрии [21].

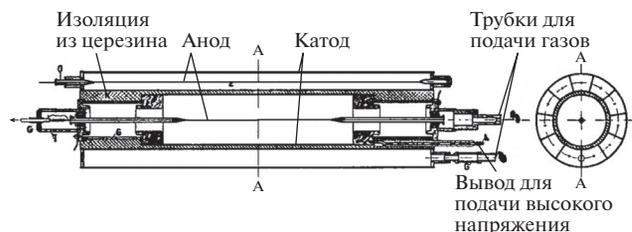


Рис. 3. Газонаполненный пропорциональный счетчик [23].

Метод жидкостного сцинтилляционного счета

Развитие метода жидкостного сцинтилляционного счета началось в 50-е годы 20-го века почти одновременно с методом газового счетчика. Принцип жидкостного сцинтилляционного счета основан на регистрации сцинтилляций, вызванных заряженными частицами, в данном случае β -частицами. Жидкий сцинтиллятор представляет собой смесь из растворителя, собственно сцинтиллятора и сместителя спектра. Интенсивность сцинтилляций пропорциональна энергии частиц, что позволяет электронными методами выделять интересующий исследователя диапазон энергии частиц.

Радиоактивные образцы и сцинтилляционную смесь помещают в небольшие прозрачные (часто стеклянные или пластиковые) вials, которые устанавливают перед фоторегистрирующими приборами, чаще всего фотоэлектронными умножителями ($\PhiЭУ$). Многие приборы имеют два $\PhiЭУ$, соединенных по схеме совпадений (рис. 4), отсекающей шум $\PhiЭУ$. Эффективность счета зависит от методики измерения и для ^{14}C может достигать более 95%. К недостаткам метода относятся эффекты гашения — ряд эффектов, приводящих к энергетическим потерям в процессе преобразования энергии распада в электрические импульсы $\PhiЭУ$ [24].

Метод ускорительной масс-спектрометрии

В вышеупомянутых методах регистрации ^{14}C детектируются только β -частицы небольшого количества атомов углерода, претерпевающих распад. В ускорительной масс-спектрометрии, появившейся в 70-е годы, происходит поштучный подсчет полного количества атомов радиоуглерода в образце. Работа ускорительного масс-спектрометра основана на измерении интенсивности пучков ионов разной массы. Чувствительность данного метода позволяет отделять пучок с ультранизкой относительной интенсивностью (на один атом ^{14}C приходится примерно 10^{12} атомов ^{12}C) от соседних пучков очень высокой интенсивности, таких как пучки ^{13}C и ^{12}C .

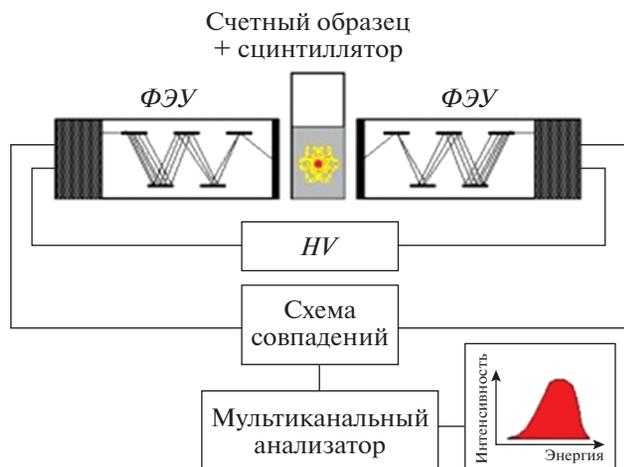


Рис. 4. Функциональная схема жидкостного сцинтилляционного спектрометра [25]. ФЭУ – фотоэлектронные умножители; HV (High voltage) – высокое напряжение.

Так как период полураспада ^{14}C 5700 лет (в расчетах радиоуглеродного возраста используется 5568 лет), то 1 г углерода, выделенного из современной древесины, будет давать только 1 распад за 4 с. Для получения точности 0.1% нужно накопить 10^6 распадов, для чего потребуется $4 \cdot 10^6$ с (почти 46 сут). Если взять 100 г углерода, время сократится до 11 ч. Для анализа методом ускорительной масс-спектрометрии достаточно взять всего 1 мг углерода, с эффективностью 2% превратить его в заряженные ионы и посчитать количество ионов ^{14}C [26].

На рис. 5 представлена схема ускорительного масс-спектрометра, который был создан в 2011 г. и запущен Институтом ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН в Новосибирске [27]. Чувствительность данной установки составляет 10^{-15} ($^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$).

Проведение радиоуглеродного анализа методом ускорительной масс-спектрометрии состоит из следующих этапов.

1. Генерация ионного пучка. 23 графитизированных образца помещают в барабан на расстоянии 7 мм друг от друга. Маленький стальной контейнер с жидким цезием нагревают до 600°C . Образовавшиеся пары цезия попадают на танталовый ионизатор, нагретый до 100°C , и, далее, ускоряясь напряжением 8 кВ, – на исследуемый образец. Таким образом генерируется отрицательный ионный пучок, состоящий из $^{12}\text{CH}_2^-$, $^{13}\text{CH}^-$, $^{14}\text{C}^-$, с энергией на выходе из ионного источника 25 кВ. Отрицательное зарядовое состояние первоначального пучка позволяет избавиться от ионов $^{14}\text{N}^-$, которые являются крайне нестабильными.

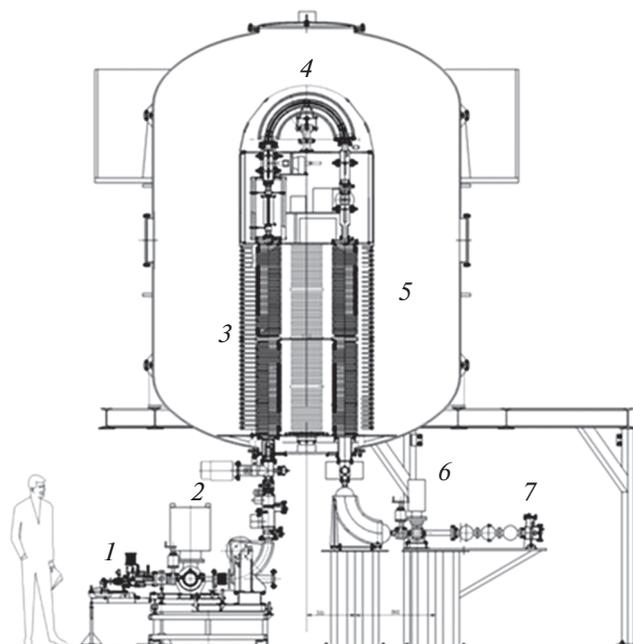


Рис. 5. Схема ускорительного масс-спектрометра в ИЯФ СО РАН. 1 – ионный источник; 2 – поворотный магнит; 3 – первая ускорительная трубка; 4 – мишень из паров магния; 5 – вторая ускорительная трубка; 6 – фильтр магнитным полем; 7 – тонкопленочный времяпролетный детектор.

2. Фокусировка ионного пучка и его поворот на 90° магнитным полем, в результате чего он попадает в первую ускорительную трубку, где он ускоряется до напряжения 1 МВ. Затем пучок попадает в мишень на парах магния.

3. Перезарядка ионов в мишени на парах магния до зарядового состояния $3+$, в результате чего отсеиваются молекулярные ионы. Полученный пучок, состоящий из частиц $^{12}\text{C}^{3+}$, $^{13}\text{C}^{3+}$, $^{14}\text{C}^{3+}$, поворачивается на 180° и попадает во вторую ускорительную трубку, где получает дополнительную энергию 3 МэВ. Пучок частиц поворачивается магнитным полем, происходит их селекция по массе и заряду, и пучок $^{14}\text{C}^{3+}$ попадает в счетчики.

4. Регистрация ионов $^{14}\text{C}^{3+}$ тонкопленочным времяпролетным детектором, состоящим из электростатического и циклоидального датчиков. В датчике установлена пленка, пролетая через которую, ионы вызывают эмиссию электронов. Далее электроны попадают на микроканальную пластину, где происходит их умножение. В это время проводится измерение времени пролета между датчиками.

Конечным результатом анализа является масс-спектр ионов, представляющий собой зависимость измеряемого тока от массы иона [28].

ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ^{14}C В ГОДИЧНЫХ КОЛЬЦАХ СОСНЫ

Ускорительная масс-спектрометрия позволяет определять точный возраст исследуемых образцов в таких научных дисциплинах, как археология, геология, океанология и др. Помимо этого, она может быть использована для измерения концентрации ^{14}C в различных объектах окружающей среды с целью как радиоэкологического исследования [29], так и ретроспективной оценки содержания радиоуглерода в атмосфере путем измерения активности ^{14}C в годичных кольцах деревьев [30].

Для оценки дополнительного вклада в природное содержание радиоуглерода при эксплуатации объектов использования атомной энергии необходимо получить данные о фоновых значениях. Метод ускорительной масс-спектрометрии наилучшим образом подходит для этих целей, поскольку является наиболее чувствительным и точным.

Поскольку целлюлоза — основной компонент древесины — не вступает во взаимодействие с углеродом из окружающей среды, а период полураспада ^{14}C составляет 5700 лет, то каждое годичное кольцо дерева содержит информацию об активности ^{14}C в атмосфере за каждый год на протяжении всего жизненного цикла дерева. Ретроспективная оценка содержания радиоуглерода в атмосфере в различные периоды времени была получена при изучении колец древесины в Академгородке г. Новосибирска — регионе, расположенном в относительном удалении от действующих объектов использования атомной энергии. На рис. 6 представлен анализ годичных колец сосны, выросшей в Академгородке г. Новосибирска. Единицы измерения ^{14}C — рМС (Percent Modern Carbon) — были приняты во второй половине 20-го века. 100 рМС = 227 Бк/г С соответствуют гипотетической удельной активности ^{14}C в атмосфере в 1950 г. без какого-либо человеческого воздействия [31].

Возраст сосны, выросшей в Академгородке, составлял 113 лет. Отобранный керн был разделен на годичные кольца, из которых выделена целлюлоза. Методика выделения целлюлозы заключалась в следующем: фрагмент кольца заливали 13 мл раствора катализатора и окислителя и выдерживали 70 мин при температуре 85°C. На 6 проб колец общей массой до 1.5 г окислительный раствор готовили путем растворения 2.25 г вольфрамата натрия двухводного (ЧДА) в 38 мл дистиллированной воды, затем по каплям добавляли 1.8 мл концентрированной серной кислоты (ОСЧ), после чего образовавшийся желтый осадок растворяли добавлением 40 мл 33%-ного раствора пероксида водорода (ОСЧ). Отбеленные таким образом волокна целлюлозы отмывали и сушили. Полученную целлюлозу полностью сжигали и превращали в графитоподобный углерод на аб-

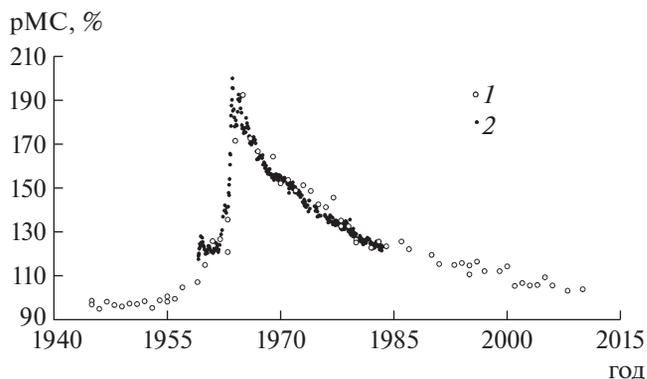


Рис. 6. Концентрация ^{14}C : 1 — в годичных кольцах сосны, выросшей в Академгородке г. Новосибирска, 2 — в воздухе на станции Вермунт, Австрия [33].

сорбционно-каталитической установке, предназначенной для получения мишеней для ускорительной масс-спектрометрии [32]. Для получения одной графитовой мишени требовалось 5–7 мг очищенной целлюлозы. После этого был проведен анализ полученных образцов на ускорительном масс-спектрометре. Согласно рис. 6, начиная с 50-х годов 20-го века наблюдается почти двукратное увеличение концентрации ^{14}C , вызванное испытаниями ядерного оружия в период с 1945 по 1980 г. Такое увеличение характерно для всего северного полушария, подтверждением этому являются данные по активности ^{14}C в окружающем воздухе на станции Вермунт, Австрия [33].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методы измерения ^{14}C стремительно развивались начиная со второй половины 20-го века. Созданный Либби газоразрядный счетчик совершил настоящую революцию в датировании и оказал огромное влияние на развитие множества наук, главным образом на археологию. Метод радиоуглеродного датирования позволил с большей точностью проводить датировку объектов по сравнению с предыдущими методами (стратиграфия и др.), а также сравнивать и синхронизировать события на больших временных расстояниях.

Созданному Либби счетчику, в который измеряемый углерод помещался в виде твердого образца (сажи), быстро пришел на смену газонаполняемый счетчик. Это обусловлено недостатками первого: низкой эффективностью регистрации, трудоемким процессом подготовки проб, а также вероятностью загрязнения образца радиоактивными веществами, находящимися в воздухе.

Улучшить чувствительность измерений помогли газовые пропорциональные счетчики, в которые образец помещался в виде газа (чаще всего CO_2). Однако, помимо проблемы подготовки проб — пе-

ревода измеряемого образца в газообразное состояние, добавилась проблема выбора материалов детектора, которые не должны содержать радиоактивных веществ.

В настоящее время наиболее популярными являются метод жидкостного сцинтилляционного счета и метод ускорительной масс-спектрометрии. Первый метод хорошо применим для проб большого объема и проб с высокой активностью. В нашей стране метод жидкостного сцинтилляционного счета представлен достаточно широко и применяется в основном для контроля ^{14}C в выбросах объектов использования атомной энергии [34], а также в окружающей среде [35]. К недостаткам данного метода относятся явления гашения, которые снижают эффективность регистрации. Метод ускорительной масс-спектрометрии является наиболее чувствительным среди всех представленных методов, он напрямую подсчитывает количество атомов ^{14}C в измеряемом образце. Недостатком данного метода является его стоимость. Выполненный анализ ^{14}C в годичных кольцах сосны, выросшей в Академгородке г. Новосибирска, подтвердил ранее опубликованные данные по активности ^{14}C в атмосфере во всем северном полушарии.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Е.Е. Воробьевой за помощь в подготовке проб древесных образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Молодин В.И., Ненахов Д.А., Мильникова Л.Н., Райнхольд С., Пархомчук Е.В., Калинин П.Н., Пархомчук В.В., Растигеев С.А. // Археология, этнография и антропология Евразии. 2019. Т. 47. № 1. С. 15. <https://doi.org/10.17746/1563-0102.2019.47.1.015-022>
2. Молодин В.И., Мильникова Л.Н., Нестерова М.С., Кобелева Л.С., Ненахов Д.А., Пархомчук Е.В., Райнхольд С., Петрожицкий А.В., Пархомчук В.В., Растигеев С.А. // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. 2019. Т. 25. С. 157. <https://doi.org/10.17746/2658-6193.2019.25.157-166>
3. Шнайдер С.В., Пархомчук Е.В. // Радиоуглерод в археологии и палеоэкологии: прошлое, настоящее, будущее. Материалы международной конференции. Санкт-Петербург, 2020. С. 111. <https://doi.org/10.31600/978-5-91867-213-6-111-113>
4. Rudaya N., Krivonogov S., Słowinski M., Cao X., Zhilich S. // Postglacial history of the Steppe Altai: Climate, fire and plant diversity. Quaternary Science Reviews. 2020. V. 249. P. 106616. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106616>
5. Fedotov A.P., Trunova V.A., Stepanova O.G., Vorobyeva S.S., Parkhomchuk E.V., Krapivina S.M., Zheleznyakova T.O., Legkodymov A.A. // Quaternary International, available online 8 June 2021. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.05.026>
6. Васильев С.К., Пархомчук Е.В., Середнев М.А., Милютин К.И., Кузьмин Я.В., Калинин П.Н., Растигеев С.А. // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. 2018. Т. 24. С. 42. <https://doi.org/10.17746/2658-6193.2018.24.042-046>
7. Caglar M., Belzberg A.S., Spruston B., Sexsmith G. // Clin. Nucl. Med. 1999. V. 24. № 9. P. 674. <https://doi.org/10.1097/00003072-199909000-00007>
8. Mattar R., Silva F.M., Alexandrino A.M., Laudanna A.A. // Revista do Instituto de Medicina Tropical de São Paulo. 1999. V. 41. № 1. P. 3. <https://doi.org/10.1590/S0036-46651999000100002>
9. Rasool S., Abid S., Jafri W. // World J. Gastroenterol. 2007. V. 13. № 6. P. 925. <https://doi.org/10.3748/wjg.v13.i6.925>
10. Крышев А.И., Крышев И.И., Васянович М.Е., Екидин А.А., Капустин И.А., Мурашова Е.Л. // Атомная энергия. 2020. Т. 128. № 1. С. 46.
11. Екидин А.А., Жуковский М.В., Васянович М.Е. // Атомная энергия. 2016. Т. 120. № 2. С. 106.
12. Burcham W.E., Goldhaber M. // Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. 1936. V. 32. № 4. P. 632. <https://doi.org/10.1017/S0305004100019356>
13. Audi G., Kondev F.G., Wang M., Huang W.J., Naimi S. // Chinese Physics C. 2017. V. 41. № 3. 030001. <https://doi.org/10.1088/1674-1137/41/3/030001>
14. Kocher D.C. Nuclear decay data for radionuclides occurring in routine releases from nuclear fuel cycle facilities. United States, 1977. <https://doi.org/10.2172/7086358>
15. Management of waste containing tritium and carbon-14. Technical Reports Series № 421. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2004. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS421_web.pdf
16. Haag G.L. // Radioactive Waste Management Handbook. V. 2. Treatment of Gaseous Effluents at Nuclear Facilities. Chur and New York, 1991. P. 269.
17. Magnusson Å. PhD thesis. Lund University, 2007. https://www.kth.se/polopoly_fs/1.469654.1550154389!/C-14%20Produced%20by%20Nuclear%20Power%20Reactors%20E2%80%93%20Generation%20and%20Characterization%20of%20Gaseous.pdf
18. Hou X. // Journal of the Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology. 2018. V. 16. № 1. P. 11. <https://doi.org/10.7733/jnfcwt.2018.16.1.11>
19. Назаров Е.И., Екидин А.А., Васильев А.В. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2018. Т. 61. № 12–2. С. 67.
20. Рублевский В.П., Яценко В.Н., Чанышев Е.Г. Роль углерода-14 в техногенном облучении человека. М.: ИздАТ, 2004.
21. Povinec P., Litherland A., von Reden K. // Radiocarbon. 2009. V. 51. № 1. P. 45. <https://doi.org/10.1017/S0033822200033701>

22. Warner M. Carbon-14 is 75 ± 0 Years Old. National Museum of American History, 2015. <https://american-history.si.edu/blog/carbon-14>
23. de Vries Hl., Barendsen G.W. // *Physica*. 1953. V. 19. № 1–12. P. 987. [https://doi.org/10.1016/S0031-8914\(53\)80110-2](https://doi.org/10.1016/S0031-8914(53)80110-2)
24. Liquid Scintillation Counting. Perkin Elmer. <https://www.perkinelmer.com/lab-products-and-services/application-support-knowledgebase/radiometric/liquid-scintillation-counting.html#Liquidscintillationcounting-Liquidscintillationcountingtheory>
25. Liquid Scintillation counting. Nuclear and Radiochemistry Teaching Material Wiki. https://nucwik.com/From_WikiSpaces/mainSpace/Liquid%20Scintillation%20Counting.html
26. Linick T.W., Damon P.E., Donahue D.J., Jull A.J.T. // *Quaternary International*. 1989. V. 1. P. 1. [https://doi.org/10.1016/1040-6182\(89\)90004-9](https://doi.org/10.1016/1040-6182(89)90004-9)
27. Алиновский Н.И., Гончаров А.Д., Клюев В.Ф., Константинов С.Г., Константинов Е.С., Крючков А.М., Пархомчук В.В., Петриченко М.В., Растигеев С.А., Рева В.Б. // *ЖТФ*. 2009. Т. 79. № 9. P. 110.
28. Пархомчук В.В., Петрожицкий А.В., Растигеев С.А. // Письма в журнал “Физика элементарных частиц и атомного ядра”. 2012. Т. 9. № 4–5. С. 729.
29. Nazarov E.I., Ekidin A.A., Vasiljev A.V., Vasyanovich M.E., Nichiporchuk A.O., Kozhemyakin V.A., Kapustin I.A., Privalov I.A., Parkhomchuk E.V., Rastigeev S.A., Parkhomchuk V.V. // *RAD Conf. Proc.* 2020. V. 4. P. 142. <https://doi.org/10.21175/RadProc.2020.30>
30. Parkhomchuk E., Kalinkin P., Rastigeev S., Parkhomchuk V., Kuleshov D., Lysikov A., Krivonogov S. // 14th International Workshop on Present Earth Surface Processes and Long-term Environmental Changes in East Eurasia. Abstracts. Novosibirsk, 2017. P. 77.
31. Stenström K., Skog G., Georgiadou E., Genberg J., Mellström A. // Division of Nuclear Physics Internal Report LUNFD6. 2011. NFFR-3111. P. 1.
32. Lysikov A.I., Kalinkin P.N., Sashkina K.A., Okunev A.G., Parkhomchuk E.V., Rastigeev S.A., Parkhomchuk V.V., Kuleshov D.V., Vorobyeva E.E., Dralyuk R.I. // *International Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes* up to 1998). 2018. V. 433. P. 11. <https://doi.org/10.1016/j.ijms.2018.08.003>
33. Levin I., Kromer B., Schoch-Fischer H., Bruns M., Münich M., Berdau D., Vogel J.C., Münnich K.O. $\delta^{14}\text{CO}_2$ record from Vermont // In *Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center. Oak Ridge National Laboratory. U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.*, 1994.
34. Vasyanovich M., Vasilyev A., Ekidin A., Kapustin I., Kryshev A. // *Nuclear Engineering and Technology*. 2019. V. 51. № 4. P. 1176. <https://doi.org/10.1016/j.net.2019.02.010>
35. Lebedev S.V., Kulkova M.A., Zarina L.M., Nesterov E.M. // *Proc. and Phenomena on the Boundary Between Biogenic and Abiogenic Nature: Collection of papers presented at VI International Symposium. Saint-Petersburg, 2018. P. 297.* https://doi.org/10.1007/978-3-030-21614-6_17

ПРЕЦИЗИОННЫЙ МАЛОШУМЯЩИЙ ИСТОЧНИК ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

© 2021 г. В. В. Колобов^{а,*}, М. Б. Баранник^{а,**}

^а Центр физико-технических проблем энергетики Севера – филиал Федерального исследовательского центра
“Кольский научный центр РАН”

Россия, 184209, Мурманская обл., Апатиты, ул. Ферсмана, 14

*e-mail: 1_i@mail.ru

**e-mail: maxbarien@mail.ru

Поступила в редакцию 27.04.2021 г.

После доработки 18.05.2021 г.

Принята к публикации 19.05.2021 г.

Описан прецизионный малошумящий источник высокого напряжения с цифровым управлением. В источнике используется двухтактный параллельный резонансный преобразователь напряжения с фиксированной частотой преобразования 110 кГц. Регулировка напряжения источника осуществляется путем изменения выходного напряжения линейного стабилизатора, питающего преобразователь. Предложен алгоритм управления ключами преобразователя, позволяющий реализовать режим питания параллельного контура преобразователя от источника напряжения. Температурная стабильность режима работы преобразователя обеспечивается схемой автоматической подстройки частоты преобразования. Разработана схема активного фильтра подавления пульсаций, особенностью которой является способ введения компенсирующего напряжения – между общей шиной источника и выводом низкого потенциала умножителя напряжения. Такое решение позволило выполнить фильтр на основе одного низковольтного операционного усилителя, одновременно выполняющего функцию усилителя сигнала ошибки основного контура регулирования источника. В результате применения активного фильтра размах амплитуды шумов и пульсаций на выходе источника в частотном диапазоне выше 10 Гц не превышает 3.3 мВ. Размах амплитуды шумов в диапазоне частот 0.1–10 Гц менее 3.5 мВ и определяется $1/f$ -шумом источника опорного напряжения. Разработанный источник высокого напряжения используется в канале питания источника ионов масс-спектрометрического комплекса для изотопного анализа инертных газов и обеспечивает следующие основные характеристики: диапазон регулирования выходного напряжения 0–5500 В с шагом 84 мВ; максимальный ток нагрузки 1 мА; суммарная нестабильность напряжения не более 50 ppm/ч в диапазоне рабочих температур 20–50°C.

DOI: 10.31857/S0032816221050219

Стабилизированные высоковольтные источники питания являются неотъемлемой частью большинства аналитических приборов и комплексов. Временная и температурная нестабильности напряжения источников, точность его установления и повторяемость, уровень шумов и пульсаций в значительной степени определяют достоверность получаемой аналитической информации [1]. Рассматриваемый в статье прецизионный малошумящий источник высокого напряжения входит в состав канала питания источника ионов масс-спектрометрического комплекса для изотопного анализа инертных газов и предназначен для формирования потенциала ионизационной камеры нировского типа [2] относительно коллимирующей линзы (ускоряющего напряжения). Источник обеспечивает выходное напряжение,

регулируемое в диапазоне от 0 до +5.5 кВ, при токе нагрузки до 1 мА.

Так как в статических магнитных масс-спектрометрах нестабильность ускоряющего напряжения по шумам определяет разрешающую способность анализа спектра масс, а временная нестабильность напряжения – точность измерения изотопных соотношений [2], то при разработке схемы источника приоритетной являлась задача обеспечения минимальной нестабильности выходного напряжения по дрейфу и шумам. Кроме того, необходимо было обеспечить низкий уровень излучаемых устройствами электромагнитных помех, так как в состав канала питания источника ионов также входят независимые стабилизированные преобразователи напряжения, формирующие потенциалы электродов ионно-оптической системы и электронной пушки источника ионов.

Существует ряд типовых схемотехнических решений, используемых при проектировании высоковольтных источников питания для аналитических комплексов, направленных на уменьшение уровня пульсаций выходного напряжения и снижение интенсивности помех (здесь и далее при отсутствии уточнений термином “пульсация” будем обозначать любое периодическое или случайное изменение выходного напряжения источника относительно постоянного значения, в том числе шум). К таким решениям можно отнести способ стабилизации и регулирования выходного напряжения источника путем изменения напряжения питания преобразовательного каскада [3], а также использование резонансного режима работы высоковольтного преобразователя напряжения [4]. Высокая эффективность применения резонансных преобразователей в контексте поставленной задачи обусловлена целым рядом преимуществ последних: паразитные элементы высоковольтного трансформатора включаются в состав резонансного контура; обеспечивается мягкий режим коммутации ключей преобразователя напряжения, вследствие чего уменьшаются динамические потери в ключах, что, в свою очередь, позволяет повысить частоту переключения без снижения к.п.д. преобразователя напряжения; высокая частота преобразования (сотни кГц) позволяет повысить эффективность выходного фильтра нижних частот, уменьшить его размеры, равно как и размеры высоковольтного трансформатора. Важным преимуществом резонансных преобразователей является пониженный уровень электромагнитных помех и пульсаций выходного напряжения [4, 5].

Принципиальная схема прецизионного малошумящего источника высокого напряжения (далее – источник) приведена на рис. 1. Можно выделить следующие основные функциональные узлы источника: задающий генератор M_4 , двухтактный (push-pull) преобразователь напряжения на транзисторах $T_{2,1}$ и $T_{2,2}$, повышающий трансформатор Tr , диодно-конденсаторный умножитель напряжения, выходной фильтр нижних частот (элементы R_2 , R_3 , C_9 , C_{10}) и высоковольтный делитель напряжения. Вывод средней точки первичной обмотки трансформатора Tr соединен с выходом регулируемого линейного стабилизатора напряжения (р.с.н.) на основе транзистора T_1 . В состав источника также входят элементы контура регулирования и стабилизации выходного напряжения, цепи токовой защиты и автоматической подстройки частоты задающего генератора.

Магнитопровод трансформатора Tr выполнен из двух E-образных сердечников: В66317G1 (с зазором) и В66317G0 (без зазора) – типоразмера E25/13/7 на основе Mn-Zn ферритового материала N87. Число витков вторичной обмотки $n_2 =$

$= 625$, первичной полуобмотки $n_1 = 5$, коэффициент трансформации $k_{тр} = n_2/n_1 = 125$. Индуктивность намагничивания L_μ первичной обмотки трансформатора составляет 13.16 мкГн.

Преобразователь напряжения источника выполнен по схеме параллельного резонансного преобразователя с питанием резонансного контура напряжением [5]. Эквивалентный параллельный колебательный контур (рис. 2), приведенный к вторичной обмотке трансформатора, образован приведенной индуктивностью намагничивания L_μ'' и суммарной приведенной емкостью вторичной обмотки C_Σ'' , которая включает в себя приведенную емкость C_p'' резонансного конденсатора (C_3 на рис. 1), включенного параллельно первичной обмотке трансформатора, и собственную емкость вторичной обмотки C_2 : $C_\Sigma'' = C_p'' + C_2$ [6]. Приведенные параметры реактивных элементов контура определяются как: $L_\mu'' = L_\mu k_n^2$; $C_p'' = C_3/k_n^2$, где $k_n = n_2/(2n_1) = 62.5$ – отношение числа витков вторичной и первичной обмоток трансформатора.

В качестве резонансного конденсатора C_3 номиналом 0.1 мкФ использован высокочастотный многослойный керамический конденсатор С1206С104F3GЕС с температурным коэффициентом емкости ± 30 ppm/°C на основе диэлектрика NP0.

Емкость вторичной обмотки C_2 , с учетом емкости переходов диодов умножителя напряжения и монтажной емкости, составляет 15.2 пФ. Соответственно: $C_\Sigma'' = C_3/k_n^2 + C_2 = 0.1 \cdot 10^{-6}/62.5^2 + 15.2 \cdot 10^{-12} = 40.8$ пФ; $L_\mu'' = 3.16 \cdot 10^{-6} \cdot 62.5^2 = 51.4$ мГн. Резонансная частота f_p колебательного контура, определяемая выражением $f_p = (2\pi\sqrt{L_\mu'' C_\Sigma''})^{-1}$, составляет 109903 Гц ≈ 110 кГц.

На рис. 3 приведены эпюры напряжений и токов, поясняющие принцип работы резонансного преобразователя напряжения источника. Двухтактный задающий генератор M_4 формирует сигналы управления ключами преобразователя напряжения $U_{зр1}(t)$ и $U_{зр2}(t)$ с амплитудой +5 В. Частота следования импульсов $f_{зр}$ подстраивается резистором R_{16} так, чтобы выполнялось условие: $f_{зр} = f_p$. Последовательности импульсов $U_{зр1}(t)$, $U_{зр2}(t)$ поступают на логические входы драйвера MOSFET (metal-oxide-semiconductor field effect transistor) ключей M_2 , обеспечивающего необходимую амплитуду и скорость нарастания/спада тока управления затворами транзисторов $T_{2,1}$ и $T_{2,2}$.

За время $\Delta t_{он}$ нахождения ключей преобразователя напряжения в открытом состоянии энергия поступает в резонансный контур или отбирается из него. При этом амплитуда гармонического на-

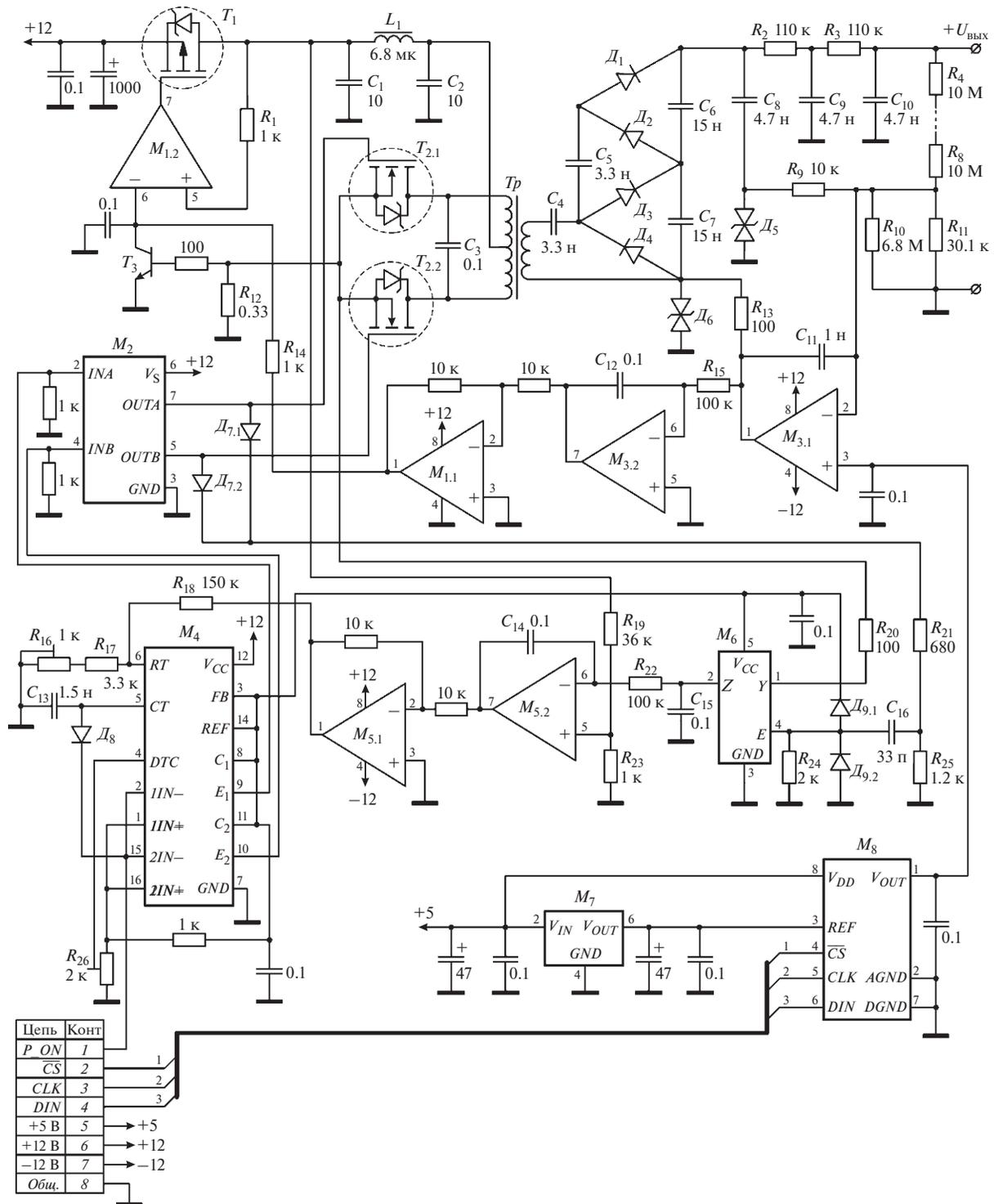


Рис. 1. Принципиальная схема прецизионного малошумящего источника высокого напряжения. M_1, M_3, M_5 – ADA4522-2, M_2 – IR4427, M_4 – TL494, M_6 – 74HC1G66, M_7 – ADR4533B, M_8 – AD5541B; T_1 – STP10P6F6, T_2 – IRF8313, T_3 – BC847; D_1 – D_4 – ВУХ101G, D_5, D_6 – SMBJ11CA, D_7, D_8 – BAV70, D_9 – BAV99; C_3 – C1206C104F3GEC (25 В, 0,1 мкФ, 1%), C_4 – C_7 – K15-5-N70-3000 В, C_8 – C_{10} – K15-5-N20-6300-4700±10%; R_4 – R_8 – CHV2010-FX-1005 (10 МОм, 1%, 0,5 Вт, ±100 ppm/°C).

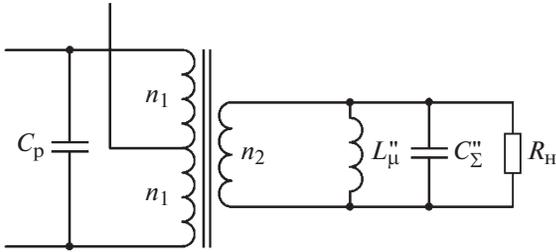


Рис. 2. Приведенная к вторичной обмотке трансформатора эквивалентная схема резонансного контура. C_p – емкость резонансного конденсатора; L_{μ}'' – приведенная индуктивность намагничивания; C_{Σ}'' – приведенная суммарная емкость вторичной обмотки.

пряжения $U_{C_3}(t)$ на резонансном конденсаторе C_3 и первичной обмотке трансформатора выравнивается с уровнем выходного напряжения р.с.н. – $U_{C_3}(t) = U_{рсн}$. Таким способом осуществляется регулирование амплитуды напряжения на вторичной обмотке трансформатора и соответственно выходного постоянного напряжения источника $U_{вых}$.

Длительность Δt_{on} регулируется резистором R_{26} в диапазоне $(0.05-0.15)T_{зг}$, где $T_{зг}$ – период следования импульсов задающего генератора ($T_{зг} = 9$ мкс). Экспериментально определенная оптимальная длительность Δt_{on} составляет ~ 1.3 мкс.

На рис. 4 приведен пример осциллограмм напряжения сток–исток $U_{си}(t)$ и тока стока $I_c(t)$ транзисторов $T_{2,1}$, $T_{2,2}$. Как видно из эюр напряжения на ключах (рис. 3, 4), резонансный преобразователь напряжения источника обеспечивает режим коммутации транзисторов при нулевом напряжении сток–исток.

Умножитель напряжения выполнен по несимметричной схеме учетверения напряжения ($k_{ун} = 4$) с использованием диодов, имеющих “мягкую” характеристику восстановления, которая обеспечивает низкий уровень высокочастотных помех и выбросов напряжения при переключении диодов.

Стабильность коэффициента деления высоковольтного делителя напряжения, входящего в цепь обратной связи контура регулирования, в значительной степени определяет стабильность выходного напряжения источника питания [1]. Верхнее плечо делителя напряжения (R_4-R_8) выполнено из пяти последовательно включенных толстопленочных высоковольтных чип-резисторов СНV2010-FX-1005 фирмы “Kemet” с температурным коэффициентом сопротивления ± 100 ppm/°C, обеспечивающих необходимый запас по рассеиваемой мощности ($P_{рас} = 0.5$ Вт). В нижнем плече делителя напряжения (R_{10} , R_{11}) использованы

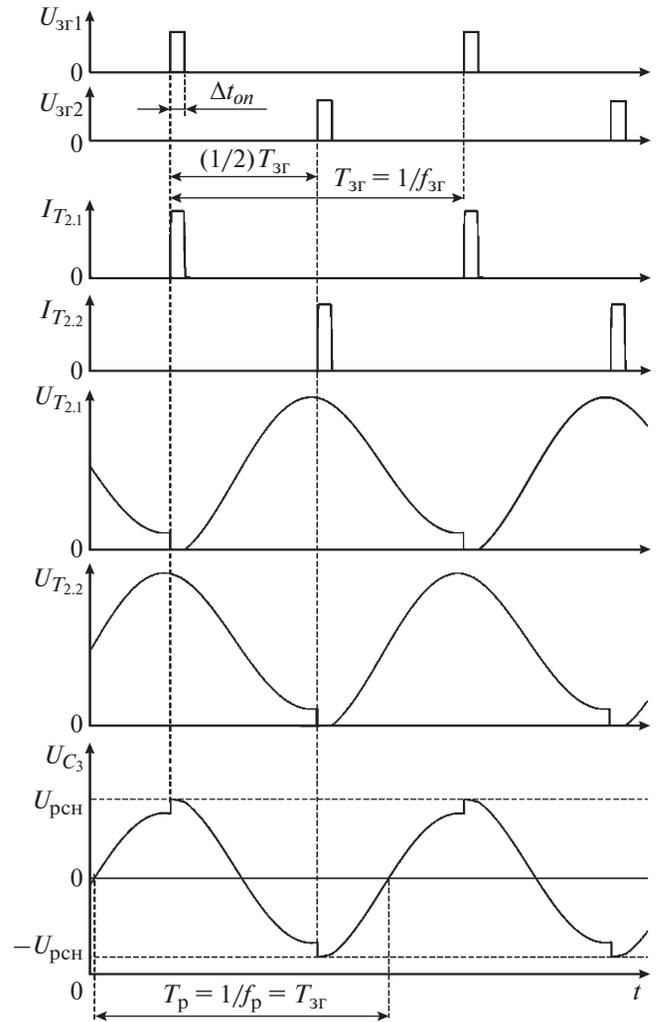


Рис. 3. Эпюры, поясняющие работу резонансного преобразователя напряжения. $U_{зг1}$, $U_{зг2}$ – напряжения на выходах двухтактного задающего генератора; $I_{T_{2,1}}$, $I_{T_{2,2}}$ – токи, протекающие через ключи $T_{2,1}$ и $T_{2,2}$; $U_{T_{2,1}}$, $U_{T_{2,2}}$ – напряжения на ключах; U_{C_3} – напряжение на резонансном конденсаторе; $U_{рсн}$ – амплитуда напряжения на выходе регулируемого стабилизатора напряжения; Δt_{on} – интервал открытого состояния ключей; $f_{зг}$, $T_{зг}$ – частота и период следования импульсов задающего генератора; f_p – собственная частота резонансного контура.

чип-резисторы CR1206-FX того же производителя, но меньшего типоразмера, имеющие аналогичный температурный коэффициент сопротивления.

Амплитуда выходного напряжения источника в режиме холостого хода при разомкнутой петле обратной связи и без учета потерь определяется выражением $U_{вых} = k_{тр} k_{ун} U_{рсн}$. Для стабилизированного выходного напряжения источника можно записать:

$$U_{\text{вых}} = k_{\text{пр}} U_{\text{р.с.н.}}, \quad (1)$$

где $k_{\text{пр}} \approx 458.3$ – эквивалентный коэффициент преобразования. Диапазон 0–12 В регулирования напряжения $U_{\text{р.с.н.}}$ обеспечивает рабочий диапазон выходного напряжения источника 0–5.5 кВ.

Регулируемый стабилизатор напряжения выполнен по схеме линейного стабилизатора с малым падением напряжения (LDO – Low Dropout). В качестве регулирующего элемента T_1 используется p -канальный Power MOSFET-транзистор STP10P6F6 со сверхмалым сопротивлением в открытом состоянии (~ 0.13 Ом), за счет чего разница между максимальным выходным напряжением р.с.н. и питающим напряжением +12 В при максимальной выходной мощности источника не превышает 50 мВ. Транзистор также обладает сверхмалым “открывающим” зарядом затвора, что исключает необходимость применения буферного каскада на выходе усилителя ошибки $M_{1,2}$.

Уровень выходного напряжения р.с.н. определяется опорным напряжением $U_{\text{оп}}$ $M_{1,2}$ ($U_{\text{р.с.н.}} = U_{\text{оп}}$). Особенностью стабилизатора на p -канальном транзисторе является использование инвертирующего входа $M_{1,2}$ в качестве входа опорного напряжения [7]. Фильтр нижних частот $C_1-L_1-C_2$ предотвращает влияние коммутационных шумов преобразователя напряжения на устойчивость и точность работы контура обратной связи.

Суммарная нестабильность выходного напряжения р.с.н. не зависит от стабильности питающего напряжения и определяется характеристиками $M_{1,2}$ и нестабильностью по дрейфу и шумам опорного напряжения $U_{\text{оп}}$. Соответственно р.с.н. обеспечивает стабильность выходного напряжения источника по входу как по дрейфу, так и по шумам питающего напряжения [1, 8]. Выполненный по схеме LDO-стабилизатора р.с.н. также позволяет использовать одно питающее напряжение +12 В как для силовой части источника, так и для цепей управления и контроля (см. рис. 1).

Контур стабилизации выходного напряжения выполнен по топологии, реализующей пропорционально-интегральный закон регулирования [9]. $M_{3,1}$ сравнивает напряжение обратной связи, снимаемое с нижнего плеча делителя напряжения, с выходным напряжением управляемого источника опорного напряжения (у.и.о.н.). Напряжение рассогласования с выхода усилителя ошибки подается на неинвертирующий интегратор, выполненный на операционных усилителях $M_{3,2}$, $M_{1,1}$. Выходное напряжение интегратора является опорным для усилителя ошибки р.с.н.

В состав у.и.о.н. входят цифроаналоговый преобразователь (ц.а.п.) M_8 и источник опорного напряжения M_7 с выходным напряжением +3.3 В. На основе двоичного кода, поступающего на вход

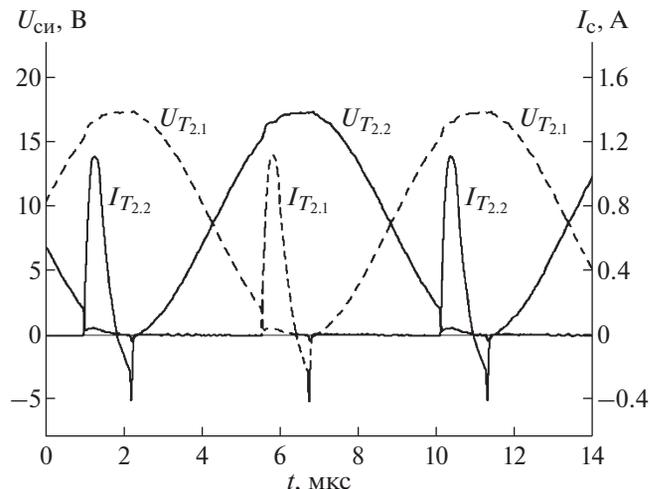


Рис. 4. Пример экспериментальных временных зависимостей напряжения сток–исток $U_{\text{си}}(t)$ и тока стока $I_c(t)$ MOSFET-транзисторов $T_{2,1}$, $T_{2,2}$ резонансного преобразователя напряжения.

ц.а.п. по шине данных от управляющего микроконтроллера канала питания источника ионов, у.и.о.н. формирует высокостабильное выходное напряжение $U_{\text{ион}}$. Диапазон 0–3.3 В изменения напряжения $U_{\text{ион}}$ обеспечивает регулирование выходного напряжения р.с.н. от 0 до 12 В.

В соответствии с выражением (1) стабильность напряжения $U_{\text{р.с.н.}}$ напрямую влияет на стабильность выходного напряжения источника и определяет такие его параметры, как точность и повторяемость, временная и температурная нестабильности. Кроме того, уровень фликкер-шума ($1/f$ -шума) на выходе р.с.н., приведенный к выходу источника через коэффициент $k_{\text{пр}}$, определяет уровень пульсаций высокого напряжения в частотном диапазоне 0.1–10 Гц.

Основными причинами нестабильности выходного напряжения р.с.н. являются:

- нестабильность напряжения смещения, $1/f$ -шум и температурная нестабильность операционных усилителей контура регулирования выходного напряжения источника (M_1 , M_3);
- краткосрочная и долговременная нестабильности, смещение и температурный дрейф выходного напряжения у.и.о.н., уровень $1/f$ -шума на его выходе.

Учитывая вышеизложенное, оптимальным решением является применение в цепях управления интегральных усилителей, выполненных по топологии модулятор–демодулятор. В качестве M_1-M_3 использованы микросхемы ADA4522-2 двояных усилителей типа модулятор–демодулятор со встроенными цепями автоматической коррекции смещения и подавления высокоча-

стотных пульсаций [10]. Операционные усилители микросхемы имеют сверхмалое напряжение смещения (типичное значение 1 мкВ) с температурным дрейфом 4 нВ/°С и малый (менее 50 пА) ток смещения (все параметры приведены для напряжения питания ± 12 В). Кроме того, плоская частотная зависимость спектральной плотности напряжения шумов, характерная для усилителей типа модулятор–демодулятор, обеспечивает малый уровень $1/f$ -шума – размах амплитуды напряжения шумов в диапазоне 0.1–10 Гц на выходе не превышает 0.12 мкВ.

Управляемый источник опорного напряжения выполнен на основе прецизионного 16-разрядного ц.а.п. AD5541В с частично сегментированной $R-2R$ резистивной матрицей [11] и высокостабильного интегрального источника опорного напряжения ADR4533В [12]. Нагрузочная способность M_7 исключает необходимость применения буферного усилителя, а согласование выходного сопротивления (6.3 кОм) резистивной матрицы ц.а.п. M_8 обеспечивается за счет высокого входного сопротивления по синфазному сигналу прямого входа $M_{3.1}$.

Основываясь на результатах анализа составляющих суммарной нестабильности напряжения $U_{\text{ион}}$ [13], можно выделить параметры у.и.о.н., оказывающие определяющее влияние на точность и стабильность выходного напряжения источника. К таким параметрам относятся точность установления напряжения, температурный дрейф и уровень $1/f$ -шума.

Точность установления выходного напряжения у.и.о.н. определяется абсолютной разрешающей способностью ц.а.п. и суммарной нескорректированной ошибкой напряжения у.и.о.н. Шаг квантования выходного напряжения ц.а.п. M_8 (младший значащий бит (м.з.б.)) составляет 50.2 мкВ. Суммарная ошибка смещения, определяемая начальной точностью микросхемы M_7 (± 650 мкВ) и ошибкой смещения нуля ц.а.п. (± 35 мкВ), устраняется за счет калибровки источника перед эксплуатацией [14]. В результате суммарная нескорректированная ошибка у.и.о.н. составляет ± 0.65 м.з.б. (~ 10 ppm от полного диапазона $U_{\text{ион}}$) и определяется интегральной нелинейностью ц.а.п. (± 0.5 м.з.б.) и нестабильностью напряжения M_7 по нагрузке (± 0.4 м.з.б.) (сопротивление инверсной $R-2R$ матрицы по входу опорного напряжения зависит от входного кода ц.а.п. [11]). Фликкер-шум на выходе ц.а.п. M_8 имеет максимальную амплитуду на краях диапазона выходного напряжения и определяется суммой фликкерных шумов M_7 и резистивной матрицы ц.а.п. Размах напряжения $1/f$ -шума на выходе у.и.о.н. составляет 2.1 мкВ (~ 0.04 м.з.б.) и преимущественно определяется фликкер-шумом M_7

(уровень шума $R-2R$ матрицы ц.а.п. AD5541В в частотном диапазоне 0.1–10 Гц не превышает 0.13 мкВ от пика до пика).

Доминирующей составляющей суммарной нестабильности выходного напряжения у.и.о.н. является температурный дрейф, значение которого определяется температурным коэффициентом напряжения M_7 , равным 2 ppm/°С (температурный коэффициент напряжения ц.а.п. M_8 не превышает 0.05 ppm/°С). В достаточно узком рабочем температурном диапазоне, от +20 до +50°С, определяемом спецификой применения источника, температурный дрейф выходного напряжения у.и.о.н. составляет ± 200 мкВ (± 60 ppm от полного диапазона).

Проведенный анализ составляющих суммарной нестабильности выходного напряжения р.с.н. показывает, что применение усилителей типа модулятор–демодулятор позволяет минимизировать влияние активных элементов контура регулирования на стабильность напряжения $U_{\text{рси}}$ и, соответственно, $U_{\text{вых}}$. При этом:

- краткосрочная и долговременная нестабильности, начальная точность и повторяемость выходного напряжения источника определяются параметрами M_7 ;
- температурный коэффициент выходного напряжения источника определяется температурной нестабильностью делителя напряжения и температурным коэффициентом напряжения M_7 ;
- так как р.с.н. компенсационного типа обеспечивает подавление шумов питающего напряжения в полосе фликкер-шума, то пульсации выходного напряжения источника в полосе частот 0.1–10 Гц определяются только $1/f$ -шумом M_7 .

Для подавления пульсаций выходного напряжения источника в частотном диапазоне выше 10 Гц используется дополнительный быстродействующий контур регулирования, выполняющий функцию активного компенсационного фильтра пульсаций [15]. В состав контура входят следующие элементы схемы: делитель напряжения; RC -цепочка C_8, R_9 ; усилитель ошибки $M_{3.1}$; резистор R_{13} ; умножитель напряжения.

Согласно рис. 1, вывод низкого потенциала умножителя напряжения не имеет прямой связи с общей шиной источника. Выходной ток умножителя протекает по цепи “высоковольтный вывод умножителя–фильтр нижних частот–нагрузка–общая шина–гальванически связанные с общей шиной цепи питания выходного каскада $M_{3.1}$ –выход $M_{3.1}-R_{13}$ –вывод низкого потенциала умножителя напряжения”. Управляющим воздействием контура регулирования является компенсирующее напряжение $U_k(t)$ между выводом низкого потенциала умножителя напряжения и общей шиной.

$M_{3.1}$ сравнивает напряжение обратной связи U_{oc} , поступающее на измерительный вход с выхода умножителя напряжения через RC -цепочку C_8 , R_9 , с опорным напряжением $U_{уион}$ и формирует на выводе низкого потенциала умножителя напряжение $U_k(t)$, обеспечивающее сохранение равенства $U_{oc} = U_{уион}$. В частности, если на выходе умножителя напряжения возникнет импульсная помеха положительной полярности (см. рис. 5), то $M_{3.1}$ сформирует на выводе низкого потенциала умножителя компенсирующий импульс идентичной формы и амплитуды, имеющий отрицательную полярность относительно общей шины.

Максимальная амплитуда напряжения $U_k(t)$ ограничена уровнем $-12 \leq U_k \leq +12$ В питающих напряжений усилителя типа модулятор–демодулятор $M_{3.1}$, имеющего “rail-to-rail” выход. Так как на измерительный вход $M_{3.1}$ также подается напряжение обратной связи с выхода делителя напряжения, то рассмотренная схема позволяет компенсировать динамические изменения выходного напряжения источника, лежащие в указанных пределах. Таким образом, применение активного фильтра пульсаций также улучшает динамическую стабильность источника, ограниченную быстродействием основного контура регулирования.

Симметричные супрессоры D_5 , D_6 с напряжением пробоя ~ 12.3 В обеспечивают защиту выхода и измерительного входа усилителя ошибки $M_{3.1}$ от перенапряжений.

Выходное напряжение $M_{3.1}$ содержит суммарный сигнал рассогласования двух контуров регулирования: основного инерционного и быстродействующего компенсирующего. Выделение управляющего воздействия основного контура – опорного напряжения усилителя ошибки $M_{1.1}$ р.с.н. – осуществляется благодаря передаточной функции интегратора ($M_{3.2}$, $M_{1.1}$).

Эффективность применения рассмотренного активного фильтра для подавления пульсаций, широкополосного шума и импульсных помех иллюстрируют осциллограммы, приведенные на рис. 5. Размах пульсаций постоянного выходного напряжения источника, измеренный в частотном диапазоне от 100 Гц до 1 МГц при максимальной выходной мощности, не повышает 3.3 мВ.

Температурная нестабильность параметров элементов колебательного контура, в частности емкости резонансного конденсатора и магнитного сопротивления сердечника трансформатора, а также ряд других факторов приводят к нестабильности собственной резонансной частоты контура при работе источника. Используемый в схеме задающий генератор M_4 (будет рассмотрен ниже) также не является высокостабильным. Для компенсации расстройки (разности) между частотами $f_{зг}$ и f_p разработана схема автоматиче-

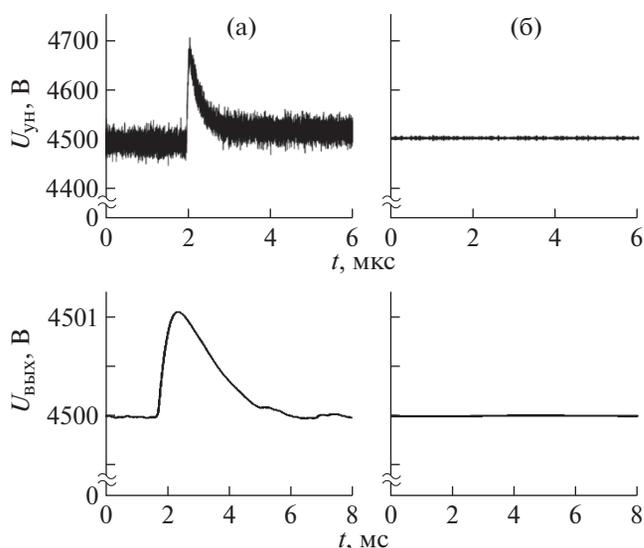


Рис. 5. Сравнительные экспериментальные временные зависимости выходного напряжения $U_{ВЫХ}(t)$ источника высокого напряжения и умножителя напряжения $U_{УН}(t)$, полученные при отключенном (а) и действующем (б) активном фильтре пульсаций.

ской подстройки частоты (а.п.ч.) задающего генератора. Основными функциональными узлами схемы а.п.ч. являются детектор частотного рассогласования, выходной сигнал которого пропорционален разности $f_{зг}$ и f_p , и интегрирующий усилитель ошибки, формирующий управляющее воздействие на задающий генератор. В детекторе используется оригинальный алгоритм, основанный на анализе формы фронтов импульсов тока через ключи резонансного преобразователя напряжения. На выходе первичного датчика тока (резистивный шунт R_{12} на рис. 1) формируется последовательность импульсов напряжения $U_{R_{12}}(t)$ с частотой следования $2f_{зг} \approx 220$ кГц, повторяющих по форме импульсы тока истока транзисторов $T_{2.1}$ и $T_{2.2}$. Как видно из рис. 6, форма импульсов $U_{R_{12}}(t)$, в частности длительность их фронта, зависит от соотношения частот $f_{зг}$ и f_p . Детектор частотного рассогласования формирует постоянное напряжение $U_{изм}$, пропорциональное амплитудному значению тока через транзисторы преобразователя напряжения в пределах короткого измерительного интервала $\Delta t_{изм} = 70$ нс (на рис. 6 для упрощения восприятия длительность $\Delta t_{изм}$ увеличена относительно длительности открытого состояния ключей $\Delta t_{от} \approx 1.3$ мкс).

Для выделения из импульсной последовательности $U_{R_{12}}(t)$ коротких импульсов длительностью $\Delta t_{изм}$ (на рис. 6 выделены заливкой) используется аналоговый коммутатор M_6 . Импульсы управления коммутатором формируются следующим об-

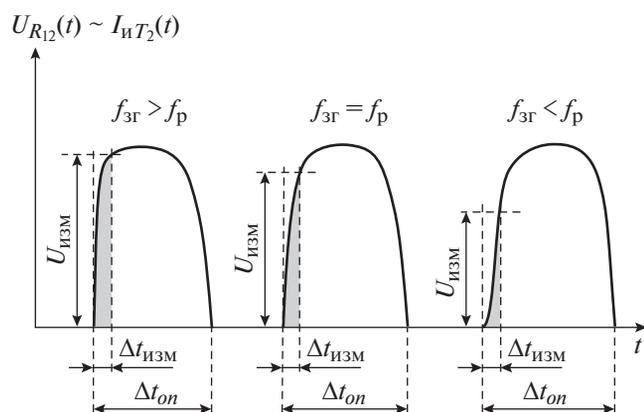


Рис. 6. Упрощенные временные диаграммы напряжения на токовом шунте R_{12} при различном соотношении частоты задающего генератора $f_{3г}$ и собственной частоты резонансного контура f_p , поясняющие работу детектора расстройки частот. $U_{изм}$ – максимальная амплитуда напряжения $U_{R_{12}}(t)$ на измерительном интервале $\Delta t_{изм}$; $\Delta t_{он}$ – интервал открытого состояния ключей.

разом. Выводные импульсы драйвера управления затворами MOSFET-транзисторов M_2 “суммируются” диодами $D_{7,1}$ и $D_{7,2}$. На резисторе R_{25} формируется импульсная последовательность с частотой следования ~ 220 кГц и амплитудой $\sim +5.6$ В, определяемой коэффициентом деления резистивного делителя напряжения: R_{21}, R_{24}, R_{25} . Диоды D_9, D_{10} выделяют из импульсной последовательности, продифференцированной цепочкой $C_{16}-R_{24}$, импульсы положительной полярности, фронты которых совпадают по времени с фронтами импульсов управления ключами преобразователя напряжения, и ограничивают их амплитуду уровнем $+5$ В внутреннего источника опорного напряжения микросхемы M_4 . В результате на управляющем входе аналогового коммутатора M_6 формируется последовательность ограниченных по амплитуде экспоненциальных импульсов напряжения с коротким фронтом и длительностью до полуспада ~ 70 нс (определяется номиналами элементов C_{16}, R_{24}). Для микросхемы одноканального аналогового ключа 74НС1G66 при напряжении питания $+5$ В (ключ M_6 питается от внутреннего источника опорного напряжения микросхемы M_4) напряжение высокого уровня по управляющему входу составляет $2.5-5$ В [16]. Соответственно форма импульсов напряжения на управляющем входе обеспечивает гарантированное открытие аналогового ключа M_6 на время интервала измерения $\Delta t_{изм}$.

Последним каскадом детектора частотного рассогласования является амплитудный детектор

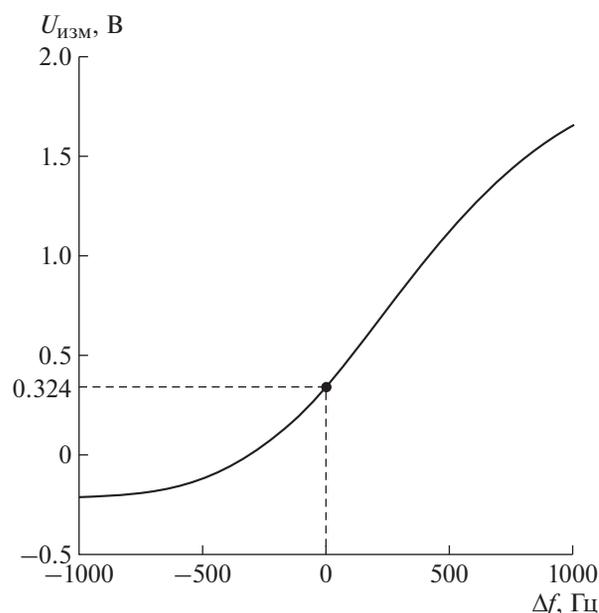


Рис. 7. Пример экспериментальной зависимости напряжения $U_{изм}(\Delta f)$ на выходе детектора расстройки частот схемы автоподстройки частоты задающего генератора от значения абсолютной расстройки $\Delta f = f_{3г} - f_p$, где $f_{3г}$ и f_p – частота задающего генератора и собственная частота резонансного контура соответственно; график получен при максимальном выходном напряжении регулируемого стабилизатора напряжения $U_{рст} = +12$ В.

(C_{15}, R_{22}), выходное напряжение $U_{изм}$ которого подается на измерительный вход интегрирующего усилителя ошибки ($M_{5,2}$ и $M_{5,1}$). На рис. 7 приведен пример экспериментально полученной зависимости $U_{изм}(\Delta f)$ выходного напряжения детектора от абсолютной расстройки частот Δf резонансного преобразователя напряжения, где $\Delta f = f_{3г} - f_p$.

Так как напряжение $U_{изм}$ зависит также от выходного напряжения р.с.н.: $U_{изм}(\Delta f, U_{рст})$, то для формирования опорного напряжения $U_{оп}$ интегрирующего усилителя ошибки схемы а.п.ч. используется делитель напряжения R_{19}, R_{23} , включенный параллельно выходу р.с.н. Коэффициент деления был определен экспериментально, путем измерения значения напряжения $U_{изм}(\Delta f, U_{рст})$ при $\Delta f = 0$ и изменении напряжения $U_{рст}$ в пределах рабочего диапазона.

В качестве задающего генератора M_4 использована микросхема TL494 многофункционального контроллера для импульсных преобразователей с широтно-импульсным регулированием выходного напряжения. Спецификация микросхемы не предусматривает регулировку частоты $f_{3г}$ внешним сигналом управления, но внутренняя структура частото задающего каскада [17] позволяет реализовать такую возможность. В состав каскада

входит токовое зеркало Уилсона [8], выходной ток которого $I_{зар}$, заряжающий конденсатор C_{13} , определяется управляющим током: $I_{зар} = I_{упр}$. Ток $I_{упр}$ протекает под воздействием напряжения +5 В внутреннего источника микросхемы через канал коллектор–эмиттер управляющего транзистора токового зеркала и последовательно соединенные резисторы R_{16} и R_{17} . При достижении линейно нарастающим напряжением на конденсаторе C_{13} значения 3 В срабатывает пороговая схема быстрого разряда конденсатора, и цикл заряда повторяется. Период пилообразного напряжения на емкости C_{13} составляет $T = 3C_{13}/I_{упр}$, а частота следования импульсов на выводах 9, 10 микросхемы M_4 в двухтактном режиме $-f_{зг} = I_{упр}/(6C_{13})$ [17].

В рассматриваемой схеме источника выход интегрирующего усилителя ошибки схемы а.п.ч. соединен с выводом 6 M_4 через резистор R_{18} . При этом значение тока $I_{упр}$ определяется разностью двух токов: один – через резисторы R_{16} , R_{17} , другой – через резистор R_{18} , т.е. $I_{упр} = I_{R_{16}+R_{17}} - I_{R_{18}}$. Ток $I_{R_{16}+R_{17}}$ определяется как: $I_{R_{16}+R_{17}} = 3.6/(R_{16}+R_{17})$, где 3.6 В – напряжение на выводе 6 микросхемы M_4 (разность между напряжением внутреннего источника опорного напряжения и падением напряжения на эмиттерных переходах выходных транзисторов токового зеркала). Ток $I_{R_{18}}$ можно выразить через выходное напряжение интегрирующего усилителя ошибки: $I_{R_{18}} = (U_{иyo} - 3.6)/R_{18}$. Тогда для частоты задающего генератора можно записать:

$$f_{зг} = \frac{1}{6C_{13}} \left(\frac{3.6}{R_{16} + R_{17}} + \frac{3.6}{R_{18}} - \frac{U_{иyo}}{6R_{18}} \right). \quad (2)$$

Так как $U_{иyo} \sim \Delta f$, то рассмотренный способ управления частотой задающего генератора M_4 внешним напряжением $U_{иyo}$ позволяет замкнуть контур регулирования схемы а.п.ч.

Резистором R_{16} частота задающего генератора настраивается в резонанс с собственной частотой контура преобразователя напряжения. При отсутствии расстройки частот $f_{зг}$ и f_p напряжение $U_{иyo} = 0$, а частота $f_{зг}$, в соответствии с (2), определяется только элементами R_{16} , R_{17} , R_{18} и C_{13} : $f_{зг} = (0.6/C_{13})(1/(R_{16}+R_{17})+1/R_{18}) \approx 110$ кГц.

При возникновении положительной расстройки частот, $f_{зг} > f_p$, $\Delta f > 0$, напряжение рассогласования на выходе будет иметь положительную полярность ($U_{иyo} > 0$), что, в соответствии с (2), приведет к уменьшению частоты задающего генератора M_4 до значения, при котором равенство частот $f_{зг}$ и f_p будет восстановлено. Аналогично, при возникновении отрицательной расстройки частот ($f_{зг} < f_p$, $\Delta f < 0$, $U_{иyo} < 0$) схема а.п.ч. повысит частоту задающего генератора.

Токовый шунт R_{12} также используется как датчик тока схемы защиты источника от перегрузок и токов короткого замыкания, которая работает по принципу ограничения на время перегрузки напряжения питания преобразователя напряжения. Транзистор T_3 шунтирует вход опорного напряжения $M_{1,2}$, тем самым уменьшая выходное напряжение р.с.н. При возникновении долговременного короткого замыкания, вызванного неисправностью нагрузки или высоковольтной части устройства, падение напряжения на шунте R_{12} стабилизируется на уровне, при котором ток, протекающий через ключи $T_{2,1}$ и $T_{2,2}$, не приводит к выходу их из строя.

Низкий уровень помех резонансного преобразователя напряжения позволил отказаться от экранирования печатной платы источника, размещенной в одном корпусе с платами автономных преобразователей напряжения, предназначенных для формирования потенциалов электродов ионно-оптической системы и электронной пушки источника ионов.

Прецизионный малошумящий источник высокого напряжения имеет следующие основные характеристики: диапазон регулирования выходного напряжения $U_{вых}$ от 0 до 5500 В с шагом 84 мВ; максимальный ток нагрузки 1 мА; погрешность установления выходного напряжения ± 20 ppm от полного диапазона $U_{вых}$; размах шумов и пульсаций (при $U_{вых} = 5500$ В и $I_n = 1$ мА) в частотном диапазоне 0.1–10 Гц не более 3.5 мВ, в частотном диапазоне выше 10 Гц – не более 3.3 мВ; дрейф выходного напряжения (после 30 мин прогрева) не более 50 ppm/ч; температурный коэффициент напряжения (в диапазоне температур 20–50°C) – 50 ppm/°C. По техническим характеристикам разработанный источник высокого напряжения не уступает промышленно выпускаемым высоковольтным модулям для аналитических установок с аналогичным выходным напряжением и мощностью, позиционируемым как прецизионные источники с малым уровнем пульсаций, например [18]. Также разработанный источник обеспечивает требования к относительной стабильности ускоряющего напряжения статических масс-спектрометров для проведения прецизионных измерений изотопного состава: дрейф напряжения 50–100 ppm/ч; размах пульсаций не более 1–2 ppm [2].

Теоретически температурная нестабильность выходного напряжения источника может быть уменьшена за счет использования специализированного высоковольтного делителя с очень малым температурным коэффициентом и применения термостатированного или термокомпенсированного источника опорного напряжения. Однако на практике такое решение приведет к значительному удорожанию устройства.

Разработанный источник на протяжении года эксплуатировался в составе канала питания источника ионов масс-спектрометрического комплекса для определения изотопного состава инертных газов. Как показал ряд проведенных экспериментов, в частности, по изучению изотопного состава грунтовых и глубокозалегающих межпластовых вод [19], полученная стабильность ускоряющего напряжения ионного источника позволила повысить точность и сходимости результатов, получаемых при длительных измерениях изотопных отношений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ЦЭС КНЦ РАН (№ 0226-2019-0067 “Исследование научно-технических проблем обеспечения надежного и эффективного энергоснабжения потребителей Арктической зоны РФ”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Скэйпелатти К.* Высоковольтные источники питания для аналитической аппаратуры: Справочное руководство по высоковольтному оборудованию. Spellman High Voltage Electronics Corp. 2018. Ред. 6. С. 54–58.
2. *Сысоев А.А., Артаев В.Б., Кащеев В.В.* Изотопная масс-спектрометрия. М.: Энергоатомиздат, 1993.
3. *Рахманов В.В., Бакакин Г.В., Главный В.Г., Меледин В.Г., Наумов И.В.* // ПТЭ. 2006. № 5. С. 90.
4. *Трубицын А.А., Грачев Е.Ю., Морозов Д.А., Полонский Б.А., Серебряков А.Е.* // ПТЭ. 2019. № 5. С. 52. <https://doi.org/10.1134/s003281621904030x>
5. *Forouzesh M., Siwakoti Y.P., Gorji S.A., Blaabjerg F., Lehman B.* // IEEE Transactions on Power Electronics. 2017. V. 32. № 12. P. 9143. <https://doi.org/10.1109/tpel.2017.2652318>
6. *Peretz M.M., Ben-Yaakov S.* // 23rd IEEE Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel. 2004. P. 52. <https://doi.org/10.1109/eeei.2004.1361086>
7. *Кузьминов А.* // Современная электроника. 2012. № 7. С. 28.
8. *Linden T. Harrison.* Current Sources and Voltage References. Amsterdam, NY.: Elsevier-Newnes, 2005. <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-7752-3.x5023-0>
9. *Christophe P. Basso.* Designing Control Loops for Linear and Switching Power Supplies. Norwood: Artech House, 2012.
10. ADA4522-2 Data sheet. https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADA4522-1_4522-2_4522-4.pdf
11. AD5541/AD5542 Data sheet. https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5541_5542.pdf
12. ADR4533 Data sheet. https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adr4520_4525_4530_4533_4540_4550.pdf
13. *Fry D.* Calculating the Error Budget in Precision Digital-to-Analog Converter (DAC) Applications. MAXIM Application Note 4300. 2008. <https://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/AN4300.pdf>
14. *Eielsen A.A., Fleming A.J.* // Rev. Sci. Instrum. 2017. V. 88. № 9. P. 094702. <https://doi.org/10.1063/1.5000974>
15. *Nasiri A.* // Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. (6–7 Sept. 2005. Chicago) 2005. P. 168. <https://doi.org/10.1109/vppc.2005.1554551>
16. 74HC1G66; 74HCT1G66 Single-Pole Single-Throw Analog Switch. Nexperia Data Sheet. 2008. https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/74HC_HCT1G66.pdf
17. Designing Switching Voltage Regulators with the TL494. Texas Instruments Application Report. Sept. 2011. <https://www.ti.com/lit/an/slva001e/slva001e.pdf>
18. Matsusada Precision. Ultra-low ripple HV Power Supply. VPS Series. https://www.matsusada.com/product/uploads/vps_datasheet_r7en.pdf
19. *Gannibal M.A., Kolobov V.V., Barry P.H., Tyne R.L., Tarakanov S.V., Tolstikhin I.N.* // Chemical Geology. 2020. V. 533. P. 119442. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.119442>

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ КОММУТАТОРОВ НА ОСНОВЕ ТРАНЗИСТОРОВ В ПОЛУМОСТОВОЙ СХЕМЕ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ С ВЫСОКОЙ СКОРОСТЬЮ НАРАСТАНИЯ

© 2021 г. Я. Е. Жарков^а, И. Е. Ребров^{а, *}, В. Ю. Хомич^а, В. А. Ямщиков^а

^а Институт электрофизики и электроэнергетики РАН
Россия, 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18

*e-mail: rbrv.igor@gmail.com

Поступила в редакцию 07.06.2021 г.

После доработки 13.07.2021 г.

Принята к публикации 15.07.2021 г.

Описан драйвер цепи управления твердотельного высоковольтного коммутатора, используемого в полумостовых схемах высоковольтных импульсных генераторов. Разработанный драйвер позволяет существенно уменьшить негативное влияние емкостных связей, таких как емкость Миллера и паразитные емкости высоковольтного коммутатора на землю. Минимизация влияния этих факторов позволила обеспечить характерные времена фронтов импульсов напряжений, создаваемых генератором, равными нескольким десяткам наносекунд.

DOI: 10.31857/S0032816221060239

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время импульсные высоковольтные генераторы с напряжением в десятки киловольт, токами в сотни ампер и мгновенными мощностями в несколько мегаватт находят широкое применение в различных областях электрофизики и, в частности, используются как источники питания для актуаторов с диэлектрическим барьерным разрядом [1–4], входят в состав установок с импульсным коронным разрядом [5, 6], используемых для очистки газовых сред [7, 8], применяются в составе систем электроформования волокнистых материалов [9, 10]. Одним из наиболее важных параметров работы такого рода генераторов является крутизна фронта нарастания сигнала и его длительность. От этих параметров зависит эффективность накачки систем газоразрядных лазеров [11], количество лекарственного препарата, доставляемого путем электропорации через клеточные мембраны [12], степень однородности плазмы атмосферного барьерного разряда [13].

Описанные выше области применения импульсных генераторов связаны с их работой на нагрузку с емкостным характером. Поэтому, для получения крутых фронтов напряжений они должны обладать высокими предельными крутизнами рабочих токов, необходимыми для быстрого приращения заряда нагрузки.

Среди высоковольтных импульсных генераторов широкое распространение получили устройства, выполненные на базе последовательного соединения дискретных транзисторов – высоковольтных ключей (в.в.к.). Применение твердотельных сборок обосновывается тем, что их состояние является полностью управляемым, а проводимость зависит от сигнала цепи управления (напряжения на затворе). Последовательное соединение множества транзисторов позволяет увеличить коммутируемые напряжения пропорционально числу компонентов при сохранении времени коммутации единичного прибора [14]. Несмотря на полную управляемость и высокое быстродействие, недостатком таких сборок является влияние их внутренних параметров (емкости Миллера, индуктивностей контактов) на общее быстродействие генератора, что выражается в задержках включения, сквозными токами, увеличении фронтов генерируемых импульсов, а также сложностью процесса синхронного открытия [15]. Поэтому совершенствование систем управления в.в.к. и создание генераторов на их основе, обеспечивающих фронты высоковольтных импульсов в десятки наносекунд, является актуальной на сегодняшний день задачей.

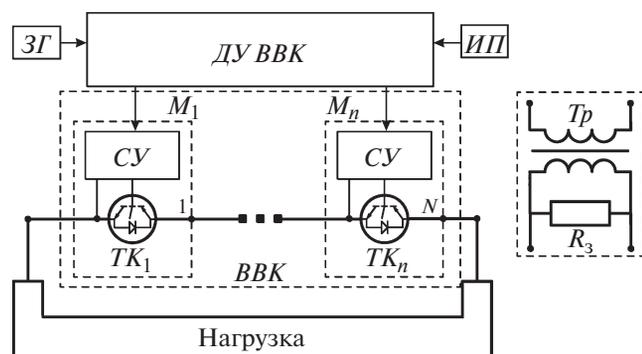


Рис. 1. Структурная схема высоковольтного ключа *ВВК*. *ЗГ* – задающий генератор, *М* – модуль, *СУ* – схема управления, *ИП* – источник питания, *ДУ* – драйвер управления.

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КОММУТАТОРОВ НА ОСНОВЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Принцип работы составного в.в.к. схож с работой единичного транзистора, рассчитанного на высокое напряжение, и может быть проиллюстрировано схемой, приведенной на рис. 1. В.в.к. состоит из составных модулей M_1 – M_n , каждый из которых содержит транзистор соответственно TK_1 – TK_n (полевой или биполярный транзистор с изолированным затвором с блокируемым напряжением 600–1200 В) и схему его управления (*СУ*), включающую сопротивление затвора R_3 и высоковольтный одновитковый трансформатор Tr . Также в состав высоковольтного коммутатора входит драйвер управления (*ДУ*) в.в.к., задающий генератор (*ЗГ*) и источник питания (*ИП*). Совместная работа *ДУ* и *СУ* обеспечивает открытие каждого дискретного элемента в ключе, а трансформатор Tr в составе *СУ* служит в качестве гальванической развязки их контуров.

Для изменения состояния транзисторов в.в.к. и формирования импульсов напряжения на нагрузке, на *ДУ*, соединенный с источниками питания *ИП*, поступают сигналы от задающего генератора *ЗГ*. Эти сигналы посредством одновиткового трансформатора передаются в цепь управления транзистором. Переходной процесс в *СУ* приводит к изменению напряжения на затворе каждого дискретного прибора, их открытию и формированию высоковольтного импульса на выходе.

Наиболее типичная топология исполнения генератора высоковольтных прямоугольных наносекундных импульсов на основе двух в.в.к. приведена на рис. 2. Она состоит из источника высокого напряжения (*ИПВН*), токоограничивающего резистора $R_{то}$ и включенных по полумостовой схеме двух коммутаторов – верхнего плеча (*ВВКв*) и

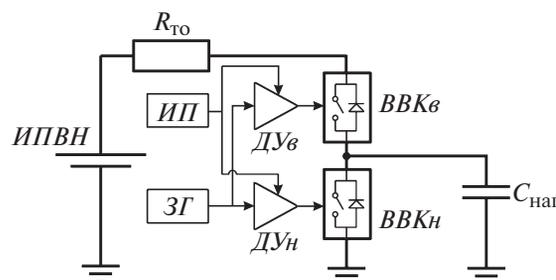


Рис. 2. Схема генератора с в.в.к., включенными по полумостовой схеме. *ИПВН* – источник высокого напряжения.

нижнего плеча (*ВВКн*) с драйверами (соответственно *ДУв* и *ДУн*), а также емкостной нагрузки $C_{наг}$.

Полумостовое включение *ВВК* позволяет обеспечить универсальность работы схемы с разными типами нагрузки без привязки к полярности высокого напряжения, а также обеспечивать широкие диапазоны рабочих частот и скважности формируемых импульсов. Формирование высоковольтных прямоугольных импульсов на емкости $C_{наг}$ происходит в два этапа. В начальный момент времени оба *ВВК* находятся в закрытом состоянии, а емкость находится под фиксированным потенциалом. После поступления сигнала от *ЗГ* на *ДУн* нижнего ключа, *ВВКн* переходит в проводящее состояние и разряжает емкость нагрузки до тех пор, пока подача сигнала от *ДУн* не прекратится и *ВВКн* не изменит состояния на непроводящее. На втором этапе сигнал управления от *ЗГ* на верхнем *ДУв* открывает *ВВКв*, и емкость нагрузки заряжается до напряжения источника питания *ИПВН*. По окончании сигнала от *ДУв* *ВВКв* переходит в непроводящее состояние, фиксируя заряд на емкости нагрузки.

Описанная топология позволяет варьировать длительность высоковольтных импульсов, изменять напряжение, регулировать фронты. Однако при протекании в полумосте коммутационных процессов с крутизной выходных напряжений, составляющей сотни вольт в наносекунду, начинают активно сказываться паразитные параметры силовых цепей, такие как индуктивности силовых линий, емкости между радиаторами транзисторов ключей и землей, собственные параметры дискретного прибора. Это также может приводить к таким нежелательным эффектам, как неравномерное распределение потенциалов по транзисторам в составе в.в.к. и протекание сквозного тока, вызванное ложным отпиранием всех силовых ключей из-за наличия емкости Миллера. Добавление выравнивающих цепочек позволяет решить ряд возникающих проблем, однако они ограничивают скорость переходных процессов и предельную частоту следования импульсов.

Для оценки амплитуды индуцированных напряжений на затворах транзистора в.в.к. была построена электрическая модель одного модуля в.в.к. в расчетной среде SPICE. В модели (рис. 3) учитывались схема управления транзистором, схема измерения напряжения, параметры измерительного пробника.

Для верификации модели использовался полумостовой генератор, состоящий из двух в.в.к. с блокируемым напряжением 19.2 кВ. На верхний ключ подавалось высокое напряжение и производилось его открытие. Нижний ключ выступал в качестве нагрузки, а его цепь управления не задействовалась и представляла трансформатор на холостом ходу. Модель включает сопротивление затвора R_3 , собственную индуктивность одновиткового трансформатора $L_{тр}$, а также активного сопротивления $R_{и}$ и емкости $C_{и}$, примененных для предварительной фильтрации сигнала, транзистор Z модели IRGPS40B120UD. Форма напряжения $U_{ист}$ воспроизводила экспериментальные данные напряжения на коллекторе транзистора.

Сравнение результатов численного расчета с осциллограммами, полученными в ходе экспериментальных исследований, приведено на рис. 4. Регистрация осциллограмм напряжения коллектора и затвора проводилась на последнем транзисторе нижнего ключа с заземленным эмиттером при помощи пробников Tectronix 6015a и 6501 с полосой пропускания 75 и 500 МГц, а также осциллографа LeCroy WR 6051 с полосой пропускания 500 МГц и частотой дискретизации 5 ГГц.

Как видно из представленных зависимостей, расчетные и экспериментальные данные имеют коэффициент детерминации $R^2 = 0.97$, что позволяет экстраполировать результаты моделирования для определения индуцированных напряжений на затворах остальных транзисторов, находящихся под плавающим потенциалом и при различных скоростях нарастания напряжения. Для этого в модели элемент источника напряжения $U_{ист}$, который имитирует возникающее в ходе коммутации напряжение на транзисторе в.в.к., задан функцией гиперболического тангенса $U_{0th}(kt)$, где параметр k определял длительности фронта $\tau_{0.1-0.9}$. Амплитудное значение напряжения источника U_0 принималось равным 1000 В. Активное сопротивление R_3 регулирует скорость диссипации заряда емкости затвора транзистора Z , ограничивая пиковое индуцированное значение напряжения затвора.

Кривые, полученные по расчетам параметров модели и иллюстрирующие негативное влияние емкости Миллера, приведены на рис. 5. Из данных зависимостей видно, что с уменьшением длительности фронта импульса источника $U_{ист}$, пиковые значения индуцированных напряжений на затворах могут превышать пороговые напряжения от-

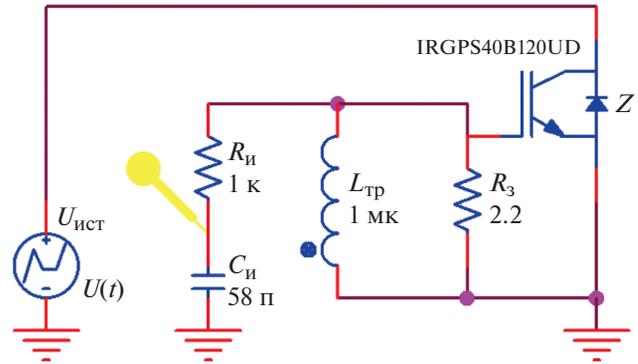


Рис. 3. Расчетная схема для оценки амплитуды индуцированных напряжений на затворах транзистора в.в.к.

крытия для данных транзисторов. Допустимые значения номиналов резисторов не должны превышать 6.8 Ом, так как для ряда транзисторов 15 В является предельным значением напряжения затвора. Однако с уменьшением сопротивления падает и индуцированное напряжение, и одновременно возрастает ток в первичной цепи CU для перевода в.в.к. в открытое состояние. Это в свою очередь затягивает переходный процесс, что негативно сказывается на фронтах высоковольтного импульса. Устранение этого эффекта возможно лишь при активном подавлении эффекта Миллера.

Вторым фактором, который оказывает влияние на скорость коммутационных процессов, является наличие паразитной емкости между радиаторами, коллекторами и землей транзисторов в.в.к. [16]. Для оценки его влияния были получены экспериментальные зависимости потенциалов коллекторов (рис. 6) на нижнем ключе в процессе нарастания напряжения на емкостной нагрузке. Для его определения на вход нижнего ключа, находящегося в закрытом состоянии, в ходе открытия верхнего ключа на нижний ключ поступал импульс напряжения с высоким значением крутизны фронта. Данное напряжение с амплитудой 19 кВ, распределяясь по узлам включения коллекторов, приводит к индуцированию напряжений на затворах.

Из приведенного на рис. 6 графика видно, что имеет местонеоднородность в распределении напряжений коллекторов как в ходе коммутационного процесса, так в статическом режиме по дискретным приборам высоковольтного ключа. К транзисторам, находящимся ближе к емкостной нагрузке, прикладывается большее напряжение, достигающее до 6% от входного (19.2 кВ). Это также означает и большее индуцированное напряжение на их затворах. В момент времени, когда напряжение затвора одного или нескольких транзисторов достигает порогового значения, нижний в.в.к. переходит в состояние с существенно большей проводимо-

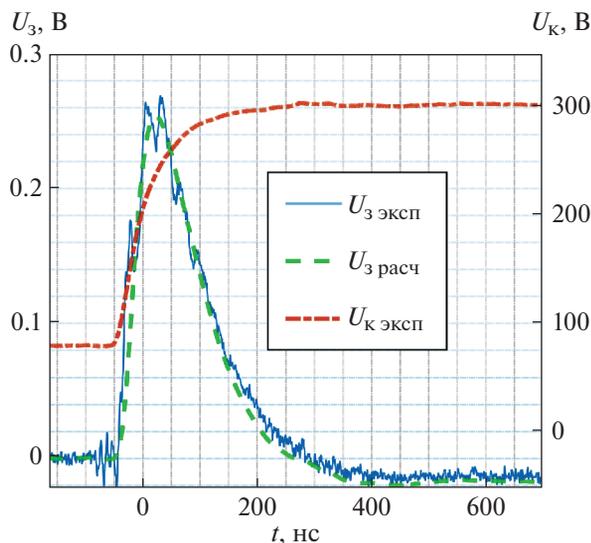


Рис. 4. Расчетные и экспериментальные осциллограммы напряжения на затворе (U_3) и коллекторе (U_k) транзистора Z.

стью, приводящему к росту тока и затягиванию фронта напряжения на нагрузке. В данном состоянии нижний в.в.к. будет находиться до тех пор, пока напряжение на нагрузке не перестанет возрастать либо до момента окончания сигнала от верхнего драйвера управления.

Все описанные выше процессы приводят к повышенным потерям на дискретных приборах в.в.к. и их разогреву, что снижает порог открытия, увеличивает токи утечки и повышает сопротивление открытого состояния [17–21]. С одной стороны, перечисленные факторы позволяют перераспределять потенциал между узлами, не допускать пробоя транзисторов и использовать в.в.к. без выравнивающих цепочек. С другой – приводит к повышенным потерям на транзисторах, уменьшению эквивалентного сопротивления в.в.к. и его самопроизвольному открытию, что еще больше повышает температуру и, в худшем варианте, приводит к выходу из строя.

Подводя итог вышеописанного, стоит заметить, что при формировании высоковольтных импульсов с фронтами в десятки наносекунд для избегания сквозных токов и пробоя отдельных транзисторов драйверы управления в.в.к. должны быть разработаны таким образом, чтобы отвечать двум требованиям. Первое – это изменение напряжений на затворах всех транзисторов в составе в.в.к. должно происходить с высоким уровнем синхронизации, и второе – схемотехническая реализация драйвера управления не должна допускать самопроизвольное открытие в.в.к. и при этом не препятствовать перераспределению блокируемого напряжения.

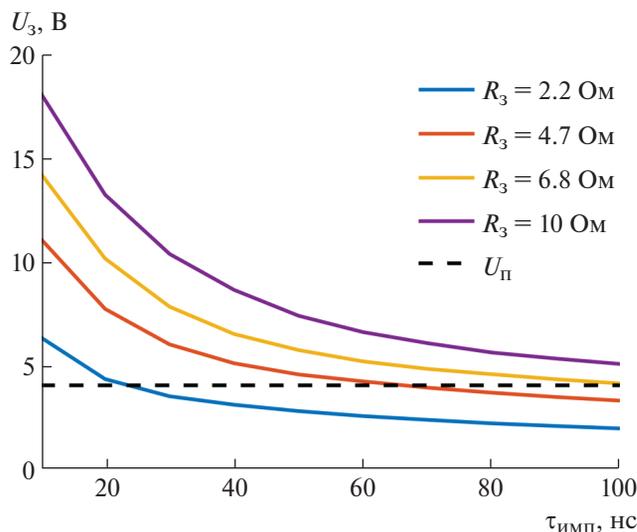


Рис. 5. Зависимость максимального напряжения на затворе U_3 от длительности фронта импульса $\tau_{\text{имп}}$ напряжения источника $U_{\text{ист}}$.

ДРАЙВЕР УПРАВЛЕНИЯ В.В.К.

Разработанная электрическая схема драйвера управления высоковольтным ключом, которая удовлетворяет сформулированным выше требованиям, приведена на рис. 7. Она состоит из блока источников питания, задающего генератора ЗГ, драйвера управления в.в.к. и n транзисторов $Qp1-Qpn$, входящих в состав в.в.к. Блок источников питания состоит из DC_n и DC_b источников питания с диапазоном регулирования напряжений 0–30 В и 0–600 В соответственно. Драйвер содержит четыре биполярных транзистора с изолированным затвором (б.т.и.з.) IRG4BC20UD ($Qc1-Qc4$), включенных по мостовой схеме, накопительную емкость C_n , сопротивления $R_{\text{откр}}$, $R_{\text{закр}}$ и одновитковые трансформаторы $Tr1-Trn$. Данный драйвер позволяет формировать на затворах транзисторов в.в.к. двухуровневый сигнал – положительный для синхронного открытия, отсутствие сигнала для сохранения закрытого состояния в статическом режиме и отрицательный сигнал для защиты от самопроизвольного открытия.

Последовательность работы драйвера управления может быть разделена на два этапа, связанных с процессами включения и отключения в.в.к. На первом этапе (перехода в.в.к. в проводящее состояние) на драйвер DY_1 поступает сигнал открытия $Откр$ от задающего генератора ЗГ по каналу $Ch1$, который открывает б.т.и.з. $Qc1$ и $Qc3$.

Открытие $Qc1$ и $Qc3$ приводит к возникновению коммутационного процесса в цепи источника DC_b , емкости C_n , сопротивления $R_{\text{откр}}$ и трансформаторов Tr . В ней развивается переходный ток $i_{\text{откр}}(t)$, который создает разность потенциалов

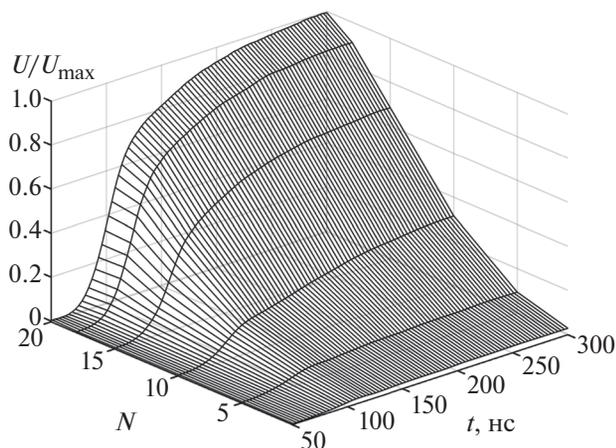


Рис. 6. Экспериментальное распределение приведенного напряжения по коллекторам транзисторов нижнего в.в.к. в процессе формирования высоковольтного импульса в зависимости от времени и положения транзистора (N).

(≥ 15 В) на затворах транзисторов Q_p . Значения DC_B и $R_{откр}$ подбирают так, чтобы максимизировать скорость открытия транзисторов в составе в.в.к. и обеспечить требуемую разность потенциалов.

На втором этапе работы драйвера управления в.в.к., который начинается после окончания сигнала $Откр$ от ЗГ, происходит переход транзисторов Q_p в непроводящее состояние. Закрытие $Qc1$ и $Qc3$ влечет за собой спад тока $i_{откр}(t)$, который индуцирует в $СУ Qp1-Qpn$ э.д.с. противоположной полярности, ведущую к спаду напряжений на емкостях затворов транзисторов и их последующему закрытию. Помимо этого, процессу спада напряжения на затворах также способствуют сопротивление затворов транзисторов $R_{з1}-R_{зn}$.

С целью противодействия ранее рассмотренному влиянию паразитных емкостей в.в.к. при их совместной работе в полумостовой схеме, в драйвер управления каждого коммутатора включен управляющий контур, содержащий транзисторы $Qc2$, $Qc4$ (обозначен штрихпунктирной линией протекания тока $I_{закр}$ на рис. 7). Для нивелирования влияния индуцированных напряжений на затворах транзисторов $Qp1-Qpn$ и поддержания одного в.в.к. в закрытом состоянии при открытии другого коммутатора полумостовой схемы, сигнал включения $Откр$ интерпретируется драйвером данного в.в.к. как сигнал на принудительное закрытие $Закр$. Данный сигнал поступает от ЗГ по каналу $Ch2$ на $ДУ_2$, что приводит к возникновению тока $i_{закр}(t)$, который индуцирует отрицательную разность потенциалов на затворах транзисторов ключа, тем самым поддерживая нахождение рассматриваемого в.в.к. в закрытом состоянии во время резкого нарастания напряжения на его входах.

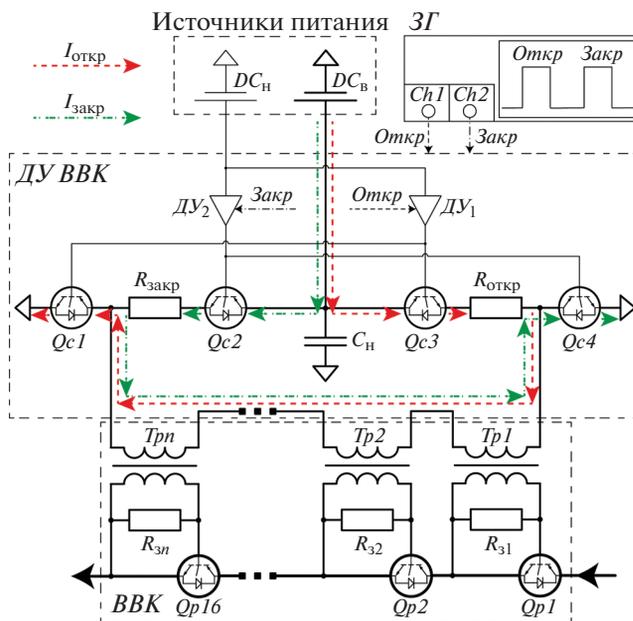


Рис. 7. Электрическая схема в.в.к. и его драйвера управления.

Таким образом, разработанная схема высоковольтного ключа, построенная по мультитрансформаторной схеме с единой первичной обмоткой, а также последовательность работы его драйвера управления позволяют добиться высокой синхронизации работы транзисторов и противодействовать самопроизвольному открытию в.в.к.

ГЕНЕРАТОР НА ОСНОВЕ ПОЛУМОСТОВОЙ СХЕМЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КОММУТАТОРОВ

На рис. 8 приведена электрическая схема экспериментального генератора, выполненного на базе полумостовой схемы включения в.в.к., а на рис. 9 – внешний вид сборки коммутаторов с драйверами управления.

Приведенная схема содержит высоковольтный источник питания ИПВН напряжением 0–20 кВ, сглаживающий R_1 и стоковый R_2 резисторы, три буферных емкости – керамические $C_{к1}$, $C_{к2}$ с низким внутренним сопротивлением и пленочный конденсатор C_n , токоограничивающий резистор $R_{то}$ и токоизмерительный шунт $R_{ш}$, а также два в.в.к. с рассмотренным ранее драйвером управления. Напряжение источников питания драйверов в.в.к. DC_H и DC_B составляло 15 В и 600 В соответственно. $СУ$, в соответствии со схемой на рис. 7, включает однофазный трансформатор, выполненный на ферритовом кольце из материала N87, и резистор $R_3 = 2.2$ Ом.

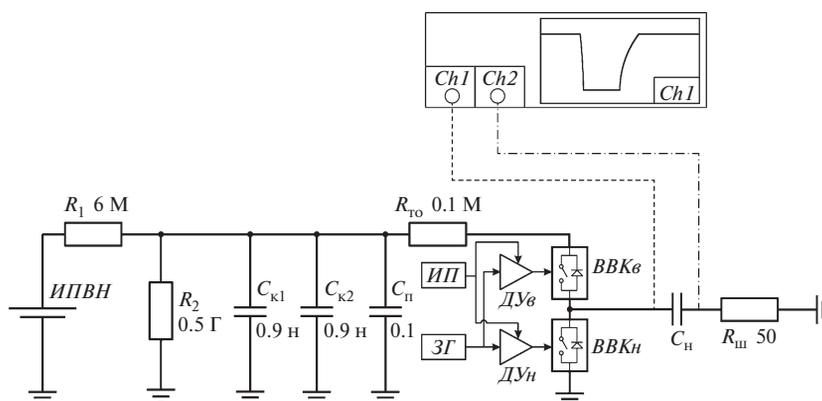


Рис. 8. Электрическая схема генератора с в.в.к., включенными по полумостовой схеме, и драйверами управления.

Активное подавление наведенного потенциала на затворах блокируется обратным импульсом управления через резистор $R_{\text{закр}} = 400 \text{ Ом}$ и устанавливается в районе -3 В , что блокирует самопроизвольное открытие и не мешает выравниваться потенциалам на самых нагруженных транзисторах. Были реализованы две пары высоковольтных ключей, включенных по полумостовой схеме, выполненные из 16 модулей на б.т.и.з. IRGPS40B120UD и IRG7PH42UD с блокируемым напряжением 19.2 кВ. Выбор транзисторов подробно описан в [20]. По результатам более 500 ч работы наиболее быстрые в.в.к. на основе IRG7 показали высокие скорости переключения, а также надежность в эксплуатации.

На рис. 10–12 представлены полученные на созданном генераторе нормированные осциллограммы напряжения на емкостной нагрузке, а также кривые времен подъема и спада высоковольтного импульса в зависимости от амплитуды питающего напряжения.

Согласно результатам измерений было получено, что при длительности импульса открытия, равной 50 нс, длительность времени спада напряжения по уровню 0.1–0.9 (рис. 10) имеет линейно-возрастающую зависимость от величины входного высокого напряжения. Это может быть обосновано достижением предельной крутизны тока транзистора, которая ограничивает скорость разрядки емкости нагрузки. Характер кривой нарастания напряжения (рис. 11) имеет более сложную природу. Это связано с изменением эквивалентной емкости верхнего в.в.к. и, как следствие, изменением резонансных частот всей высоковольтной части. При снижении длительности импульса открытия до 30 нс, как видно из рис. 12, работа в.в.к. ограничивается достижением предельной крутизны тока б.т.и.з., что приводит к неполной перезарядки емкости нагрузки. Однако ширина импульса становится менее 100 нс, что позволяет повысить

частоту высоковольтного сигнала до 10 МГц в пачке импульсов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были рассмотрены особенности схемотехнической реализации высоковольтных генераторов на базе высоковольтных коммутаторов, включенных по полумостовой схеме. Разработаны и созданы решения для увеличения эффективности и повышения частоты работы высоковольтных генераторов на основе полумостового включения последовательно соединенных дискретных транзисторов.

На примере демонстрационного моделирования и экспериментальных схем были показаны эффекты влияния паразитных параметров единичного модуля на работу в.в.к. Приведена и реализована

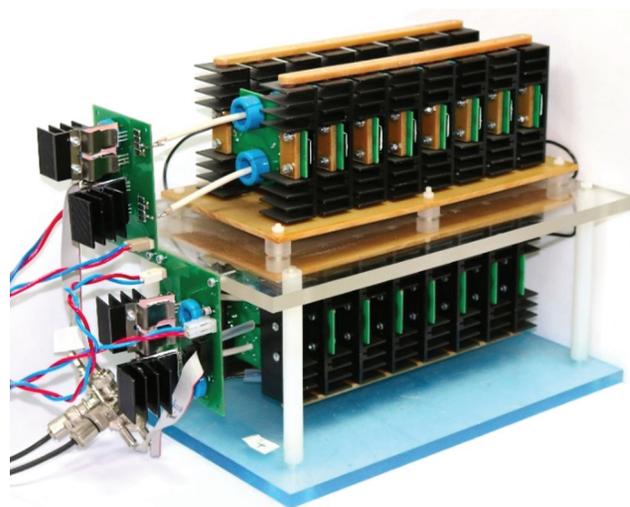


Рис. 9. Внешний вид коммутатора с рабочим напряжением 19.2 кВ и током 100 А на основе б.т.и.з. IR7GPH42UD.

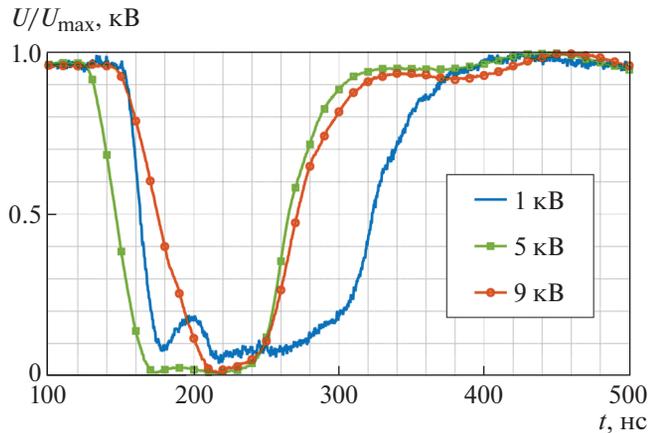


Рис. 10. Усредненные осциллограммы напряжений на нагрузке при длительности импульса открытия 50 нс.

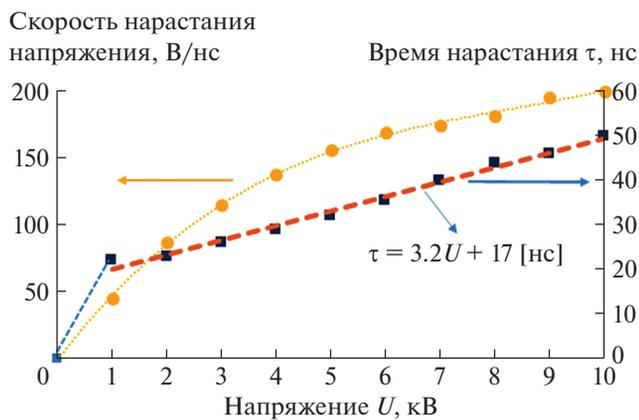


Рис. 11. Зависимость времени нарастания напряжения на нагрузке от значения напряжения источника.

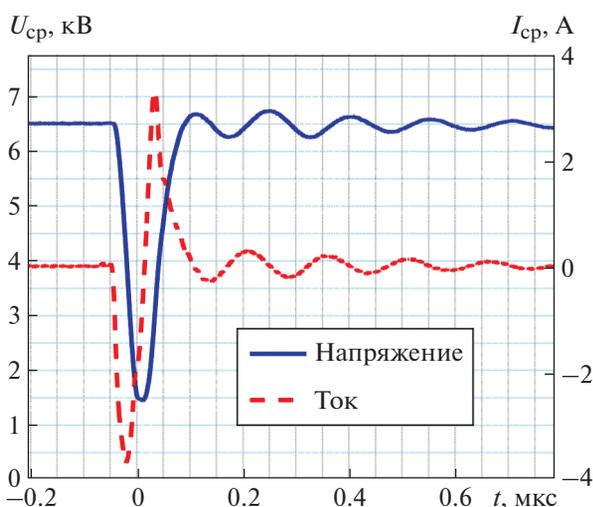


Рис. 12. Усредненные осциллограммы напряжения и тока шунта при напряжении источника питания 7 кВ при длительности импульса открытия 30 нс.

схема драйвера управления, последовательность работы которого приводит к активному подавлению эффекта Миллера, существенно ограничивающего скорость нарастания высоковольтного импульса и частоту работы генератора. Создан импульсный генератор с напряжением питания до 19.2 кВ, импульсным током до 100 А, рабочей частотой коммутации – до 100 кГц и до 10 МГц в (пачкоимпульсном) режиме следования импульсов и со скоростью нарастания импульса до 200 В/нс.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований 18-29-17066 мк.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Benard N., Moreau E. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100 (19). 193503. <https://doi.org/10.1063/1.4712125>
2. Starikovskii A.Y., Nikipelov A.A., Nudnova M.M., Roupassov D.V. // Plasma Sources Science and Technology. 2009. V. 18 (3). 034015. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/18/3/034015>
3. Shintaro Sato, Masayuki Takahashi, Naofumi Ohnishi // Appl. Phys. Lett. 2017. V. 110. 194101. <https://doi.org/10.1063/1.4983370>
4. Corke T.C., Enloe C.L., Wilkinson S.P. // Annual Rev. Fluid Mechanics. 2010. V. 42. № 1. P. 505. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-FLUID-121108-145550>
5. Ding Z.W., Li Y.W., Pang L., Zhuang Z., Ma W., Zhang B.L. // Физика плазмы. 2019. Т. 45. № 8. С. 727. <https://doi.org/10.1134/S0367292119070047>
6. Ребров И.Е., Хомич В.Ю. // Прикладная физика. 2020. № 1. С. 5.
7. Filatov I.E., Uvarin V.V., Kuznetsov D.L. // Technical Physics. 2018. V. 63 (5). P. 680. <https://doi.org/10.1134/S1063784218050079>
8. Sun Y., Montenegro A., Tobin T. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020. V. 27 (1). P. 206. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2019.008386>
9. Ребров И.Е., Кашин А.В., Луканина К.И., Антипова К.Г., Хомич В.Ю., Григорьев Т.Е. // Прикладная физика. 2019. № 3. С. 98.
10. Rebrov I.E., Lukanina K.I., Grigoriev T.E., Bakirov A.V., Krashenninnikov S.V., Dmitryakov P.V., Kamyschinsky R.A., Antipova C.G., Chvalun S.N., Khomich V.Yu. // Chemical Engineering J. 2021. V. 418. 126561. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126561>
11. Soldatov A.N., Sukhanov V.B., Fedorov V.F., Yudin N.A. // Atmospheric and Oceanic Optics C/C of Optika Atmosfery i Okeana. 1995. V. 8. P. 894.
12. Reberšek M., Miklavčič D. // Automatika, 2011. V. 52 (1). P. 12. <https://doi.org/10.1080/00051144.2011.11828399>

13. Малашин М.В., Мошкунов С.И., Хомич В.Ю., Шершунова Е.А. // ПТЭ. 2016. № 2. С. 71.
<https://doi.org/10.7868/S0032816216020099>
14. Мошкунов С.И., Ребров И.Е., Хомич В.Ю. // Успехи прикл. физики. 2013. Т. 1. С. № 5. 630.
15. Малашин М.В., Мошкунов С.И., Ребров И.Е., Хомич В.Ю., Шершунова Е.А. // ПТЭ. 2014. № 2. С. 53.
<https://doi.org/10.7868/S0032816214010285>
16. Казанцев В.И., Платонов С.А., Сергеев В.Г. // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. № 8 (8). С. 60.
17. Vakun I., Čobanov N., Jakopović Ž. // Automatika. 2011. V. 52. № 4. P. 295.
<https://doi.org/10.7305/automatika.52-4.104>
18. Guo C., Cai W., Li J., Wang S., Wei L., Li Y. // J. Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2019. V. 1237. № 4. P. 042076.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1237/4/042076>
19. <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irgps40b120ud.pdf>
20. Storasta L., Matthias S., Kopta A., Rahimo M. // 24th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs. IEEE., 2012. P. 157.
<https://doi.org/10.1109/ispsd.2012.6229047>
21. Scofield J., Merrett J.N., Richmond J., Agarwal A., Leslie S. // Additional Papers Presentations 2010 HITEC. P. 1–8.
<https://doi.org/10.4071/HITEC-JScofield-WP22>
22. Мошкунов С.И., Ребров И.Е., Хомич В.Ю., Шершунова Е.А. // ПТЭ. 2018. № 6. С. 62.
<https://doi.org/10.1134/S0032816218050257>

ДИСКРЕТНЫЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ МОДУЛЯТОРЫ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

© 2021 г. Е. Л. Шошин*

Сургутский государственный университет

Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, 628400, Сургут, просп. Ленина, 1, Россия

**e-mail: shoshin_el@surgu.ru*

Поступила в редакцию 12.04.2021 г.

После доработки 28.04.2021 г.

Принята к публикации 12.05.2021 г.

Рассмотрен метод формирования неполяризованных электромагнитных волн. Проведен анализ погрешности измерения параметров Стокса рассеянной радиоволны при внешней калибровке радиолокационного поляриметра с использованием неполяризованных зондирующих радиосигналов. Описана конструкция диодного волноводно-планарного формирователя, обладающего быстродействием переключения 1 мкс при реализации дискретной поляризационной модуляции зондирующих радиосигналов в 3-см диапазоне. Описана конструкция коммутируемого волноводного модулятора, формирующего мощные неполяризованные радиолокационные сигналы. Приведены рабочие характеристики поляризационных модуляторов при подключении к импульсному сверхвысокочастотному генератору с пиковой мощностью 9 кВт.

DOI: 10.31857/S0032816221050244

ВВЕДЕНИЕ

При измерении поляризационных характеристик рассеяния радиолокационных объектов в состав радиолокационных станций вводят векторный формирователь, с помощью которого задается вид поляризационной модуляции (п.м.) зондирующих сигналов [1, 2]. Конструктивно устройства п.м. в сверхвысокочастотном (с.в.ч.) диапазоне могут представлять собой отрезок квадратного или круглого волновода, вдоль продольной оси которого размещена тонкая фазовая пластина [2]. В других известных конструкциях поляризационные модуляторы реализуют на основе фазосдвигающих устройств, формирующих ортогонально поляризованные компоненты радиолокационных сигналов [3, 4].

Различают непрерывную и дискретную п.м. Непрерывная п.м. может быть реализована с помощью вращающейся фазовой пластины. Так, при вращении полуволновой фазовой пластины формируемый с.в.ч.-сигнал характеризуется линейной вращающейся поляризацией, а в случае вращающейся четвертьволновой фазовой пластины – принимает состояния линейной, эллиптической и круговой поляризации, динамически изменяющейся во времени. Дискретную п.м. реализуют с помощью фазовращателей с ограниченным набором значений фаз, позволяющих формировать электромагнитные волны линейной и круговой

поляризации [3]. Выбор вида п.м. связывают с реализацией того или иного алгоритма измерения поляризационных характеристик радиолокационной цели [4, 5].

В настоящее время отсутствуют разработанные устройства дискретной п.м., способные формировать неполяризованные радиосигналы. Необходимость в таких устройствах связана с тем, что неполяризованные электромагнитные волны могут использоваться при проведении внешней калибровки поляриметрической радиолокационной станции и для устранения искажений, вносимых антенно-фидерным трактом при измерении поляризационных характеристик рассеяния радиолокационных объектов [6].

Целями данной работы являются разработка метода формирования неполяризованной электромагнитной волны, анализ погрешности измерения параметров Стокса при внешней калибровке поляриметрической радиолокационной станции с использованием неполяризованных зондирующих радиосигналов, создание конструкции и измерение рабочих характеристик дискретных поляризационных модуляторов, формирующих поляризованные и неполяризованные радиолокационные сигналы.

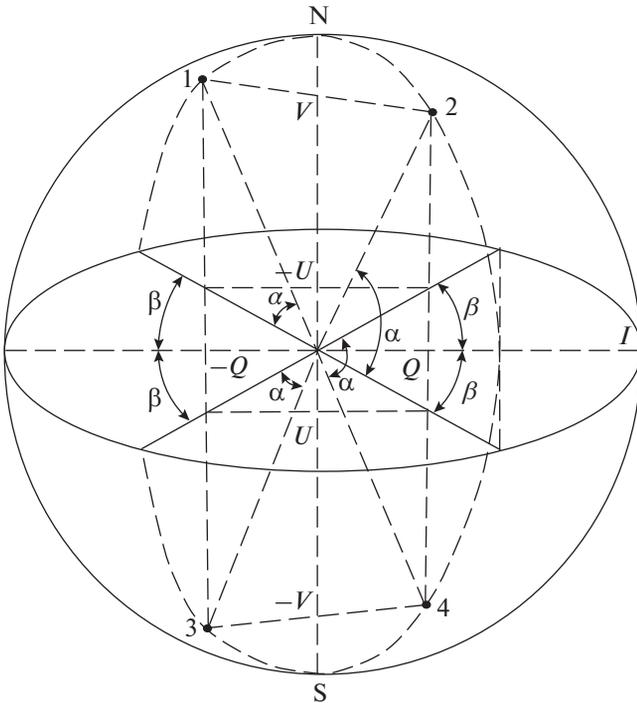


Рис. 1. Представление неполяризованной электромагнитной волны на сфере Пуанкаре. V, Q, U – координаты поляризационных состояний 1, 2, 3, 4 в прямоугольной системе координат; α – угол эллиптичности; β – угол ориентации.

ФОРМИРОВАНИЕ НЕПОЛЯРИЗОВАННЫХ РАДИОВОЛН

Поляризация электромагнитной волны может быть описана через параметры Стокса:

$$\begin{aligned} I &= E_X^2 + E_Y^2; & Q &= E_X^2 - E_Y^2; \\ U &= 2E_X E_Y \cos \varphi; & V &= 2E_X E_Y \sin \varphi, \end{aligned} \quad (1)$$

где E_X и E_Y – интенсивности x - и y -компоненты электромагнитного поля, φ – фазовый сдвиг между компонентами поля.

Вектор Стокса, составленный из параметров Стокса, имеет вид:

$$\text{St} = (I, Q, U, V)^T. \quad (2)$$

Нормированный вектор Стокса электромагнитной волны единичной интенсивности равен [1]:

$$\begin{aligned} \text{St} &= (1, \cos(2\alpha)\cos(2\beta), \\ &\cos(2\alpha)\sin(2\beta), \sin(2\alpha))^T, \end{aligned} \quad (3)$$

где α – угол эллиптичности эллипса поляризации, β – угол ориентации большой полуоси.

Электромагнитную волну можно считать полностью неполяризованной, если ее вектор Стокса равен [7]

$$\text{St} = (I, 0, 0, 0)^T. \quad (4)$$

Покажем возможность формирования неполяризованной электромагнитной волны путем векторного сложения поляризованных радиоволн. Для этого поляризованные радиоволны одинаковой интенсивности должны различаться между собой углами эллиптичности α и ориентации β , так чтобы выполнялось равенство:

$$\begin{pmatrix} I \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = 0.25 \left\{ \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I \\ Q \\ -U \\ -V \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I \\ -Q \\ U \\ -V \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I \\ -Q \\ -U \\ V \end{pmatrix} \right\}. \quad (5)$$

На рис. 1 приведены сфера Пуанкаре и набор из четырех поляризационных состояний электромагнитных волн, отвечающих условию (5).

Параметры Q, U, V на сфере Пуанкаре представляют собой координаты поляризационных состояний 1, 2, 3, 4 в прямоугольной системе координат, углы эллиптичности α и ориентации β характеризуют поляризацию электромагнитной волны в сферической системе координат, а радиус сферы равен I . Из геометрии, представленной на рис. 1, можно определить векторы Стокса единичной интенсивности поляризационных состояний 1, 2, 3, 4, выражая их через углы эллиптичности и ориентации:

$$\begin{aligned} (1, Q, U, V)^T &= (1, \cos(2\alpha)\cos(2\beta), \\ &\cos(2\alpha)\sin(2\beta), \sin(2\alpha))^T; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (1, Q, -U, -V)^T &= (1, \cos(2(-\alpha))\cos(2(-\beta)), \\ &\cos(2(-\alpha))\sin(2(-\beta)), \sin(2(-\alpha)))^T; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (1, -Q, U, -V)^T &= (1, \cos(2(-\alpha))\cos(2(-\beta + 90^\circ)), \\ &\cos(2(-\alpha))\sin(2(-\beta + 90^\circ)), \sin(2(-\alpha)))^T; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (1, -Q, -U, V)^T &= (1, \cos(2\alpha)\cos(2(\beta + 90^\circ)), \\ &\cos(2\alpha)\sin(2(\beta + 90^\circ)), \sin(2\alpha))^T. \end{aligned}$$

Электромагнитные волны, различающиеся параметрами Стокса, согласно формуле (5), чередуются во времени, что позволяет выполнить усреднение параметров Стокса на интервале времени, равном периоду $L = 4t$, где t – временной интервал формирования волны фиксированной поляризации. Уравнение (5) позволяет использовать электромагнитные волны произвольной поляризации – линейной, круговой, эллиптической.

Формирование неполяризованной электромагнитной волны на интервале времени $>L$ может быть выполнено с использованием радиоволн, число поляризационных состояний которых >4 . При этом ограничивающим фактором является кратность интервала времени, в течение которого формируется неполяризованная элек-

тромагнитная волна, значению L . Вектор Стокса неполяризованной электромагнитной волны на интервале времени NL имеет вид:

$$St = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^N \{I_k, Q_k, U_k, V_k\}^T + (I_k, Q_k, -U_k, -V_k)^T + (I_k, -Q_k, U_k, -V_k)^T + (I_k, -Q_k, -U_k, V_k)^T \}, \quad (6)$$

где k – индекс временного интервала L_k , N – количество интервалов L .

На рис. 2 приведена структурная схема модулятора неполяризованной электромагнитной волны.

Формирователь поляризованной электромагнитной волны $\Phi ПВ$ задает вид поляризации сигнала (линейная, круговая, эллиптическая). На интервале времени, равном L_k ($k = 1, 2, \dots, N$), поляризация электромагнитной волны в общем случае отличается от поляризации сигналов на других интервалах времени. В частном случае задаваемая поляризация электромагнитной волны может оставаться неизменной на всем интервале времени формирования неполяризованной электромагнитной волны. Поляризационный разделитель $ПР$ выделяет ортогонально поляризованные компоненты, а фазосдвигающие устройства $\Phi У$ формируют отдельно во времени четыре компоненты волны: 1, 2, 3, 4 (см. рис. 1), для которых выполняется равенство (5). На выходе суммирующего устройства $СУ$ формируется неполяризованная электромагнитная волна, вектор Стокса которой определяется выражением (6).

ВНЕШНЯЯ КАЛИБРОВКА КАНАЛОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СТОКСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕПОЛЯРИЗОВАННЫХ ЗОНДИРУЮЩИХ РАДИОСИГНАЛОВ

Погрешность измерения параметров Стокса рассеянной волны влияет на точность формируемых поляризационных параметров радиолокационного объекта. Для повышения точности поляризационных измерений используют различные методы калибровки. Определим погрешность измерения параметров Стокса рассеянной волны при использовании неполяризованных зондирующих радиосигналов и эталонного радиолокационного отражателя.

Будем использовать приборный вектор Стокса $St^e = (I^e, Q^e, U^e, V^e)^T$, в котором параметр I^e определяет мощность зондирующих радиосигналов, а параметры Q^e, U^e, V^e характеризуют поляризационное состояние радиосигналов, согласно (5). Вектор Стокса рассеянного радиосигнала

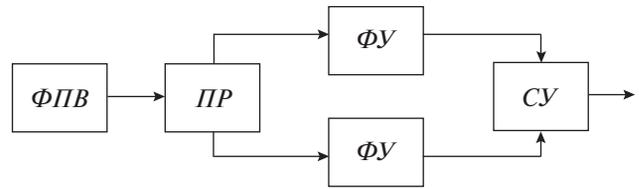


Рис. 2. Структурная схема модулятора неполяризованной электромагнитной волны. $\Phi ПВ$ – формирователь поляризованной волны; $ПР$ – поляризационный разделитель; $\Phi У$ – фазосдвигающее устройство; $СУ$ – суммирующее устройство.

$St^r = (I^r, Q^r, U^r, V^r)^T$ связан с приборным вектором Стокса соотношением:

$$St^r = hMSt^e. \quad (7)$$

Здесь M – матрица Мюллера эталонного отражателя; $h = \frac{\sigma_0}{(4\pi)^2 R^4}$, где σ_0 и R – соответственно эффективная поверхность рассеяния эталонного отражателя и его расстояние до поляриметра.

В качестве эталонного отражателя будем использовать трехгранный уголкоый отражатель, матрица рассеяния которого имеет вид [8]:

$$S = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Матрица рассеяния связана с матрицей Мюллера преобразованием вида [1]:

$$M = \Lambda[S \otimes S^*]\Lambda^{-1}, \quad (9)$$

где выражение в квадратных скобках – кронекеровское произведение матрицы рассеяния на комплексно-сопряженную с ней матрицу, а

$$\Lambda = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -i & i & 0 \end{pmatrix}$$

есть матрица преобразования.

Подставляя равенство (8) в (9) и (7), получим вектор Стокса рассеянной радиоволны, усредненный на интервале времени, равном L :

$$St^r = (hI^e, 0, 0, 0)^T. \quad (10)$$

Таким образом, отраженная радиоволна, согласно (10), является неполяризованной. При этом временные диаграммы параметров Q, U и V представляют собой последовательности разнополярных импульсов, которые формируются в моменты времени $t, 2t, 3t, 4t$ и имеют нулевое среднее значение. Различия амплитудных значений параметров Q, U, V определяют относительные погрешности измерения параметров Стокса:

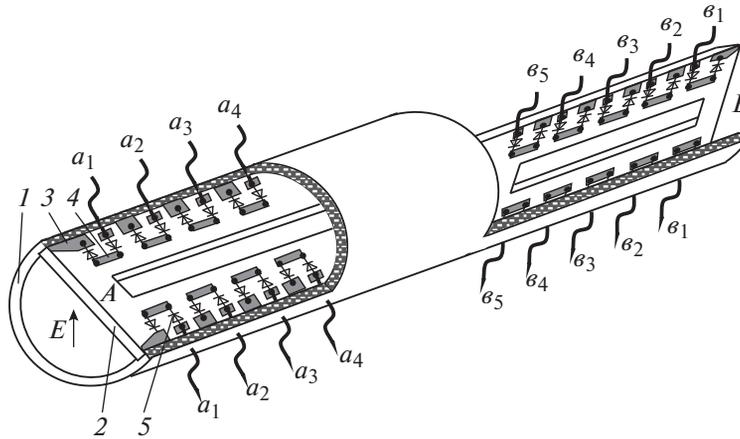


Рис. 3. Конструкция диодного волноводно-планарного поляризатора. 1 – волновод; 2 – полосковая плата; 3 – пластины заземления; 4 – управляющие полоски; 5 – *p-i-n*-диоды; a_1 – a_4 , v_1 – v_5 – управляющие выводы *p-i-n*-диодов; *A* – первая секция; *B* – вторая секция; *E* – напряженность поля возбуждающего источника.

$$\delta_Q = \frac{Q_t^r + Q_{2t}^r - Q_{3t}^r - Q_{4t}^r}{I^r}; \quad (11)$$

$$\delta_U = \frac{U_t^r - U_{2t}^r + U_{3t}^r - U_{4t}^r}{I^r}; \quad (12)$$

$$\delta_V = \frac{V_t^r - V_{2t}^r - V_{3t}^r + V_{4t}^r}{I^r}. \quad (13)$$

Нормировка величин δ_Q , δ_U , δ_V относительно параметра I^r связана с тем, что для неполяризованных рассеянных радиоволн I^r – величина постоянная.

Таким образом, использование неполяризованных зондирующих радиосигналов позволяет определить погрешность измерения параметров Стокса рассеянной радиоволны, согласно формулам (11)–(13).

ДИСКРЕТНЫЙ ФОРМИРОВАТЕЛЬ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Известные методы внешней калибровки и измерения поляризационных характеристик радиолокационных объектов используют зондирующие радиосигналы линейной, круговой и эллиптической поляризации [2, 4, 5]. Механические и ферритовые управляемые поляризаторы обладают низким быстродействием, термостабильностью и технологичностью. Рассмотрим конструкцию диодного волноводно-планарного поляризатора, построенного на полосковых фазосдвигающих структурах. Диодный поляризатор представляет собой круглый волновод, внутри которого размещены две секции *A* и *B*. Каждая секция выполнена из двух одинаковых односторонних полосковых плат по печатной технологии на фольгиро-

ванном фторопласте толщиной 1.5 мм (рис. 3). Секция *A* в круглом волноводе ориентирована под углом 45° к *E*-плоскости возбуждающего прямоугольного волновода, а секция *B* расположена в круглом волноводе перпендикулярно секции *A*. Топология проводящего слоя плат обладает осевой симметрией. Плата содержит два ряда металлических пластин, каждая из которых имеет сильную емкостную связь со стенкой волновода (рис. 4). Вдоль пластин расположены управляющие полоски, отделенные от пластин зазорами. Между каждой управляющей полоской и металлической пластиной включены бескорпусные *p-i-n*-диоды.

Принцип управления поляризатором основан на изменении эквивалентного сечения волновода при коммутации каждого из диодов, а также на трансформации с.в.ч.-волн на управляемых распределенных неоднородностях [9]. В каждой секции реализованы 20 управляющих полосок и размещены 40 *p-i-n*-диодов. Управлением состояния *p-i-n*-диодов с помощью выводов a_1 – a_{10} и v_1 – v_{10} (на рис. 3 выводы a_5 – a_{10} и v_6 – v_{10} не показаны) обеспечивают внесение дискретного значения фазового сдвига секциями *A* и *B*. Для формирования электромагнитной волны линейной поляризации все переключательные диоды нужно перевести в закрытое состояние. Для формирования электромагнитной волны эллиптической поляризации с углами $\alpha = \pm 22.5^\circ$ и $\beta = 0^\circ$ необходимо перевести в открытое состояние диоды с управляющими выводами a_1 – a_5 или v_1 – v_5 . Для формирования электромагнитной волны круговой поляризации правого направления вращения необходимо перевести в открытое состояние диоды с выводами a_1 – a_{10} , а для формирования волны круговой поляризации левого направления вращения – диоды с выводами v_1 – v_{10} . Ток прямого смещения на *p-i-n*-диоде 2A546A-5 составляет

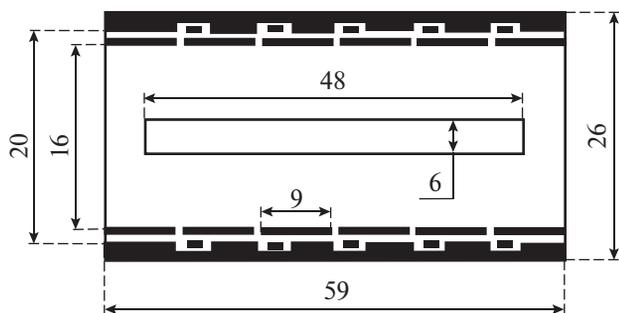


Рис. 4. Схема полосковой платы. Размеры указаны в миллиметрах.

100 мА при напряжении 0.875 В, величина напряжения обратного смещения выбрана равной 100 В [10]. На рис. 5 приведены частотные зависимости управляемого фазового сдвига между ортогональными компонентами электромагнитной волны на выходе поляризатора.

Для исследования рабочих характеристик был создан опытный образец диодного поляризатора, который прошел испытание при подключении к выходу импульсного с.в.ч.-генератора, развивающего на частоте 9.37 ГГц пиковую мощность 9 кВт при частоте посылки импульсов 400 Гц и длительности импульса 3.5 мкс.

Технические характеристики диодного волноводно-планарного поляризатора представлены ниже:

- полоса рабочих частот 9.0–9.4 ГГц;
- тип переключаемых с.в.ч.-диодов 2A546A-5;
- диапазон регулировки разности фаз для преобразования поляризации от -90° до 90° ;
- минимальная вносимая разность фаз для преобразования поляризации 9° ;
- число поляризационных состояний 21;
- вносимые потери 0.5–1.6 дБ;
- коэффициент стоячей волны ≤ 1.4 ;
- время переключения 1 мкс;
- импульсная мощность 9 кВт;
- средняя с.в.ч.-мощность 13 Вт;
- размеры волновода $\varnothing 22 \times 240$ мм.

Приведенные характеристики свидетельствуют о том, что диодный волноводно-планарный поляризатор можно использовать при проведении радиолокационных измерений или в составе модулятора неполяризованных радиосигналов.

ДИСКРЕТНЫЙ ФОРМИРОВАТЕЛЬ НЕПОЛЯРИЗОВАННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Формирование неполяризованных радиолокационных сигналов, согласно (6), может быть

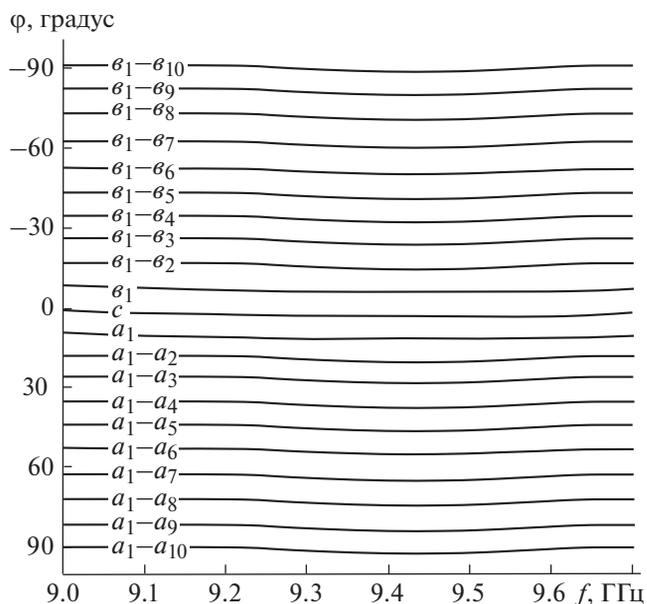


Рис. 5. Зависимость фазового сдвига от частоты. c – закрытое состояние $p-i-n$ -диодов; a_1-a_{10} , $\varphi_1-\varphi_{10}$ – открытое состояние $p-i-n$ -диодов.

обеспечено с помощью коммутируемого волноводного устройства, обладающего необходимым быстродействием при переключении и способного пропустить мощный с.в.ч.-сигнал, поступающий от передатчика. На рис. 6 приведена электрическая схема коммутируемого волноводного поляризационного модулятора, на вход которого поступает поляризованный сигнал, сформированный диодным волноводно-планарным поляризатором.

Входящий в состав модулятора поляризационный разделитель S_1 конструктивно представляет собой отрезок круглого волновода с двумя прямоугольными фланцами, на выходе которых формируются ортогонально поляризованные x - и y -компоненты радиосигнала передатчика. Дискретные управляемые фазосдвигатели построены на основе волноводных Y -циркуляторов C_1-C_4 высокого уровня мощности, переключаемых диодов D_1-D_3 , закороченных стенок прямоугольного волновода. Суммирующее устройство S_2 по своей конструкции аналогично поляризационному разделителю. Управляющие сигналы g_1-g_3 изменяют состояние переключаемых диодов, согласно табл. 1. Ток прямого смещения на с.в.ч.-диоде равен 100 мА, напряжение обратного смещения 100 В.

С.в.ч.-диоды вмонтированы перпендикулярно к широкой стенке прямоугольного волновода, при этом диоды D_1 и D_2 подключены к точкам d и f волноводной линии, удаленным от короткозамкнутой стенки волновода на расстояние $\lambda/4$ (λ –

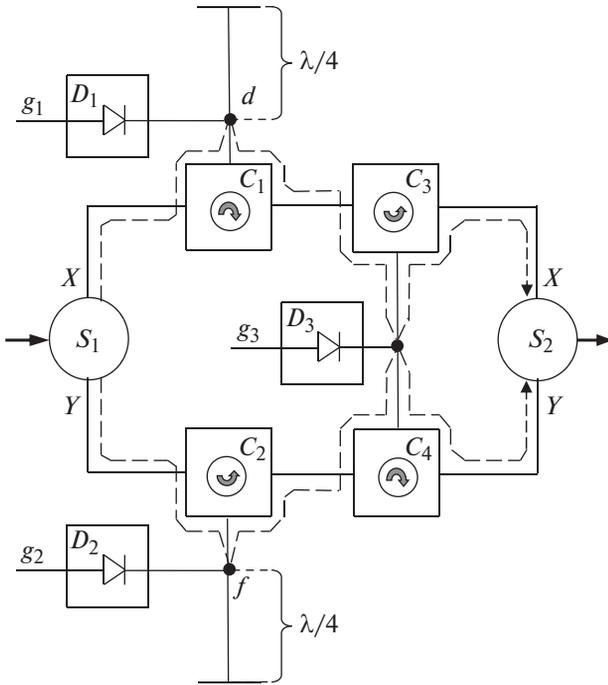


Рис. 6. Электрическая схема коммутируемого волноводного поляризационного модулятора неполяризованных радиосигналов. S_1 – поляризационный разделитель; S_2 – сумматор; C_1 – C_4 – Y -циркуляторы; D_1 – D_3 – переключаемые диоды; X, Y – выходы поляризационного разделителя и входы сумматора; g_1 – g_2 – управляющие входы диодов.

длина волны в волноводе). При изменении состояния диодов D_1 и D_2 x - и y -компоненты поступающей радиоволны отражаются либо от точек d и f , либо от короткозамкнутых стенок волновода, приобретая при этом регулируемый фазовый сдвиг. При открытом диоде D_3 x -компонента поступающей радиоволны проходит на X -вход сумматора, а y -компонента – на Y -вход сумматора. При закрытом диоде D_3 x -компонента поступающей радиоволны проходит на Y -вход сумматора, а y -компонента – на X -вход сумматора. Длина волноводной линии, соединяющей X -выход разделителя и X -вход сумматора, в случае отражения x -компоненты радиоволны от точки d кратна λ и равна длине волноводной линии, соединяющей

Y -выход разделителя и Y -вход сумматора, в случае отражения y -компоненты радиоволны от точки f .

В первом режиме модуляции (см. табл. 1) с X -выхода поляризационного разделителя на X -вход сумматора проходит x -компонента электромагнитной волны, приобретая нулевой фазовый сдвиг при отражении от точки d , а с Y -выхода поляризационного разделителя на Y -вход сумматора – y -компонента электромагнитной волны, приобретая нулевой фазовый сдвиг при отражении от точки f . При этом на выходе сумматора формируется электромагнитная волна, состояние поляризации которой описывает вектор Стокса $(I, Q, U, V)^T$.

Во втором режиме модуляции с X -выхода поляризационного разделителя на X -вход сумматора проходит x -компонента электромагнитной волны, приобретая нулевой фазовый сдвиг при отражении от точки d , а с Y -выхода поляризационного разделителя на Y -вход сумматора – y -компонента электромагнитной волны, приобретая фазовый сдвиг 180° при отражении от закороченной стенки волновода. При этом на выходе сумматора формируется электромагнитная волна, состояние поляризации которой описывает вектор Стокса $(I, Q, -U, -V)^T$.

В третьем режиме модуляции с X -выхода поляризационного разделителя на Y -вход сумматора проходит x -компонента электромагнитной волны, приобретая нулевой фазовый сдвиг при отражении от точки d , а с Y -выхода поляризационного разделителя на X -вход сумматора – y -компонента электромагнитной волны, приобретая нулевой фазовый сдвиг при отражении от точки f . При этом на выходе сумматора формируется электромагнитная волна, состояние поляризации которой описывает вектор Стокса $(I, -Q, U, -V)^T$.

В четвертом режиме модуляции с X -выхода поляризационного разделителя на Y -вход сумматора проходит x -компонента электромагнитной волны, приобретая нулевой фазовый сдвиг при отражении от точки d , а с Y -выхода поляризационного разделителя на X -вход сумматора – y -компонента электромагнитной волны, приобретая фазовый сдвиг 180° при отражении от закороченной стенки волновода. При этом на выходе сумматора формируется электромагнитная волна, состояние поляризации которой описывает вектор Стокса $(I, -Q, -U, V)^T$.

За интервал времени, равный L , коммутируемый волноводный поляризационный модулятор формирует неполяризованный радиосигнал, согласно (5). За интервал времени NL ($N = 1, 2, \dots, 21$) модулятор с подключенным к входу управляемым диодным волноводно-планарным поляризатором формирует неполяризованный радиосигнал, со-

Таблица 1. Режимы управления поляризационным модулятором

Режим	D_1	D_2	D_3
1	Открыт	Открыт	Закрыт
2	Открыт	Закрыт	Закрыт
3	Открыт	Открыт	Открыт
4	Открыт	Закрыт	Открыт

Таблица 2. Поляризационные параметры входного и выходного радиосигналов

Поляризация входного радиосигнала	Параметры Стокса выходных радиосигналов, кВт			
	I_{cp}	Q_{cp}	U_{cp}	V_{cp}
Линейная	5.11	0.18	0.16	0.13
Эллиптическая с $\alpha = -22.5^\circ$ и $\beta = 0^\circ$ левого направления вращения	5.03	0.16	0.12	0.15
Круговая поляризация правого направления вращения	4.94	0.13	0.17	0.14

гласно (6). В зависимости от вида электромагнитной волны, генерируемой передатчиком, создаваемый неполяризованный радиосигнал будет иметь непрерывный или импульсный характер. Управляя одновременно состоянием диодов D_1 и D_2 , возможно формирование неполяризованного радиосигнала с учетом его фазовых характеристик, что можно использовать при измерении фазовых свойств радиолокационных объектов.

С целью исследования рабочих характеристик создан опытный образец коммутируемого волноводного поляризационного модулятора на основе типовых волноводных приборов. С помощью диодного волноводно-планарного поляризатора задавались линейная и эллиптическая поляризация левого направления вращения и круговая поляризация правого направления вращения импульсов с.в.ч. Для этого диодный поляризатор был подключен к выходу импульсного с.в.ч.-генератора, развивающего на частоте 9.37 ГГц пиковую мощность 9 кВт при частоте посылки импульсов 400 Гц и длительности импульса 3.5 мкс. К выходу диодного поляризатора подключен коммутируемый волноводный модулятор. В табл. 2 приведены значения параметров Стокса радиосигналов на выходе модулятора, полученные при усреднении результатов измерений на интервале времени, равном интервалу четырех посылок импульсов с.в.ч.-генератором.

Полученные данные свидетельствуют о том, что нормированные значения параметров Стокса выходного радиосигнала в зависимости от поляризации входного радиосигнала составляют: $I_{cp} = 1$, $Q_{cp} = 2.6-3.5\%$, $U_{cp} = 3.1-3.4\%$, $V_{cp} = 2.5-2.8\%$.

Технические характеристики коммутируемого волноводного поляризационного модулятора приведены ниже:

- полоса рабочих частот 9.2–9.5 ГГц;
- тип переключательных с.в.ч.-диодов: 2A523A-4;
- тип Y-циркуляторов ФВЦН2-60А;
- формируемые радиосигналы – неполяризованные;
- коэффициент стоячей волны ≤ 1.2 ;
- время переключения 1.3 мкс;
- импульсная мощность 9 кВт;

- средняя с.в.ч.-мощность 13 Вт;
- диаметр и сечение волновода: $\varnothing 22$ мм, 23×10 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Неполяризованные электромагнитные волны можно представить в виде векторной суммы поляризованных волн одинаковой интенсивности, формируемых раздельно во времени и различающихся значениями углов эллиптичности и ориентации. Использование неполяризованных зондирующих радиосигналов при внешней калибровке радиолокационного поляриметра позволяет определить погрешность измерения параметров Стокса рассеянной радиоволны. Диодный волноводно-планарный поляризатор обладает скоростью переключения 1 мкс при реализации дискретной поляризационной модуляции радиосигналов из пространства 21 поляризационного состояния и может использоваться при проведении радиолокационных измерений или в составе модулятора неполяризованных радиосигналов. Коммутируемый дискретный волноводный модулятор способен формировать мощные неполяризованные радиосигналы, для которых значения параметров Q , U , V составляют 2.5–3.5% от уровня параметра I .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Татаринов В.Н., Татаринов С.В., Лигтхарт Л.П. Введение в современную теорию поляризации радиолокационных сигналов. Т. 1. Поляризация плоских электромагнитных волн и ее преобразования. Монография. Томск: Томский государственный университет, 2006.
2. Канарейкин Д.Б., Павлов Н.Ф., Потехин В.А. Поляризация радиолокационных сигналов. М.: Сов. радио, 1966.
3. Гусев К.Г., Филатов А.Д., Сополов А.П. Поляризационная модуляция. М.: Сов. радио, 1974.
4. Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А. Поляризация радиоволн. Кн. 3. Радиополяриметрия сложных по структуре сигналов. М.: Радиотехника, 2008.

5. *Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А.* Поляризация радиоволн. Кн. 2. Радиолокационная поляриметрия. М.: Радиотехника, 2007.
6. *Шошин Е.Л.* // Измер. техника. 2021. № 3. С. 45. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-3-45-52>
7. *Козлов А.И., Татаринов В.Н., Татаринов С.В.* Введение в современную теорию поляризации радиолокационных сигналов. Т. 2. Статистическая теория поляризации. Монография. Томск: Томский государственный университет, 2007.
8. *Кобак В.О.* Радиолокационные отражатели. М.: Сов. радио, 1975.
9. *Сычев А.Н.* Управляемые СВЧ-устройства на многомодовых полосковых структурах. Томск: Томский государственный университет, 2001.
10. Полупроводниковые приборы. Сверхвысокочастотные диоды. Справочник / Под ред. Б.А. Наливайко. Томск: МГП "Раско", 1992.

УДК 621.3

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ РАДИОЧАСТОТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

© 2021 г. Е. И. Тренкаль^а, В. С. Поздняков^а, А. Г. Лошилов^а, Н. Д. Малютин^{а,*}^а *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 40***e-mail: ndm@main.tusur.ru*

Поступила в редакцию 19.01.2021 г.

После доработки 03.06.2021 г.

Принята к публикации 07.06.2021 г.

Описан стенд для исследования обратного рассеяния радиочастотных импульсов длительностью 1.75–3.1 нс с изменяемой от 5.3 до 8.8 ГГц частотой заполнения. Импульсы формируются измерительным устройством и излучаются передающей широкополосной антенной с линейной поляризацией. Сигнал обратного рассеяния принимается приемной антенной системой, состоящей из собственной антенны, поляризационного разделителя сигналов и высокочастотного переключателя. Далее сигнал усиливается, обрабатывается в приемном канале измерительного устройства и регистрируется п.э.в.м. Стенд позволяет исследовать свойства диэлектрических и других материалов, метаматериалов, защитных покрытий антенн и конструкций, а также различных негабаритных объектов в лабораторных условиях. Кроме того, стенд может быть использован при постановке экспериментальных работ, для реализации которых требуется излучение и прием электромагнитных волн, возбуждаемых радиочастотными импульсами наносекундной длительности.

DOI: 10.31857/S0032816221060069

ВВЕДЕНИЕ

Известно [1, 2], что при воздействии радиочастотных сигналов на сверхвысокочастотные (с.в.ч.) устройства в виде четырехполюсников смена направления передачи энергии с выхода на вход может приводить к неравенству коэффициентов передачи в этих опытах, т.е. к невязности исследуемого объекта. Мету невязности в данном случае обычно определяют из сравнения коэффициентов S_{12} и S_{21} [3] матрицы рассеяния:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Поскольку коэффициенты матрицы S комплексные, невязность устройств может быть следующих типов: амплитудная, фазовая, частотная (преобразование частоты, включая доплеровский сдвиг), поляризационная.

В отличие от четырехполюсных устройств, при исследовании отражений от различных объектов при их облучении электромагнитной волной определить свойство невязности нельзя, поскольку в этом случае есть вход, но нет выхода. При обратном рассеянии радиочастотной волны от объекта можно провести аналогию с двухполюсником, в котором часть энергии отражается от входа, а другая часть попадает внутрь. При

этом возбуждающая этот двухполюсник электромагнитная волна порождает в нем систему нормальных волн внутри волноведущей структуры и может через единственный “вход” переотразиться в сторону источника облучения. Отсюда понятно, что в случае изучения обратного рассеяния радиолокационными методами при измерении коэффициентов S_{12} и S_{21} получаем некоторое противоречие с классическим определением невязности. Поэтому при исследовании невязности обратного рассеяния определяют коэффициенты матрицы обратного рассеяния, схожие по смыслу с коэффициентами матрицы S , но определяемые по-иному [4–6]. Основой для этого являются параметры, с помощью которых описывается электромагнитная волна, отражаемая от объекта.

Одно из определений невязности матрицы рассеяния строится на сравнении амплитуд излученного и отраженного сигналов, получаемых при излучении и отражении волны с разной поляризацией. Обозначим вертикальную поляризацию через V , горизонтальную – через H . В работах [7, 8] матрицу обратного рассеяния определяют при смене поляризации излучаемой волны с H на V . При этом принимаемый сигнал в виде отраженной волны разделяют с помощью устройства поляризационной селекции (ортоплесера) на

компоненты H и V . В результате строится матрица обратного рассеяния:

$$S_p = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{VH} \\ S_{HV} & S_{VV} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где неравенство коэффициентов S_{VH} и S_{HV} является мерой невязимности по признаку поляризации.

Следует отметить, что полной аналогии между матрицами S и S_p нет, поскольку физический смысл коэффициентов разный. Невязимность при исследовании обратного рассеяния может быть определена как неравенство модулей коэффициентов матрицы обратного рассеяния $|S_{VH}| \neq |S_{HV}|$ и/или их аргументов $\arg(S_{VH}) \neq \arg(S_{HV})$. Если же мы выберем в качестве основного параметра амплитуду отраженного сигнала, то необходимо нормировать коэффициенты матрицы S_p по уровню сигнала от некоторого “идеального” отражателя. В качестве последнего может быть выбрана бесконечная металлическая стенка. При других видах поляризации излучаемого сигнала можно использовать более сложные поверхности отражающих объектов [9].

Свойство невязимности, в дополнение к рассмотренному признаку поляризации при изучении обратного рассеяния, может быть определено так же, как для четырехполюсников – по параметру частоты измеряемого отраженного сигнала вследствие преобразования частоты нелинейным объектом, а также доплеровского сдвига.

В ряде работ, посвященных исследованию процесса обратного рассеяния электромагнитных волн, теоретически и экспериментально показано существование объектов с невязимными свойствами обратного рассеяния [7, 8]. Введено понятие частично невязимного объекта и представлен алгоритм декомпозиции матрицы обратного рассеяния S_p такого объекта на симметричную и антисимметричную части. При этом антисимметричная часть инвариантна к параметрам поляризационного базиса описания S_p и во всех возможных базисах имеет вид антисимметричной матрицы. На основе результатов этих и других работ предложены устройства [8, 10–13], позволившие экспериментально подтвердить в лабораторных условиях и на полигоне радиолокационное наблюдение частично-невязимных объектов.

Измерения параметров, характеризующих невязимность отраженных от различных объектов волн, рассматривались во многих публикациях, например [14–17]. В работе [18] представлен обзор с.в.ч.-антенн, устройств, материалов и сред с невязимными свойствами, которые имеют уникальные характеристики и перспективны для

применения на практике. При исследовании с.в.ч.-параметров обратного рассеяния используют достаточно сложные измерения в безэховых камерах с применением векторных анализаторов цепей и другой аппаратуры [9, 13]. Нами была поставлена задача создания стенда для исследования частично невязимного обратного рассеяния при воздействии коротких радиочастотных импульсов в условиях лаборатории.

В данной работе представлены описания структурной схемы такого стенда и принципа его работы, а также результаты измерения физической модели среды, представляющей собой ферритовый брусок, помещенный между двумя диэлектрическими подложками.

ОПИСАНИЕ СТЕНДА

Структурная схема стенда (рис. 1) содержит измерительное устройство; передающую антенну A_1 , соединенную с выходом 1 радара, генерирующего радиочастотный импульс; приемную антенну A_2 , размещенную на входе поляризационного разделителя PP , выходы которого соединены через с.в.ч.-переключатель и малошумящий усилитель $MШУ$ с входом 2 радара измерительного устройства; персональный компьютер $ПК$. Измерительное устройство включает в себя микроконтроллер и формирователь питающих напряжений.

Передающая A_1 и приемная A_2 антенны ориентированы относительно отражающего круглого металлического экрана так, чтобы их оптические оси пересекались под небольшим углом α на объекте исследований $ОИ$. В качестве экрана использовался диск диаметром 240 мм из нержавеющей стали, закрытый диэлектрической пластиной из полиэтилена толщиной 5 мм, на которой закрепляют исследуемые объекты – модели среды. Металлический отражатель приводит в движение шаговым двигателем с управлением от персонального компьютера и контролем угла поворота с минимальным шагом 3° .

Микроконтроллер измерительного устройства предназначен для управления режимом измерения радара, временного хранения измеряемых данных и их передачи через порт USB в персональный компьютер. Переключение выходов поляризационного разделителя осуществляется персональным компьютером. Управление измерительным устройством и стендом в целом осуществляется с помощью разработанного специализированного программного обеспечения.

Микросхема радара содержит генератор тестового сигнала, приемник, вход и выход синхронизации. Тактирование может быть выполнено от внутреннего генератора или от внешнего источ-

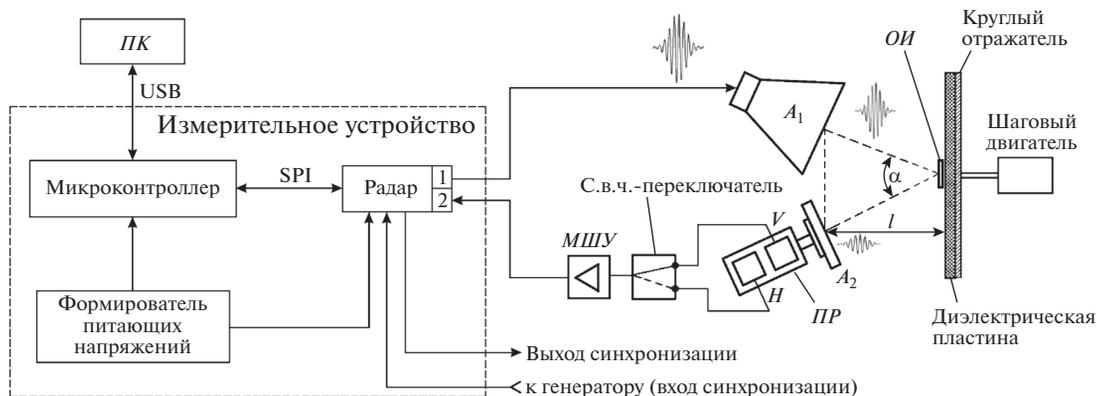


Рис. 1. Структурная схема стенда для исследования частично невязанного обратного рассеяния. 1 – выход радиочастотного сигнала; 2 – вход принимаемого отраженного от объекта сигнала; A_1, A_2 – соответственно передающая и приемная антенны; ПР – поляризационный разделитель с выходом горизонтальной H и вертикальной V поляризации принимаемого электромагнитного сигнала; МШУ – малошумящий с.в.ч.-усилитель; ОИ – объект исследований; ПК – персональный компьютер.

ника через вход синхронизации. Радар имеет следующие технические характеристики:

– длительность сигнала, нс	1.75–3.1
– центральная частота, ГГц	5.3–8.8
– частота дискретизации, ГГц	38
– чувствительность, мВ	0.1
– динамический диапазон, дБ	60
– максимальная дальность измерения, м	21.7

Радар формирует радиоимпульс с амплитудой 0.6 В, параметры которого определяются настройками генератора.

Внешний вид стенда показан на рис. 2.

Тип поляризации излучаемой волны, вертикальная или горизонтальная, задается ориентацией передающей антенны A_1 , в качестве которой взята антенна A-INFOMW LB-8180-NF (0.8–18 ГГц). Установка исследуемого объекта на вращающемся диске обеспечивает поворот плоскости поляризации излучаемой электромагнитной волны относительно исследуемого объекта в пределах 0° – 360° . При этом изменение плоскости поляризации за счет вращения антенны A_1 имеет вспомогательный характер и, как показала практика, вносит существенные погрешности в измерения.

С помощью приемной гофрированной рупорной антенны A_2 принимается отраженный от исследуемого объекта сигнал с неизвестным соотношением между вертикальной и горизонтальной составляющими поляризации. Поляризационный разделитель [19–24] позволяет декомпозировать эти составляющие и передать одну из них с помощью с.в.ч.-переключателя NARDA 143DT через волноводно-коаксиальные разъемы и усилитель на приемный канал 2 приемопередатчика. Переключением выхода поляризационного раз-

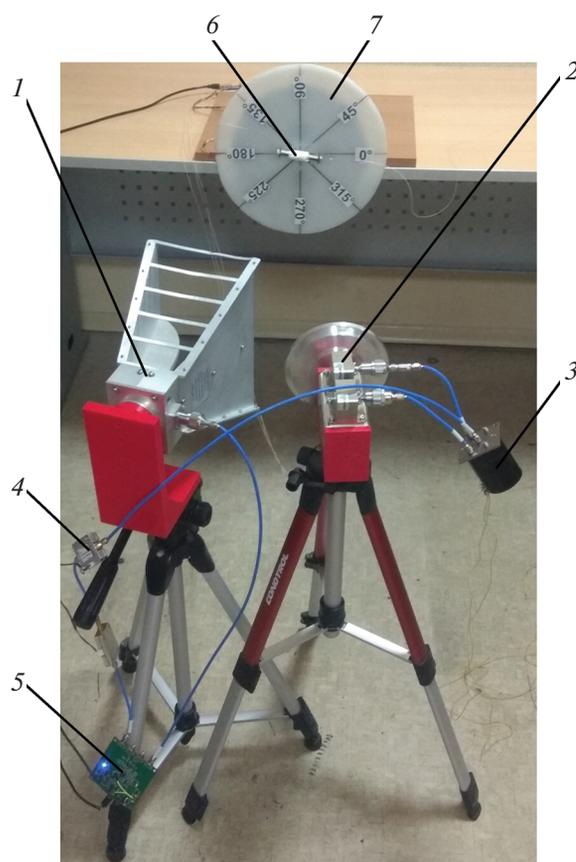


Рис. 2. Фотография стенда. 1 – передающая антенна A_1 ; 2 – сборка приемной антенны A_2 и поляризационного разделителя; 3 – с.в.ч.-переключатель сигналов с выходов H, V поляризационного разделителя на вход малошумящего усилителя 4; 5 – приемный канал измерительного устройства; 6 – исследуемый объект, установленный на диске 7, видимая поверхность которого выполнена из диэлектрика, закрепленного на металлическом диске-отражателе (тыльная сторона).

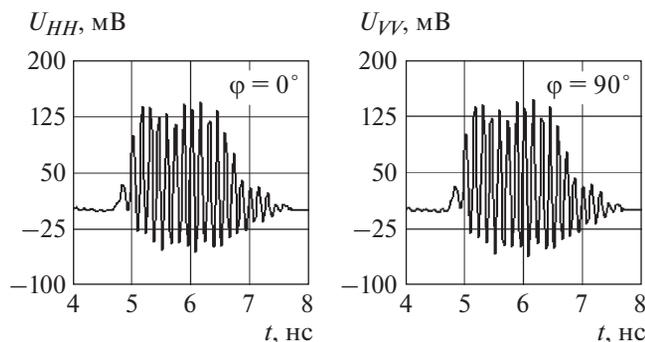


Рис. 3. Осциллограммы напряжений U_{HH} и U_{VV} на выходе измерительного устройства при измерении S_p при углах поворота $\varphi = 0^\circ$ и 90° металлического диска.

делителя измеряется другая составляющая поляризации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Калибровка

Перед началом измерений различных объектов проводилась калибровка стенда путем измерения отраженного сигнала от круглого отражателя при его вращении от 0° до 180° в отсутствие на нем испытуемого объекта. Также проводились измерения с использованием антенны A_1 , зафиксированной в специально разработанной системе крепления, изготовленной с помощью 3D-печати. Выполнялся поворот передающей антенны A_1 от исходного положения на углы 45° и 90° . Указанные положения антенны A_1 соответствовали поляризации излучаемой электромагнитной волны: горизонтальной (H), под углом 45° и вертикальной (V). В приемном канале использовались выходы H и V поляризационного разделителя, обеспечивающие сочетания поляризации передача–прием в следующих вариантах: HH , HV , VV , VH , $45^\circ H$, $45^\circ V$.

Однако поворот антенны A_1 при проведении экспериментов приводил к изменениям угла α и расстояния l , а следовательно, к неприемлемым погрешностям измерения. Такой способ изменения поляризации требует дополнительных калибровочных измерений в каждом положении антенны A_1 . Поэтому в процессе измерений использовалось вращение диска и соответственно объекта исследований (см. рис. 1, 2) с помощью шагового двигателя относительно фиксированной плоскости поляризации электромагнитного поля, излучаемой антенной A_1 .

Целью калибровки являлось определение погрешности при измерении матрицы обратного рассеяния S_p , которая для вращающегося диска должна максимально близко удовлетворять усло-

виям $S_{HH} = S_{VV}$, $S_{HV} = S_{VH} = 0$. Измерения коэффициентов S_p проводились при вращении диска от 0° до 180° . На рис. 3 показаны осциллограммы напряжений U_{HH} и U_{VV} на выходе измерительного устройства при углах поворота $\varphi = 0^\circ$ и 90° .

Аналогичные осциллограммы получены при $\varphi = 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ для U_{VV}, U_{VH}, U_{HV} . Зависимость U_{HH} от угла φ измерялась при неизменной ориентации передающей антенны, соответствующей поляризации H , при этом сигнал снимался с выхода H поляризационного разделителя. Напряжение U_{HV} снималось с выхода V поляризационного разделителя при различных углах φ и неизменном положении антенны A_1 . Определено среднее значение напряжения U_{HHm} , равное 145.0 мВ, и максимальное отклонение от среднего $\Delta U_{HH} = 2.9$ мВ, что составило 2% от U_{HHm} . При измерении U_{HV} получено среднее значение $U_{HVm} = 3.8$ мВ в диапазоне φ от 0° до 180° и максимальное абсолютное отклонение от среднего $\Delta U_{HV} = 4.9$ мВ при $\varphi = 180^\circ$. На основании анализа погрешностей измерения коэффициентов S_{HV}, S_{VH} был сделан вывод о целесообразности перехода от горизонтальной поляризации к вертикальной при в интервале углов $\varphi = 0^\circ - 180^\circ$.

При указанных ограничениях на угол φ динамический диапазон при измерениях S_{HH}, S_{HV}, S_{VH} составит:

$$D_{HH} = 20 \log(\max(\Delta U_{HH})/U_{HHm}) = -34.0 \text{ дБ}, \quad (3)$$

$$D_{VH, HV} = 20 \log(\max(\Delta U_{HV})/U_{HHm}) = -33.7 \text{ дБ}. \quad (4)$$

В результате измерений получена нормированная по U_{HHm} матрица рассеяния S_{pn} диска в диапазоне $\varphi = 45^\circ - 135^\circ$:

$$S_{pn} = \frac{2}{(S_{HH} + S_{VV})} \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.992 & 0.021 \\ 0.018 & 1.008 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Объект исследования, результаты измерений

В качестве объекта исследований взят ферритовый брусок (материал 1СЧ12) размером $8 \times 4 \times 70$ мм, помещенный между двумя диэлектрическими подложками с относительной проницаемостью $\epsilon_r = 9.8$ размером $8 \times 1 \times 64$ мм. Брусок размещали плоскостью 4×70 мм на диэлектрической пластине вдоль линии 0° (см. рис. 2, поз. 6), высота бруска над поверхностью диска составляла 8 мм (рис. 4). Подмагничивание феррита осуществлялось неодимовым магнитом размером $6 \times 4 \times 6$ мм в поперечном направлении по центру бруска.

На рис. 5 приведены сигналы в виде временных зависимостей напряжений на выходе микроконтроллера при разных углах наклона ферритового

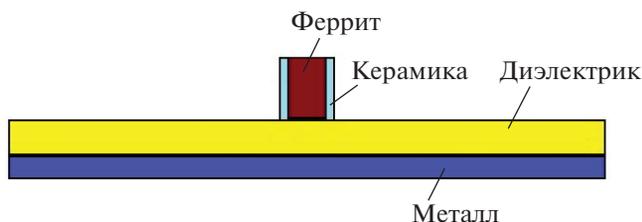


Рис. 4. Испытуемый объект, содержащий ферромагнитное включение и размещенный на отражателе с диэлектрической пластиной.

бруска, задаваемых поворотом диска-отражателя, и при переключении выходов поляризационного разделителя U_{HH}, U_{HV}, U_{VH} .

Измерения позволили получить матрицу обратного рассеяния в абсолютных значениях напряжений и в нормированном виде (нормирование проводилось по коэффициенту $0.5(U_{HH} + U_{VV})$):

$$S_{pn} = \frac{2}{(U_{HH} + U_{VV})} \begin{bmatrix} U_{HH} & U_{HV} \\ U_{VH} & U_{VV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.002 & 0.139 \\ 0.041 & 0.998 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Оценка коэффициентов S_{pn} в (6), исходя из превышения порога чувствительности $D_{VH, HV}$ (4), дает следующие величины: $D_{HV} = -17.14$ дБ, $D_{VH} = -27.744$ дБ. Рассчитанный коэффициент невязности [7, 8] составил $\xi = 0.089$, что позволяет сделать вывод о частичной невязности матрицы обратного рассеяния исследуемой физической модели.

В разработанной программе для обработки результатов измерений предусмотрено проведение спектрального анализа временных зависимостей, что дает возможность получить матрицы обратного рассеяния в комплексной форме и осуществить их анализ с определением группы из шести инвариантов Хойнена–Эйлера: $\varphi, m, \theta, \varepsilon, \nu, \gamma$ – и двух поляризационных инвариантов ζ, η , имеющих угловую размерность [25–27].

Проведены измерения матрицы обратного рассеяния ферритового бруска (см. рис. 4) при его продольном намагничивании посредством соленоида длиной 16 мм. Соленоид был расположен поверх бруска и закрывал его участок ± 9 мм от центра от падающей электромагнитной волны. При токе подмагничивания 1.5 А получена нормированная матрица рассеяния:

$$S_{pn} = \begin{bmatrix} 1.003 & 0.177 \\ 0.019 & 0.997 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

а после применения преобразования Фурье к исходным временным зависимостям напряжений $U_{HH}, U_{VV}, U_{VH}, U_{HV}$ – комплексная нормированная матрица:

$$\bar{S}_{pn} = \begin{bmatrix} 0.802 + 0.597i & 0.147 + 0.054i \\ 0.019 + 8.72i \cdot 10^{-3} & 0.821 + 0.571i \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Используя (8), определен угол невязности $\zeta = 5.03^\circ$ и разность абсолютных фаз симметричной и антисимметричной частей матрицы рассеяния $\zeta = 20.6^\circ$ [27].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный стенд позволяет излучать, принимать, оцифровывать и записывать отклики от исследуемого объекта при изучении параметров различных материалов и физических моделей различных сред в режиме отражения электромагнитной волны радиоимпульса длительностью в интервале 1.75–3.1 нс при изменяемой от 5.3 до 8.8 ГГц частоте заполнения. Получаемые данные в виде зависимостей напряжения от времени дают возможность при последующей обработке записываемых сигналов проводить построение и анализ матриц обратного рассеяния в лабораторных условиях. Приведенные примеры измерений демонстрируют возможности стенда, ограниченные, в основном, величиной развязки H и V каналов поляризационного разделителя и неидеаль-

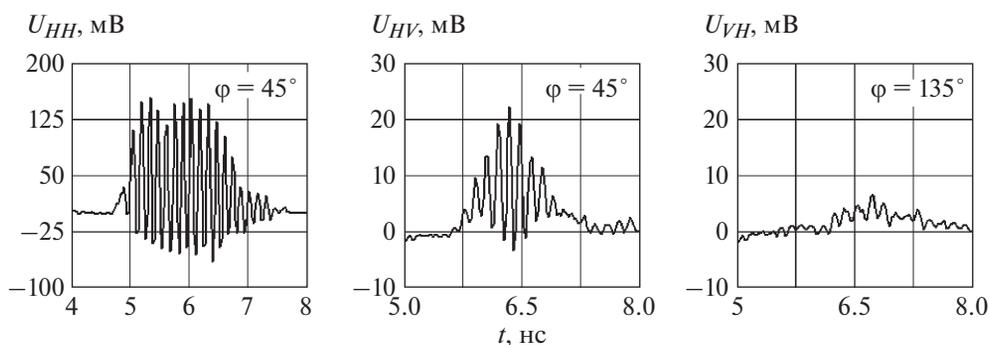


Рис. 5. Временные зависимости напряжений на выходе микроконтроллера при углах наклона ферритового бруска $\varphi = 45^\circ$ и 135° и переключении выходов поляризационного разделителя.

ностью отражателя, на котором устанавливается объект исследования. Порог чувствительности составил –33.7 дБ. Стенд применим для исследования свойств обратного рассеяния устройств, метаматериалов, защитных покрытий антенн и конструкций, диэлектрических и других материалов, а также при постановке экспериментальных работ, для реализации которых требуется излучение и прием электромагнитных волн, возбуждаемых радиочастотными импульсами с указанными параметрами.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны к.т.н. М.О. Коноваленко и инженеру В.В. Соколову, а также инженерам М.В. Дугину и В.А. Титову за разработку и измерение параметров соответственно блока приемной антенны и поляризационного разделителя, а также малошумящего усилителя, изготовленных в АО “НПФ “Микран”.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект FEWM-2020-0039 от 01.03.2020. Экспериментальные исследования проведены с применением оборудования ЦКП “Импульс”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Carlin H.* // IRE Transactions on Circuit Theory. 1956. V. 3. № 2. P. 88. <https://doi.org/10.1109/tct.1956.1086297>
2. *Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р.* Синтез четырехполюсников и восьмиполюсников на СВЧ. Издание 2-е, переработанное и дополненное. М.: Связь, 1971.
3. *Сазонов Д.М.* Антенны и устройства СВЧ. М.: Высшая школа, 1988.
4. *Канарейкин Д.Б., Павлов Н.Ф., Потехин В.А.* Поляризация радиолокационных сигналов. М.: Сов. радио, 1966.
5. *Богородский В.В., Канарейкин Д.Б., Козлов А.И.* Поляризации рассеянного и собственного радиоизлучения земных покровов. Л.: Гидрометеоиздат, 1981.
6. *Boerner W.M., Jamaguchi Y.* // Aerospace and Electronic Systems Magazine. 1990. V. 5(6). P. 3. <https://doi.org/10.1109/62.54634>
7. *Хлусов В.А.* // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 10. С. 1441.
8. *Хлусов В.А., Воробьев П.В.* Препринт ИЯФ 95-106. Новосибирск, 1995.
9. *Khristenko A.V., Konovalenko M.O., Rovkin M.E., Khlusov V.A., Marchenko A.V., Sutulin A.A., Maluyutin N.D.* // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2018. V. 66. № 4. P. 1977. <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2800640>
10. *Бутько В.А., Доценко В.В., Гонтер В.Я., Носов Д.М., Осипов М.В., Ровкин М.Е., Сурков А.С., Хлусов В.А.* Патент № 2413185 РФ // Бюл. № 6. Оpubл. 27.02.2011.
11. *Осипов М.В., Хлусов В.А.* Патент RU2398318 // Бюл. № 24. Оpubл. 27.08.2010.
12. *Доценко В.В., Осипов М.В., Хлусов В.А.* Патент RU2398317 // Бюл. № 24. Оpubл. 27.08.2010.
13. *Бутько В.А., Носов Д.М., Сурков А.С., Хлусов В.А.* // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2006. № 6. С. 66.
14. *Taravati S., Chamanara N., Caloz C.* // Phys. Rev. B, Condens. Matter. 2017. V. 96. № 16. P. 165. <https://doi.org/10.1103/Phys-RevB.96.165144>
15. *Sukhanyuk M., Shoshin E.L.* // Proc. of the 9th International Scientific and Practical Conference of Students. Post-graduates Modern Techniques and Technologies (7-11 April 2003) MTT 2003. Tomsk, 2003. P. 71. <https://doi.org/10.1109/SPCMTT.2003.1438135>
16. *Zang W.J., Wang X.T., Alvarez-Melcon A.A., Gomez-Diaz J.S.* <https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2947847> [Online]: <https://arxiv.org/abs/1906.06418>
17. *Guo X., Ding Y., Duan Y., Ni X.* // Light: Science and Applications. 2019. V. 8. Article number 123. <https://doi.org/10.1038/s41377-019-0225-z>
18. *Сычев А.Н., Малютин Н.Д.* // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. № 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.11.2>
19. *Konovalenko M.O., Sokolov V.V., Trenkal E.I., Maluyutin N.D.* // International Scientific Conference CAMSTech-2020: Advances In Material Science And Technology. (Krasnoyarsk, Russia, 31 июля 2020) IOP Publishing, 2020. P. 052018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/919/5/052018>
20. *Крылов Ю.В.* // Научные технологии. 2016. Вып. 8(17). С. 13.
21. *Uwe Rosenberg, Ralf Beyer* // Proc. of the 41st European Microwave Conference. 2011. P. 663. <https://doi.org/10.23919/EuMC.2011.6101784>
22. *Ali Imran Sandhu.* Master of Science Thesis in the program Communication Antenn Group. Department of Signals & Systems Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden, 2010.
23. *Narayanan Gopal* // Thirteenth International Symposium on Space Terahertz Technology. Harvard University, March 2002. P. 505.
24. *Sarasa P., Díaz-Martín M., Angevain J.-C., Mangenot C.* // 32nd ESA Antenna Workshop. Proc. of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EU-CAP) 2011. P. 1181.
25. *Karnychev V., Khlusov V., Lighthart L.P., Sharygin G.* // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. 2004. V. 42. № 3. P. 529. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.817807>
26. *Карнышев В.И., Лутхарт Л.П., Хлусов В.А., Шарыгин Г.С.* // Сб. докладов по тематике “Радиолокация и навигация” Международной н.-т. конф. “Радиолокация, навигация, связь”. (RLNC-2002, Воронеж) 2002. С. 85.
27. *Karnychev V., Lighthart L., Khlusov V., Sharygin G.* // Proc. 14th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications. MIKON-2002. (IEEE Cat.No.02EX562) P. 572. <https://doi.org/10.1109/mikon.2002.1017912>

ГЕНЕРАТОР ГАЗА НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО ТИТАНА В СОСТАВЕ
ОТПАЯННЫХ КАМЕР ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА© 2021 г. Д. И. Юрков^а, В. А. Лавренин^б, Б. Д. Лемешко^а,
Ю. В. Михайлов^а, И. А. Прокуратов^а, А. К. Дулатов^{а,*}^а *Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова
Россия, 127055, Москва, ул. Сущевская, 22*^б *1425 Военное представительство Министерства обороны РФ, Россия, Москва***e-mail: akdulatov@vniia.ru*

Поступила в редакцию 01.06.2021 г.

После доработки 30.06.2021 г.

Принята к публикации 02.07.2021 г.

Рассмотрено использование поглотителя газа на основе пористого титана в качестве генератора газа в составе герметичного электровакуумного прибора – камеры плазменного фокуса. Последние используются в качестве импульсных источников нейтронов наносекундной длительности в составе нейтронных генераторов. Для генерации нейтронов внутренний объем камер заполняется дейтерием либо дейтерий-третиевой смесью. Рассмотрены физические основы использования генератора газа, обеспечивающего работу камер плазменного фокуса при наполнении дейтерием либо дейтерий-третиевой смесью в диапазоне давлений 1–30 Торр при объеме камер от 10 до 1000 см³. Генератор газа позволяет осуществлять до нескольких тысяч рабочих циклов выделения и поглощения газа в объеме камеры при времени выделения газа порядка нескольких минут. Безопасность использования герметичных камер плазменного фокуса с дейтерий-третиевым наполнением обеспечивается тем, что радиоактивный тритий находится в титане в связанном состоянии и выделяется в объеме камеры при нагревании насыщенного рабочим газом пористого титана лишь на время работы в генераторе нейтронов.

DOI: 10.31857/S0032816221060124

ВВЕДЕНИЕ

Камеры плазменного фокуса (п.ф.) являются газонаполненными плазменными приборами, разработанными для генерации импульсного нейтронного и рентгеновского излучений с длительностью импульсов порядка нескольких десятков наносекунд. Камеры п.ф. используются в качестве нагрузки генераторов импульсных токов: при протекании через электроды камер разрядного тока в сотни килоампер внутри камер формируется с последующим сжатием на оси газовая токоплазменная оболочка. Сжатие оболочки приводит к формированию нецилиндрического Z-пинча [1] – импульсного источника ионизирующих излучений. На практике наиболее распространено применение камер п.ф. в составе генераторов нейтронного излучения [2], для чего внутренний объем камер заполняется дейтерием (D) или дейтерий-третиевой смесью (D-T) для генерации нейтронов с энергиями 2.5 и 14 МэВ соответственно.

Камеры п.ф. с наполнением дейтерием нашли широкое распространение в качестве лабораторных импульсных источников нейтронов с энерги-

ей 2.5 МэВ для исследования процессов термоядерного синтеза, материаловедения, радиографии, контроля работы регистраторов импульсного излучения и др. Преимуществом работы с дейтерием является его доступность и относительная простота эксплуатации. Для заполнения внутреннего объема камер п.ф. дейтерием в конструкции камер предусмотрен вакуумный вентиль, подключаемый к вакуумной системе для откачки объема и наполнения рабочим газом. Однако ядерная реакция $D(d, n)^3\text{He}$ [3] обеспечивает относительно малый выход нейтронного излучения. Для получения больших выходов нейтронов используется реакция дейтерия с тритием, сопровождающаяся генерацией нейтронов с энергией 14 МэВ. Сеченные реакции $D(t, n)^4\text{He}$ больше почти на два порядка по сравнению с сечением $D + D$, соответственно пропорционально увеличивается выход нейтронов. У опытных образцов импульсных нейтронных генераторов выход нейтронов с энергией 14 МэВ лежит в диапазоне 10^{10} – 10^{12} нейтронов/импульс [4]. Причем генератор 14-мегаэлектронвольтных нейтронов с выходом 10^{10} нейтронов/импульс на основе камеры п.ф. является компакт-

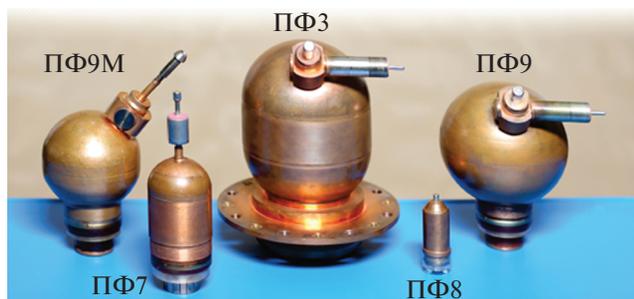


Рис. 1. Внешний вид камер п.ф.: ПФ7 (10^8 – 10^{10} нейтронов/импульс), ПФ3 (10^{10} – 10^{12} нейтронов/импульс), ПФ9 (10^9 – 10^{11} нейтронов/импульс) – отпаянной конструкции с г.г.; ПФ8 (10^5 – 10^7 нейтронов/импульс) – отпаянной конструкции без г.г.; ПФ9М ($5 \cdot 10^8$ – $5 \cdot 10^{10}$ нейтронов/импульс) – с вакуумным вентилем.

ным, практически настольным, источником, в то время как аналогичный генератор с камерой п.ф., заполненной дейтерием, будет размером с небольшое испытательное помещение.

Основной проблемой при работе с D-T-смесью является радиоактивность трития [5], поскольку это приводит к повышенным требованиям по безопасности камеры п.ф. как радиоактивного источника. Вариант заполнения внутреннего объема камер через вакуумный вентиль является неприемлемым ввиду возможности утечек радиоактивного трития. Для работы с D-T-смесью рассмотрен вариант использования генератора газа (г.г.) на основе пористого титана или сплава в качестве поглотителя водорода, способного поглощать изотопы водорода и выделять их обратно при нагревании. Генератор газа необходимо герметично встраивать в конструкцию камеры п.ф. В этом случае в штатном режиме работы D-T-смесь будет находиться только во внутреннем объеме камеры.

Конструктивно камера п.ф. является соосной двухэлектродной разрядной системой, в которой, как правило, используются электроды из бескислородной меди, разделенные керамическим изолятором. При протекании тока через электроды камеры п.ф. рабочий газ во внутреннем объеме ионизируется в токоплазменной оболочке. Оболочка, в свою очередь, движется практически вдоль всей поверхности электродов, ионизируя газ с последующим сжатием его в плотный высокотемпературный пинч на оси камеры. Поскольку значение разрядного тока составляет сотни килоампер, то срабатывание камеры п.ф. сопровождается эрозией электродов и выделением примесей. Поэтому важным требованием к герметичной конструкции камер является отсутствие примесей во внутреннем объеме камеры.

В данной работе показаны возможность применения и особенность работы встроенного г.г. в составе различных камер п.ф., приведены практические примеры реализации камер п.ф. со встроенным г.г. Внешний вид герметичных камер п.ф. производства ВНИИА приведен на рис. 1.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕНЕРАТОРА ГАЗА

На основании специфики работы нейтронных генераторов с камерами п.ф. можно сформулировать основные требования, предъявляемые к г.г.:

- взаимодействие рабочего вещества г.г. с изотопами водорода для поглощения и выделения рабочего газа (использование сплава-накопителя водорода);

- реверсивность, т.е. возможность работы ≥ 1000 циклов без изменения поглощающей и выделяющей способности структуры;

- возможность задавать и поддерживать давление выделившегося газа в камере п.ф. в пределах 1–30 Торр;

- малое время (порядка нескольких минут) выделения и поглощения газа г.г. для обеспечения простоты, удобства и безопасности работы;

- помимо выделения газа, рабочий элемент г.г. должен выполнять функции поглотителя различных примесей типа O_2 , CO , CO_2 , CN и пр., т.е. выполнять роль геттера;

- компактность для возможности размещения г.г. в составе камеры п.ф.

Рассмотрим основные физические процессы, протекающие в металлических сплавах-накопителях изотопов водорода. В первом приближении взаимодействие водорода с материалом сплава-накопителя включает в себя следующие шесть последовательных стадий [6]: массоперенос водорода в газовой фазе, физическая адсорбция водорода на поверхности металла (она зависит в основном от температуры и давления газа), хемосорбция водорода на поверхности (происходит на активных центрах поверхности и завершается диссоциацией молекулы водорода на атомы), переход атомов водорода из поверхностного слоя в приповерхностный слой, диффузия атомов водорода в объем металла (интерметаллида) с образованием в нем твердого раствора атомарного водорода (α -фаза) и упорядочиванием твердого раствора после его пересыщения водородом и переход в гидрид (β -фаза).

Поскольку камеры п.ф. для генерации нейтронов с энергией 14 МэВ заполняются радиоактивной D-T-смесью, то для безопасности необходимо минимизировать остаточную активность D-T-смеси в объеме камер п.ф. в нерабочем состоянии. Для этого сплав-накопитель изотопов водорода должен обеспечивать низкое равновесное давление

(на уровне 10^{-2} – 10^{-4} Торр) в камере п.ф. при комнатной температуре, т.е. рабочий элемент г.г. должен поглощать практически всю D-T-смесь. К числу наиболее известных поглотителей изотопов водорода относятся пористый титан и сплавы: циаль (84% циркония + 16% алюминиевого сплава), тройная смесь “С” (30% циркония, 10% алюминиевого сплава, 60% титана), аналогичная тройная смесь “Э”. Сорбционные характеристики пористого титана, тройных смесей “С” и “Э” мало отличаются друг от друга, хотя следует отметить большую активность смесей по сравнению с пористым титаном в области температур 100–400°C. Температурные зависимости сорбции водорода и окиси углерода различными активными составами известны [7]. Лучшими сорбционными характеристиками обладает состав циаль, однако он имеет высокую температуру активировки (около 1000°C).

Наибольшее распространение получили газопоглотители на основе пористого титана благодаря их высокой активности по отношению к водороду, сравнительно невысокой температуре активировки (около 800°C), механической прочности и необратимости поглощения газов, за исключением водорода и его изотопов. Поглощение остаточных газов хорошо развитой поверхностью пористого титана начинается при 20°C, причем в диапазоне температур 20–300°C поглощение водорода значительно превышает поглощение других газов. Выше 300°C начинается обратное выделение водорода, а активное поглощение окиси и двуокиси углерода и азота происходит в области температур $\geq 400^\circ\text{C}$. Инертные газы титаном не поглощаются [7].

Обратимость поглощения водорода позволяет эффективно использовать пористый титан в качестве генератора водорода в различных приборах, например тиратронах [8]. Кроме того, титановые газопоглотители имеют различные варианты конструкции в зависимости от условий их применения в приборах. Для камер п.ф. в качестве г.г. использован газопоглотитель на основе мелкодисперсного титана. Рабочий элемент газопоглотителя представляет собой тонкостенный цилиндр диаметром ~ 3.5 мм и массой 66 мг, выполненный из спрессованного мелкодисперсного порошка титана. Площадь активной поверхности составляет 0.8 см², а уровень пористости – не менее 35%. Внутри цилиндра находится нить накала (нагреватель) из сплава Re (20%) и W (80%), температурный коэффициент сопротивления $\alpha = 1.16 \cdot 10^{-3}$ 1/градус. Диаметр проволоки нити накала газогенератора составляет несколько десятков микрометров, исходное сопротивление – 8–10 Ом. Нить покрыта слоем алунда. Газогенератор с внутренним подогревателем выполнен в едином корпусе (см. рис. 1).

Пористый титан, используемый для газопоглотителя, производят методом восстановления из двуокиси титана карбидом кальция при температуре 1280°C. При характерном размере дисперсности титана ~ 5 мкм поглощающая поверхность титана составляет ~ 200 см², что примерно равно геометрической внутренней поверхности камеры п.ф. нейтронных генераторов средней мощности. Надо отметить, что при размере частиц восстановленного титана ~ 5 мкм насыщается практически весь объем титана.

Перед насыщением генератора газа D-T-смесью проводят процедуру обезгаживания г.г. в несколько этапов с последовательным повышением температуры поглотителя. При этом температура титана достигает $\sim 700^\circ\text{C}$. Прогрев обеспечивается подачей на нить накала нагревателя г.г. напряжения. После обезгаживания проводится активировка, при которой температура титана достигает $\sim 900^\circ\text{C}$. Данные операции проводят в вакууме, и по времени они занимают не более одного часа. После активировки газопоглотитель приобретает способность поглощать газы, находящиеся в объеме камеры, и поддерживать в камере вакуум на уровне 10^{-5} – 10^{-6} Торр.

Необходимо отметить, что процесс поглощения водорода очень чувствителен не только к изменению температуры, но и к формированию поверхностных пленок. Водород растворяется в металле с диссоциацией на атомы без образования пленки гидрида. Пленка гидрида не образуется потому, что атомы водорода, вследствие своих малых размеров, тотчас же диффундируют в глубь кристаллической решетки. Было показано, что гидрид титана устойчив в вакууме до температуры 300°C, при более высокой температуре из титана может быть полностью удален водород в высоком вакууме.

Титан не поглощает инертные газы, но зато необратимо связывает тяжелые газы типа O₂, N₂, CO, CO₂, углеводороды [7], что обеспечивает откачку из объема камеры примесей, выделяющихся из внутренней поверхности камеры и изолятора при хранении и работе камер п.ф. Это значительно увеличивает ресурс работы камер п.ф. Кроме того, поскольку газопоглотитель содержит радиоактивный тритий в связанном состоянии, то при хранении камер отсутствует бомбардировка внутренней поверхности камер электронами распада трития со средней энергией ~ 6 кэВ, что значительно снижает газовыделение, а следовательно, положительно сказывается на сохранении характеристик камер п.ф. при их длительном хранении.

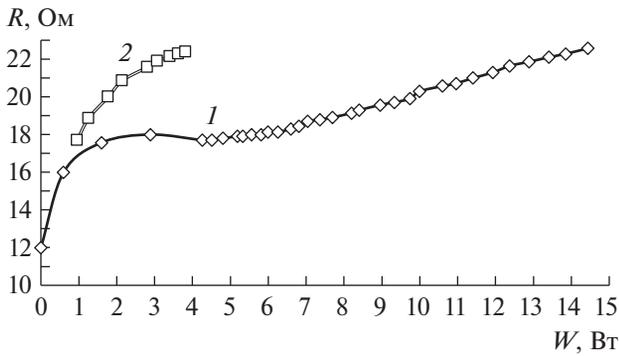


Рис. 2. Зависимости сопротивления нагревателя газо-поглотителя R_n от подводимой к нагревателю мощности W_n в составе камеры п.ф. (1) и в вакууме (2).

РАБОТА ГЕНЕРАТОРА ГАЗА В КАМЕРАХ П.Ф. ОБЪЕМОМ $\sim 100 \text{ см}^3$

Для камеры ПФ7 (см. рис. 1) при газопоглотителе, насыщенном D-T-смесью активностью 10 Ки, были сняты вольт-амперные характеристики нагревателя г.г. Для сравнения такие же характеристики для той же камеры были сняты при ненасыщенном газопоглотителе в вакууме ($2 \cdot 10^{-4}$ Торр). На рис. 2 приведены графики зависимостей сопротивления нагревателя R_n от мощности W_n , подводимой к нагревателю, для газопоглотителя в вакууме и газопоглотителя в составе камеры ПФ7. При одной и той же подводимой к нагревателю мощности W_n значения сопротивления нагревателя R_n при работе в составе камеры значительно ниже, чем в вакууме. Максимальная разница ΔR_n достигает 4 Ом при подводимой мощности ≈ 3.9 Вт. При этом давление газа в камере п.ф. составляет порядка 10 Торр.

Сопротивление нагревателя R_n определяется его температурой T_n , которая зависит от подводимой к нагревателю мощности W_n , причем механизмы отвода тепла от нагревателя для ненасыщенного газопоглотителя (т.е. работа нагревателя в вакууме) и насыщенного (работа нагревателя в газовой среде) существенно различаются. При работе ненасыщенного газопоглотителя в вакууме температуру нагревателя можно определить из уравнения теплового баланса между подводимой W_n и отводимой W_1 мощностью:

$$W_n = I_n U_n = I_n (I_n R(T_n)) = \sigma T_n^4 S_n = W_1, \quad (1)$$

где σ – постоянная Стефана–Больцмана для абсолютного черного тела; S_n – площадь излучаемой поверхности нагревателя; T_n – температура нагревателя в вакууме.

Из уравнения (1) можно определить температуру нагревателя в вакууме:

$$T_n = [I_n^2 R(T_n) / (\sigma S_n)]^{0.25}. \quad (2)$$

Для камеры п.ф. при использовании насыщенного газопоглотителя уравнение баланса будет содержать дополнительный член W_2 , учитывающий отдачу тепла нагревателем выделившемуся газу, и при достижении равновесия иметь вид $W_n = W_1 + W_2$:

$$I_n^2 R(T_{n,\text{газ}}) = \sigma T_{n,\text{газ}}^4 S_n + W_2(T_{n,\text{газ}}, p), \quad (3)$$

где $T_{n,\text{газ}}$ – температура нити нагревателя после выделения газа; p – давление газа.

Тогда $T_{n,\text{газ}}$ можно определить из (3) как

$$T_{n,\text{газ}} = \{[I_n^2 R(T_{n,\text{газ}}) - W_2(T_{n,\text{газ}}, p)] / (\sigma S_n)\}^{0.25}. \quad (4)$$

Очевидно, что при одной и той же подводимой мощности W_n температура нагревателя $T_{n,\text{газ}}$, а следовательно, и температура рабочего элемента в камере с насыщенным газопоглотителем, определяемая из уравнения (4), ниже температуры нагревателя T_n в вакууме (ненасыщенный газопоглотитель), определяемой из уравнения (2).

В общем случае температура нагревателя может быть вычислена на основе экспериментальных данных для камер п.ф., зная $R_{\text{эксп}}$ и учитывая известную зависимость сопротивления от температуры:

$$R(T) = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)], \quad (5)$$

где R – сопротивление нагревателя; T – температура нагревателя; R_0 – сопротивление нагревателя при 20°C ; α – температурный коэффициент сопротивления; T_0 – температура 20°C .

Откуда

$$T_{\text{эксп}} = T_0 + \frac{R_{\text{эксп}} - R_0}{\alpha R_0}. \quad (6)$$

Ниже приведены значения вычисленной по формуле (6) температуры $T_{\text{эксп}}$ нагревателя газопоглотителя, используемого в камерах п.ф., при разных экспериментальных значениях сопротивления нагревателя $R_{\text{эксп}}$:

$R_{\text{эксп}}$, Ом	8.4	10	12	14	16	18	20	21	22
$T_{\text{эксп}}$, $^\circ\text{C}$	20	184	389	595	800	1000	1210	1313	1416

Чтобы газопоглотитель работал в нормальном режиме в составе камеры п.ф., необходимо: во-первых, не превышать предельную температуру (900°C) для рабочего элемента из пористого титана (активация в вакууме при напряжении $U_n = 8$ В, при этом сопротивление активации $R_a = 22$ Ом), а во-вторых, при длительной работе не превышать температуру титана и нагревателя, которая задается номинальным режимом работы газопоглотителя – $730\text{--}740^\circ\text{C}$. Температура нити нагревателя в режиме активации составляет $T_n = 1370^\circ\text{C}$, в номинальном режиме – 1250°C .

Рассмотрим показательный график зависимости давления p газа в камере от сопротивления нагревателя $R_{\text{экс}}$ (рис. 3). Согласно рис. 3, вплоть до давлений газа 40 Торр сопротивление $R_{\text{экс}}$ остается меньше 21 Ом, что обусловлено интенсивным охлаждением нагревателя газом в камере. При рабочем давлении в камере п.ф. 10–20 Торр сопротивление нагревателя составляет 17.6–18 Ом, что на 3–3.4 Ом ниже сопротивления нагревателя в режиме активации. Температура титана вплоть до давлений 30–40 Торр не превышает 720°C, что меньше температуры титана в номинальном режиме работы, составляющей ~750°C. Можно сделать вывод, что режим работы газопоглотителя в камере типа ПФ7 даже более мягкий, чем в номинальном режиме, т.е. является допустимым режимом работы.

Из вышесказанного следует, что именно температура нагревателя определяет как температуру титана и процесс выделения газа, так и сопротивление нагревателя.

РАБОТА ГЕНЕРАТОРА ГАЗА В КАМЕРАХ П.Ф. ОБЪЕМОМ ДО 1000 см³

Для нейтронных генераторов с выходом 10^{11} и 10^{12} нейтронов/импульс используются камеры типа ПФ9 и ПФ3 объемами 700–1000 см³ (см. рис. 1), в которых также используются г.г. Однако для обеспечения требуемого давления D-T-смеси в этих камерах используются сборки из нескольких параллельно подключенных газопоглотителей, объединенных в одной конструкции г.г. В случае использования одного газопоглотителя (насыщенного до атомного отношения 0.5) предельное давление с учетом полного выделения газа в камере типа ПФ9 объемом 700 см³ составит порядка 8.5 Торр. С учетом реального выделения газа на уровне 80% предельное давление в камере п.ф. составит 7 Торр. Такого давления недостаточно для нормальной работы камеры, поскольку характерный рабочий диапазон давлений составляет 12–20 Торр.

Увеличение количества титана в г.г. (для повышения давления газа в камере п.ф.) возможно либо путем увеличения массы одного рабочего элемента г.г., либо параллельным включением нескольких газопоглотителей. При поглощении одним из газопоглотителей большого количества газа (вследствие флуктуаций) коэффициент насыщения титана этого газопоглотителя увеличивается. Данному образцу газопоглотителя будет соответствовать кривая с большим равновесным давлением, что сопровождается выделением газа (его насыщение при этом уменьшается), который поглотят другие газопоглотители. При уменьшении насыщения одного из газопоглотителей относительно других возрастет интенсивность по-

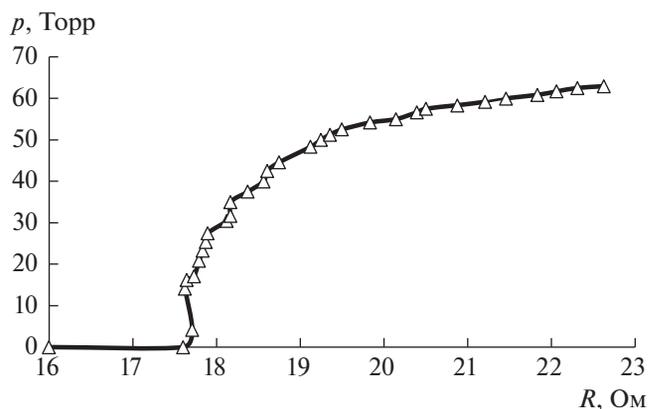


Рис. 3. Зависимость давления p D-T-смеси в камере п.ф. типа ПФ7 от сопротивления нагревателя R .

глощения им газа, что приведет к увеличению его коэффициента насыщения. Таким образом, можно сделать вывод, что в системе существует отрицательная обратная связь. Это позволяет утверждать, что система из нескольких газопоглотителей стремится к равновесному значению коэффициента насыщения.

В камере ПФ9 объемом 700 см³ используются три газопоглотителя в одном корпусе с общей массой титана 198 мг. Для обеспечения работы камеры ПФ3 с внутренним объемом до 1000 см³ используются пять газопоглотителей с общей массой титана 330 мг. Некоторый запас по массе титана позволит получать давления более 20 Торр или смягчить режим работы г.г., снизив температуру титана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в статье физические основы работы г.г. на основе пористого титана показали возможность его использования в составе отпаянных камер плазменного фокуса при его насыщении D-T-смесью. Для камер п.ф. среднего объема использование одного газопоглотителя в составе г.г. позволяет обеспечить давление во внутреннем объеме камер на уровне 10–20 Торр. Показана связь температуры нагревателя с его сопротивлением, предельное значение сопротивления для используемого газопоглотителя в составе камер п.ф. составляет 22 Ом. Для обеспечения давления до 50 Торр в камерах п.ф. объемом до 1000 см³ возможно использование нескольких (до пяти) параллельно включенных газопоглотителей в одном корпусе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Сер. Б. Т. IX-3. Радиационная плазмодинамика / Под ред. В.А. Грибкова. М.: Янус-К, 2007.
2. *Dulatov A.K., Lemeshko B.D., Mikhailov Yu.V., Prokuratorov I.A., Selifanov A.N., Andreev D.A., Golikov A.V., Yurkov D.I.* // Journal of Physics: Conference Series. 2015. № 653. P. 1.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/653/1/012019>
3. *Кирьянов Г.И.* Генераторы быстрых нейтронов. М.: Энергоатомиздат, 1990.
4. Нейтронные генераторы для научных исследований. ФГУП “ВНИИА им. Н.Л. Духова”. URL: <http://vniia.ru/production/neitronnie-generatory/nauchnie-issledovaniya/>
5. https://www.uwyo.edu/safety/_files/docs/procedures/nuclearsafetydatasheets/3hpdf.pdf
6. *Коган Я.Д.* Константы взаимодействия металлов с газами / Под ред. Я.Д. Когана, Б.А. Колачева, Ю.В. Левинского. М.: Металлургия, 1987.
7. Газопоглотители. Каталог. М.: ЦНИИ “Электроника”, 1975.
8. *Bochkov V.D., Bochkov D.V., Salynov I.A., Nikolaev V.N., Krestianinov A.S., Sokovnin S.Yu., Balezin M.E., Ponzovsky A.P.* // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2018. V. 15. № 7. P. 894.
<https://doi.org/10.1134/S154747711807018X>

ЭФФЕКТИВНЫЙ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ХИМИЧЕСКИЙ HF(DF)-ЛАЗЕР

© 2021 г. В. Я. Агроскин^а, Б. Г. Бравый^а, Г. К. Васильев^а, В. И. Гурьев^а,
С. А. Каштанов^а, Е. Ф. Макаров^{а,*}, С. А. Сотниченко^а, Ю. А. Чернышев^{а,**}

^а Институт проблем химической физики РАН

Россия, 142432, Черноголовка Московской обл., просп. Академика Семенова, 1

*e-mail: makarov@icp.ac.ru

**e-mail: chern@icp.ac.ru

Поступила в редакцию 13.05.2021 г.

После доработки 07.06.2021 г.

Принята к публикации 15.06.2021 г.

Предложен рабочий процесс HF(DF)-лазера, в котором полностью исключена откачка реактора. Рабочий процесс состоит из следующих этапов: 1) вытеснение инертным газом продуктов реакции, образовавшихся в результате инициирования рабочей смеси, 2) последующее вытеснение инертного газа рабочей смесью. Конструктивное решение для системы напуска газов в реактор – через кольцевую щель на одном из его концов – позволяет минимизировать расход инертного газа, вытесняющего продукты реакции после инициирования рабочей смеси. Количество остаточного HF(DF) в реакторе практически не влияет на энергию генерации в следующем цикле. Экспериментально показано, что технология с вытеснением не приводит к снижению энергии генерации по сравнению с технологией, использующей откачку, но значительно (на ~2 порядка) сокращает продолжительность рабочего цикла HF(DF)-лазера.

DOI: 10.31857/S003281622106001X

1. ВВЕДЕНИЕ

Рабочая смесь химического HF(DF)-лазера, помимо основных реагентов F₂ и H₂(D₂), содержит O₂, необходимый для ее стабилизации, и инертный газ-разбавитель (обычно He). Оптимальной является смесь с соотношением количеств F₂ и H₂(D₂), равным 3:1, и количеств O₂ и F₂, равным 1:5. В итоге рабочая смесь имеет состав 0.15F₂ + 0.03O₂ + 0.05H₂(D₂) + 0.77He. Стандартный рабочий цикл импульсного химического HF(DF)-лазера включает в себя следующие этапы: 1) приготовление рабочей смеси в предварительно откачанном реакторе и ее инициирование, 2) откачку продуктов реакции через фильтр, поглощающий агрессивные газы, – HF(DF) и остаточный F₂. Достоинство такого цикла – возможность работать при произвольном давлении рабочей смеси в реакторе, недостатки – длительный напуск рабочей смеси из-за необходимости предпринимать различного рода предосторожности в силу разветвленно-цепного механизма реакции F₂ с H₂(D₂) [1] и длительная откачка реактора от продуктов, образовавшихся после инициирования рабочей смеси (около 10 мин). В результате промежуток времени между двумя последовательными импульсами составляет ≥10 мин.

Решению проблемы быстрого и безопасного приготовления фтороводородных смесей посвящены наши работы [1, 2]. В работе [1] обоснована технология быстрого (в секундном диапазоне) приготовления рабочих смесей при одновременном напуске реагентов в реактор. Известно, что реакция F₂ с H₂(D₂) протекает по механизму с энергетическим разветвлением, вследствие чего приготовление смесей может сопровождаться вхождением в область самовоспламенения. Для устранения самовоспламенения напускаемой в реактор смеси в начальный период предложено предварительно заполнять реактор некоторым количеством инертного газа. Величина минимального давления инертного газа, при котором напускаемая смесь не воспламеняется, зависит от рода инертного газа, состава смеси, скорости напуска и т.п. и требует экспериментального определения. Для быстрого и безопасного приготовления смесей предложено использовать конструкцию смесителя, состоящую из системы капилляров, плотно упакованных в цилиндрический канал. Смесь, содержащая H₂(D₂), подается через капилляры, смесь, содержащая F₂, – через промежутки между капиллярами. В работе [2] описывается конструкция компактного капил-

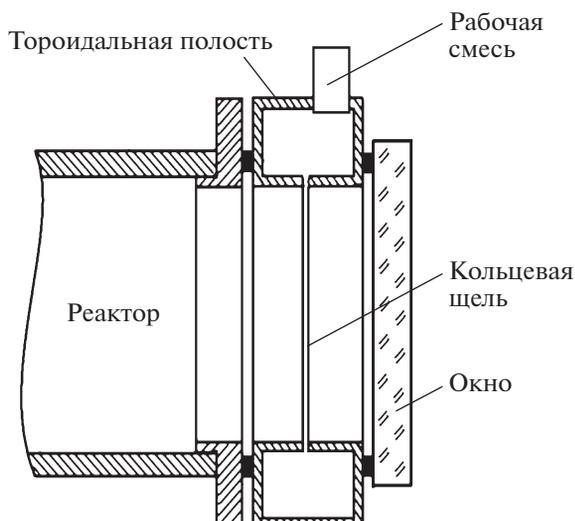


Рис. 1. Устройство для напуска газов через кольцевую щель.

лярного смесителя, обеспечивающего эффективное смешение газов, с суммарной производительностью до $2 \text{ л} \cdot \text{атм/с}$.

В настоящей работе предлагается исключить из рабочего цикла еще один продолжительный этап — откачку продуктов реакции. Вместо откачки продуктов предлагается вытеснять их из реактора инертным газом. Это в принципе позволит значительно сократить продолжительность рабочего цикла химического лазера. В этой технологии напускаемая рабочая смесь вытесняет из реактора газ, оставшийся в нем от предыдущего цикла, затем, после инициирования смеси, инертный газ вытесняет образовавшиеся после взрыва продукты. Если вытеснение происходит в окружающую атмосферу (через фильтр, поглощающий агрессивные газы), то давление вытесняющих газов должно быть не ниже атмосферного.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В опытах с вытеснением использовали два варианта напуска газов в реактор: 1) напуск через канал диаметром 1 см, расположенный под углом 45° к оси реактора, и 2) напуск через кольцевую (по диаметру реактора) щель шириной 0.35 мм.

Выходное отверстие канала, равно как и кольцевая щель, размещались вблизи конца реактора. Площади поперечного сечения канала и кольцевой щели были примерно одинаковыми — 0.79 и 0.72 см^2 соответственно. В обоих вариантах напуска — с использованием канала либо щели — газ из реактора вытеснялся через боковое отверстие диаметром 1 см, расположенное на противоположном конце.

Вариант с напуском через кольцевую щель схематически представлен на рис. 1. В этом варианте рабочая смесь через подводящую трубку сначала подается в распределительную тороидальную полость, из которой затем через кольцевую щель вытекает в реактор.

2.1. Вытеснение из реактора инертного газа рабочей смесью

В опытах использовали химический DF-лазер с реактором из тефлона длиной 120 см и объемом 4 л. Смесь инициировали импульсными лампами с общей запасенной энергией 440 Дж. Энергия лазерного излучения составляла 20 Дж. Упрощенная схема напускной установки приведена на рис. 2. Она включает в себя три независимые магистрали для подачи соответственно смесей $0.3\text{F}_2 + 0.06\text{O}_2 + 0.64\text{He}$ и $0.1\text{D}_2 + 0.9\text{He}$, а также чистого He. Установка содержит смеситель *СМ*, электромагнитные клапаны $\mathcal{ЭК}_1 - \mathcal{ЭК}_4$ и систему регулировки расходов напускаемых газов [2] (на рисунке не показана). Рабочая смесь образуется в результате соединения смесей $0.3\text{F}_2 + 0.06\text{O}_2 + 0.64\text{He}$ и $0.1\text{H}_2(\text{D}_2) + 0.9\text{He}$ при равном их расходе. Гелиевая магистраль используется для вытеснения продуктов из реактора. Электромагнитные клапаны служат для быстрого включения и отключения потоков соответствующих газов. Для приготовления рабочей смеси использовали смеситель с суммарной производительностью $2 \text{ л} \cdot \text{атм/с}$ [2]. При одновременном открытии электромагнитных клапанов $\mathcal{ЭК}_1$, $\mathcal{ЭК}_2$ и $\mathcal{ЭК}_4$ образующаяся в смесителе рабочая смесь вытесняет через клапан $\mathcal{ЭК}_4$ предварительно напущенный в откачанный реактор гелий. В ходе вытеснения давление в реакторе остается неизменным и равным 1 атм. Длительность вытеснения варьируется от 2 с (однократное вытеснение) до 3 с (полуторакратное вытеснение) с сохранением постоянной объемной скорости напуска, равной $2 \text{ л} \cdot \text{атм/с}$. Здесь и далее под кратностью вытеснения понимается отношение использованного объема вытесняющего газа к объему реактора.

В опытах проводили сравнение лазерной генерации для смесей, приготовленных по технологии с вытеснением, и смесей, приготовленных по стандартной, обычно используемой нами технологии. Согласно этой технологии, в откачанный реактор предварительно напускают гелий до давления 0.1 атм с последующим напуском рабочей смеси до общего давления 1 атм со скоростью $2 \text{ л} \cdot \text{атм/с}$. Как отмечалось, предварительное заполнение реактора гелием предотвращает самовоспламенение рабочей смеси в начальный момент напуска [1], пока давление в реакторе невелико. Предварительно напущенный гелий вытесняется далее при напуске смеси в присоединенный к реактору

добавочный объем. Если v_0 , v – соответственно добавочный объем и объем лазера, P_0 , P – начальное и конечное давление газа, то $v_0/v = P_0/(P - P_0)$. При $v = 4$ л, $P_0 = 0.1$ атм, $P = 1$ атм добавочный объем v_0 будет равен ~ 0.44 л.

В опытах с вытеснением определяли плотность лазерной генерации в джоулях на квадратный сантиметр в зависимости от кратности вытеснения из реактора гелия смесью $0.15F_2 + 0.03O_2 + 0.05D_2 + 0.77He$ из смесителя и исходя из конструктивных особенностей устройств напуска газов в реактор. Результаты, полученные в опытах, выполненных по стандартной технологии и с вытеснением, приведены ниже (каждый результат усреднялся по 3–5 опытам):

– стандартная технология напуска рабочей смеси	0.46 Дж/см ²
– 1-кратное вытеснение гелия смесью $0.15F_2 + 0.03O_2 + 0.05D_2 + 0.77He$, напуск смеси через канал	0.53 Дж/см ²
– 1.5-кратное вытеснение гелия смесью $0.15F_2 + 0.03O_2 + 0.05D_2 + 0.77He$, напуск смеси через канал	0.65 Дж/см ²
– 1-кратное вытеснение гелия смесью $0.15F_2 + 0.03O_2 + 0.05D_2 + 0.77He$, напуск смеси через кольцевую щель	0.59 Дж/см ²

Анализ данных показывает, что при использовании технологии с вытеснением энергия генерации в целом выше. Росту энергии генерации также способствуют увеличение кратности промывки реактора рабочей смесью и использование напуска смеси через кольцевую щель. Отметим, что все сказанное в равной степени относится к химическому HF-лазеру.

2.2. Вытеснение из реактора продуктов реакции инертным газом

В продуктах взрыва стандартной рабочей смеси $0.15F_2 + 0.03O_2 + 0.05D_2 + 0.77He$ содержится 10% DF. Проблемы, возникающие при использовании технологии вытеснения для удаления продуктов, значительно сложнее. Это связано с тем, что даже небольшое количество DF, остающееся после промывки реактора инертным газом, способно эффективно снижать генерацию в последующем цикле за счет внесения дополнительных потерь вследствие поглощения лазерного излучения молекулами DF.

Об эффективности вытеснения DF судили по величине энергии лазерной генерации, достигаемой в опытах, в зависимости от кратности вытеснения продуктов и способа ввода вытесняющего газа в реактор.

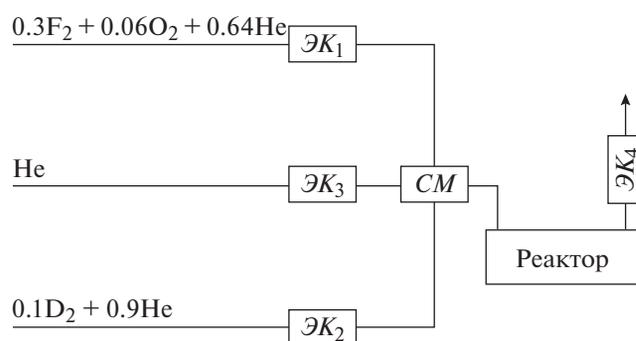


Рис. 2. Упрощенная схема напускной установки. СМ – смеситель; ЭК₁–ЭК₄ – электромагнитные клапаны.

Лазерную генерацию в опытах соотносили с генерацией в “стандартном” опыте. В откачанный реактор напускали He до давления 1 атм, затем вытесняли его рабочей смесью. Рабочую смесь инициировали и регистрировали энергию генерации. Этот опыт считали стандартным. После его проведения сначала вытесняли образовавшиеся продукты He, затем новой порцией рабочей смеси вытесняли He с возможной примесью DF, инициировали рабочую смесь, измеряли энергию генерации и сравнивали ее с генерацией в предыдущем опыте. Результаты опытов представлены ниже.

Вытеснение продуктов при подаче He через канал, Дж/см²:

– стандартный опыт	0.56
– 3-кратное вытеснение продуктов гелием	0
– 10-кратное вытеснение продуктов гелием	0

Вытеснение продуктов при подаче He через кольцевую щель, Дж/см²:

– стандартный опыт	0.54
– 1.4-кратное вытеснение продуктов гелием	0.48
– 2.8-кратное вытеснение продуктов гелием	0.49
– 4.2-кратное вытеснение продуктов гелием	0.58

Согласно полученным данным, даже 10-кратное вытеснение продуктов при подаче He через канал не приводило к генерации в последующем опыте. В то же время использование кольцевой щели решило проблему. Требуемая кратность вытеснения при этом была невелика – вполне достаточно 1.4-кратного вытеснения.

Объяснение полученных результатов состоит в следующем. Напускной канал и реактор имеют заметно различающиеся диаметры, поэтому их сочленение приводит к внезапному расширению потока. При входе в реактор возникает струйное течение со свободной границей, расширяющейся в направлении движения струи. Скорость струи, вытекающей из канала, составляет около 25 м/с. Достигая стенки, струя последовательно отража-

ется от нее до тех пор, пока ширина струи не сравняется с диаметром реактора. Далее течение газа происходит с фиксированной внешней границей. На участке, где струя расширяется до размеров реактора, между стенкой и границей струи устанавливается сложное вихревое движение. Имеет место образование застойных зон с турбулентным обменом массы между струей гелия и окружающим газом – продуктами взрыва смеси в предыдущем опыте. В застойных зонах в поток гелия может подмешиваться значительное количество неподвижного газа из реактора. В результате вытеснение продуктов происходит не поступающим гелием, а смесью гелия с продуктами взрыва, что может приводить к увеличению концентрации остаточного DF.

В случае использования кольцевой щели вытекающий из нее гелий создает газовую “завесу”. Эта “завеса” при движении по направлению к другому концу реактора создает своеобразную “пробку” из инертного газа, вытесняющую продукты подобно поршню. При временах заполнения реактора 2 с, как в опытах, диффузионное размытие фронта “пробки” невелико, и конфигурация “пробки” сохраняется в течение всего времени заполнения реактора. Это объясняет высокую эффективность вытеснения продуктов при использовании кольцевой щели.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные свидетельствуют о возможности реализации рабочего процесса HF(DF)-ла-

зера, в котором полностью исключен процесс откачки реактора без потерь в энергии генерации. Процесс состоит из двух этапов: 1) вытеснение инертным газом продуктов реакции, образовавшихся в результате инициирования рабочей смеси, 2) последующее вытеснение инертного газа рабочей смесью. Продолжительность каждого этапа зависит от объемной скорости напуска газов в реактор и объема реактора. На лазерной установке с реактором длиной 120 см и объемом 4 л со смесителем производительностью 2 л·атм/с и энергией генерации в импульсе 20 Дж достигнута продолжительность рабочего цикла, равная примерно 5 с. Это примерно на 2 порядка меньше, чем продолжительность цикла с откачкой. Если вытеснение происходит в атмосферу, то рабочее давление в реакторе должно быть не меньше атмосферного.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания АААА-А19-119070790003-7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Васильев Г.К., Макаров Е.Ф., Чернышев Ю.А.* // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39. № 3. С. 9.
2. *Агроскин В.Я., Бравый Б.Г., Васильев Г.К., Гурьев В.И., Каштанов С.А., Макаров Е.Ф., Сотниченко С.А., Чернышев Ю.А.* // ПТЭ. 2019. № 1. С. 94. <https://doi.org/10.1134/S0032816218060010>

К АНАЛИЗУ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОГО ОСВЕТИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

© 2021 г. С. М. Зуев^{a,*}, Д. О. Варламов^b, В. В. Кукса^b

^a *Российский технологический университет МИРЭА
Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78*

^b *Московский политехнический университет
Россия, 432700, Москва, ул. Б. Семёновская, 38*

*e-mail: sergei_zuev@mail.ru

Поступила в редакцию 09.05.2021 г.

После доработки 02.07.2021 г.

Принята к публикации 05.07.2021 г.

Проведен анализ графических зависимостей спектрального распределения мощности лазерного осветительного устройства. Представлены данные по световому потоку этих систем. Обозначены перспективы оптимизации спектра лазерных осветительных устройств малой мощности. Исследование спектров проведено с использованием модернизированного спектрометра. Показано, что оптимизация конструкции спектрометра позволяет обеспечить его регулировку и калибровку для получения более точных значений спектров.

DOI: 10.31857/S0032816221060148

Мировая энергетика расходует порядка 20% мощности на освещение. В 2021 г. затраты на освещение составят порядка 23 млрд долларов. Рынок осветительных приборов растет в среднем на 15% в год и в 2021 г. составит 12 млрд долларов. На глобальном рынке в настоящее время широко представлены осветительные устройства трех типов. К первому типу можно отнести лампы накаливания, включая галогенные, ко второму – люминесцентные лампы, а третий тип – это светодиодные лампы. В настоящее время светильники первого и второго поколений активно замещаются светодиодными лампами, более высокая стоимость которых компенсируется снижением энергопотребления по сравнению со светильниками первых двух типов. Применение светодиодных ламп приведет в 2021 г. к двукратному сокращению всей потребляемой в мире энергии на освещение относительно периода начиная с 2001 г. Однако светодиодная технология, которая начала разрабатываться в 60-е годы XX века, постепенно выходит на насыщение в части повышения светотдачи и к.п.д. устройств, поэтому в перспективе их должны будут заменить осветительные системы нового типа.

Альтернативным источником света, превосходящим светодиоды по энергосбережению и ряду других характеристик, является лазерный диод. В настоящее время все больше научных групп и высокотехнологичных компаний уделяют этому

направлению пристальное внимание. В РФ также ведутся работы по созданию современных лазерных осветительных устройств, в том числе авторами данной научной работы, которыми разработан лазерный светильник малой мощности [1, 2]. Анализ спектрального распределения лазерного светильника малой мощности может дать важную информацию о направлениях применения и перспективах развития устройств данного типа.

Хорошо известно, что видимое излучение – воспринимаемые человеческим глазом электромагнитные волны [1] – занимает участок спектра с длиной волны от ~380 (фиолетовый) до ~780 нм (красный) и частотный диапазон 400–790 ТГц [2].

Для исследования спектров излучения используются спектрометры [3]. Авторами в ходе работы был изготовлен спектрометр, позволяющий анализировать спектры излучения источников всех типов [4–7]. Общий вид поворотного спектрометра и лазерной лампы в нерабочем и включенном состояниях показан на рис. 1.

Спектрометр включает в себя 3 датчика: AS72651, AS72652 и AS72653, каждый из которых имеет 6 независимых каналов измерения.

Рассмотрим работу спектрометра более подробно. Каждый датчик содержит аналого-цифровой преобразователь с 16-битным разрешением, который интегрирует ток от фотодиода каждого канала. По завершении цикла преобразования ин-

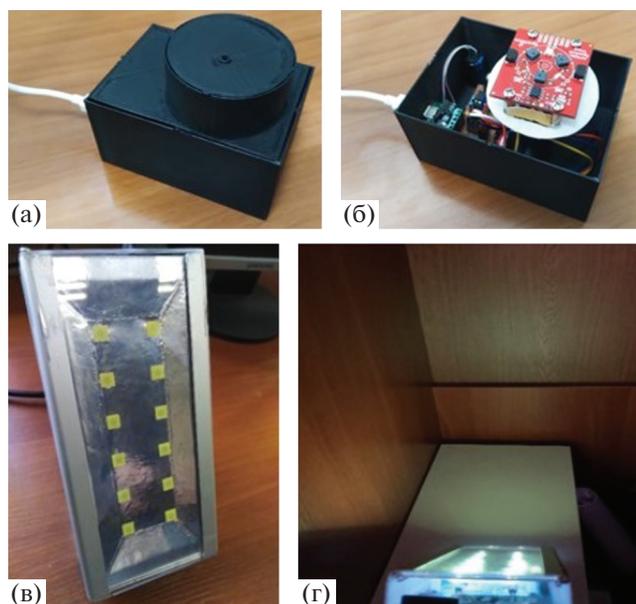


Рис. 1. Общий вид поворотного спектрометра (а, б) и лазерной лампы в нерабочем (в) и включенном (г) состояниях.

тегральный результат передается в соответствующие регистры данных. Передача данных осуществляется с двойной буферизацией для обеспечения их целостности [8].

По каждому каналу измерения установлен электронный гауссов фильтр с полной шириной спектра на уровне половинной амплитуды 20 нм. Фильтры имеют интерференционную топологию, обеспечивающую высокую стабильность работы. Спектральная характеристика всех 18-ти каналов определяется в диапазоне от 410 до 940 нм.

Точность фильтра зависит от угла падения света, который ограничен интегрированной апертурой и внутренней структурой микролинзы. Ограниченное апертурой среднее поле зрения составляет $\pm 20.5^\circ$ для обеспечения заданной точности. Все оптические характеристики оптимизированы для рассеянного света. При использовании точечного источника или коллимированного света измерительное отверстие датчика должно быть закрыто ламбертовским рассеивателем с ахроматическими характеристиками [9]. Для этой цели был выбран диффузор Tsujiden типа D121UP. При измерении рассеянного света, например, от отражающей поверхности дополнительный рассеиватель не требуется [10].

Чтобы компенсировать влияние изменения температуры на процесс измерения, в каждый из датчиков спектрометра интегрирован датчик температуры.

Датчик AS72651 является ведущим. Его программное обеспечение и заводские калибровки фильтров записаны во внешней Flash-памяти [11], подключенной к нему по интерфейсу SPI. Этот датчик собирает показания с других датчиков по интерфейсу I2C и отправляет результат измерения (по запросу) на микросхему-преобразователь USB/UART.

В каждый из датчиков спектрометра встроен тактирующий генератор импульсов на 16 МГц. Датчики AS72651, AS72652 и AS72653 предварительно калибруются с помощью определенного источника света.

Каждый датчик имеет два встроенных светодиодных драйвера (один – на мощный, а другой – на индикаторный светодиод) с программируемым значением тока в случае измерения спектра не излучающего свет объекта.

Питание поворотного спектрометра и его связь с персональным компьютером осуществляются через преобразователь USB/UART на основе микросхемы CH340E. Напряжение питания спектрометра 3.3 В. Для уменьшения амплитуды сигнала высокого логического уровня с 5 до 3.3 В, подаваемого с вывода передатчика (TX) интерфейса UART микросхемы CH340 на приемник (RX) спектрометра, используется делитель напряжения на резисторах R_1 и R_2 . Серводвигатель RDS3115 обеспечивает поворот рабочей части спектрометра на $\pm 120^\circ$ относительно центрального положения. Чтобы скомпенсировать кратковременные “просадки” напряжения, которые происходят от стартовых импульсов тока серводвигателя, в его цепь питания установлен электролитический конденсатор C_4 емкостью 10 мФ. Схема управления серводвигателем построена на микроконтроллере Attiny85, такты которого задаются внешним кварцевым резонатором с частотой 16 МГц. Для отсека гармоник высшего порядка к кварцевому резонатору подключены конденсаторы C_1 и C_2 . Конденсатор C_3 служит для фильтрации высокочастотных помех по питанию Attiny85. Управляющие сигналы с UART-передатчика TX микросхемы CH340E поступают на вывод PB1 микроконтроллера, на основе которого программно реализован приемник RX интерфейса UART. Для установки нужного углового положения спектрометра на вход PWM серводвигателя с вывода PB2 микроконтроллера Attiny85 поступают широтно-импульсно-модулированные сигналы на частоте 50 Гц с длительностью импульсов, пропорциональной углу поворота серводвигателя. Для внутрисхемного программирования микроконтроллера на плате распаян стандартный 6-выводный ISP-разъем. Электрическая схема поворотного спектрометра показана на рис. 2.

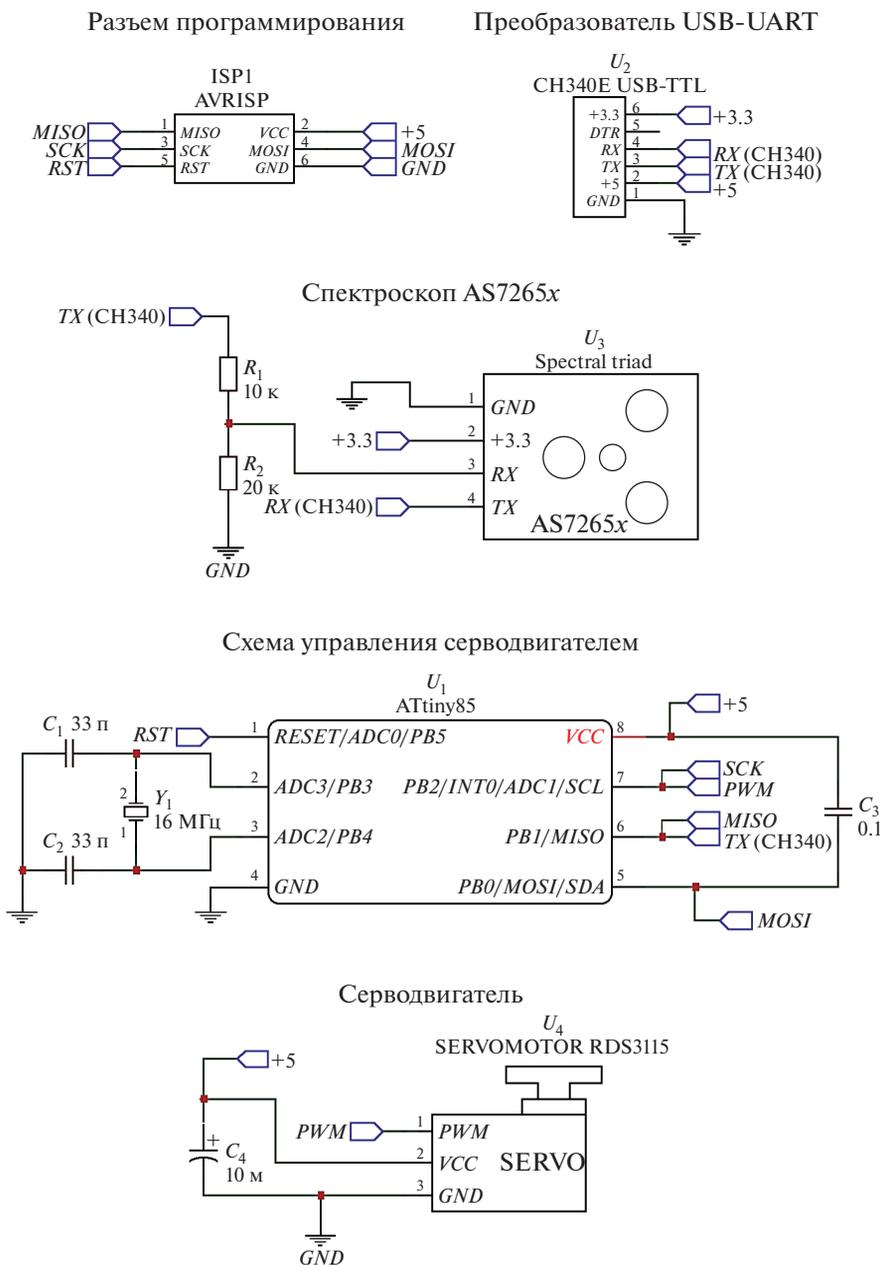


Рис. 2. Электрическая схема поворотного спектрометра.

Каждый из трех датчиков является инновационным цифровым 6-канальным спектральным сенсорным устройством. Все 6 каналов имеют характеристики гауссова фильтра с полосой пропускания, равной половине максимальной ширины (FWHM) 20 нм. Спектральная характеристика всех 18-ти каналов определяется в диапазоне 410–940 нм (рис. 3). Разрешающая способность спектрометра равна 35 [8].

Для оптимизации работы спектрометра датчики AS72651, AS72652 и AS72653 размещены на поворотной установке, которая с помощью шагового двигателя может поворачиваться на угол 270°. Данная оптимизация позволяет регулировать и калибровать спектрометр для получения более точных значений спектров.

Спектр излучения лазерного светильника малой мощности собственной запатентованной разработки [9–12], полученный в ходе эксперимен-

та, представлен на рис. 4. Некоторые характеристики данного светильника приведены ниже:

– мощность лазерного диода, мВт	50
– длина волны лазерного диода, нм	405
– количество лазерных диодов в лазерной лампе, шт.	12
– тип используемого люминофора	ИАГ Ce^{3+}
– угол обзора, градус	~180
– цветовая температура (CCT), К	~6000
– индекс цветопередачи CRI	70
– прямой ток, мА	60
– прямое напряжение, В	4.2
– максимальная рабочая температура (корпуса) без радиатора, °С	40–50
– срок службы, ч	~20000

Рассмотрим узкий пучок монохроматического фиолетового излучения ($\lambda = 405$ нм) мощностью $P = 50 \cdot 10^{-3}$ Вт, с временем излучения $t = 1$ с и углом расходимости $\varphi = 2^\circ$, который падает перпендикулярно на люминофор ИАГ Ce^{3+} . Показатель рассеивания $\rho = 0.5$, расстояние между лазерным диодом и люминофором $d = 0.02$ м (рис. 5).

Рассчитаем количество фотонов N , попавших на люминофор, а также световой поток $\Phi_{\text{сп}}$, освещенность E , яркость B , энергию одного фотона $E_{\text{ф}}$, светимость R_c и полную энергию W светового излучения.

Поскольку поток излучения Φ равен энергии $E_{\text{об}}$, переносимой через поверхность за единицу времени t , мы можем вычислить искомое количество фотонов, участвующих в излучении, мощность P которого знаем, с использованием следующего соотношения [13]:

$$P = E_{\text{об}}/t. \quad (1)$$

Исходя из теории Планка, энергию светового излучения можно представить в виде множества парциальных значений энергии квантов:

$$E_{\text{об}} = NE_{\text{ф}}, \quad (2)$$

где $E_{\text{ф}}$ – энергия одного фотона.

Учитывая все сказанное выше, для значения N получаем

$$E_{\text{ф}} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6.63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{4.05 \cdot 10^{-7}} \approx 5 \cdot 10^{-19}; \quad (3)$$

$$P = \frac{E_{\text{об}}}{t} \Rightarrow E_{\text{об}} = Pt = 5 \cdot 10^{-2}; \quad (4)$$

$$N = \frac{E_{\text{об}}}{E_{\text{ф}}} = \frac{5 \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 10^{-19}} = 10^{17}. \quad (5)$$

Далее найдем световой поток данного лазерного излучения $\Phi_{\text{сп}}$. Световым потоком является вели-

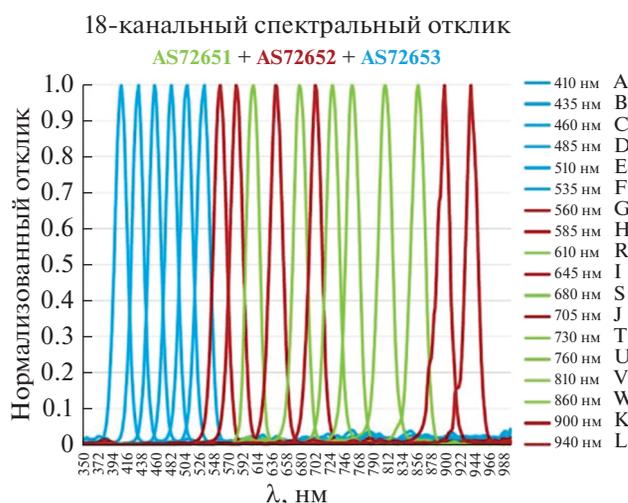


Рис. 3. Диаграмма чувствительности датчиков AS72651, AS72652 и AS72653 спектрометра [8].

Интенсивность излучения (нормализованная), отн. ед.

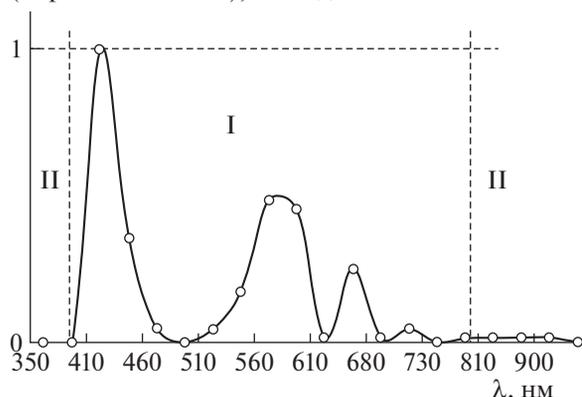


Рис. 4. Спектральное распределение мощности излучения лазерного светильника малой мощности. I, II – соответственно области спектра видимого и невидимого для глаза человека излучения.

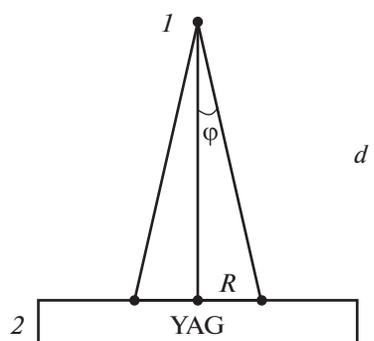


Рис. 5. Схема размещения лазера относительно люминофора. 1 – лазерная головка, 2 – люминофор.

чина, пропорциональная потоку излучения, оцененному в соответствии с относительной спектральной чувствительностью среднего человеческого глаза. Иными словами, световой поток можно определить как световую величину, оценивающую поток излучения по его действию на селективный приемник света. Причем спектральная чувствительность данного потока определяется функцией относительной спектральной световой эффективности излучения $V(\lambda)$. Таким образом, если имеется монохроматическое излучение с длиной волны λ , поток которого равен Φ , то в соответствии с вышеприведенным определением световой поток $\Phi_{сп}$ такого излучения определяется следующим равенством:

$$\Phi_{сп} = K_m V(\lambda) \Phi, \quad (6)$$

где K_m — коэффициент, величина которого определяется используемой системой единиц (в системе СИ этот коэффициент равен 683 лм/Вт), а $V(\lambda)$ берут нормированной в максимуме на единицу чувствительности среднего человеческого глаза при дневном зрении.

Учитывая это, получим

$$\Phi_{сп} = K_m V(\lambda) \Phi = 683 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \approx 34.2 \text{ лм}. \quad (7)$$

Полная же энергия W испускаемого светового потока определяется как произведение мощности излучения P на время излучения t : $W = Pt = 50 \text{ мВт} \cdot \text{с}$.

По характеристикам отдельного лазерного диода, входящего в состав лазерной лампы, обнаружено, что через 150 с работы при токе 60 мА устанавливается падение напряжения 4.15 В в установившемся режиме. Суммарно по 12-ти лазерным диодам выходная мощность составляет 249 мВт.

Что касается выходного напряжения светильника, то при расчете следует учитывать количество светодиодов и к.п.д. отдельных линейных стабилизаторов на каждый лазерный диод. Ориентировочно этот к.п.д. составляет 70% при напряжении питания 9 В, а при 12 В он будет в районе 50% (в линейных стабилизаторах излишки падают на регулирующем элементе, он греется, следовательно, больше разница в напряжениях — меньше к.п.д.). В итоге получаем $12 \cdot 0.249 \cdot 0.7 = 2.1 \text{ Вт}$.

На рис. 6а приведены зависимости $U(t)$ для лазерного диода при различной токовой нагрузке, а на рис. 6б — зависимости электрической мощности лазерного диода от приложенной токовой нагрузки.

Анализ зависимостей на рис. 6 показал, что имеется небольшой спад, 10–12%, электрической мощности диода с нормализацией эффективности работы лазерных диодов с течением времени при приложении токовой нагрузки. Данный спад сказывается на показателях яркости и светового

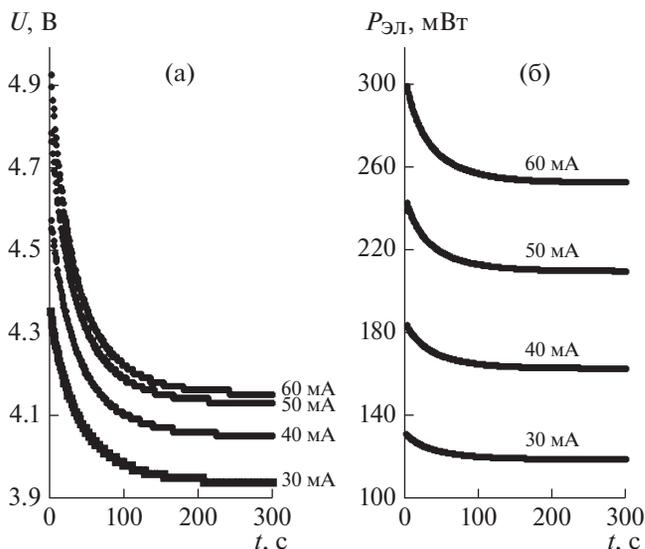


Рис. 6. Зависимости от времени работы: а — напряжения на лазерном диоде (405 нм, 50 мВт) и б — электрической мощности лазерного диода — при различной токовой нагрузке (цифры у кривых).

потока лазерной лампы ввиду их пропорциональности электрической мощности, но изучение этого эффекта выходит за рамки данной работы.

Проведенный анализ полученного спектра излучения лазерной лампы (см. рис. 4) показал, что 87% площади под кривой графика относится к спектру видимого излучения (380–740 нм). У данного источника света наблюдаются наименьшие потери энергии в инфракрасном спектре по срав-



Рис. 7. Спектральные распределения мощности излучения различных осветительных устройств: 1 — лампы накаливания, 2 — светодиода холодного белого света (6000 К), 3 — лазерной лампы малой мощности. I, II — соответственно области спектра видимого и невидимого для глаза человека излучения.

нению с другими источниками, представленными на рынке (рис. 7).

Особенностью спектра лазерной лампы является значительный пик в области излучения 410–435 нм, что можно нивелировать использованием дихроичных фильтров или заменой люминофора (в данном случае использовался иттрий-алюминиевый гранат, легированный церием (YAG+)). Интенсивность фотостимулированного люминесцентного излучения лазерной лампы может быть повышена за счет увеличения толщины слоя люминофора, однако это требует отдельного исследования.

Таким образом, проведенный анализ полученных экспериментально спектров излучения современных осветительных устройств показал, что с точки зрения эффективности генерации видимого спектра излучения наилучшими являются лазерные лампы. Расчет светового потока и других оптических величин по формулам (1)–(7) для данного лазерного светильника показал его высокую эффективность по сравнению с осветительными устройствами других типов. Так, для лазерного диода с электрической мощностью 50 мВт световой поток составил 34.2 лм, в то время как, например, у обычного светодиода с цветовой температурой 4000 К и мощностью 5 Вт (в режиме 2.2 Вт) [14] – порядка 407 лм.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хортон В.П., Скворцов А.А., Зуев С.М. Патент № 167485 РФ // Бюл. № 1. Оpubл. 10.01.2017 г.
2. Скворцов А.А., Зуев С.М. Патент №197045 РФ // Бюл. № 9. Оpubл. 26.03.2020 г.
3. Hitz T., Graeff-Hönniger S., Munz S., Henke M. // Computers and Electronics in Agriculture. 2019. Т. 156. С. 540. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.11.043>
4. Xu G., Zhang J., Cao G., Xing M., Li D., Yu J., Zou N. // Zhenkong Kexue yu Jishu Xuebao (Journal of Vacuum Science and Technology). 2016. Т. 36. № 1. С. 1. <https://doi.org/10.13922/j.cnki.cjovst.2016.01.01>
5. Хортон В.П., Скворцов А.А., Зуев С.М. Патент № 184953 РФ // Бюл. № 32. Оpubл. 15.11.2018 г.
6. De Boer J.B., Schreuder D. // Light Res. Technol. 1967. № 32. P. 117.
7. Bullough J.D., van Derlofske J., Fay C.R., Dee P. Discomfort glare from headlamps: interactions among spectrum, control of gaze and background light level. SAE Technical Paper 2003-01-0296. 2003. <https://doi.org/10.4271/2003-01-0296>
8. www.ams.com. Дата обращения: 01.06.2021 г.
9. Dorleans G. World Harmonization and Procedures for Lighting and Signaling Products. SAE Technical Paper 970913. 1997. <https://doi.org/10.4271/970913>
10. Хортон В.П., Скворцов А.А., Зуев С.М. Патент № 167452 РФ // Бюл. № 1. Оpubл. 10.01.2017 г.
11. Woerdenweber B., Wallaschek J., Boyce P. Automotive Lighting and Human Vision. Springer, 2010. P. 95–96. ISBN 3540366970.
12. Зуев С.М., Варламов Д.О., Лавриков А.А., Малеев Р.А., Шматков Ю.М. Электрооборудование и электроника автомобилей. Краткий толковый русско-английский терминологический словарь / Под ред. канд. физ.-мат. наук С.М. Зуева. М.: ИНФРА-М, 2021.
13. Hu L.-Y., Xu X.-X., Wang Z.-S., Xu X.-F. // Physical Review A: Atomic, Molecular, and Optical Physics. 2010. Т. 82. № 4. С. 043842. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.82.043842>
14. www.led.com. Дата обращения: 01.07.2021 г.

ЦИФРОВОЙ ДЕТЕКТОР РЕНТГЕНОВСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

© 2021 г. А. А. Трубицын^а, Е. Ю. Грачев^{а,*}

^а Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина
Россия, 390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1

*e-mail: monopol_rus@mail.ru

Поступила в редакцию 22.03.2021 г.

После доработки 17.05.2021 г.

Принята к публикации 19.05.2021 г.

Разработан детектор рентгеновских изображений для установки микрофокусной рентгенографии. Применение элемента поликапиллярной оптики, сопряженного с серийно выпускаемым сенсором на основе комплементарных структур металл–оксид–полупроводник, позволило создать компактную конструкцию детектора без громоздкого объектива. Приведены методики экспериментального определения параметров и характеристик детектора. Определено базовое пространственное разрешение изготовленного детектора, проведена оценка значения отношения сигнал/шум полученных изображений и построены функции передачи модуляции. Для работы с детектором создано программное обеспечение на языке C++; представлены его основные возможности и функционал.

DOI: 10.31857/S0032816221050256

1. ВВЕДЕНИЕ

Детекторы рентгеновских изображений в составе промышленных и научных установок применяются в следующих областях: неразрушающий контроль на производстве, изучение биологических образцов, анализ геологических кернов, проведение гистологических исследований, общая медицинская диагностика и др.

В настоящее время цифровые устройства регистрации рентгеновских изображений практически вытеснили аналоговые детекторы. Получение рентгеновских изображений в режиме реального времени лежит в основе наиболее актуальных методов анализа, таких как томосинтез, компьютерная микротомография, фазоконтрастная томография.

По совокупности характеристик пока вне конкуренции остаются детекторы непрямого преобразования рентгеновского излучения в электрический сигнал (камеры и плоскочувствительные детекторы).

Базовыми компонентами детекторов непрямого преобразования являются матрица фоточувствительных элементов (сенсор), сцинтилляционный экран для преобразования излучения в видимый свет и блок электроники. Качество получаемых изображений в основном зависит от параметров и характеристик фоточувствительной матрицы, определяющей предел по разрешающей способности, величину отношения сигнал/шум и квантовую эффективность. Вполне очевидно, что для полу-

чения информации об объекте на микронном уровне размер пикселей сенсора должен иметь соизмеримую величину. В зависимости от реализуемой технологии изготовления сенсоров размеры единичного пикселя различаются в пределах от единиц микрометров (рентгеновские камеры на CCD (charge-coupled device) и sCMOS (scientific complementary metal–oxide–semiconductor) сенсорах) до сотен микрометров (a-Si TFT (amorphous silicon thin-film transistor), CMOS, IGZO (Indium gallium zinc oxide) матрицы и сборки на их основе). Современные рентгеновские камеры с разрешением менее 50 мкм выполняются на основе CCD-, sCMOS-сенсоров и имеют размер диагонали рабочей области ≤ 50 мм. Несмотря на скромные, с точки зрения пользователя, размеры рабочей области, рентгеновские камеры этого класса имеют высокую стоимость. Это обусловлено тем, что для современных технологий рабочие области порядка 50 мм при малом размере пикселя сложны в изготовлении.

Альтернативой применению дорогостоящих CCD- и sCMOS-сенсоров с большой активной областью (порядка 50 мм) и малым размером пикселя может стать сочетание элемента волоконной оптики и матрицы сенсоров значительно меньшего размера. В таком устройстве оптоволоконный элемент служит для уменьшения изображения и эффективного переноса его на матрицу детектора. Именно такой подход к проектированию рентгеновской камеры используется в настоящей работе.

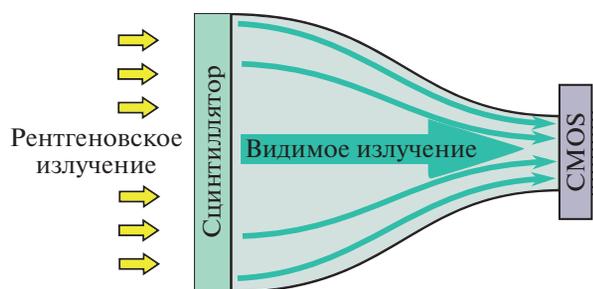


Рис. 1. Схематическое устройство детектора.

2. КОНСТРУКЦИЯ ДЕТЕКТОРА РЕНТГЕНОВСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Устройство разработанного детектора схематично представлено на рис. 1. Основными компонентами детектора являются сенсор с блоками электроники, оптоволоконный элемент типа фокон и сцинтиляционный экран.

В качестве сенсора с блоком управления в данной работе использована готовая камера аСА1920-40gm фирмы Basler известного производителя устройств визуализации для научных исследований, медицины и промышленности. Представленная модель камеры оснащена сенсором типа IMX249 производства компании Sony. При выборе типа сенсора детектора авторы опирались на мировой опыт успешного использования в рентгеновских камерах с оптоволоконными элементами сенсора ICX285 [1], имеющего параметры, близкие к IMX249. Параметры указанных сенсоров приведены в табл. 1.

Передача изображения на активную область сенсора IMX249 в разработанном устройстве осуществляется с помощью оптоволоконного элемента типа фокон производства ОАО «Завод

«Оптик» (г. Лида, Беларусь). Фокон представляет собой монолитную сборку из отдельных оптических волокон, которая в процессе спекания, вытягивания и обработки приобретает форму усеченного конуса. Качественная передача изображений при минимальных искажениях требует применения оптоволоконна, диаметр которого в несколько раз меньше размера пикселя сенсора. Процесс вытягивания определяет коэффициент масштабирования изображения при переносе его с входного торца на сенсор, при этом диаметр волокон на выходе фокона уменьшается. Учет всех технологических ограничений и свойств используемых материалов позволил изготовить фокон со следующими параметрами:

- размер активной области 45×28 мм;
- диаметр исходного единичного волокна 7 мкм;
- коэффициент масштабирования 4:1.

Процесс вытягивания заготовки с коэффициентом 4:1 обеспечивает конечный размер волокна на выходе фокона порядка 1.75–2 мкм. В этом случае одному пикселю сенсора после сопряжения с фоконом будут соответствовать 3–4 отдельных оптоволоконна, при этом значение эффективного размера пикселя составит $5.86 \text{ мкм} \cdot 4 \approx 24 \text{ мкм}$.

На финальном этапе изготовления фокона проведены работы по его сопряжению с сенсором IMX249 камеры аСА1920-40gm. Заметим, что необходимо предварительно удалить защитное стекло сенсора, поскольку наличие малого, даже воздушного, зазора между сенсором и плоскостью торца фокона приводит к недопустимой расфокусировке изображения. Основная операция сопряжения заключается в точном позиционировании торца фокона относительно активной области сенсора, в результате чего выходной торец фокона должен полностью перекрывать рабочую область сенсора и располагаться параллельно поверхности матрицы. Пространство между торцом фокона и матрицей сенсора заполняется оптическим компаундом. Эпоксидная смола служит для жесткой фиксации фокона с матрицей. Описанные работы по сопряжению и приклеиванию фокона предполагают наличие специализированного оборудования, поэтому для обеспечения требуемого качества в рамках настоящей работы они выполнялись фирмой Salvo Technologies Inc.

Электронные узлы камеры размещены и зафиксированы в специально изготовленном корпусе (рис. 2), который дополнительно обеспечивает экранирование компонентов от рентгеновского излучения.

Для преобразования рентгеновского излучения в видимый свет в детекторе использован сцинтилляционный так называемый усиливающий экран серии DRZ (HR типа) производства компании MCI Optonix, LLC. Усиливающий экран изготовлен на основе оксисульфида гадол-

Таблица 1. Параметры сенсоров IMX249 и ICX285

Параметр	Модель сенсора	
	IMX249	ICX285
Технология изготовления	CMOS	CCD
Разрешение, пиксели	1920×1200	1360×1024
Размер пикселя, мкм	5.86	6.45
Размер диагонали, мм	13.4	11
Разрядность, бит	12	12
Скорость считывания, кадров/с	30	60
Квантовая эффективность, %	70	64
Темновой ток, e^-	6.7	28
Емкость насыщения, ke^-	31.9	13.5
Динамический диапазон, дБ	73.6	53.8
Сигнал/шум, дБ	45	41.3

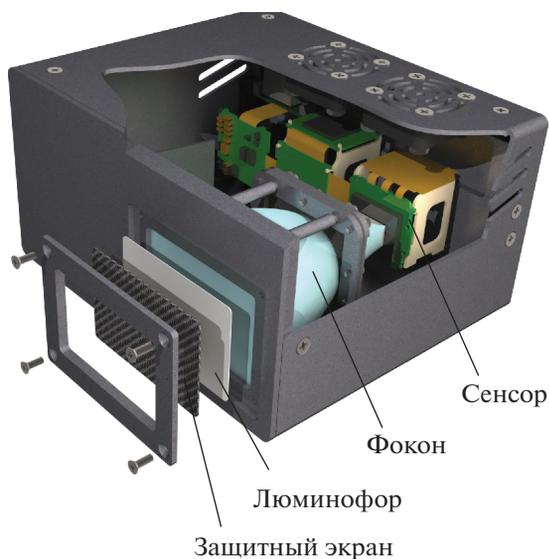


Рис. 2. Конструкция детектора рентгеновских изображений.

линия (P43, Gadox) и применяется в большинстве плоскопанельных детекторов рентгеновского излучения. Поверхностная плотность экрана составляет 25 мг/см^2 , толщина слоя люминофора $\sim 70 \text{ мкм}$, общая толщина — 330 мкм . Стоит отметить, что экраны серии DRZ различаются по толщине люминофорного слоя и применяются в плоскопанельных детекторах с размером пикселя $>100 \text{ мкм}$. В связи с этим укажем на известный подход к оптимизации пространственного разрешения детекторов непрямого преобразования, заключающийся в согласовании толщины сцинтилляционного экрана с эффективным размером пикселя, который не превышает 24 мкм в разрабатываемом устройстве. Однако усиливающие экраны с толщиной менее $70\text{--}90 \text{ мкм}$ специализированными компаниями серийно не выпускаются.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЕТЕКТОРА

После сборки и проверки работоспособности детектора была проведена серия экспериментов по определению базового пространственного разрешения детектора ($SR_b^{detector}$) и отношения сигнал/шум (SNR) регистрируемых изображений. Для оценки способности детектора воспроизводить контраст объекта на различных пространственных частотах построены функции передачи модуляции.

Описываемый детектор разрабатывается для исследования небольших образцов в установках микрофокусной рентгенографии и компьютерной микротомографии. Поэтому исследования

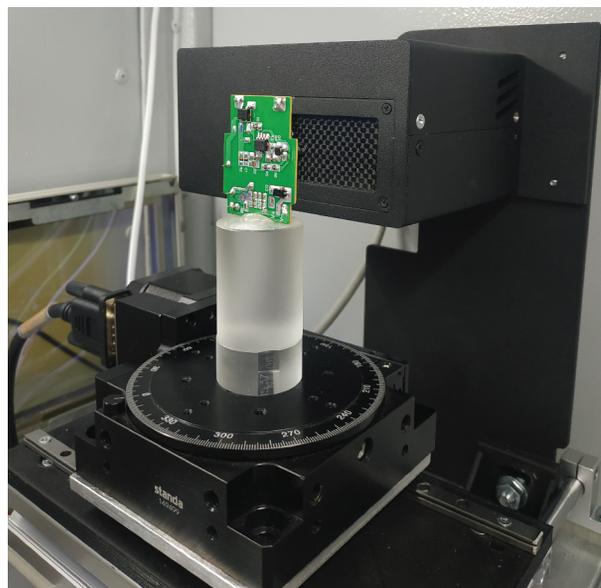


Рис. 3. Стенд для испытания детектора рентгеновских изображений.

его характеристик проводились в составе экспериментального стенда (рис. 3) с маломощной (до 10 Вт) микрофокусной трубкой, анодное напряжение которой ограничено максимальным значением 120 кВ .

При проведении экспериментов использовались методики и рекомендации, изложенные в нормативном документе [2]. Данный документ на настоящий момент является единственным современным российским стандартом, в котором регламентируются процедуры применения систем с матричными цифровыми детекторами (DDA — digital detector array system) для радиографического контроля. В стандарте определены два класса способов контроля сварных соединений: класс А (основные способы) и класс В (улучшенные). В соответствии с этими классами назначают минимально необходимые параметры цифровых изображений для различных диапазонов толщин контролируемых объектов.

Согласно рекомендациям [2], при определении параметров изображений используются линеаризованные значения градаций серого. Для выполнения требований этого условия проводилась калибровка детектора и коррекция по смещению и усилению [3, 4]. Для обработки изображений “плоского поля” и калибровки детектора использовалось программное обеспечение [5], для увеличения отношения сигнал/шум — техника усреднения кадров [6].



Рис. 4. Индикатор качества изображения для определения базового пространственного разрешения.

3.1. Определение базового пространственного разрешения

Основным параметром, характеризующим DDA, является базовое пространственное разрешение (SR_b^{image}) получаемых изображений. Данный параметр определяется с помощью индикатора качества изображения (IQI) дуплексного типа [7], помещаемого перед объектом контроля. В экспериментах, проводимых авторами данной статьи, применялся индикатор качества, изображенный на рис. 4. Он отличается от дуплексного значениями пространственной частоты групп штрихов.

Для определения базового пространственного разрешения детектора $SR_b^{detector}$ [2] индикатор качества размещали непосредственно на поверхности детектора под небольшим углом к строкам пиксельной структуры DDA.

Согласно [2], разрешение определяется по первой паре проволок, которая дает величину модуляции $<20\%$. Под модуляцией понимают отношение глубины впадины (dip) к высоте двойного пика на профиле распределения градаций серого. При определении $SR_b^{detector}$ дополнительно проводили усреднение по 21 профильной линии; процедуры фильтрации, улучшающие качество изображения, не применяли.

Изображения IQI были получены при анодном напряжении рентгеновского источника 90 кВ. Ток и время экспозиции подбирались таким образом, чтобы на изображении уровень сигнала был $\leq 80\%$ от порога насыщения детектора.

Для более точной оценки разрешения, а также из-за небольшого отличия используемого инди-

катора от рекомендованного в стандарте, определялось так называемое “интерполированное значение $SR_b^{detector}$ ” или $iSR_b^{detector}$. Для этого полученные данные по глубине модуляции для нескольких групп штрихов аппроксимировались полиномом второго порядка. Далее находилось значение $iSR_b^{detector}$ как координата точки пересечения графика с прямой для 20%-ного уровня модуляции.

3.2. Оценка отношения сигнал/шум изображений

Согласно [2], при радиографическом контроле с использованием DDA должны быть обеспечены минимальные значения нормализованного отношения сигнал/шум (SNR_N), соответствующие выбранному классу контроля. В [2] приведены минимальные значения SNR_N для различных диапазонов толщин контролируемых объектов и напряжений рентгеновского источника.

С использованием описанного подхода проведена экспериментальная оценка диапазона толщин исследуемых объектов, допустимых для класса В ($SNR_N > 120$, материал алюминий). В качестве тест-объекта использовался ступенчатый клин с диапазоном толщин 2.5–58 мм. Изображения клина были получены для двух анодных напряжений 90 и 120 кВ и времен экспозиции 2 и 4 с. Усреднение проводилось по 30-ти кадрам. Ток источника устанавливался такой величины, чтобы на изображении самой тонкой ступеньки не был достигнут уровень насыщения детектора. Изображения тест-объекта были получены в микрофокусном режиме рентгеновского источника с постоянно поддерживаемой мощностью 6 Вт для всех анодных напряжений.

Уровень сигнала определялся как среднее значение линейризованных градаций серого в выбранной области изображения, а для оценки уровня шума использовалось стандартное отклонение линейризованных градаций [2]. Значение $SNR_{measured}$ вычислялось для каждой толщины материала (ступеньки тест-объекта) с размером изображения не менее 20×55 пикселей. Далее, с использованием базового пространственного разрешения находились нормализованные значения отношения сигнал/шум [2]:

$$SNR_N = SNR_{measured} \frac{88.6}{iSR_b^{detector}} \quad (1)$$

3.3. Построение функций передачи модуляции

Уровень контрастной чувствительности изображений, получаемых с помощью DDA, функционально связан с пространственным разрешением детектора. Для описания этой взаимосвязи используют частотно-контрастную характеристику системы или функцию передачи модуляции

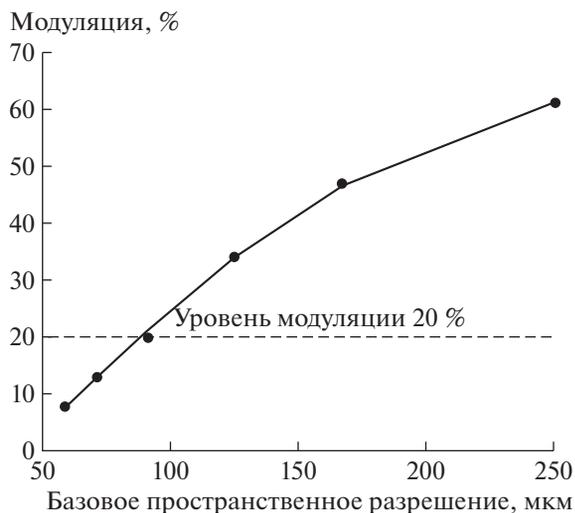


Рис. 5. Результаты определения базового пространственного разрешения детектора.

(ф.п.м.). Характеристика позволяет оценить зависимость отношения контраста на изображении к контрасту тест-объекта от пространственной частоты.

В настоящей работе для оценки контрастной чувствительности строились ф.п.м. с использованием изображений тест-объекта типа “острый край” [8]. Тест-объект представлял собой вольфрамную пластину толщиной 1.5 мм. Край пластины, используемый для построения линии профиля и вычисления ф.п.м., был отшлифован до уровня шероховатости $Ra = 3.2$.

Известно, что на результаты, получаемые при построении ф.п.м., сильно влияет точность расположения тест-объекта [9]. В идеальном случае поверхность пластины должна быть строго перпендикулярна оси пучка трубки (оси системы источник–детектор) в обеих плоскостях. Для выполнения этого условия тест-объект закрепляли в вертикальном положении на поворотной платформе и выравнивали оптическим способом с помощью лазерной головки и зеркала [9].

Изображения тест-объекта для построения ф.п.м. были получены с одинаковой мощностью рентгеновского источника 6 Вт при анодных напряжениях 90 и 120 кВ. При вычислении значений ф.п.м. дополнительно проводилось усреднение по 10-ти профильным линиям; процедуры фильтрации не применялись.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЦЕДУРЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДЕТЕКТОРА

Базовое пространственное разрешение детектора, найденное в соответствии с вышеописанной методикой, составило 88 мкм. Экспериментальные

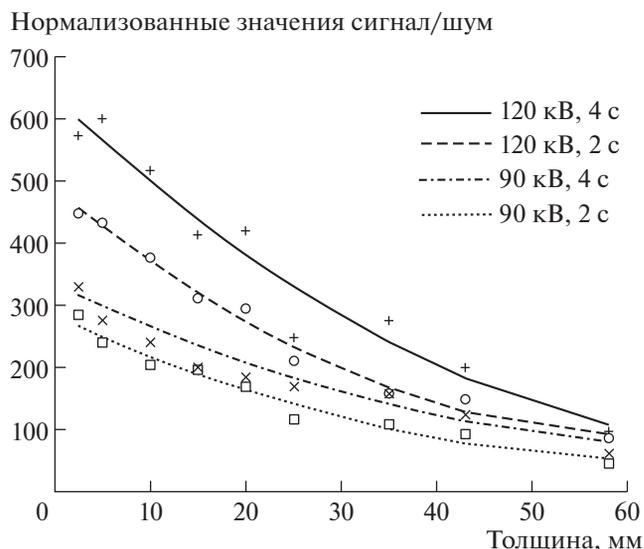


Рис. 6. Результаты оценки SNR_N изображений детектора для разных толщин объекта при различных значениях анодного напряжения и времени экспозиции.

данные представлены на рис. 5. Полученное значение $iSR_b^{детектор}$ почти в 4 раза превосходит размер пикселя детектора на входном торце фокона. Это указывает на необходимость применения сцинтиллятора с меньшей толщиной активного слоя, а значит, с более высокой разрешающей способностью. Более точно оценить требуемую толщину сцинтиллятора можно лишь при проведении дополнительных исследований с использованием специально изготовленных усиливающих экранов, не выпускаемых серийно.

Результаты оценки нормализованного отношения сигнал/шум SNR_N отображены графически на рис. 6. Согласно [2], для обеспечения класса В цифрового радиографического контроля изделий из алюминия величина SNR_N должна быть не менее 120 (для рентгеновских источников до 150 кВ). По координате точки пересечения графиков с линией уровня $SNR_N = 120$ можно оценить допустимый диапазон толщин исследуемых объектов.

Из анализа графических зависимостей на рис. 5 можно сделать вывод, что, в частности, для анодного напряжения 120 кВ сокращение времени экспозиции в два раза приводит к уменьшению допустимой толщины объекта на 16%, тогда как для напряжения 90 кВ – на 26%.

Графики функции передачи модуляции детектора представлены на рис. 7. Практическое совпадение двух кривых позволяет сделать вывод, что при изменении напряжения на источнике в диапазоне порядка 30% рассматриваемая характеристика изменяется в пределах 1%.

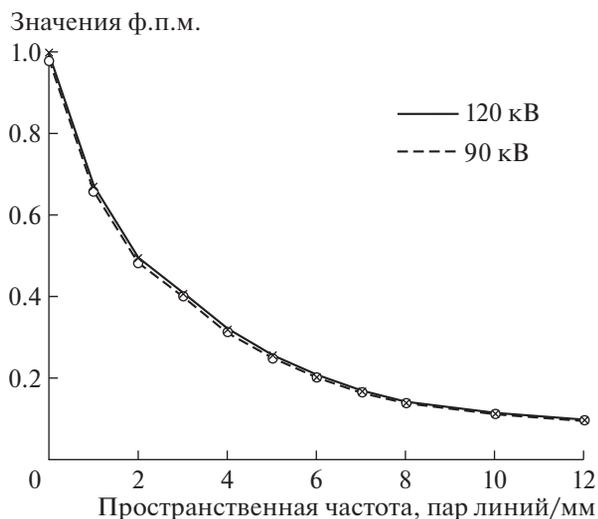


Рис. 7. График функции передачи модуляции детектора для двух анодных напряжений.

5. ПРИМЕНЕНИЕ ДЕТЕКТОРА В УСТАНОВКЕ МИКРОФУКУСНОЙ РЕНТГЕНОГРАФИИ

Для управления детектором в составе установки микрофокусной рентгенографии, для регистрации и обработки изображений в среде программирования Qt на языке C++ создана программа “X-ray Projection Pro” [5]. Программа

включает в себя два модуля: модуль захвата изображений и модуль обработки изображений.

Модуль захвата и визуализации данных позволяет в интерактивном режиме оптимизировать параметры съемки: величину экспозиции, коэффициент усиления, количество кадров при усреднении; а также выделять область интереса (ROI) на изображении.

Основу графического интерфейса модуля обработки изображений составляют четыре окна вывода графической информации (рис. 8). Два верхних окна предназначены для вывода исходного и обработанного изображений, а два нижних – различных графических зависимостей, характеризующих данные изображения.

Исходное изображение *pic0* считывается из базы данных рентгеновских изображений или передается из модуля захвата, хранится в оперативной памяти и не подвергается обработке. После считывания *pic0* создается его копия *pic1*, которая автоматически отображается в левом верхнем графическом окне и является исходным для обработки изображением. В программу включены стандартные функции обработки изображений, такие как поворот, увеличение выделенной области, инвертирование интенсивности, а также операции линейной и нелинейной фильтрации в пространственной области [10]. Назначение фильтров – сглаживание шумов и выделение полезных особенностей на изображениях. Обработанное изображение *pic2* хранится в оперативной памяти, а

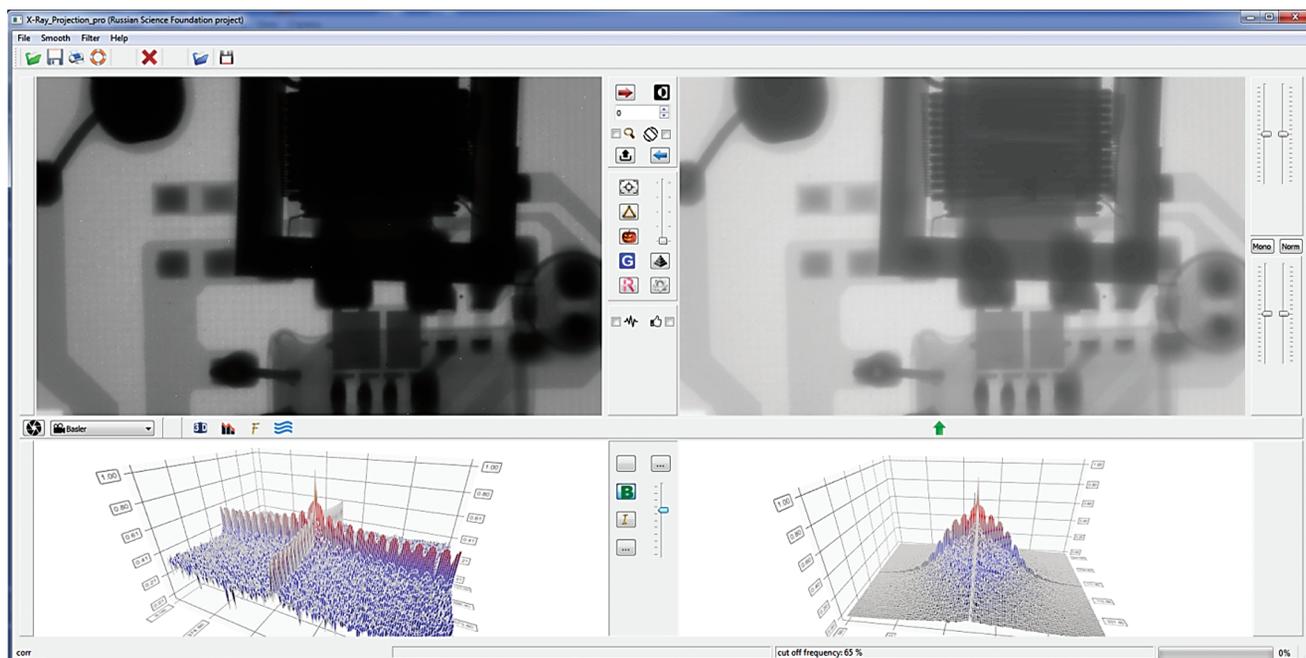


Рис. 8. Интерфейс модуля обработки изображения программы “X-ray Projection Pro” и результат обработки печатной платы с компонентами. Два верхних окна – исходное (слева) и обработанное (справа) изображения, два нижних – графические зависимости, характеризующие данные изображения.

его копия *pic3* выводится в правом верхнем графическом окне. Предусмотрены регулировки яркости и контраста, а также гамма-коррекция изображения *pic3*. Окончательно обработанное изображение *pic3* может быть скопировано в изображение *pic1* и вновь подвергнуто обработке. Организация массивов изображений в программе позволяет быстро восстановить исходное изображение заменой *pic1* изображением *pic0*.

Альтернативный путь обработки изображений заключается в перезаписи информации, зарегистрированной на координатной плоскости ($x0y$), в смежное функциональное пространство. Математическая обработка образов изображений и последующая операция обратного перехода в исходное метрическое пространство позволяют получить изображения нового качества. В частности, преобразование Фурье конвертирует плоское изображение в область двумерных частот, где возможно применение большого количества частотных фильтров, с разной эффективностью подавляющих паразитные шумы [10]. В программе “X-ray Projection Pro” для визуализации образа исходного изображения служит левое нижнее окно. Полученный после операции обработки, например фильтрации шумов, образ изображения *pic1* отображается в виде графика соответствующей зависимости в правом нижнем окне и после применения операции обратного преобразования Фурье автоматически восстанавливается как изображение *pic2*.

На рис. 7 представлен пример обработки изображения печатной платы с компонентами. Исходное для обработки изображение зарегистрировано при анодной мощности микрофокусной трубки 5 Вт и анодном напряжении 90 кВ; время экспозиции составляло 1 с, количество усреднений – 10. Процесс обработки представлял собой последовательность следующих операций: гамма-коррекции, адаптивной пространственной фильтрации импульсных шумов, фильтрации гауссовых шумов в частотной области, повышения резкости пространственным фильтром на основе Лапласиана.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный и изготовленный детектор рентгеновских изображений предназначен для использования с микрофокусными маломощными источниками. Полученные данные по SNR_N позволяют сделать вывод о соответствии изображений классу В для указанных условий экспозиции практически во всем диапазоне исследуемых толщин объекта. Полученные значения SNR_N определяют диапазон толщин объекта контроля, доступных для анализа на одном изображении при одинаковых условиях съемки. Разрешение детектора ниже теоретически предельного уровня

является следствием большой толщины сцинтиллятора, используемого в экспериментах, и может быть улучшено его заменой. Полученные значения функции передачи модуляции хорошо согласуются с результатами измерения базового пространственного разрешения.

Детекторы на основе миниатюрных серийных CMOS-сенсоров и увеличивающих элементов поликапиллярной оптики могут служить недорогой альтернативой устройствам на основе крупноформатных sCMOS-сенсоров и обеспечить качество рентгеновских изображений, достаточное для большинства приложений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10168).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Radiation cameras (Phosphor coupled X-ray Cameras) <https://www.proxivision.de/product/phosphor-coupled-x-ray-cameras/> (дата обращения 30.01.2021).
2. ГОСТ ISO 17636-2-2017. Неразрушающий контроль сварных соединений. Радиографический контроль. Ч. 2. Способы рентгено- и гаммаграфического контроля с применением цифровых детекторов. М.: Стандартинформ, 2018.
3. Seibert J.A., Boone J.M., Lindfors K.K. // Proc. SPIE. 1998. V. 3336. P. 348. <https://doi.org/10.1117/12.317034>
4. Kwan A.L., Seibert J.A., Boone J.M. // Med Phys. 2006. V. 33 (2). P. 391. <https://doi.org/10.1118/1.2163388>
5. Grachev E., Trubitsyn A., Kirushin D., Fefelov A. // Proc. of the 8th Mediterranean Conf. on Embedded Computing (MECO*2019). Research Monograph. Budva, Montenegro, 2019. Article number 8760151. <https://doi.org/10.1109/MECO.2019.8760151>
6. Muehlhauser B.A. Optimizing image signal to noise ratio using frame averaging. <https://4nsi.com/blog/2015/10/21/optimizing-image-signal-to-noise-ratio-using-frame-averaging> (дата обращения 30.01.2021).
7. ISO 19232-5:2018 Non-destructive testing. Image quality of radiographs. Part 5: Determination of the image unsharpness and basic spatial resolution value using duplex wire-type image quality indicators.
8. ГОСТ Р МЭК 62220-1-2006. Характеристики цифровых приемников рентгеновского изображения. Ч. 1. Определение квантовой эффективности регистрации. М.: Стандартинформ, 2007.
9. Samei E., Flynn M.J., Reimann D.A. // Med Phys. 1998. V. 25 (1). P. 102. <https://doi.org/10.1118/1.598165>
10. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital Image Processing. 4th Edition (Global Edition). Pearson Prentice Hall, 2018.

ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ ПРОТОННОГО РЕЛАКСОМЕТРА НА ОСНОВЕ ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА С МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ

© 2021 г. А. А. Мысик^{а,*}, И. В. Бызов^а, С. В. Жаков^а

^а Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН
Россия, 620108, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18

*e-mail: mysik@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 30.04.2021 г.

После доработки 08.06.2021 г.

Принята к публикации 05.07.2021 г.

Описаны два варианта автоматической коррекции температурных вариаций постоянного магнитного поля в системе я.м.р.-релаксометра на постоянных магнитах. В первом варианте используется коррекция магнитного потока в магнитопроводе системы с помощью магнитного шунта, перемещение которого осуществляется шаговым двигателем. Во втором варианте поле корректируется током в катушках, размещенных на магнитопроводе магнитной системы. Коррекция поля осуществляется автоматически в процессе настройки резонансной частоты прибора. Предложенные методы позволяют корректировать относительное изменение магнитного поля в пределах 1%, что перекрывает возможные температурные вариации магнитного поля во всем диапазоне комнатных температур при использовании магнитов на основе сплавов неодим-железо-бор и самарий-кобальт (NdFeB и SmCo).

DOI: 10.31857/S0032816221060100

ВВЕДЕНИЕ

В спектроскопии ядерного магнитного резонанса (я.м.р.) в относительно низких полях с величиной магнитной индукции до 2 Тл широко используются магнитные системы (м.с.) на постоянных магнитах [1, 2]. В отличие от систем на основе электромагнитов и сверхпроводящих соленоидов, такие м.с. не требуют для работы ни мощных источников питания, ни охлаждения до низких температур, они относительно просты и не требуют обслуживания. Основными магнитными материалами, используемыми для изготовления м.с. в настоящее время, являются сплавы неодим-железо-бор и самарий-кобальт (NdFeB и SmCo). При этом сплав NdFeB является наиболее востребованным, поскольку имеет высокую остаточную индукцию (до 1.45 Тл), высокую коэрцитивную силу (~1000 кА/м) и существенно меньшую цену по сравнению с SmCo. Однако температурный коэффициент индукции, который определяет, насколько сильно магнитная индукция зависит от температуры, для сплава NdFeB примерно в 3 раза больше, чем для сплавов на основе SmCo. В свою очередь, температурная зависимость магнитной индукции приводит к нестабильности как напряженности магнитного поля в рабочей области м.с., так и рабочей частоты (ча-

стоты Лармора). Стабильность рабочей частоты является одним из основных параметров, определяющих отношение сигнал/шум и чувствительность прибора. Поскольку частота Лармора однозначно определяется напряженностью магнитного поля, то стабильность поля является одним из главных параметров прибора.

Традиционным способом поддержания стабильности частоты Лармора в я.м.р.-приборах является температурная стабилизация магнита [3]. Хотя при современном уровне электроники автоматическая стабилизация температуры м.с. не представляет существенной проблемы, ее недостатком является фактор времени. Для удобства автоматической стабилизации температура м.с. обычно поддерживается выше комнатной, т.е. на уровне 30–40°C, и перед началом работы температуру магнита в приборе необходимо вывести на заданный рабочий уровень. Это занимает, как правило, 1–1.5 ч. Кроме того, устройство температурной стабилизации требует установки нагревателя и вентиляторов, что приводит к дополнительному энергопотреблению и увеличению габаритов прибора. Поэтому привлекательным является подход, позволяющий поддерживать стабильное магнитное поле в системе при минимуме затрат энергии.

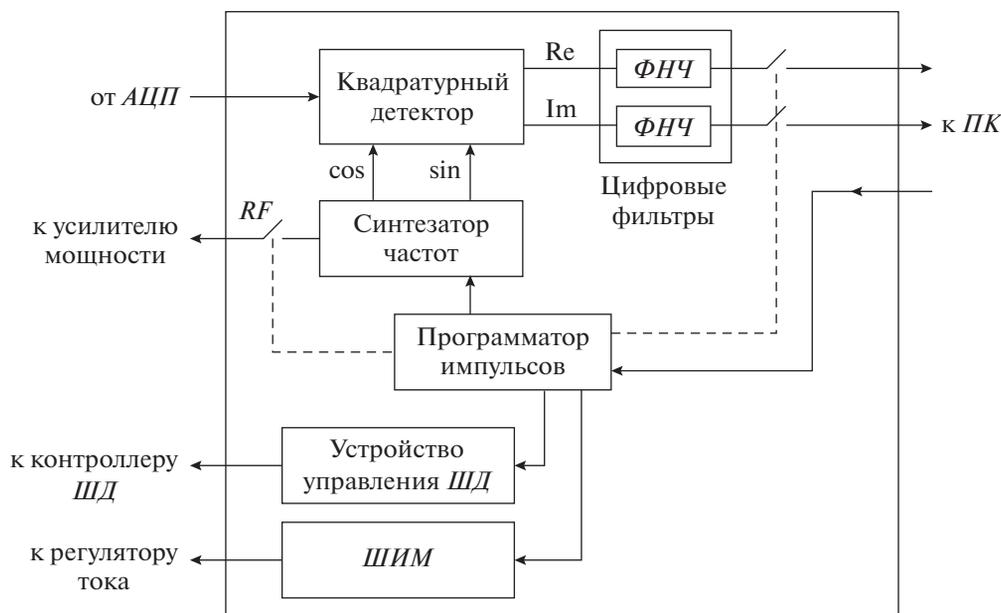


Рис. 1. Упрощенная блок-схема электронной системы я.м.р.-релаксометра. АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ФНЧ – фильтр низких частот; ШД – шаговый двигатель; ШИМ – широтно-импульсная модуляция; ПК – персональный компьютер.

Обычно магнитная система я.м.р.-релаксометра, помимо постоянных магнитов, включает в себя магнитопровод из магнитно-мягкого железа, что позволяет регулировать напряженность магнитного поля в рабочем объеме м.с. изменением параметров магнитной цепи, т.е. изменением магнитного состояния магнитопровода. Такую регулировку можно осуществить с помощью магнитных шунтов, в качестве которых могут быть использованы термомагнитные шунты [4], магнитные шунты на основе перемещающихся постоянных магнитов или магнитно-мягких элементов [5]. Кроме того, регулировку можно осуществить с помощью токовых катушек. В данной работе показана возможность автоматической подстройки частоты Лармора путем изменения магнитного состояния магнитопровода м.с. с помощью механического магнитного шунта или токовых катушек.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данной работе нами использован импульсный я.м.р.-релаксометр собственной разработки. Прибор позволяет проводить измерения с применением наиболее распространенных импульсных последовательностей и имеет полностью цифровой тракт, который состоит из следующих основных блоков: аналого-цифрового преобразователя, квадратурного детектора, цифровых фильтров, программатора импульсов, синтезатора частот. Основой релаксометра является программируемая логическая интегральная схема (п.л.и.с.) фирмы

XILINX XC6SLX9, в прошивке которой реализованы вышеперечисленные основные схемы и узлы цифрового тракта. Прошивка реализована с использованием языка VHDL. Упрощенная блок-схема прибора изображена на рис. 1.

Принятый и усиленный сигнал от образца оцифровывается и поступает в цифровой квадратурный детектор, в котором происходит перемножение сигнала с двумя цифровыми последовательностями, соответствующими двум гармоническим сигналам опорной частоты, сдвинутым на 90°. На выходе квадратурного детектора после необходимой фильтрации с помощью фильтров низких частот ФНЧ образуются две цифровые последовательности, соответствующие вещественной и мнимой частям входного сигнала я.м.р. Скорость изменения фазы этого комплексного сигнала представляет собой отклонение частоты Лармора от требуемой частоты настройки, которая равна частоте опорного сигнала. Известно, что частота я.м.р.-резонанса прямо пропорциональна величине магнитного поля. Следовательно, рассчитанное отклонение частоты можно использовать в качестве сигнала ошибки для выработки управляющих воздействий при коррекции магнитного поля. Расчет сдвига частоты осуществляет управляющая программа релаксометра. Она же на основе предварительно полученных зависимостей изменения магнитного поля от угла поворота ротора или тока катушек рассчитывает необходимое число шагов шагового двигателя ШД или длительность импульсов широтно-импульсной модуляции ШИМ для задания необхо-

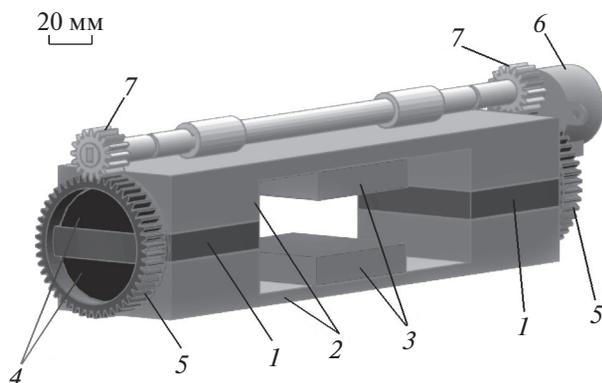


Рис. 2. Схема магнитной системы я.м.р.-релаксометра с магнитными шунтами. 1 – магниты; 2 – магнитопровод; 3 – полюсные наконечники; 4 – элементы магнитного шунта; 5 – зубчатые колеса; 6 – шаговый двигатель; 7 – вал с шестернями, передающими вращение.

димого тока, позволяющего минимизировать отклонение магнитного поля от заданного.

Во время тестовых измерений при регистрации я.м.р. на протонах в качестве образца использовался водный раствор сульфата меди в режиме релаксации $T_2 = 60$ мс при комнатной температуре.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Компенсация вариаций магнитного поля с помощью магнитного шунта

Использование магнитного шунта может быть эффективно в компактных магнитных системах, применяемых, например, в химических и биологических исследованиях, где требуется работать с образцами малых объемов. Схематическое изображение предлагаемого варианта м.с. для биологических исследований с магнитным шунтом приведено на рис. 2.

Необходимая напряженность магнитного поля в рабочем зазоре системы обеспечивается двумя постоянными магнитами. Для увеличения стабильности магнитного поля использовались магниты из сплава $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, температурный коэффициент индукции которых $\alpha = 0.035\%/K$. Стабилизация магнитного поля в м.с. обеспечивается двумя поворотными магнитными шунтами в виде двух круговых сегментов, изготовленных из пластин магнитно-мягкого железа. Пластины закреплены в углублениях зубчатого колеса, изготовленного из немагнитного материала, как показано на рис. 2. Зазор между пластинами фиксирован и равен толщине магнита. При вращении колеса меняется положение пластин относительно полюсов магнита, что приводит к изменению магнитного потока через рабочий зазор м.с. Максимальная

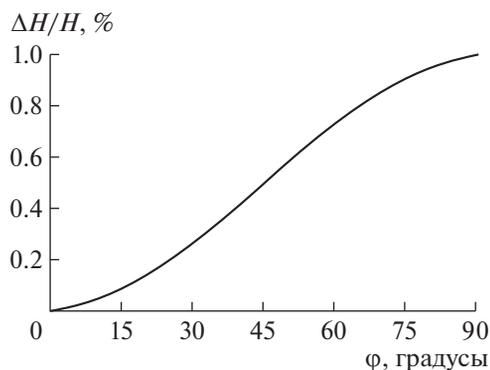


Рис. 3. Относительное изменение напряженности магнитного поля в рабочей области м.с. в зависимости от угла поворота шунта.

напряженность магнитного поля в рабочей области системы реализуется, когда длинная сторона зазора между пластинами шунта параллельна плоскости магнитов, а минимальная – когда перпендикулярна. Величина изменения поля в рабочем зазоре зависит от толщины пластин шунта и может быть выбрана исходя из параметров м.с.

Вращение магнитного шунта осуществляется шаговым двигателем. Все детали механизма движения шунта (зубчатое колесо для крепления элементов магнитного шунта, ось вращения, шестерня на шаговом двигателе) изготовлены из пластика методом 3D-печати.

В процессе автоматической настройки аппаратуры я.м.р. происходит настроечное измерение, в ходе которого вырабатывается сигнал ошибки, пропорциональный разности частоты сигнала Лармора и частоты опорного источника, которая в свою очередь равна частоте настройки LC -контура датчика я.м.р. На основании этого сигнала ошибки аппаратура вырабатывает импульсы управления шаговым двигателем. Зная зависимость напряженности магнитного поля от угла поворота (рис. 3) и угол поворота, который соответствует одному шагу шагового двигателя, рассчитывается число шагов, необходимое для поворота магнитного шунта таким образом, чтобы скомпенсировать ошибку.

Настроечные измерения при необходимости могут быть повторены с целью дальнейшего уменьшения ошибки настройки.

В экспериментальной магнитной системе я.м.р.-релаксометра были использованы два постоянных магнита из сплава $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ сечением 50×30 мм² и толщиной 10 мм. Полюсные наконечники из железа имели сечение 50×50 мм², величина рабочего зазора равна 15 мм. Пластины магнитных шунтов имели форму кругового сегмента с длиной хорды 50 мм и толщину 0.5 мм, расстояние между поверхностью магнита и шунтом 2 мм, а зазор между пластинами шунта равен 10 мм. Частота

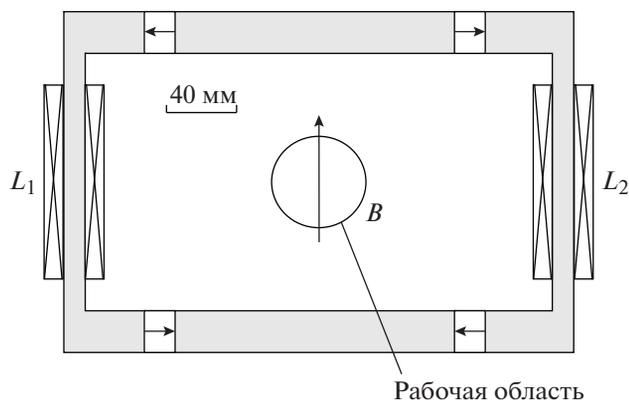


Рис. 4. Схема (поперечное сечение) магнитной системы я.м.р.-релаксометра с токовыми катушками для компенсации изменения магнитного поля. L_1 , L_2 – корректирующие катушки.

настройки я.м.р. равна ~ 8 МГц. Размер рабочего объема: диаметр 8 мм, высота 8 мм. Относительная неоднородность магнитного поля $\Delta H/H$ в рабочем объеме не превышала 10^{-3} .

На рис. 3 приведена относительная зависимость изменения магнитного поля в рабочей области изготовленной м.с. от угла поворота магнитных шунтов. Изменение напряженности магнитного поля в рабочем зазоре при повороте магнитных шунтов от 0° до 90° составило 1% от исходной напряженности магнитного поля. Это обеспечило стабилизацию поля в диапазоне температур от 15 до 45°C , т.е. во всем возможном диапазоне изменения комнатных температур. Коррекция поля с помощью поворота пластин шунта происходила в течение нескольких секунд. Точность поддержания величины поля (частоты) задается перед настроечным измерением. Эта заданная величина определяет количество требуемых итераций. Минимально возможная величина задаваемой ошибки определяется отношением сигнал/шум.

Для обеспечения того же диапазона регулировки поля при использовании магнитов на основе сплава NdFeB, имеющих температурный коэффициент индукции $0.12\%/K$, достаточно увеличить толщину пластин магнитных шунтов.

Следует отметить, что из-за наличия движущихся частей предложенный метод стабилизации магнитного поля удобен только для компактных магнитных систем.

Компенсация вариаций магнитного поля с помощью катушек с током

В магнитных системах с магнитопроводом для коррекции напряженности магнитного поля в рабочей области м.с. могут быть использованы катушки с током, размещенные на магнитопроводе.

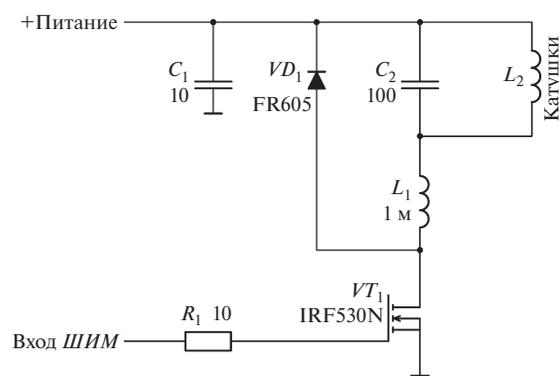


Рис. 5. Схема регулятора тока в катушках.

Схема (поперечное сечение) варианта такой м.с. приведена на рис. 4. Для рассматриваемого типа м.с. элементы магнитопровода, на которых установлены катушки, находятся в состоянии, далеко от магнитного насыщения. Это позволяет изменять магнитный поток достаточно малыми токами. Катушки с током позволяют как уменьшать, так и увеличивать магнитный поток в магнитопроводе путем изменения направления тока. Но, как правило, это требует применения мостовых схем питания. Поэтому для упрощения схемотехники была разработана схема однополярного питания катушек с использованием ШИМ. Для такой схемы достаточно одного транзисторного ключа (рис. 5). При этом катушки были подключены так, что увеличение тока приводило к уменьшению магнитного поля в рабочей области. При таком подходе первоначальная настройка резонанса проводилась при токе в катушке, равном $j = j_{\text{max}}/2$, где j_{max} – максимальный ток, который используемая схема коррекции позволяет пропускать через катушку.

Предложенная система коррекции была реализована в работающей на частоте $f = 2.05$ МГц (поле ~ 481 Э) магнитной системе я.м.р.-релаксометров для исследования кернов. Расстояние между полюсами системы 70 мм, максимальный размер исследуемых кернов: диаметр 42 мм, высота 55 мм. Относительная неоднородность магнитного поля $\Delta H/H$ в рабочем объеме не превышала 10^{-3} . Корректирующие катушки имели следующие параметры: сечение 160×8 мм², число витков $N = 100$, ток $j_{\text{max}} = 3$ А.

На рис. 6 приведены результаты измерений относительного изменения напряженности магнитного поля в зависимости от тока корректирующей катушки. Используемая схема позволила компенсировать изменение магнитного поля в рабочем зазоре в пределах 1% (4.8 Э), т.е. обеспечить стабильность поля в диапазоне комнатных температур от 15° до 45° в м.с. с магнитами на основе сплава $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$.

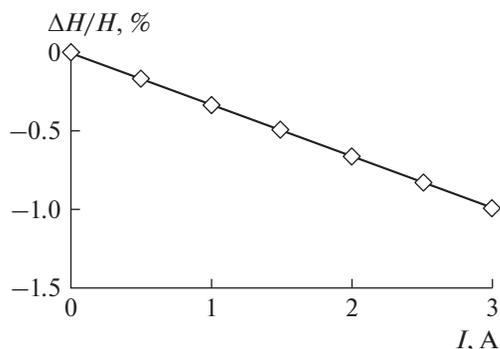


Рис. 6. Относительное изменение напряженности магнитного поля в рабочей области м.с. в зависимости от тока корректирующей катушки.

На рис. 7 приведены результаты измерения частотной зависимости амплитуды эхо-сигнала при различных токах в корректирующих катушках и амплитудно-частотная характеристика резонансного контура датчика сигнала я.м.р. Видно, что при неполном совпадении частот Лармора (максимума эхо-сигнала) с максимумом а.ч.х. датчика амплитуда эхо-сигнала уменьшается. Изменением тока в корректирующих катушках можно ликвидировать эту неточность настройки. В случае использования магнитов на основе сплава NdFeB число витков в компенсирующих катушках может быть увеличено при том же максимальном токе.

Регулировка тока катушек осуществляется автоматически в процессе работы. В ходе предварительного (настроечного) измерения я.м.р.-релаксометр вырабатывает сигнал ошибки, пропорциональный отклонению частоты ларморовской прецессии от частоты настройки измерительной ячейки. На основании сигнала ошибки, зная зависимость напряженности магнитного поля от тока корректирующей катушки (рис. 6), рассчитывается длительность импульса ШИМ, необходимая для изменения тока катушек и соответственно магнитного поля в рабочем зазоре магнитной системы таким образом, чтобы скомпенсировать ошибку настройки из-за изменений температуры окружающей среды.

Настроечные измерения при необходимости могут быть повторены с целью дальнейшего уменьшения ошибки настройки. Количество итераций зависит от отношения сигнал/шум и задаваемой допустимой погрешности целевой частоты (поля). При отношении сигнал/шум > 100 , как правило, достаточно 1 или 2 итераций при допустимой погрешности 50 Гц, обычной для релаксометрии. Кроме того, экспериментально не было обнаружено какого-либо ухудшения однород-

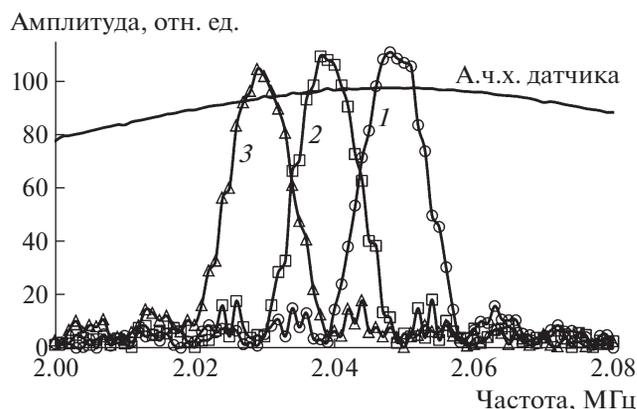


Рис. 7. Зависимости модуля эхо-сигнала от частоты при различных токах корректирующей катушки, А: 0 (1), 1.5 (2), 3.0 (3).

ности магнитного поля при его регулировке для обеих конструкций магнитных систем.

ВЫВОДЫ

Результаты работы показали, что использование как механически перемещаемого магнитного шунта из магнитно-мягких элементов, так и катушек с током обеспечивает необходимую стабилизацию рабочей частоты я.м.р. во всем диапазоне изменения рабочих комнатных температур. Таким образом, рассмотренные схемы для стабилизации магнитного поля могут быть использованы в компактных магнитных системах я.м.р.-релаксометров и спектрометров.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госзадания по теме "Магнит" Г.р. № АААА-А18-118020290129-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mitchell J., Gladden L.F., Chandrasekera T.C., Fordham E.J. // Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy. 2014. V. 76. P. 1. <https://doi.org/10.1016/j.pnmrs.2013.09.001>
2. Casanova F., Perlo J., Blumich B. Single-Sided NMR. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2011.
3. Evans B.A., Richards R.E. // J. Sci. Instrument. 1960. V. 37. P. 353.
4. Колесников С.В., Нохрин В.П., Собянин В.Г., Сивогризов П.Ф. Патент на полезную модель № RU88199 // Бюл. № 30. Оpubл. 27.10.2009.
5. Мысик А.А., Бызов И.В., Уймин М.А., Ермаков А.Е., Раев М.Б., Храмов П.В. Магнитная Патент № RU2691753 // Бюл. № 17. Оpubл. 18.06.2019.

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 539.1.074+544.541+544.542.122

**ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ДОЗИМЕТРЫ НА ОСНОВЕ КЕРАМИКИ
ИЗ ОКСИДА И НИТРИДА АЛЮМИНИЯ**

© 2021 г. Н. Л. Алукер^{a,*}, А. С. Артамонов^b, Т. И. Гимадова^c, А. С. Зверев^d

^a Кемеровский государственный университет
Россия, 650000, Кемерово, ул. Красная, 6

^b Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”
Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31

^c ФГБУ ГНЦ – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России
Россия, 123182, Москва, ул. Живописная, 46

^d Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты СО РАН
Россия, 650000, Кемерово, просп. Советский, 18

*e-mail: naluker@gmail.com

Поступила в редакцию 02.05.2021 г.

После доработки 15.05.2021 г.

Принята к публикации 18.05.2021 г.

Представлены результаты исследования люминесцентных характеристик серийных керамических подложек на основе AlN и Al₂O₃. Полученные результаты позволили определить условия, при которых эти материалы могут быть использованы в дозиметрии ионизирующих излучений. В качестве объектов для сравнения использованы термолюминесцентные детекторы ТЛД-К и ТЛД-500.

DOI: 10.31857/S0032816221050177

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования керамических материалов в последние годы бурно развиваются, что связано с налаженным многими фирмами синтезом материалов для специальных нужд электронной техники и все растущими возможностями применения этих материалов в смежных областях. Наиболее перспективными конструкционными материалами для формирования электронных схем в настоящее время являются керамики на основе алюминия – нитрид алюминия (AlN) и корунд (Al₂O₃). Большинство новых конструкционных материалов обладают термолюминесцентными свойствами. В ряде исследований стандартные и синтезированные керамики, а также материалы подложек микросхем исследовались на предмет использования их в качестве детекторов ионизирующего излучения при оптической и термостимуляции [1–4]. Изучение термо- и фотолюминесцентных характеристик серийно выпускаемых керамических материалов обеспечит возможность их применения в качестве дешевых термолюминесцентных или оптически стимулированных детекторов излучения. Однако характеристики керамик, изготовленных по разным технологиям разными производителями, не вполне идентичны, что требует разработки критериев для паспортизации мате-

риалов и проведения исследований конкретных характеристик определенной партии керамик.

В данной работе приведены результаты исследования спектров поглощения, фото- и термолюминесценции, кинетики люминесценции образцов на основе оксидов кремния и алюминия, а также нитрида алюминия до и после воздействий света и радиации. Основная серия экспериментов по определению характеристик керамик проведена на серийных легкодоступных керамических подложках китайского производства. В качестве основных объектов для сравнения использованы реальные термолюминесцентные детекторы ТЛД-500 (α-Al₂O₃) и ТЛД-К (SiO₂) [5–10].

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

В качестве образцов для исследования использовались:

– стандартные сапфировые керамические подложки Al₂O₃ типа ВК 96 размером 1.5 × 2.5 см и толщиной 0.38 мм;

– стандартные керамические подложки состава 96–99% AlN плюс неконтролируемые добавки, размер подложек 1.5 × 2.5 см, толщина 0.5 мм;

– термолюминесцентные детекторы ТЛД-500 на основе α-Al₂O₃ в виде монокристаллических

шлифованных дисков (масса 75 мг, диаметр 5 мм, толщина 1 мм), выпускаемые серийно и широко используемые в дозиметрическом контроле [5–8];

– термолюминесцентные детекторы ТЛД-К из аморфного стеклокерамического материала на основе SiO_2 массой 11 мг, размером 3×3 мм и толщиной 0.5 мм, детекторы представляли собой полупрозрачный аморфный чип [9, 10] и в данной работе использовались в качестве основного объекта сравнения, поскольку используемая дозиметрическая аппаратура аттестована по ним.

Для изучения фотолюминесценции использовался прибор “Флюорат-02-Панорама”. Прибор содержит два монохроматора и предназначен для исследования спектров возбуждения и регистрации люминесценции, кинетики люминесценции и оптического поглощения. Рабочий диапазон длин волн анализатора 210–860 нм. Длительность импульса возбуждения 1 мкс. Для исследования фосфоресценции спектры измерялись при различных длительностях стробирования (до 1 мс) и задержках строба (до 6 мс). При исследовании образцов малых размеров использовалась диафрагма с круглым отверстием диаметром ~ 3 мм.

Спектры поглощения измерялись в диапазоне длин волн 190–1900 нм с использованием спектрофотометров Shimadzu-1700 и Shimadzu-3600. При измерениях малых образцов применялись те же диафрагмы, что и при измерении люминесценции.

Термолюминесцентные исследования проводились с использованием модифицированного дозиметрического комплекса ДТУ-01М, обладающего высокой чувствительностью к слабым световым потокам и обеспечивающего регистрацию сигнала в температурном диапазоне до 450°C с возможностью изменения скорости нагрева от 1 до $20^\circ\text{C}/\text{с}$. Для исследования термолюминесценции керамик методом лазерной резки из керамических пластин были подготовлены образцы (детекторы) размером 3×3 мм. Таким образом, размеры детекторов ТЛД-К и нарезанных образцов керамик были одинаковыми; толщины образцов сравнимы: ТЛД-К и AlN – 0.5 мм, Al_2O_3 – 0.38 мм; массы образцов составили: 10.9, 14.7 и 13.3 мг соответственно. Детектор ТЛД-500 отличался по размерам: толщина 1 мм, диаметр 5 мм, он имел массу 75 мг и более высокую прозрачность (монокристалл со шлифованной поверхностью). При сравнении чувствительностей образцов к воздействию излучения проводилась поправка интенсивности сигнала в максимуме термостимулированной люминесценции (т.с.л.) на массу детектора.

Для облучения материалов небольшими дозами подпороговых энергий использовался импульсный рентгеновский аппарат АРИНА с максимальной энергией 250 кэВ; для облучения в области доз >0.1 кГр использовалось γ -излучение

^{60}Co (установка РХМ- γ -20). Дозиметрический прибор ДТУ-01М откалиброван совместно с детекторами ТЛД-К, используемыми для контроля дозы облучения.

В качестве источника ультрафиолета (у.ф.) был использован облучатель ОУФд-01 с ртутной газоразрядной лампой низкого давления с кварцевой колбой (диапазон ультрафиолета 205–315 нм, максимум на 253.7 нм).

После резки и обработки лазером образцы керамики не отжигались, фиксировались т.с.л., вызванная воздействием лазерной обработки. При исследовании влияния оптического и ионизирующего воздействий все образцы перед измерениями подвергались отжигу в стандартном для термолюминесцентных детекторов режиме (медленный программируемый нагрев до температуры 450°C с последующим охлаждением в течение 0.5 ч). При небольших дозах (сигналах т.с.л.) высокотемпературный вклад теплового излучения нагревательного элемента вычитался для получения истинного сигнала. Скорость нагрева варьировалась в разных экспериментах от 1 до $20^\circ\text{C}/\text{с}$. Режим нагрева подбирался перед проведением серии измерений и не менялся в процессе исследований всех сравниваемых объектов.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Спектры поглощения

На рис. 1 приведены спектры оптического поглощения детекторов и образцов керамик в единицах десятичного логарифмического коэффициента поглощения. Все образцы имеют значительный фон экстинкции. Рассеяние в видимой области спектра связано с шероховатостью поверхности образцов и для детекторов уменьшается при их оптической полировке. Образцы керамик и ТЛД-К имеют сильное поглощение в у.ф.-области. Поглощение всех образцов в у.ф.-области на длинах волн >200 нм обусловлено наличием собственных и примесных дефектов, так как ширина запрещенной зоны для нитрида алюминия составляет ~ 6.2 эВ, для корунда ~ 9.5 эВ, для кварца ~ 9 эВ. Поглощение детектора ТЛД-500 в у.ф.-области обусловлено присутствием в материале анионных вакансий в разных зарядовых состояниях (F^- и F^{+} -центров) [5–8].

Натрий силикатная основа материала детектора ТЛД-К обуславливает его непрозрачность в диапазоне длин волн до 300 нм. По всей видимости, аналогичные примеси влияют и на у.ф.-поглощение керамик. Судя по спектрам, при измеренных параметрах экстинкции объемная люминесценция в области ~ 400 –500 нм будет регистрироваться в следующих приповерхностных слоях: ~ 0.15 мм для керамики на основе AlN , ~ 0.1 мм для керамики

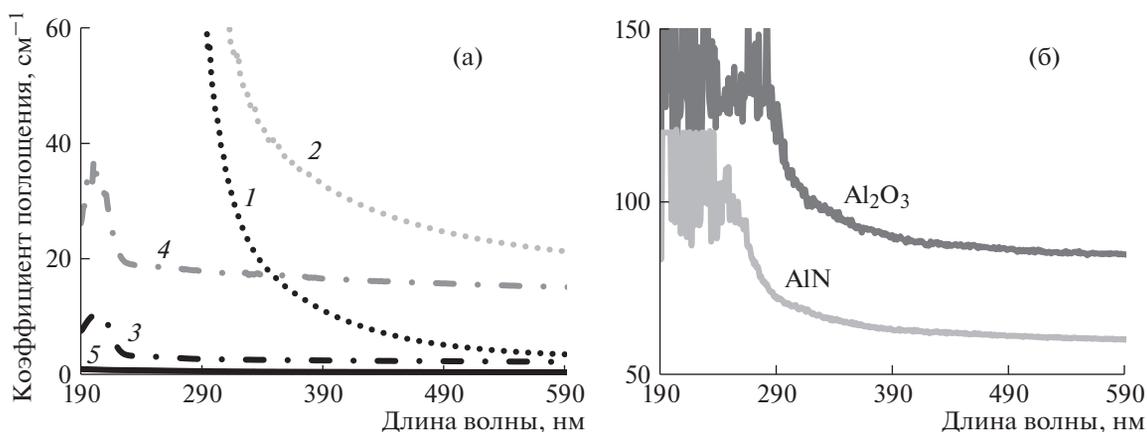


Рис. 1. Спектры поглощения: а – полированного (1) и реального (2) детекторов ТЛД-К, полированного (3) и реального (4) детекторов ТЛД-500, а также чистого монокристалла α - Al_2O_3 (5); б – керамических подложек из Al_2O_3 и AlN .

ки на основе Al_2O_3 , ~0.6 мм для детектора ТЛД-500 и ~0.3 мм для детектора ТЛД-К. Ультрафиолетовое возбуждение в области 190–290 нм в ТЛД-К и керамиках эффективно поглощается в приповерхностном слое ~0.07 мм, обеспечивая значительное влияние поверхности в люминесцентных исследованиях.

В у.ф.-области на краю собственного поглощения керамики AlN выявляется полоса поглощения ~5 эВ, а в керамике Al_2O_3 – полосы поглощения 4.8 и 6 эВ (рис. 1б).

3.2. Спектры люминесценции

3.2.1. Детекторы ТЛД-500 (α - Al_2O_3) и ТЛД-К.

Спектры рентгено-, фото- и термолюминесценции анион-дефектного монокристаллического α - Al_2O_3 хорошо изучены [5–8, 11]. В них доминирует люминесценция анионных вакансий в разных зарядовых состояниях: длительная люминесценция триплетно возбужденного F -центра (410 нм) и свечение, связанное с внутрицентровым переходом синглетно возбужденного F^+ -центра (330 нм – быстрая люминесценция) [5–8]. В рентгенолюминесценции проявляется быстрая излучательная рекомбинация электрона на возбужденном F^+ -центре, т.е. экситонная люминесценция на длине волны 380 нм [11]. Синглетный возбужденный уровень F -центра находится вблизи зоны проводимости, что обеспечивает возможность его ионизации и электронно-дырочной рекомбинации, приводящей к возбуждению триплетного уровня с последующей внутрицентральной люминесценцией. Уровни триплетно возбужденного F -центра и синглетно возбужденного F^+ -центра практически совпадают, что обеспечивает конверсию $F \leftrightarrow F^+$. Центры, образованные кислородными вакансиями, являются определяющими в формировании оптических и люминесцентных

свойств целого ряда оксидов (Al_2O_3 , SiO_2 , BeO , MgO , ZnO и др.) [12–14].

При микросекундном импульсном возбуждении в наших экспериментах наблюдалась интенсивная люминесценция F^+ -центров с максимумом на длине волны 330 нм (рис. 2), которая короче длительности импульса возбуждения и составляет, по литературным данным, порядка нескольких наносекунд [11]. Люминесценция F -центров длительная (~36 мс), поэтому для ее измерения применялся режим регистрации с задержкой регистрирующего строба при его максимальной длительности. Наряду с люминесценцией собственных дефектов, наблюдалась люминесценция длительностью ~ 3.5 мс, обусловленная примесью хрома (Cr^{3+} , 693 нм), возбуждаемая при длинах волн ~210, 260, 400 и 550 нм.

Основная роль в формировании спектра поглощения и люминесценции принадлежит F - и F^+ -центрам и примеси Cr , которые имеются в ис-

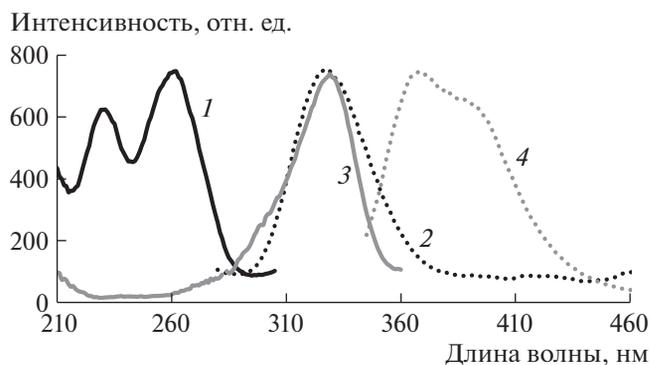


Рис. 2. Спектры возбуждения и фотолюминесценции детекторов ТЛД-500 (соответственно 1, 2) и ТЛД-КМ (соответственно 3, 4) при микросекундном импульсном возбуждении. Задержка строба 0.95 мкс, длительность стробирования 4.95 мкс.

ходном материале. С учетом возможности перезарядки центров соотношения их концентраций меняются при воздействии ионизирующего излучения, в процессе регистрации т.с.л. и отжига.

В спектре люминесценции детектора ТЛД-К наблюдается интенсивная короткая люминесценция с перекрывающимися полосами ~370 и ~390 нм, максимум возбуждения которых приходится на 330 нм (см. рис. 2).

При возбуждении на длине волны 210 нм фиксируется широкая полоса люминесценции с максимумом ~410 нм, она практически идентична люминесценции F -центра в ТЛД-500, только быстрая. В миллисекундном диапазоне наблюдается люминесценция в области длин волн 480–520 нм и на 680 нм, которая носит примесный характер. Предположительно, примеси с переменной валентностью (Ti, Mn, Sr, P и Ce) и щелочно-земельные примеси Ca, K и Na (как компенсаторы заряда), обнаруженные в материале по результатам элементного анализа, играют роль в длительной люминесценции и влияют на выход люминесценции материала детектора ТЛД-К. Люминесценция Cr^{3+} в нем не фиксируется.

Приведенные на рис. 2 спектры возбуждения и люминесценции детекторов ТЛД-500 и ТЛД-К зарегистрированы в одинаковых условиях. Выходы быстрой люминесценции высоки и сравнимы для обоих детекторов. Вызывает интерес перекрытие быстрой люминесценции F^+ -центров в ТЛД-500 с возбуждением быстрой люминесценции ТЛД-К, обусловленной собственными дефектами, предположительно V_0^{++} .

Материал детектора ТЛД-К (стеклокерамика) содержит примеси в концентрациях до нескольких процентов, синтезирован, как и дозиметрический Al_2O_3 , в восстановительных условиях при высоких температурах в присутствии углерода, поэтому анионные вакансии в разных зарядовых состояниях и примеси с переменной валентностью играют в нем, как и в дозиметрическом Al_2O_3 , основную роль в формировании люминесценции.

3.2.2. Корундовая керамика. В длительной люминесценции корундовой керамики, наряду с люминесценцией Cr^{3+} (693 нм), наблюдается узкая полоса вблизи 680 нм, обусловленная, вероятно, примесью Mn^{4+} , с максимумом возбуждения на длине волны ~320 нм [13, 15–19]. При возбуждении на длине волны 260 нм проявляется слабая люминесценция триплетных F -центров в области 410–460 нм.

В быстрой люминесценции проявляется F^+ -центр. Для керамики рассматривается возможность присутствия парных анионных вакансий типа F_2^- ,

F_2^+ и F_2^{2+} -центров [8]. В наноструктурированной керамике Al_2O_3 в спектрах фиксируют полосы люминесценции в области 360–390 нм с возбуждением в область 240–260 нм, которые связывают с F - или F^+ -центрами [6, 7, 12], расположенными на поверхности Al_2O_3 .

3.2.3. Керамика на основе AlN. Быстрая люминесценция в керамике на основе AlN, так же как и в Al_2O_3 , возбуждается в области 260–280 нм. Люминесценция в несколько раз слабее, чем в керамике Al_2O_3 , и может быть обусловлена присутствием корундовой фазы в нитриде алюминия. Спектры длительной люминесценции AlN при разных возбуждениях спектра приведены на рис. 3. При возбуждении в области прозрачности люминесценция проявляется в области 480–580 нм. При возбуждении на длинах волн 210 и 230 нм дополнительно наблюдается люминесценция в области 350–450 нм и 710 нм.

В спектре возбуждения люминесценции с длинами волн 480–580 нм присутствуют три основные области: 230–250, 280 и 387 нм, что может свидетельствовать о единой природе наблюдаемой широкой люминесценции в этой области.

Высокий световыход, большая ширина полосы люминесценции в области 480–580 нм и миллисекундное время высвечивания обеспечивают возможность использования керамики на основе AlN в качестве люминофора для изготовления светодиодов и перспективного материала для изготовления детекторов излучения.

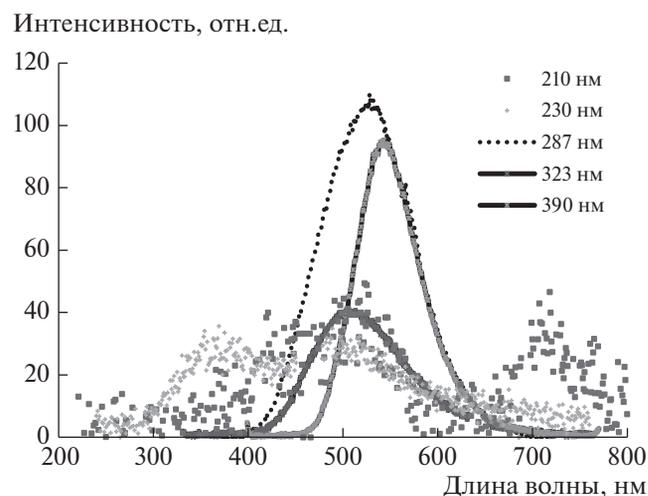


Рис. 3. Люминесценция керамики на основе AlN при микросекундном импульсном возбуждении на разных длинах волн. Задержка строка 50 мкс, длительность строка 1000 мкс.

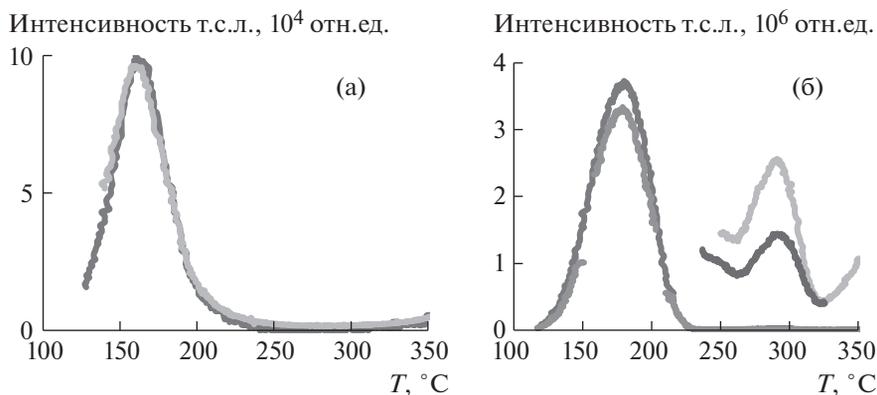


Рис. 4. Термостимулированная люминесценция: **а** – двух детекторов ТЛД-К и **б** – двух детекторов ТЛД-500 (масштаб для высокотемпературных пиков увеличен в 100 раз). Доза 8 Гр.

3.3. Термостимулированная люминесценция термолюминесцентных детекторов ТЛД-К и ТЛД-500

На рис. 4 приведены кривые термовысвечивания детекторов ТЛД-К и ТЛД-500, зарегистрированные при скорости нагрева $\sim 2.7^\circ\text{C}/\text{с}$ при облучении рентгеновским излучением с максимальной энергией 250 кэВ, дозой 8 Гр через три дня после облучения. Эти детекторы далее использовались в качестве объектов сравнения при оценке дозиметрических характеристик керамик. В данных условиях регистрации основные дозиметрические пики расположены при 165°C для ТЛД-К и 178°C для ТЛД-500. Полуширины пиков сравнимы. Небольшие различия в форме полос и их температурном положении могут быть связаны с различием толщин детекторов.

Для ТЛД-500 наблюдается высокотемпературный пик $\sim 280^\circ\text{C}$, интенсивность которого в ~ 200 раз слабее основного дозиметрического пика. Интенсивности сигнала т.с.л. в основных дозиметрических пиках для детекторов различаются в ~ 35 раз, а массы детекторов \sim в 7 раз, следовательно, чувствительности материалов на единицу массы детектора различаются в ~ 5 раз в пользу детектора ТЛД-500.

Анион-дефектный монокристалл $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (ТЛД-500), помимо чувствительности к ионизирующему излучению, обладает сильной чувствительностью к свету, максимальная интенсивность т.с.л. наблюдается при возбуждении у.ф.-излучением. В спектре поглощения $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ этот диапазон соответствует области поглощения F и F^+ -центров и примеси хрома. Чувствительность к облучению в видимой области обусловлена примесью Сг. В отличие от ТЛД-500, детектор ТЛД-К слабо подвержен влиянию у.ф.-засветки на термолюминесцентные характеристики, так как у.ф.-свет < 300 нм практически не проникает в детектор из-за сильного поглощения в тонком приповерхностном

слое. Чувствительности к нефiltroванному свету у.ф.-лампы (максимум на длине волны 254 нм) с учетом поправки на массы детекторов различаются для ТЛД-500 и ТЛД-К в ~ 2600 раз, что делает возможной работу с детекторами ТЛД-К на свету. Проведенный различными методами расчет энергии активации ловушек, обеспечивающих основной дозиметрический пик, дает величину 1.1 ± 0.1 эВ для основных дозиметрических пиков обоих детекторов. При температуре 177°C высвечивание ловушки с такой глубиной происходит за десятки–сотни микросекунд. При комнатной температуре такая глубина ловушки обеспечивает сохранение информации в течение нескольких лет после облучения, обеспечивая фединг (спад показаний при хранении облученного детектора) $\sim 20\%$ в течение года после облучения. Наличие более мелких ловушек в обоих материалах вызывает небольшую дополнительную потерю информации об облучении в первые часы после облучения.

При увеличении скорости нагрева детектора ТЛД-К от 1 до $10^\circ\text{C}/\text{с}$ интенсивность основного дозиметрического пика растет пропорционально изменению скорости нагрева, что сохраняет светосумму пика неизменной (рис. 5). Более низкие и более высокие скорости приводят к изменению светосуммы сигнала термолюминесценции, т.е. нежелательны. При слишком медленной скорости нагрева светосумма пика растет за счет того, что более глубокие ловушки могут вносить вклад в формирование сигнала. При увеличении скорости более $10^\circ\text{C}/\text{с}$ происходит потеря сигнала из-за того, что за время регистрации не успевает произойти полное высвечивание светосуммы.

В области температур до 400°C в т.с.л. детекторов ТЛД-500 и ТЛД-К регистрируются, по крайней мере, два пика – дозиметрический и более высокотемпературный. Для обоих пиков при облучении в определенном диапазоне доз наблюда-

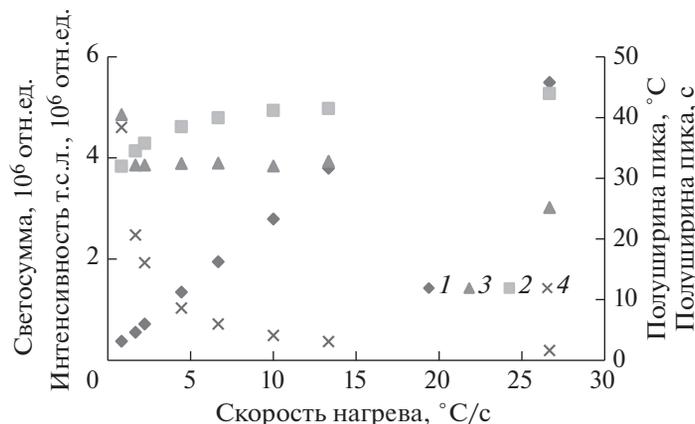


Рис. 5. Зависимости интенсивности т.с.л. (1), полуширины (в градусах Цельсия) (2), полуширины (в секундах) (4) и светосуммы (3) дозиметрического пика детектора ТЛД-К от скорости нагрева. Доза 50 Гр, источник ⁶⁰Со.

ется линейность накопления термолюминесцентного сигнала от дозы облучения. Затем имеет место выход на насыщение, а при последующем росте дозы – даже падение сигнала. Для детекторов ТЛД-К линейность зависимости выхода т.с.л. от дозы облучения выполняется до доз ~1 кГр, что является своеобразным рекордом для термолюминесцентных детекторов [9, 10]. Рекордными являются также характеристики детектора при больших плотностях излучения [10].

Наиболее популярные в индивидуальном дозиметрическом контроле детекторы ТЛД-100 (LiF-Mg, Ti) обладают в пересчете на массу, по крайней мере, в 3 раза меньшей чувствительностью к облучению, чем ТЛД-К, и в 15 раз меньшей, чем ТЛД-500. Отклонение от линейности их дозовой зависимости в дозиметрическом пике наступает при дозах ~1–10 Гр.

3.4. Термостимулированная люминесценция керамических образцов

3.4.1. Al₂O₃. На рис. 6 показана кривая т.с.л. не отожженного после воздействия лазера детектора из керамики Al₂O₃.

В т.с.л., наведенной лазерной резкой, наблюдаются три максимума: при 175, 250 и 350°C. При облучении рентгеновским излучением с энергией ~250 кэВ дозами ~8 и ~40 Гр после отжига сигнала, наведенного лазерной обработкой, хорошо фиксируются те же пики т.с.л., что свидетельствует об идентичности термолюминесцентных сигналов, наведенных лазерной резкой и облучением. Удельная чувствительность к ионизирующему излучению детектора из корундовой керамики в ~70 раз ниже, чем ТЛД-К. Чувствительность к нефилтрованному свету у.ф.-лампы детектора из корундовой керамики существенно ниже, чем у детектора ТЛД-500, и сопоставима с чувствительно-

стью к свету детектора ТЛД-К, что связано с сильным поглощением у.ф. (см. рис. 16).

Из-за низкой чувствительности к свету и ионизирующему излучению керамика на основе Al₂O₃ бесперспективна в качестве материала термолюминесцентного детектора, но достаточно перспективна в качестве материала подложек для пленочных высокочувствительных термолюминесцентных детекторов. Наличие высокотемпературных пиков на кривой термолюминесценции может быть интересно (при выполнении дополнительных исследований) для дозиметрии в критических условиях (при разогреве среды при воздействиях ионизирующего излучения).

3.4.2. AlN. Интересной и неоднозначной оказалась термолюминесценция детекторов, приготовленных из керамики на основе AlN.

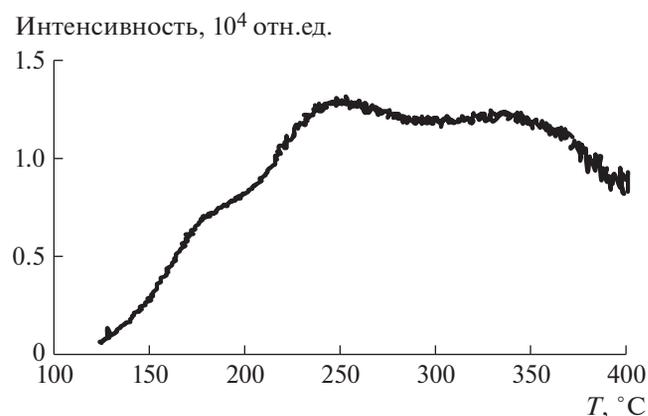


Рис. 6. Термостимулированная люминесценция детектора из керамики на основе Al₂O₃ после резки лазером, вычтен фон, обусловленный тепловым свечением нагревательного элемента.

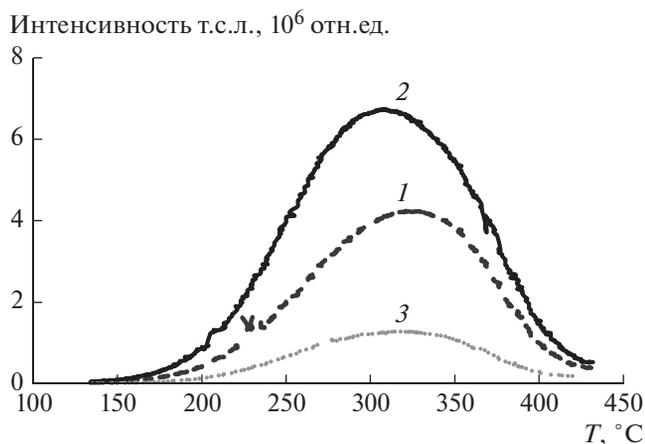


Рис. 7. Термостимулированная люминесценция детекторов из керамики AlN при скорости нагрева 3°C/с после резки лазером и последующей обработки им поверхности. 1 – т.с.л., измеренная со стороны, противоположной слою металлизации; 2 – т.с.л. детектора без слоя металлизации; 3 – т.с.л., измеренная через слой металлизации. Измерения выполнены через две недели после резки.

На рис. 7 приведена кривая т.с.л. детекторов, изготовленных лазерной резкой без последующего отжига. Резка лазером наводит очень интенсивный высокотемпературный сигнал т.с.л. После резки и дополнительной обработки лазером поверхности детектора на ней появляется тонкий слой металлизации.

На рис. 8 приведена кривая т.с.л. детекторов из керамики на основе AlN после отжига и облучения дозами 8 и 40 Гр. Анализ рисунка показывает, что выдерживается линейная зависимость сигнала т.с.л. от дозы облучения, но обращает на себя внимание сдвиг максимума т.с.л. Отличие условий проведения измерений состояло в том, что после облучения дозой 8 Гр измерения проводили через неделю, а после облучения дозой 40 Гр – на 5-й день после облучения. Зарегистрированный в эксперименте сдвиг максимума термолюминесценции может свидетельствовать о частичной потере информации детектором в процессе выдержки облученного детектора перед измерениями. О большом фединге т.с.л. материала AlN, легированного иттрием, сообщалось в работах [1, 2]. Очевидно, что кривая т.с.л. не элементарна, и потеря информации об облучении связана с сильным федингом ее низкотемпературной части.

Чувствительность к ионизирующему излучению керамики на основе AlN высокая: через неделю после облучения чувствительность была в 5 раз выше, чем у детектора ТЛД-К, и незначительно хуже, чем у материала детектора ТЛД-500. Сокращение интервала времени между облучением и началом измерений до нескольких минут позволяет увеличить сигнал т.с.л. детекторов из

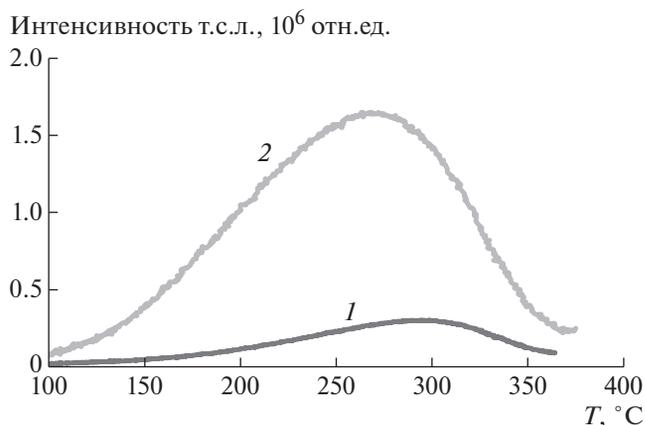


Рис. 8. Термостимулированная люминесценция детекторов из керамики на основе AlN, облученных дозами 8 (1) и 40 Гр (2). Скорость нагрева 2.67°C/с.

AlN в несколько раз. В этом случае уровень сигнала т.с.л. будет сравним с сигналом детектора ТЛД-500, масса которого в 5 раз больше. С учетом поправки на массу детекторов чувствительность керамики на основе AlN в 5 раз выше чувствительности материала детектора ТЛД-500.

Результаты проверки чувствительности детектора из керамики AlN к свету приведены на рис. 9. Здесь же приведен сигнал т.с.л. детектора AlN после облучения дозой 40 Гр.

Уровень максимального сигнала, регистрируемый в первые минуты после у.ф.-облучения (вероятно, близко к области насыщения), спадает в е

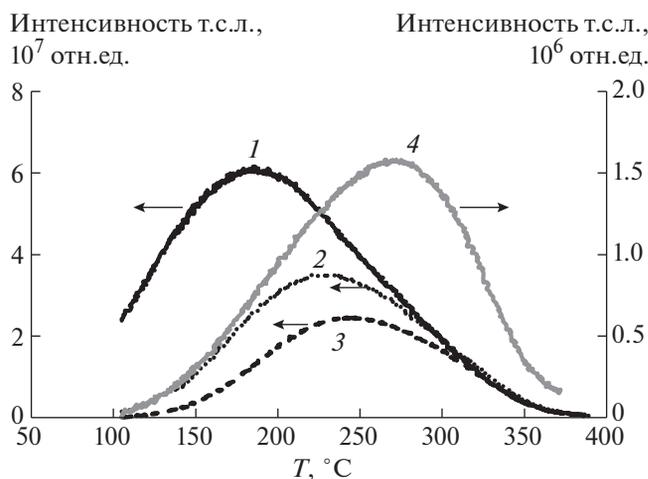


Рис. 9. Термостимулированная люминесценция детекторов из керамики на основе AlN после облучения светом и ионизирующим излучением. 1 – сразу после облучения светом; 2 – через день после облучения светом; 3 – через 3 дня после облучения светом; 4 – через 5 дней после облучения ионизирующим излучением дозой 40 Гр.

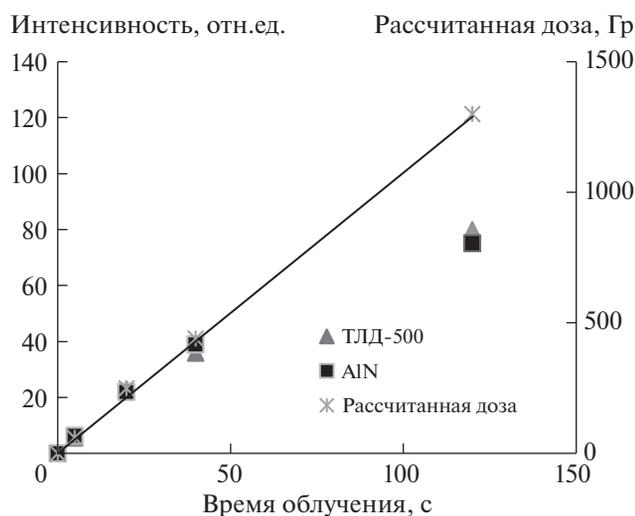


Рис. 10. Зависимости интенсивности сигнала т.с.л. детекторов на основе AlN и TLD-500 от времени у.ф.-облучения с пересчетом на соответствующее воздействие ионизирующей радиацией (рассчитанная доза).

раз в течение последующих шести дней со сдвигом максимума в высокотемпературную область почти на 100°C . Через равные промежутки времени после воздействий ионизирующего излучения и у.ф. термолюминесцентный сигнал от ионизирующего излучения в 10 раз меньше, чем при его насыщении у.ф.-облучением, что позволяет оценить эффективную дозу у.ф.-воздействия в ~ 400 Гр. Интенсивности сигнала через равное время после облучения равным дозами хорошо воспроизводятся.

При изменении скорости нагрева интенсивность т.с.л. детектора из керамики AlN, как и детектора TLD-K (см. рис. 5), изменяется пропорционально скорости нагрева в диапазоне $1\text{--}10^{\circ}\text{C}/\text{с}$.

В связи с тем что характеристики т.с.л. керамики AlN после ионизирующего и у.ф.-воздействия идентичны, исследование дозовой зависимости осуществлялось при у.ф.-облучении и пересчитывалось на воздействие ионизирующего излучения. Оценки линейности сигналов т.с.л. детектора из керамики AlN и детектора TLD-500, также обладающего высокой чувствительностью к воздействию света, от времени у.ф.-облучения приведены на рис. 10.

Облучение проводилось на расстоянии 6 см от колбы лампы после ее прогрева в течение 5 мин, т.с.л. регистрировалась в течение первых нескольких минут после облучения. После облучения в течение 40 с (эффективная доза 400 Гр) у детектора TLD-500 наблюдается небольшое отклонение от линейности с дальнейшим выходом на насыщение. Для керамики AlN область линейности шире, с более выраженным выходом на насыщение при дозах ≥ 600 Гр.

Измерения проводили при скорости нагрева $6.7^{\circ}\text{C}/\text{с}$, стандартной для ДТУ-01. Получены практически идентичные зависимости для детекторов на основе керамики AlN и TLD-500 при отличии их масс в 5 раз.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Изученный нами серийно выпускаемый керамический материал AlN является чрезвычайно перспективным для использования в дозиметрии как ионизирующего, так и фотовоздействия. В обоих случаях после облучения наблюдается значительный фединг сигнала т.с.л. и сдвиг его максимума. Однако хорошая воспроизводимость сигнала после облучения позволяет осуществлять градуировку детектора с учетом фединга. При измерении в течение нескольких минут после облучения чувствительность керамики AlN к облучению как светом, так и ионизирующим излучением высокая и превосходит чувствительность материалов детектора TLD-500 в 5 раз, TLD-K — в 25 раз, а TLD-100 — в 80 раз. В течение недели после облучения происходит почти десятикратное падение сигнала т.с.л. за счет высвечивания низкотемпературной части пика, удельная чувствительность к радиации через несколько дней после облучения становится ниже чувствительности TLD-500, однако превосходит чувствительность TLD-K в 3.5 раза, а TLD-100 \sim в 10 раз.

Несомненный интерес представляет металлизация поверхности, появляющаяся под действием лазерной обработки и свидетельствующая о создании при лазерном воздействии поверхностных дефектов в катионной подрешетке. Этот эффект может быть использован в качестве метки при контроле слабо проникающего излучения, когда важно фиксировать сторону облучения.

Люминесцентные характеристики нитрида алюминия подразумевают нетривиальный механизм его фотолюминесценции и т.с.л. с наличием в объекте зоны ловушек с близкими энергиями активации. Высока вероятность того, что это сложный молекулярный центр, обладающий колебательной структурой, с длительной релаксацией к наиболее стабильному состоянию. Таким центром, на наш взгляд, может быть молекулярный центр типа MnO_4^- , проявляющийся в фотолюминесценции.

Высокая чувствительность, хорошая воспроизводимость сигнала т.с.л. партии детекторов, изготовленных из одной серийной подложки, возможность многократного использования при стандартном отжиге, линейность дозового отклика в широком диапазоне доз делает материал стандартных керамических подложек весьма перспективным для дозиметрии высокодозных воздействий. Наличие сильного фединга накладывает

определенные ограничения на использование материала. Он не может быть применен для накопительного контроля фоновой радиации, но при соответствующей градуировке является отличным высокочувствительным детектором в случае необходимости быстрой оценки дозы после облучения. Высокая интенсивность и большая полуширина сигнала т.с.л. при измерении в течение нескольких минут после облучения обеспечивают высокий выход т.с.л., $\geq 10\%$, что является рекордным для термолюминесценции, так как выходы т.с.л. наиболее чувствительных детекторов не превышают 1%. Высокий выход фотолюминесценции в микросекундном диапазоне в области 480–580 нм делает материал перспективным для изготовления светодиодов.

Исследованная керамика Al_2O_3 характеризуется наличием нескольких пиков на кривой термолюминесценции и не очень высокой чувствительностью к свету и ионизирующему излучению. В связи с этим материал может быть перспективен в качестве подложки для тонкопленочных детекторов с возможностью использования (при проведении дополнительных исследований) в качестве детектора излучения в высокотемпературных полях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Trinkler L., Botter-Jensen L., Christensen P., Berzina B.* // Rad. Meas. 2001. V. 33(5). P. 731. [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(01\)00093-2](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(01)00093-2)
2. *Trinkler L., Berzina B., Kasjan D., Chen L.-Ch.* // Rad. Meas. 2008. V. 43. P. 231. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2007.12.025>
3. *Bi Z.X., Zheng Y.D., Zhang R., Gu S.L., Xiu X.Q., Zhou L.L., Shen B., Chen D.J., Shi Y.* // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2004. № 15. P. 317. <https://doi.org/10.1023/B:JMSE.0000024233.82681.dc>
4. *Satoru Tanaka, Quanli Hu, Grishmanov V., Toshiaki Yoneoka* // Nucl. Instrum. and Methods. in Phys. Res. B. 1998. V. 141. P. 547.
5. *Akselrod M.S., Kortov V.S., Kravetsky D.J., Gotlib V.I.* // Radiat. Prot. Dosim. 1990. V. 32. № 1. P. 15.
6. *Кортков В.С., Никифоров С.В.* // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. 2011. Т. 9. № 1. С. 41.
7. *Кортков В.С., Ермаков А.Е., Зацепин А.Ф., Уймин М.А., Никифоров С.В., Мысик А.А., Гавико В.С.* // ФТТ. 2008. Т. 50. № 5. С. 916.
8. *Kortov V.S., Pustovarov V.A., Shtang T.V.* // Radiation Measurements. 2016. V. 85. P. 51. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2015.12.009>
9. *Алукер Н.Л., Суздальцева Я.М., Herrmann M.E., Дулепова А.С.* // ПТЭ. 2016. № 5. С. 115. <https://doi.org/10.7868/S0032816216050025>
10. *Алукер Н.Л., Артамонов А.С., Herrmann M.* // ПТЭ. 2021. № 3. С. 98. <https://doi.org/10.31857/S0032816221020269>
11. *Кортков В.С., Сюрдо А.И., Шарафутдинов Ф.Ф.* // ЖЭТФ. 1997. Т. 67. № 7. С. 72.
12. *Kostyukov A.I., Zhuzhgov A.V., Kaichev V.V., Rastorguev A.A., Snytnikov V.N.* // Optical Materials. 2018. V. 75. P. 757. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2017.11.040>
13. *Berezovskaya I.V., Khomenko O.V., Poletaev N.I., Khlebnikova M.E., Stoyanova I.V., Efrushina N.P., Dotsenko V.P.* // Functional Materials. 2018. V. 25. № 3. P. 490. <https://doi.org/10.15407/fm25.03.490>
14. *Kotomin E.A., Popov A.I.* // Nucl. Instrum. and Methods. in Phys. Res. 1998. V. 141. № 1–4. P. 1. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(98\)00079-2](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(98)00079-2)
15. *Novita M., Ogasawara K.* // Journal of the Physical Society of Japan. 2012. V. 81. P. 104709. <https://doi.org/10.1143/JPSJ.81.104709>
16. *Adachi S.* // J. Lumin. 2018. V. 202. P. 263. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2018.05.053>
17. *Xu Y., Wang L., Qu B., Li D., Lu J., Zhou R.* // J. Am. Ceram. Soc. 2019. V. 102. P. 2737. <https://doi.org/10.1111/jace.16155>
18. *Кулинкин А.Б., Феофилов С.В., Захарченя Р.И.* // ФТТ. 2000. Т. 42. Вып. 5. С. 835.
19. *Salek G., Devoti A., Lataste E., Demourgues A., Garcia A., Jubera V., Gaudon M.* // J. Lumin. 2016. V. 179. P. 189. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2016.07.004>

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

**ВЫБОР УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ МАЛОГАБАРИТНОГО
ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ**

© 2021 г. С. В. Куцаев*

RadiaBeam Technologies LLC, 1717 Stewart st., Santa Monica, CA, 90404, USA

*e-mail: kutsaev@radiabeam.com

Поступила в редакцию 07.05.2021 г.

После доработки 10.06.2021 г.

Принята к публикации 21.06.2021 г.

В основе современных систем для фотонной радиотерапии лежат ускорители электронов с энергией до 6 МэВ. Разработка и производство таких ускорителей находится во вполне зрелом состоянии. Однако для реализации новых методов лучевой терапии, таких как некопланарная или 4π-терапия, коммерчески-доступные ускорители являются слишком громоздкими. Другим препятствием на пути к более широкому внедрению и доступности современной технологии линейных ускорителей являются высокие капитальные и эксплуатационные затраты. В данной статье будет рассмотрен вопрос выбора ускоряющей структуры для экономичного малогабаритного ускорителя электронов системы некопланарной фотонной лучевой терапии.

DOI: 10.31857/S0032816221060094

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее бурно развивающихся областей прикладного применения ускорителей заряженных частиц является радиотерапия. В последние годы стали появляться инновационные методы облучения опухолей с высокой биологической эффективностью, точностью позиционирования, малым повреждением здоровых тканей и адаптивностью (способностью изменять параметры излучения в соответствии с изменением положения опухоли в реальном времени) [1]. Эти методы невозможно реализовать в полной мере с помощью существующих ускорителей, поэтому разработка новых малогабаритных ускорителей с уникальными параметрами является ключевой задачей в области медицины.

Среди проблем современной фотонной радиотерапии можно отметить неравномерность распределения дозы облучения и повреждение здоровых тканей вокруг опухоли. В традиционных системах радиотерапии, таких как C-arm [2] или CyberKnife [3], вращающихся вокруг пациента, эту технологию реализовать практически невозможно из-за габаритов источников излучения [4]. Существующие установки для лучевой терапии можно разделить на C-образные, кольцевые и роботизированные в зависимости от конструкции гентри¹ [5]. Первые два типа гентри не подходят для некопланарной лучевой терапии, поскольку излучение может вращаться только в одной плоскости. В то же время существующие роботизиро-

ванные порталные системы непрактичны, так как углы доступа источника излучения очень ограничены [6].

Проблема неравномерности дозы может быть решена облучением пациента с большого числа разных некопланарных направлений путем, например, вращения источника излучения вокруг пациента в пределах полного телесного угла 4π [7]. Такой метод получил название 4π-терапии. Основная его идея заключается в том, что, когда излучение может быть доставлено практически под любым углом и из любого положения, оно может быть нацелено более точно и с большей интенсивностью на опухоль, уменьшая при этом степень облучения здоровых тканей.

Технология 4π-терапии позволяет существенно увеличить эффективность доставки дозы в опухоль, не повреждая окружающие ткани [8, 9]. Некопланарное облучение обеспечивает более компактное распределение дозы, которое защищает нормальную ткань от чрезмерных доз облучения и лечит опухоль более высокими дозами. Ученые Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе (UCLA) [10] показали, что с помощью 4π-терапии можно улучшить местный контроль рецидивных опухолей головы и шеи с 35% до бо-

¹ Подвижная часть аппарата радиотерапии, содержащая источник излучения (в случае фотонной терапии), или система магнитного ротационного облучения лежащего пациента (в случае адронной терапии).

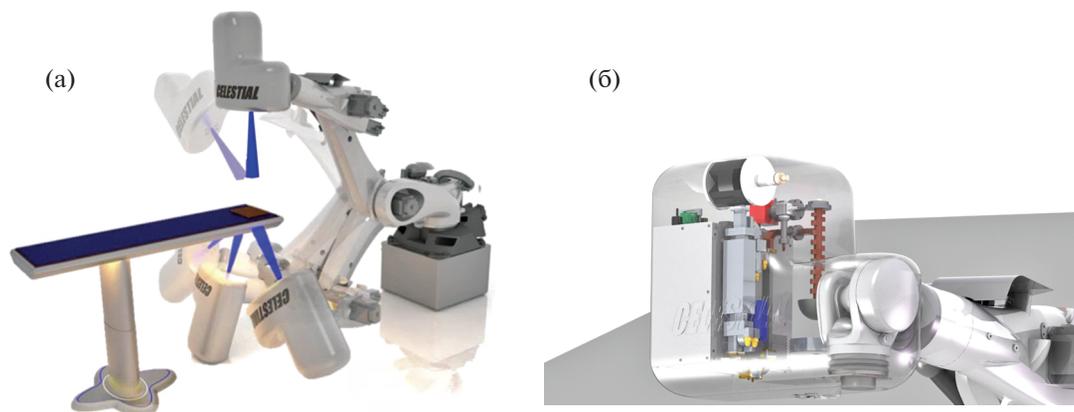


Рис. 1. Модель установки для 4π-терапии (а), разработанная Калифорнийским университетом в Лос-Анжелесе (UCLA) совместно с RadiaBeam Technologies (США), и схема ее источника излучения на основе линейного ускорителя электронов с энергий 6 МэВ (б).

лее 90% [11], а центрально расположенных опухолей легкого – практически до 100% [12].

Реализация метода 4π-терапии напрямую зависит от источника фотонов, т.е. ускорителя заряженных частиц. Для доступа источника во всем диапазоне телесного угла 4π его размер, а значит и размер ускорителя, должен быть настолько компактным, чтобы вместе с механической рукой-манипулятором поместиться под медицинским столом. Хотя лучевая 4π-терапия может быть частично реализована на существующих платформах, телесный угол доступа источника сильно ограничен из-за большой вероятности столкновения с системой фиксации пациента и необходимости наклона и движения кушетки для доступа устройства из-за его значительных размеров.

Более удобной платформой для лучевой 4π-терапии является малогабаритный роботизированный гентри, показанный на рис. 1, с доступом к некопланарным углам облучения без необходимости движения кушетки. Технологией, обеспечивающей лучевую 4π-терапию, может стать компактный ускоритель на 6 МэВ [13], который поместился бы в роботизированный манипулятор и в то же время был бы способен обеспечить дозы до 750 сГр/мин на расстоянии 1 м от выхода линейного ускорителя, требуемые для эффективно-го лечения [14].

Основным фактором, определяющим размер и массу ускорителей, является источник питания [15], а размер и масса других периферических компонентов в определенной степени зависят от размера ускоряющей структуры. Для решения этой проблемы компанией RadiaBeam был разработан малогабаритный линейный ускоритель электронов частотного X-диапазона на энергию 6 МэВ [16] с нижеприведенными параметрами, который может использоваться для лучевой 4π-терапии:

Энергия электронного пучка 6 МэВ

Доза облучения – 750 сГр/мин на расстоянии 1 м от ускорителя

Импульсная в.ч.-мощность 1.8 МВт

Коэффициент заполнения импульса 0.08%

Количество ячеек – 19

Импульсный ускоренный ток 100 мА

Масса ускорителя со всеми системами 135 кг

Размер блока излучения – $46 \times 53 \times 28$ см³.

Разработанная ускоряющая структура имеет заметно меньшую длину по сравнению с аналогами [3], что важно для планируемых приложений.

Другой актуальной проблемой современной радиотерапии является ее недостаточная распространенность, особенно в развивающихся странах, где количество установок для лучевой терапии на душу населения может быть до 70 раз меньше по сравнению с развитыми странами [17]. Существуют как технические, так и экономические причины, препятствующие более широкому распространению медицинских линейных ускорителей. Последние включают в себя высокую стоимость установки, стоимость обслуживания и комплектующих. В обзоре [15] приводятся такие способы решения данной проблемы, как использование магнетронов в качестве источников питания и новой технологии изготовления, известной как “разделенная структура”.

В данной статье будет рассмотрен вопрос выбора источника питания и ускоряющей структуры для линейного ускорителя электронов в системе некопланарной лучевой терапии с точки зрения их эффективности.

Таблица 1. Коммерческие магнетроны X-диапазона (9.3 ГГц) с высокой импульсной мощностью

Характеристики магнетрона	Модель магнетрона (производитель)		
	MM7637 (NJR)	VMX3100HP (CPI)	6170 (L-3)
Импульсная в.ч.-мощность, МВт	1.6	1.5	1.8
Коэффициент заполнения импульса, %	0.088	0.18	0.08
Длительность импульса, мкс	4.0	5.5	4.0
Плоская вершина (оценка), мкс	3.5	5.0	3.5
Требуемый импульсный ток пучка для достижения необходимой дозы, мА	90	45	100

2. ВЫБОР ЧАСТОТЫ И ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

Основной новизной при разработке данного ускорителя стало решение работать в частотном X-диапазоне (9.3 ГГц) с питанием от магнетрона вместо традиционно используемого S-диапазона (3 ГГц). Разработка линейных ускорителей электронов X-диапазона началась в 1960–80-х годах [18] и продолжается в различных ускорительных лабораториях в настоящее время [19]. Работа на более высокой частоте имеет несколько преимуществ по сравнению с более низкими частотами, поскольку эффективное шунтовое сопротивление растет с частотой как $f^{1/2}$ при сохранении всех геометрических пропорций структуры. Более низкая добротность структур X-диапазона также позволяет сократить время заполнения резонатора, увеличивая эффективный коэффициент заполнения импульса пучка. Более высокочастотные линейные ускорители также имеют меньшие габариты и меньшую массу ускоряющей конструкции, источника в.ч.-мощности и модулятора.

Обратной стороной работы на повышенных частотах являются более дорогие производственные процессы (из-за более жестких допусков на размеры) и более дорогие радиочастотные компоненты (магнетрон, изолятор и т.д.). Однако увеличение их стоимости компенсируется, по крайней мере, частично экономией в других подсистемах (модулятор, система охлаждения, экранирование). В любом случае разница в стоимости ускорителя является незначительной по сравнению с общей стоимостью медицинской системы для радиотерапии [15].

В качестве источника питания было рассмотрено несколько магнетронов частотного X-диапазона, приведенных в табл. 1 и широкодоступных для коммерческого использования. Среди них L-3 6170 [20] имеет самый высокий уровень импульсной мощности, а CPI VMX3100HP [21] самый высокий уровень средней мощности. Оценка параметров ускорителя, представленных в табл. 2, была проведена с помощью следующей аналитической формулы [22] в предположении

использования БУС с внешней ячейкой связи (БУС-с) [19]:

$$W = \frac{\sqrt{r_{ш} P_{в.ч.} L}}{\frac{I_{п}}{2} \sqrt{\frac{r_{ш} L}{P_{в.ч.}} + \sqrt{1 + \frac{I_{п} r_{ш} L}{4 P_{в.ч.}}}}, \quad (1)$$

где W – энергия пучка, $r_{ш}$ – погонное сопротивление ускоряющей структуры, $P_{в.ч.}$ – доступная в.ч.-мощность, L – длина структуры, $I_{п}$ – ускоренный ток пучка.

Результаты, показывают, что минимальная длина ускоряющей структуры достигается с помощью магнетрона CPI, а оптимальная потребляемая мощность достигается с помощью магнетрона L-3. Для дальнейшей оптимизации мы будем рассматривать только этот магнетрон (L-3). Здесь же стоит отметить, что формула (1) используется в случае структур на стоячей волне, а в случае структур с постоянным импедансом на бегущей волне [23] применяется формула

$$W = \sqrt{\frac{2r_{ш} P_{в.ч.}}{\alpha} (1 - e^{-\alpha L})} - I_{п} r_{ш} L \left(1 - \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha L} \right), \quad (2)$$

где α – коэффициент затухания в структуре.

3. ТРАДИЦИОННЫЕ УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ

Важнейшим этапом разработки ускорителя является выбор ускоряющей структуры. Для ускорителей с энергиями пучка в несколько мегаэлектронвольт и импульсными токами в сотни миллиампер ускоряющие структуры на стоячей волне (с.в.) являются более короткими, чем структуры бегущей волны (б.в.), за счет более эффективного использования в.ч.-мощности [24]. Как следствие, они гораздо более распространены для медицинских ускорителей [25]. Тем не менее, в процессе выбора ускоряющей структуры были рассмотрены и структуры на б.в. – КДВ с электрической и магнитной связью (КДВ-М) [26, 27], и на с.в. – БУС с внутренними и внешними ячейками связи (БУС-о и БУС-с, соответственно). Далее приведены краткие характеристики этих структур:

Таблица 2. Зависимость энергетических параметров ускоряющей структуры типа БУС-с X-диапазона от радиуса апертуры и выбора магнетрона

Параметры	Радиус апертуры, мм					
	0.8		1.4		2.0	
Магнетрон	CPI	L-3	CPI	L-3	CPI	L-3
Добротность структуры ²	9400		9150		8800	
Шунтовое сопротивление, МОм/м	184		167		149	
Длина структуры, см	17.8	18.7	19.5	20.5	22.0	23.1
Средняя в.ч.-мощность, требуемая для достижения необходимой дозы, кВт	1.82	1.10	1.94	1.15	2.12	1.23

² Добротность и шунтовое сопротивление для частицы, движущейся со скоростью света, рассчитаны численно в CST Microwave Studio.

- БУС-с с внешними ячейками связи (рис. 2а) работает в режиме стоячей волны, который обычно более эффективен, чем режим бегущей волны для коротких слаботочных линейных ускорителей, поскольку используется вся доступная в.ч.-мощность.

- БУС-о с внутренними ячейками связи (рис. 2б). Эта структура имеет меньшие поперечные размеры, так как ячейки связи расположены между ускоряющими ячейками. Кроме того, большие размеры отверстий связи обеспечивают лучшую по сравнению с БУС-с стабильность работы при изменении резонансной частоты или частоты генератора, например, вследствие нагрева [24]. С другой стороны, такая структура имеет меньшую эффективность (шунтовое сопротивление) из-за наличия ячеек связи с нулевым полем, расположенных вдоль ускоряющего пути.

- КДВ с электрической связью (рис. 2в). Структуры, работающие в режиме б.в., обычно используются для сильноточных линейных ускорителей или ускорителей с высокой энергией, поскольку они не имеют проблемы частотного разделения соседних видов колебаний благодаря непрерывной дисперсионной кривой и могут быть сделаны

очень длинными. Кроме того, более длинная структура имеет более высокое полное шунтовое сопротивление ($R_{ш} = r_{ш}L$), что может привести к снижению требований к мощности (поскольку $P \sim V^2/R_{ш}$). В отличие от структур, работающих в режиме с.в., где время заполнения зависит от добротности, в структуре б.в. оно зависит от длины и групповой скорости ($t_3 = v_{гр}L$) и для типичных длин ускорителей 3-см диапазона оно меньше, чем в БУС. С другой стороны, минимальный размер апертуры структуры типа КДВ определяется минимальным значением групповой скорости и должен быть больше, чем для структуры с.в., что снижает шунтовое сопротивление.

- Наконец, структура КДВ-М, работающая на обратной волне (рис. 2г), представляет интерес, поскольку она не имеет вышеописанной проблемы с минимальной апертурой, так как связь между соседними ячейками осуществляется с помощью магнитного поля через отверстия связи, в отличие от обычного КДВ, где ячейки связаны через отверстия диафрагмы посредством электрического поля. Из-за наличия магнитной связи дисперсия в такой структуре становится отрица-

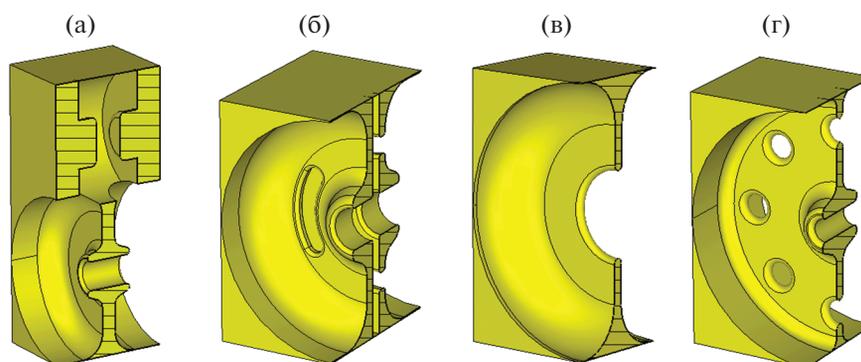


Рис. 2. Поперечное сечение ускоряющих структур, рассматриваемых в качестве кандидатов для медицинского ускорителя: БУС-с (а), БУС-о (б), КДВ (в) и КДВ-М (г).

Таблица 3. Сравнение электродинамических параметров различных ускоряющих структур частотного X-диапазона для использования в ускорителе для лучевой терапии

Тип структуры	Шунтовое сопротивление, МОм/м	Время заполнения, нс	Длина, см	Средняя в.ч.-мощность, кВт
БУС-с	148.7	453	23.1	1.23
БУС-о	125.5	378	27.4	1.36
КДВ	168.5	357	22.8	1.27
КДВ-М	186.8	177	21.5	1.13

тельной и электромагнитная волна распространяется от конца структуры к началу [28].

Сравнение параметров рассматриваемых структур, численно рассчитанных в CST Microwave Studio, приведено в табл. 3. По результатам этих расчетов можно сделать следующие выводы:

– средние потери в.ч.-мощности в основном определяются магнетроном, а L-3 6170 обеспечивает оптимальную длину и экономию энергии;

– необходимая средняя в.ч.-мощность может меняться в зависимости от длины структуры; в структурах на с.в. единственный способ увеличить шунтовое сопротивление и тем самым уменьшить требуемую мощность (всего на ~10%) – это уменьшить радиус апертуры, что не рекомендуется;

– структура КДВ с постоянным импедансом может иметь параметры, сравнимые с линейным ускорителем на основе БУС, но для высокого токопротождения для этого может потребоваться громоздкий соленоид [29];

– структуры с постоянным градиентом на основе КДВ-М могут потенциально улучшить потери мощности или длину на 10% по сравнению со структурой на с.в., однако имеют такие недостатки, как сложность настройки и чувствительность к нагрузке током [30].

По результатам этих расчетов было отдано предпочтение БУС-с. Хотя последняя имеет меньшие поперечные размеры, поскольку ячейки связи расположены между ускоряющими ячейками, эта структура имеет также и более низкую эффективность ускорения из-за наличия ячеек связи с нулевым полем, расположенных вдоль траектории движения пучка.

4. РАЗДЕЛЕННЫЕ УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ

Для уменьшения стоимости изготовления ускоряющих структур в последнее время стала использоваться технология их изготовления из двух половинок, так называемая разделенная структура [15]. Суть этой технологии заключается в том, что вместо того, чтобы изготавливать десятки отдельных ячеек, которые затем должны быть спаяны и настроены, разделенная в.ч.-структура состоит всего из

двух блоков меди с профилем ячеек, выточенных с одной стороны. Затем эти две половинки соединяются вместе с помощью процесса пайки в печи [31]. Такой метод позволяет достичь большей точности при меньших затратах за счет сокращения количества деталей и времени работы оператора станка. В частности, в рамках данной работы были рассмотрены следующие типы разделенных ускоряющих структур.

- Разделенная структура типа КДВ с электрической связью, работающая в режиме бегущей волны (р-КДВ б.в., рис. 3а), имеет преимущества и недостатки, аналогичные традиционной структуре, однако ее шунтовое сопротивление значительно ниже.

- Разделенная структура БУС-с (р-БУС-с, рис. 3б) обладает всеми преимуществами разделенной структуры и высокой эффективностью структуры БУС-с. Однако из-за технологической сложности изготовления разделенных структур сложной формы она требует значительной оптимизации формы для возможности изготовления.

- Разделенная структура типа КДВ, работающая в режиме стоячей волны (р-КДВ с.в.). Простейшая структура КДВ, которая может быть изготовлена, не имеет носиков на диафрагме, что

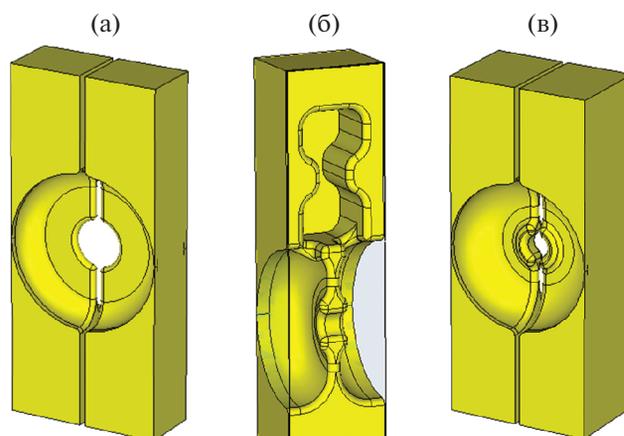


Рис. 3. Геометрия разделенных структур, рассматриваемых в качестве кандидатов для медицинского ускорителя: р-КДВ б.в. (а), р-БУС-с (б) и р-КДВ с.в. (в).

Таблица 4. Сравнение электродинамических параметров различных ускоряющих структур частотного X-диапазона для использования в ускорителе для лучевой терапии

Тип структуры	Шунтовое сопротивление, МОм/м	Время заполнения, нс	Длина, см	Средняя в.ч.- мощность, кВт
БУС-с	148.7	453	23.1	1.23
p-БУС-с	125.5	498	27.4	1.36
p-КДВ б.в.	136.6	222	28.0	1.37
p-КДВ с.в.	138.8	539	24.8	1.28

приводит к слабой концентрации электрического поля и его плохим фокусирующим свойствам. Структура на стоячей волне позволяет уменьшить радиус отверстия в диафрагме по сравнению с ее версией, работающей на бегущей волне. Кроме того, такая структура работает на виде колебаний π , который для 19 ячеек имеет неприемлемо маленькое частотное разделение соседних резонансов (~200 кГц). Носики на диафрагме можно выточить (рис. 3в) и тем самым несколько улучшить шунтовое сопротивление, однако частотное разделение остается неразрешимой проблемой.

Сравнение параметров вышеуказанных структур приводится в табл. 4. Исходя из проведенных расчетов, можно сделать следующий вывод: структура типа p-БУС-с является единственным практичным вариантом для открытой структуры, работающей в режиме с.в. Кроме того, этот тип структуры – лучший вариант с точки зрения экономической эффективности. Таким образом, основываясь на результатах численного моделирования, мы остановили свой выбор на разработке разделенной структуры с внешними ячейками связи (p-БУС-с), поскольку она имеет сопоставимые параметры с традиционной структурой, но намного дешевле для изготовления, сборки и настройки.

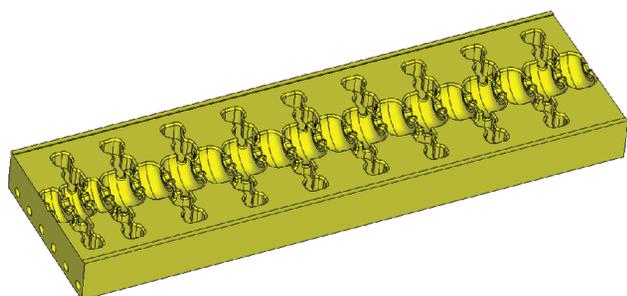


Рис. 4. Одна из половинок ускоряющей структуры типа p-БУС-с, состоящая из 19 ячеек, включая 3 группирующие ячейки с пониженной фазовой скоростью.

5. ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНСТРУКЦИЯ УСКОРИТЕЛЯ

Для изготовления выбранной структуры p-БУС-с было сделано несколько модификаций конструкции по сравнению с прямой адаптацией структуры БУС-с, представленной на рис. 2а:

- цилиндрическая форма ячейки связи изменена на прямоугольную;
- увеличен радиус стыковки углов;
- острая кромка отверстия связи заменена на овальное соединение.

Полная ускоряющая структура, показанная на рис. 4, состоит из 16 регулярных ячеек с $\beta_{\phi} = 1$ и трех группирующих ячеек с $\beta_{\phi} = 0.65$, аналогично другим ускорителям частотного X-диапазона, разработанным в RadiaBeam [16]. Оптимизация формы группирующих ячеек проводилась аналогично. Параметры оптимизированных ячеек – электродинамические характеристики ячеек структуры p-БУС-с следующие:

Фазовая скорость β	0.65	0.999
Длина ячейки, см	1.048	1.61
Шунтовое сопротивление (удельное), МОм/м	89.4	124.3
Коэффициент связи между ячейками, %	3.3	2.5
Разделение соседних резонансов, МГц	~8	~6
Добротность	6692	9224

На основе этих параметров в программе *Parmela* [32] был проведен анализ динамики пучка для того, чтобы продемонстрировать возможность использования линейного ускорителя на основе разделенной структуры (в основном, с точки зрения фокусировки пучка). Профиль напряженности электрического поля в группирующих ячейках показан на рис. 5а, а на рис. 5б – энергетический спектр пучка в конце ускорителя, полученный в результате моделирования. Расчетные параметры ускорителя на основе разделенной структуры представлены ниже, и они не уступают параметрам традиционного ускорителя [16]:

- энергия пучка (наиболее вероятная) 5.96 МэВ;
- импульсный ток пучка 118 мА;
- ток инжекции 283 мА;

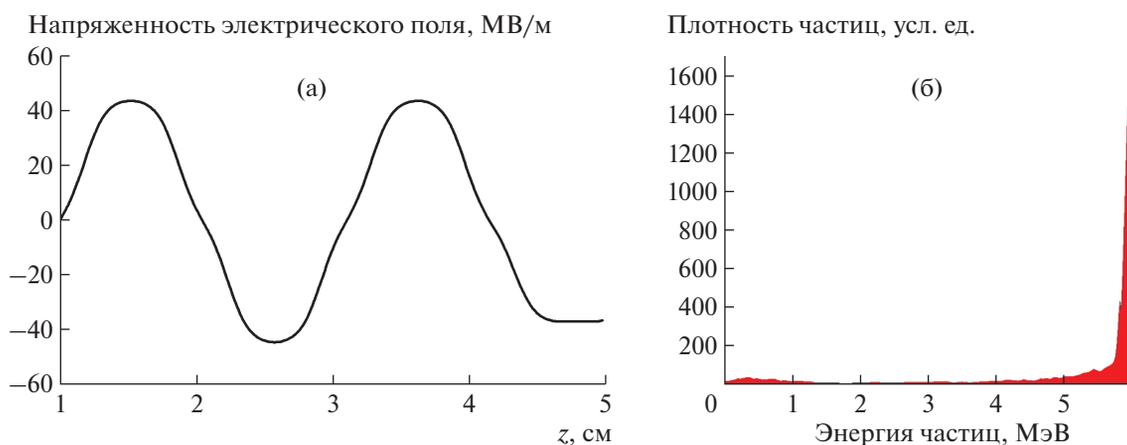


Рис. 5. Профиль электрического поля в группирующей секции (а) и энергетический спектр пучка в конце ускорителя (б).

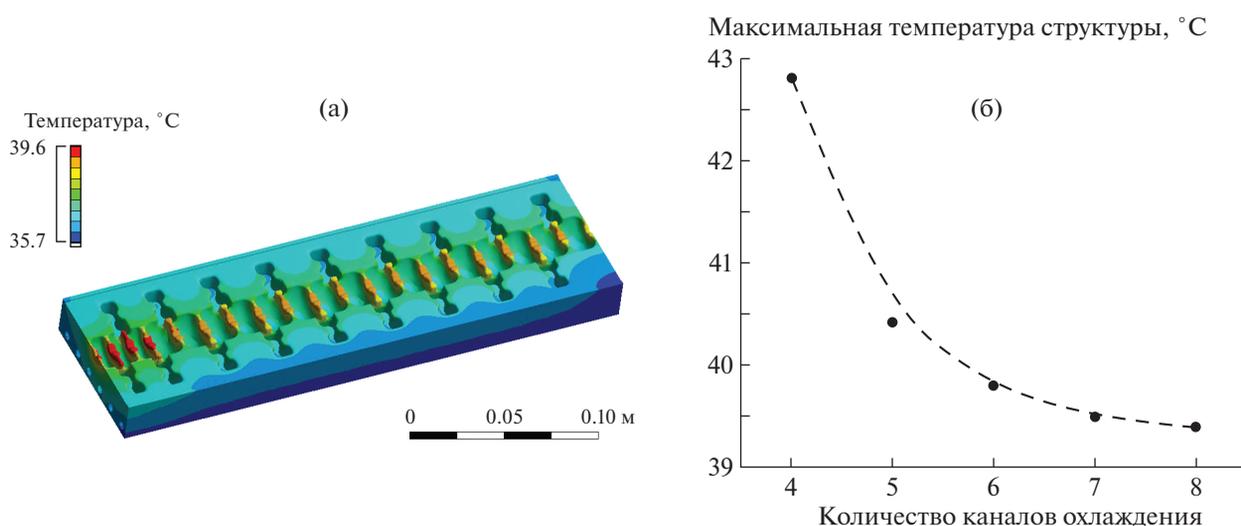


Рис. 6. Распределение температуры в ускоряющей структуре с в.ч.-потерями 567 Вт и шестью водяными каналами на половинку (а); б – максимальная температура нагрева структуры в зависимости от количества охлаждающих каналов на каждую половинку.

- коэффициент токопрохождения 42%;
- ускоряющий градиент 28 МВ/м.

Также был предложен механизм охлаждения разделенной структуры. Предлагается использовать водяные каналы $\varnothing 5$ мм в каждой половинке, позволяющие получить коэффициент теплопередачи для охлаждающей воды $15 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. При оценке нагрева структуры в.ч.-потери в стенках полагались равномерно распределенными (567 Вт на каждую половинку). Температуру охлаждающей жидкости желательнее выбрать равной 35°C , поскольку в этом случае частота структуры, настроенной при комнатной температуре (18°C) и заполнении азотом, будет соответствовать частоте структуры при температуре 35°C в условиях вакуума [33]. Предварительные результаты моделиро-

вания для различного количества каналов представлены на рис. 6 и показывают, что увеличение числа каналов больше шести является нецелесообразным, так как не приводит к уменьшению температуры нагрева структуры.

Механическая конструкция такого ускорителя может быть реализована следующим образом. Во-первых, к ускоряющей структуре прикрепляются электронная пушка, конвертор электронного пучка в тормозное излучение (также известный как мишень), в.ч.-окно, вакуумные насосы, охлаждающие трубки и другие механические компоненты (см. рис. 7). После пайки двух половинок структуры и сварки электронной пушки и вакуумной системы линейный ускоритель подвергается процессу прокаливания, чтобы ускорить вы-

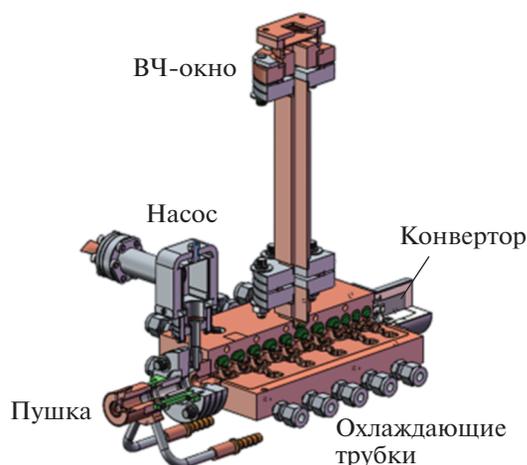


Рис. 7. Инженерная конструкция ускоряющей структуры с периферическими компонентами.

деление газа с поверхностями внутри герметичного объема и улучшить уровень вакуума. Затем происходит в.ч.-тренировка структуры для достижения рабочих значений электромагнитных полей [34]. После этого активируется катод электронной пушки и начинается ускорение пучка.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разделенные ускоряющие структуры являются перспективной технологией, особенно для малогабаритных линейных ускорителей. В данной статье была продемонстрирована возможность ее использования для разработки компактного ускорителя частотного X-диапазона для новой системы фотонной 4π-радиотерапии. Применение разделенной структуры позволит уменьшить время и стоимость разработки медицинских ускорителей и сделать их более доступными.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит коллег, принимавших участие в данной работе: Mr. Salime Boucher и Mr. Ronald Agustsson.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа была профинансирована Министерством энергетики США, номер гранта DE-SC0017687.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куцаев С.В. // ЖТФ. 2021. Т. 91. № 2. С. 173. <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.02.50352.201-20>
2. Orth R.C., Wallace M.J., Kuo M.D. // J. Vascular and Interventional Radiology. 2008. V. 19. № 6. P. 814. <https://doi.org/10.1016/j.jvir.2008.02.002>

3. Kurup G. // J. Medical Physics. Wolters Kluwer – Medknow Publications. 2010. V. 35. № 2. P. 63. <https://doi.org/10.4103/0971-6203.62194>
4. Yu V.Y., Tran A., Nguyen D., Cao M., Ruan D., Low D.A., Sheng K. // Med. Phys. 2015. V. 42. № 11. P. 6457. <https://doi.org/10.1118/1.4932631>
5. Wilke L., Andratschke N., Blanck O., Brunner T.B., Combs S.E., Grosu A.L., Moustakis C., Schmitt D., Baus W.W., Guckenberger M. // Strahlentherapie und Onkologie. 2019. V. 195. № 3. P. 193. <https://doi.org/10.1007/s00066-018-1416-x>
6. Dong P., Nguyen D., Ruan D., King C., Long T., Romeijn E., Low D.A., Kupelian P., Steinberg M., Yang Y., Sheng K. // Pract. Radiat. Oncol. 2014. V. 4. № 4. P. 254. <https://doi.org/10.1016/j.prro.2013.10.009>
7. Dong P., Lee P., Ruan D., Long Y., Romeijn E., Yang Y., Low D., Kupelian P., Sheng K. // Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys. 2013. V. 85. № 5. P. 1360. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2012.09.028>
8. Smyth G., Evans P.M., Bamber J.C., Bedford J.L. // British J. Radiology. B. 2019. V. 92. № 1097. P. 20180908. <https://doi.org/10.1259/bjr.20180908>
9. Протонные пучки высоких энергий и лучевая терапия злокачественных опухолей / Ред. В.П. Джеллепов, А.И. Рудерман. Дубна: ОИЯИ, 1975.
10. Lyu Q., Neph R., Yu V.Y., Ruan D., Boucher S., Sheng K. // Phys. Med. Biol. 2020. V. 65. № 4. P.045003. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/ab63b8>
11. Rwigema J.C.M., Nguyen D., Heron D.E., Chen A.M., Lee P., Wang P.C., Vargo J.A., Low D.A., Huq M.S., Tenn S., Steinberg M.L., Kupelian P., Sheng K. // Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys. 2015. V. 91. № 2. P. 401. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2014.09.043>
12. Dong P., Lee P., Ruan D., Long T., Romeijn E., Low D.A., Kupelian P., Abraham J., Yang Y., Sheng K. // Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys. 2013. V. 86. № 3. P. 407. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2013.02.002>
13. Woods K., Harrison M., Boucher S., McNevin J., Kutsaev S., Faillace L., Sheng K. // Med. Phys. 2016. V. 43. № 6. P. 3895. <https://doi.org/10.1118/1.4958253>
14. Agustsson R., Berry R., Boucher S., Hartzell J., Kutsaev S., McNevin J., Verma A. Pat. 10,212,800 USA. 2019.
15. Куцаев С.В. // ПТЭ. 2021. № 5. С. 5.
16. Kutsaev S.V., Agustsson R., Arodzero A., Berry R., Bezhanov A., Boucher S., Chimalpopoca O., Diego A., Faillace L., Gavryushkin D., Harrison M., Hartzell J.J., McNevin J., Ruelas M., Smirnov A.Yu. et al. // Radiat. Phys. Chem. 2021. V. 185. С. 109494. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109494>
17. Page B.R., Hudson A.D., Brown D.W., Shulman A.C., Abdel-Wahab M., Fisher B.J., Patel S. // Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys., 2014. V. 89. № 3. P. 476. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2013.12.022>
18. Schonberg R.G., Deruyter H., Fowkes W.R., Johnson, W.A., Miller R.H., Potter J.M., Weaver J.N. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1985. V. 32. № 5. P. 3234. <https://doi.org/10.1109/TNS.1985.4334330>
19. Mishin A.V. // in Proc. of the IEEE Particle Accelerator Conference PAC'05. 2005. P. 240.

20. L-3. <https://www.l3harris.com/all-capabilities/magnetrans>
21. CPI Power Tubes. <https://www.cpii.com/product.cfm/8/2>
22. *Sobenin N.P., Zverev B.V.* Electrodynamic characteristics of accelerating cavities. London: CRC Press, 1999.
23. *Kutsaev S.V.* // Eur. Phys. J. Plus. 2021. V. 136. № 4. P. 446. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01312-3>
24. *Lapostolle P., Septier A.L.* Linear Accelerators. North-Holland Pub. Co., 1970.
25. *Karzmark C.J., Nunan C.S., Tanabe E.* Medical Electron Accelerators. NY: McGraw Hill, 1992 .
26. *Kutsaev S.V., Sobenin N.P., Zavadtsev A.A., Bolgov R.O., Davydov P.K.* // Probl. At. Sci. Technol. 2010. V. 54 № 3. P. 48.
27. *Kutsaev S.V., Smirnov A.Yu., Bolgov R.O., Gusarova M.A., Kamenshikov D.S., Sobenin N.P.* // in Proc. 25th Linear Accelerator Conference, LINAC 2010. 2011. P. 202.
28. *Каминский В.И., Лалаян М.В., Собенин Н.П.* Ускоряющие структуры. М.: НИЯУ МИФИ, 2005.
29. *Каминский В.И., Куцаев С.В.* // Ядерная физика и инжиниринг. 2011. Т. 2. № 2. С. 154.
30. *Kutsaev S.V., Sobenin N.P., Smirnov A.Yu., Kamenshikov D.S., Gusarova M.A., Nikolskiy K.I., Zavadtsev A.A., Lalayan M.V.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2011. Т. 636. № 1. С. 13. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.01.047>
31. *Chou P.J., Bowden G.B., Copeland M.R., Henke H., Menegat A., Siemann R.H.* // Proc. IEEE Part. Accel. Conf. PAC'97. 1998. V. 1. P. 464. <https://doi.org/10.1109/PAC.1997.749688>
32. *Young L., Billen J.* // Proc. of the 2003 IEEE Particle Accelerator Conference. 2003. V. 5. P. 3521. <https://doi.org/10.1109/PAC.2003.1289968>
33. *Завадцев А.А., Завадцев Д.А., Каминский В.И., Смирнов А.Ю., Собенин Н.П.* Высокочастотные дефлекторы для диагностики пучка заряженных частиц. М.: МИФИ, 2014.
34. *Hanna S.* RF Linear Accelerators for Medical and Industrial Applications. Boston: Artech House, 2012.

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 681.723.2

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО
МИКРОСКОПА ДЛЯ ОЦЕНКИ ФЛУКТУАЦИЙ И ЭКВИВАЛЕНТНОЙ
КОНСТАНТЫ УПРУГОСТИ МЕМБРАН КЛЕТОК**

© 2021 г. А. И. Юсипович^а, Е. Ю. Паршина^а, А. А. Байжуманов^а, С. К. Пирутин^{а,б},
А. Д. Иванов^{а,*}, В. Л. Минаев^{д,е}, Г. Г. Левин^д, Г. В. Максимов^а

^а Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

^б Институт экспериментальной и теоретической биофизики РАН
Россия, 142290, Пуцино Московской обл., ул. Институтская, 3

^с Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”
Россия, 119049, Москва, Ленинский просп., 4

^д ВНИИ оптико-физических измерений
Россия, 119361, Москва, ул. Озерная, 46

^е Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”
Россия, 101000, Москва, ул. Мясницкая, 20

*e-mail: Academi@ya.ru

Поступила в редакцию 26.04.2021 г.

После доработки 01.06.2021 г.

Принята к публикации 24.06.2021 г.

Описано применение автоматизированного интерференционного микроскопа для определения среднеквадратичной амплитуды флуктуаций живых клеток *in vitro*. Измеренные оптические разности хода световых волн использованы для расчета геометрических толщин клеток. Оценены эквивалентные константы упругости таких клеток. Полученные значения среднеквадратичной амплитуды флуктуаций оптической разности хода составили 0.3–2.7 нм, что соответствует 4–40 нм среднеквадратичной амплитуды флуктуаций мембраны. Показано, что амплитуды флуктуаций распластанных клеток (клетки эндотелия и макрофаги) меньше, чем неприкрепленные клетки (эритроциты и лимфоциты *in vitro*). При этом амплитуда флуктуаций распластанных на подложках опухолевых клеток линии HeLa больше амплитуды флуктуаций клеток эндотелия и макрофагов, также распластанных на подложке. Полученные экспериментальные данные соответствуют результатам, измеренным ранее с помощью других оптических методов.

DOI: 10.31857/S0032816221060136

1. ВВЕДЕНИЕ

Живые клетки характеризуются локальными флуктуациями мембраны в диапазоне 0.1–30 Гц [1]. Несмотря на длительную историю исследований таких колебаний, молекулярные и клеточные механизмы данного явления до конца не изучены. Не подвергается сомнению тот факт, что амплитуда этих флуктуаций зависит от состояния как мембраны, так и цитоскелета клетки.

Флуктуации мембраны могут иметь отношение к важным физиологическим свойствам клеток, таким как эндо- и экзоцитоз, регуляция объема, способность к деформации, определяющая возможность прохождения клеток крови через мелкие кровеносные сосуды; также было показано влияние флуктуаций на адгезию и агрегацию клеток [2]. Так, например, было установле-

но, что уменьшение амплитуды флуктуаций (увеличение натяжения) приводит к увеличению адгезии [3]. Возможно, совокупность локальных колебаний комплекса, состоящего из мембраны и цитоскелета, который иногда называют просто мембраной, в итоге приводит к изменению таких макроскопических параметров клетки, как форма и объем. В ряде случаев при этом изменяется жесткость мембранно-спектринового комплекса, которая может быть обусловлена агрегацией и иммобилизацией денатурированных молекул спектринина [4]. Для количественной оценки колебания мембран (клеток) используют среднеквадратичную амплитуду флуктуаций (с.а.ф.). При этом квадрату с.а.ф. толщины мембран обратно пропорциональна эквивалентная константа упругости клеточных мембран, что позволяет оценить

механические характеристики этих клеток, в частности эффективную величину поверхностного натяжения [5].

Для исследования колебаний клеточных мембран используется целый набор методов, основанных на различных видах рассеяния видимого света, рентгеновского или нейтронного излучения, а также на различных видах микроскопии [2, 6, 7]. Однако наиболее эффективными в этом случае являются методы на основе интерференционной микроскопии (см., например, [8, 9]), позволяющие неинвазивно и без использования красителей количественно оценивать флуктуации мембран. Для этого измеряется амплитуда изменения оптической разности хода (о.р.х.), а затем вычисляется амплитуда колебаний. Однако это требует модификации методик получения фазовых изображений именно для оценки флуктуаций мембраны. Следует учитывать, что о.р.х. включает в себя не только геометрическую толщину клетки, но и показатель преломления, зависящий от концентрации вещества в ней. Поэтому локальные значения о.р.х. внутри клетки могут изменяться в результате процессов транспорта везикул, эндоцитоза и т.д. При этом мембрана и примембранный цитоскелет вносят небольшой вклад в толщину клетки (их общая толщина составляет ~100–200 нм [10], менее 10% толщины клетки). Основной вклад в толщину клетки вносят цитоплазма, ядро и другие органеллы. Таким образом, по измеренному значению о.р.х. можно оценить динамические процессы во всей толщине клетки, поскольку даже незначительные локальные изменения толщины и (или) показателя преломления клетки могут повлиять на регистрируемое значение о.р.х.

Цель настоящей работы – оценить возможность использования и границы применения метода лазерной интерференционной микроскопии для измерения среднеквадратичной амплитуды флуктуаций о.р.х. и эквивалентных констант упругости некоторых фиксированных и живых клеток *in vitro*.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

2.1. Метод лазерной интерференционной микроскопии

Фазовое изображение биологического объекта представляет собой двумерное распределение сдвига фазы $\varphi(x, y)$ светового излучения, проходящего через объект. Для прозрачных объектов оно вычисляется по формуле [11]:

$$\varphi(x, y) = \Delta(x, y)2\pi/\lambda, \quad (1)$$

где $\Delta(x, y)$ – двумерное распределение о.р.х.; λ – длина волны света источника излучения.

В каждой точке изображения о.р.х. определяется как [12]:

$$\Delta_i = (n_i - n_0)z_i, \quad (2)$$

где n_i – среднее значение показателя преломления клетки в точке i ; z_i – толщина клетки в точке i ; n_0 – показатель преломления окружающей среды.

В общем случае показатель преломления n клетки линейно зависит от концентрации C вещества в ней [13]:

$$n = n_0 + \alpha C, \quad (3)$$

где α – экспериментально определяемый параметр.

Таким образом, изменение показателя преломления вещества отражает изменение концентрации вещества в клетке. При этом на фазовом изображении клетки зарегистрированные значения о.р.х. можно представить как сумму двух величин:

$$\Delta(x, y) = \Delta(x, y)_{\text{кл}} + \Delta(x, y)_{\text{пр}}, \quad (4)$$

где $\Delta(x, y)_{\text{кл}}$ – значение о.р.х., зависящее только от свойств клетки, а $\Delta(x, y)_{\text{пр}}$ – значение о.р.х., связанное с воздействием внешних факторов, таких как движение жидкости, вибрация прибора, шум регистрирующей камеры и т.д.

В качестве меры оценки флуктуаций клетки используется среднее значение с.а.ф. о.р.х., определенных в каждой точке фазового изображения клетки в течение времени измерений [14]:

$$s_{\text{кл}} = \sqrt{s^2 - s_{\text{пр}}^2}, \quad (5)$$

где $s_{\text{пр}}$, s – средние значения экспериментально измеренных с.а.ф. $\Delta(x, y)_{\text{пр}}$ и $\Delta(x, y)$ соответственно, полученных за определенное время. Величина $s_{\text{пр}}$ измеряется на участке фазового изображения, лишенном клеток, а величина s – на участке фазового изображения с клеткой.

Найденные значения s , $s_{\text{пр}}$ можно представить в виде следующих соотношений:

$$s = (XY)^{-1} \times \sum_x \sum_y \sqrt{(\tau - 1)^{-1} (\Delta(x, y, t)_\tau - \Delta_{\text{ср}}(x, y, t))^2}, \quad (6)$$

$$s_{\text{пр}} = (XY)^{-1} \times \sum_x \sum_y \sqrt{(\tau - 1)^{-1} (\Delta_{\text{пр}}(x, y, t)_\tau - \Delta_{\text{пр ср}}(x, y, t))^2}, \quad (7)$$

где τ – общее время измерений; X, Y – общее число пикселей по горизонтали и вертикали; $\Delta(x, y, t)_\tau$, $\Delta_{\text{пр}}(x, y, t)_\tau$ – экспериментально измеренные значения о.р.х. в точке фазового изображения с клеткой и без нее соответственно; $\Delta_{\text{ср}}(x, y, t)$, $\Delta_{\text{пр ср}}(x, y, t)$ – средние значения о.р.х. в точке фазового изображения на участках фазового изображения с клеткой и без нее соответственно.

2.2. Влияние показателя преломления различных компонентов клетки на величину с.а.ф. о.р.х.

В статических условиях величина показателя преломления (а точнее разница показателей преломления клетки и окружающей среды – рефрактерность) влияет на значение о.р.х. как простой множитель, см. формулу (2). При этом вклад мембраны с цитоскелетом в суммарное значение о.р.х. клетки мал из-за малой толщины мембраны по сравнению с толщиной слоя цитоплазмы клетки (включая находящиеся там органеллы). Так, например, для эритроцитов толщина мембраны с цитоскелетом составляет ~100–200 нм, а толщина слоя цитоплазмы ~2 мкм. Однако в случае динамических измерений может наблюдаться увеличение вклада мембраны и цитоплазмы в регистрируемую величину с.а.ф. в результате локальных изменений показателя преломления, связанных с локальными

изменениями концентрации вещества (см. формулу (3)) в цитоскелете и цитоплазме.

Для оценки потенциального вклада цитоплазмы в экспериментально регистрируемое значение о.р.х. клетки можно представить общее значение о.р.х. как сумму двух о.р.х., одна из которых зависит только от мембраны с прилежащим цитоскелетом, а другая – только от цитоплазмы:

$$\Delta_i = (n_m - n_0)z_m + (n_{цит} - n_0)z_{цит}. \quad (8)$$

Таким образом, в регистрируемое значение о.р.х. клетки могут вносить вклад толщина z_m и рефрактерность $(n_m - n_0)$ мембраны, а также толщина $z_{цит}$ и рефрактерность $(n_{цит} - n_0)$ цитоплазмы.

Компоненты уравнения (8) можно рассматривать как функцию четырех переменных: $n_m - n_0 = A$; $z_m = B$; $n_{цит} - n_0 = C$; $z_{цит} = D$. Тогда с.а.ф. такой функции будет представлять собой сложное выражение [15]:

$$s_{кл} = \sqrt{A_{cp}^2 B_{cp}^2 (s_A^2/A_{cp}^2 + s_B^2/B_{cp}^2) + C_{cp}^2 D_{cp}^2 (s_C^2/C_{cp}^2 + s_D^2/D_{cp}^2)}, \quad (9)$$

где s_A, s_B, s_C, s_D – с.а.ф. (соответствует стандартному отклонению) переменных A, B, C, D соответственно; $A_{cp}, B_{cp}, C_{cp}, D_{cp}$ – средние значения переменных A, B, C, D соответственно.

Локальные изменения показателя преломления могут возникать либо в случае диффузии молекул мембраны или цитоплазмы (например, структурных белков и липидов), а также перестройки цитоскелета (например, сборки или разборки микротрубочек), либо в результате транспорта элементов цитоскелета, различных везикул, органелл, например митохондрий, как с помощью, так и без помощи микротрубочек. Кроме того, в случае механических повреждений клетки или ее органелл возможно не только изменение геометрии, но и локальные изменения показателя преломления. Поскольку фазовое изображение представляет собой двумерную проекцию клетки, оценивалась только двумерная диффузия.

Толщина мембраны без цитоскелета составляет около 10 нм, показатель преломления такой мембраны – 1.427 [16]. Толщина мембраны находится на пределе разрешения прибора, что не позволяет корректно регистрировать локальные изменения показателя преломления (концентрацию вещества) внутри этого объекта. Однако, если учитывать примембранный цитоскелет (кортекс), толщина мембраны составляет около 100–200 нм. Основной вклад в эту величину вносит относительно рыхлая трехмерная сеть из белковых трубочек диаметром 6–8 нм с достаточно высокой скоростью сборки-разборки (порядка 0.1–1 мкм/с). В экспериментах время получения одного фазового изображения составило 0.04 с, расстояние

между соседними точками фазового изображения – 0.28 мкм, т.е. за время регистрации фазового изображения теоретически можно обнаружить изменение о.р.х., обусловленное разницей локальной концентрации вещества внутри клеток размером ≥ 10 мкм в результате диффузии или транспорта. Если бы сборка и разборка трубочек осуществлялись одновременно, компактно и однонаправленно, то это могло бы повлиять на регистрируемые колебания о.р.х. клетки. Хаотическое разнонаправленное движение молекул и органелл уменьшает локальное изменение концентрации в цитоплазме (компонента $n_m - n_0$ в уравнении (8)) и приводит к усреднению локальных значений о.р.х. и уменьшению с.а.ф. Таким образом, в нормальных условиях в случае мембран основной вклад в регистрируемое значение о.р.х. будут вносить только их геометрические колебания.

Цитоплазма обладает значительной толщиной, а внутри нее возможны как латеральная диффузия молекул, так и перемещение (транспорт) элементов цитоскелета, различных везикул, органелл, например митохондрий, и т.д. со скоростью 0.1–2 мкм/с [17]. Если бы, как и в случае примембранного цитоскелета, подобные перемещения осуществлялись одновременно и однонаправленно в большом объеме цитоплазмы, то это могло бы повлиять на регистрируемые колебания о.р.х. клетки. В обычных условиях наблюдается хаотическое разнонаправленное движение молекул и органелл, приводящее к усреднению локальных значений о.р.х. и, соответственно, уменьшению с.а.ф. При этом не предполагались регулярные изменения размеров цитоплазмы (компонента

$z_{\text{цит}}$ в уравнении (8)), аналогичные флуктуациям мембраны z_m . Однако в состоянии покоя, при отсутствии одновременных и однонаправленных массовых перемещений компонентов клетки, на s воздействуют только геометрические колебания мембран.

2.3. Расчет эквивалентной константы упругости

По значению $s_{\text{кл}}$ рассчитывается среднеквадратическая амплитуда s_T флуктуаций толщины клетки [14]:

$$s_T = s_{\text{кл}} / (n - n_0), \quad (10)$$

где n – усредненный показатель преломления клетки, зависящий от всех компонентов, входящих в клетку.

Эквивалентная константа k_e упругости мембраны обратно пропорциональна s_T^2 и определяется по формуле:

$$k_e = k_B T / s_T^2, \quad (11)$$

где k_B – константа Больцмана; T , K – температура.

В общем случае:

$$k_e = \kappa q^4 + \sigma q^2,$$

где κ – модуль изгиба; σ – коэффициент поверхностного натяжения; q – координата, описывающая положение мембраны [1].

Согласно данным [11], $\kappa = 0.70 \pm 0.12 \cdot 10^{-20}$ Дж/м², $\sigma = 3.5 \pm 0.6 \cdot 10^{-7}$ Дж/м². Заметно, что значение σ во много раз превышает значение κ . Таким образом, в обычных условиях основной вклад в k_e вносит поверхностное натяжение.

3. МЕТОДИКИ ВЫДЕЛЕНИЯ КЛЕТОК

Приготовление образцов эритроцитов *in vitro*.

Данная методика подробно описана в работе [8]. При проведении измерений оценивали размеры и величину колебания мембран только у дискоцитов.

Получение образцов фиксированных эритроцитов. Эритроциты фиксировали по методу [18]. Все операции проводили при комнатной температуре. Клетки наносили в виде капли на зеркальное предметное стекло и высушивали на воздухе в течение 12 ч. Затем на препарат наносили 5–10 мкл смеси глицерин–вода в соотношении по объему 1:1, накрывали покровным стеклом и оставляли в горизонтальном положении еще на 12 ч, после чего препарат был готов к измерениям.

Получение образцов теней эритроцитов. Образцы получали согласно методике, описанной в работе [19]. Тени эритроцитов хранили при температуре -80°C . После разморозки 1–2 мкл суспензии теней эритроцитов наносили на зеркальное

предметное стекло и накрывали покровным стеклом.

Получение фракции белых клеток крови (лимфоцитов). Выделение фракции белых клеток крови (главным образом лимфоцитов) проводили методом лизиса эритроцитов, основанным на способности изотонического раствора хлорида аммония гемолизировать эритроциты [20]. Полученную суспензию (1–2 мкл) наносили на зеркальное предметное стекло и накрывали покровным стеклом.

Выделение перитонеальных макрофагов мышей. Данная методика описана в работе [21]. Перед проведением измерений покровное стекло, содержащее клетки, помещали на зеркальную подложку (клетками к зеркалу).

Выделение клеток эндотелия. Клетки эндотелия выделяли из пупочных вен человека путем промывания их раствором коллагеназы, согласно стандартному протоколу [22]. Перед проведением измерений покровное стекло с нанесенными клетками помещали на зеркальную подложку (клетками к зеркалу).

Приготовление образцов, содержащих клетки HELA. В экспериментах использовалась культура клеток линии HELA аденокарциномы шейки матки человека, полученная из репозитория клеточных культур American Type Culture Collection (Роквилл, США). Получение культуры осуществлялось, согласно стандартным протоколам. Перед проведением измерений покровное стекло с нанесенными клетками помещали на зеркальную подложку (клетками к зеркалу).

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

4.1. Измерения с.а.ф. о.р.х. методом лазерной интерференционной микроскопии

Для определения с.а.ф. о.р.х. использовали автоматизированный интерференционный микроскоп МИА-Д (ВНИИОФИ, Россия) [23] с высокоскоростной (300 кадров/с) черно-белой видеокамерой FastVideo 300B (SPA ASTEK, Россия) с матрицей 1/2 дюйма (6.33×4.75 мм²) разрешением 640×480 пикселей и микрообъективом $33\times/0.65\text{NA}$. Размер изображений объекта 180×135 мкм. Управление прибором и получение фазовых изображений по интерферограммам осуществляли с помощью программы “WinPhast”. При реконструкции одного фазового изображения использовали десять интерференционных изображений, что позволяло регистрировать фазовые изображения с частотой до 30 Гц. Образец освещали диодным лазером с длиной волны 659 нм и мощностью 20 мВт, при этом мощность, попадающая на 1 клетку, составляла <2 мВт. Лазерный луч был направлен перпендикулярно плоскости клетки. Согласно описанию микроскопа,

погрешность вдоль оптической оси составляла 1.9 нм, а в плоскости XY – 0.5 мкм, повторяемость результатов измерений s составляла <0.1 нм.

Для обработки изображений и визуализации клеток было использовано открытое программное обеспечение Open Source package FIJI [24]. Схема измерения и расчета значения s приведена на рис. 1. Во время эксперимента записывали последовательность из 512-ти фазовых изображений на частоте 25 Гц. Далее выделяли изображение отдельной клетки, проводили процедуру выравнивания серии изображений (используя алгоритм StackReg, присутствующий в программе FIJI). После этого рассчитывали с.а.ф. временных осцилляций о.р.х. в каждой точке изображения клетки, отступив от ее края 2 пикселя для компенсации влияния латеральных колебаний. В точке k с.а.ф. колебаний s_k вычисляли по формуле:

$$s_k = \sqrt{(\tau - 1)^{-1} \sum_{\tau=1} (\Delta_{\tau} - \Delta_{avg})^2}. \quad (12)$$

Затем рассчитывали среднее значение с.а.ф. колебаний s для всей клетки по формуле (6). Значение $s_{пр}$ рассчитывали по аналогичной процедуре на участке образца без клеток по формуле (7).

При проведении измерений также оценивали статические параметры фазовых изображений клеток: площадь $S_{кл}$; среднее значение о.р.х. клетки (среднее арифметическое всех значений о.р.х. клетки, зависящее от толщины клетки и количества вещества в ней); максимальное значение о.р.х. клетки (зависит от толщины клетки и количества вещества, входящего в нее; косвенно, особенно в случае эритроцитов, может отражать морфологию клетки; у клеток, содержащих ядро, может отражать состояние ядра).

4.2. Статистическая обработка экспериментальных данных

Статистическую обработку и визуализацию экспериментальных данных проводили при помощи демоверсии программы Graphpad Prism v8.4 (GraphPad Software, La Jolla, Калифорния, США). Результаты анализа приведены ниже в табл. 1 и 2. Типичные значения стандартного отклонения флуктуаций мембраны по толщине и (или) эквивалентной константы упругости представлены в табл. 1 в виде: “среднее ± стандартное отклонение”. В сводной табл. 2 экспериментальные данные представлены в виде: медиана [нижний квартиль; верхний квартиль].

Статистически значимую разницу между измеренными флуктуациями (эквивалентными константами упругости) клеток различных типов оценивали по критерию Краскелла–Уоллеса с апостериорным анализом Данна ($p < 0.05$).

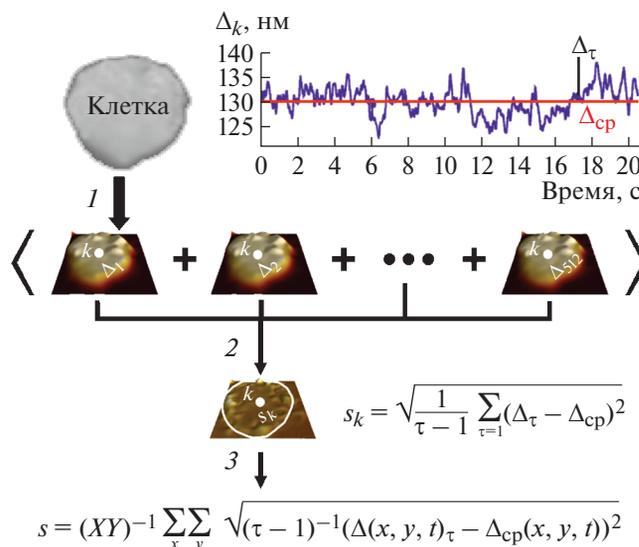


Рис. 1. Расчет среднего значения с.а.ф. о.р.х. s одиночной клетки. Шаг 1 – запись серии фазовых изображений (512 изображений с частотой 25 кадров/с), на вставке показаны временные осцилляции о.р.х. в точке k ; шаг 2 – получение z -проекции клетки, представляющей собой с.а.ф. временных осцилляций о.р.х. в каждой точке изображения, приведена формула для расчета с.а.ф. колебаний в точке k (s_k), белая линия – граница клетки; шаг 3 – определение значения s для всей клетки, исключая край эритроцита (2 пикселя на изображении от границы клетки) во избежание вклада латеральных колебаний края клетки.

Достоверные различия между измеренными флуктуациями клеток и соответствующими значениями шума на подложке оценивали при помощи одновыборочного критерия Вилкоксона ($p < 0.05$).

4.3. Результаты

В табл. 1 приведены значения s_{τ} , а также эквивалентные константы упругости k_e для эритроцитов *in vitro*, фиксированных эритроцитов, нормальных и раковых клеток эпителия кишечника, полученные другими различными методами: reflection interference contrast microscopy (RICM), low-coherence spectral-domain phase microscopy (SDPM), wide-field digital interferometry (WFDI), stabilized Hilbert phase microscopy (sHPM), wide-field interferometric phase microscopy (IPM), digital holographic microscopy (DHM). Для удобства последующего сравнения (при наличии необходимой для этого информации в цитируемой работе) приведенные в табл. 1 значения s_{τ} пересчитаны в $s_{кл}$ по формуле (10).

В настоящей работе для иллюстрации возможностей метода лазерной интерференционной микроскопии были использованы некоторые наиболее часто анализируемые типы клеток: свободноплавающие эритроциты *in vitro*; фиксиро-

Таблица 1. Типичные значения среднеквадратичной амплитуды флуктуаций о.р.х. $s_{\text{кл}}$, толщины s_{T} и эквивалентной константы упругости k_e мембран клеток

Тип клеток	Метод исследования	s_{T} , нм	$s_{\text{кл}}$, нм	$k_e \cdot 10^6$, Дж/м ²	Ссылка
Мышечные макрофаги <i>in vitro</i>	RICM	5.5 ± 1	$\sim 0.3 \pm 0.1$	~ 100	[3]
Эритроциты <i>in vitro</i>	SDPM	35 ± 15	2.2 ± 0.9	около 3.5	[25]
	WFDI	35 ± 15	2.2 ± 0.9	около 3.5	
Эритроциты фиксированные	SDPM	4.5 (предел измерения)	около 0.3	–	[25]
	WFDI	14.5 (предел измерения)	~ 0.9	–	
Эритроциты <i>in vitro</i> (диСАФциты)	sHPM	$\sim 53.4^*$	~ 0.6	$\sim (1.5 \pm 0.2)$	[11]
Эритроциты <i>in vitro</i> (эхиноциты)	sHPM	$\sim 32.5^*$	~ 0.4	$\sim (4.05 \pm 1.1)$	
Эритроциты <i>in vitro</i> (сфероциты)	sHPM	$\sim 22.8^*$	~ 0.3	$\sim (8.25 \pm 1.06)$	
Клетки эпителия кишечника (норма)	IPM	–	1.6 ± 0.4	–	[26]
Клетки эпителия кишечника (рак)	IPM	–	2.1 ± 0.8	–	
Эритроциты <i>in vitro</i>	DHM	35.9 ± 8.9	2.2 ± 0.6	–	[14]

*Значения рассчитывались из соответствующего значения k_e по формуле (11)

Таблица 2. Измеренные параметры клеток

	$S_{\text{кл}}$, мкм ²	Средняя о.р.х., нм	Максимальная о.р.х., нм
Эритроциты фиксированные	61.4 [54.7; 69.0]	78.1 [75.0; 83.7]	138.0 [126.1; 152.8]
Тени эритроцитов	–	5.0 [4.7; 35.7]	54.6 [54.8; 62.0]
Клетки эндотелия	597.3 [497.8; 698.6]	31.3 [25.9; 37.6]	64.33 [49.0; 90.22]
Макрофаги	156.4 [140.5; 163.9]	337.8 [253.7; 375.4]	74.30 [57.57; 82.34]
Клетки линии HeLa	434.9 [343.7; 516.7]	162.5 [147.5; 181.7]	273.1 [238.6; 321.5]
Лимфоциты человека	64.05 [47.60; 69.72]	139.1 [133.2; 184.5]	334.5 [257.8; 370.7]
Эритроциты <i>in vitro</i>	69.7 [68.0; 87.0]	70.0 [63.4; 91.5]	128.7 [110.0; 154.3]

ванные эритроциты (у которых сшиты белки внутри цитоплазмы); тени эритроцитов, которые представляют собой клетки с удаленной цитоплазмой (фактически биологическую мембрану с цитоскелетом); лимфоциты, выделенные из плазмы; культуры клеток эндотелия; опухолевые клетки линии HeLa, прикрепленные к подложке *in vitro*; активированные макрофаги, прикрепленные к подложке. Эти объекты являются примерами наиболее часто используемых вариантов для исследования клеток.

Типичные фазовые изображения измеренных клеток представлены на рис. 2. В целом изображения согласуются с соответствующими изображениями клеток из литературных источников [5, 8, 18]. Средние размеры площади, среднего и максимального значения о.р.х. фазовых изображений клеток представлены в табл. 2. Показатель преломления клеток изменяется в интервале 1.37–1.42 [14], что позволяет, используя экспериментально измеренные средние значения $\Delta_{\text{ср}}$, оценивать толщину клеток по формуле (2). Средняя геометрическая толщина теней эритроцитов

на подложке составляет около 54 нм (при показателе преломления мембраны 1.427 и показателе преломления раствора 1.335), что соответствует примерно пяти слоям мембран эритроцитов.

На рис. 3 представлены средние значения $s_{\text{кл}}$ и k_e . Значения $s_{\text{кл}}$ составляют 0.3–2.7 нм о.р.х., что соответствует колебаниям мембран приблизительно на 3–40 нм. В целом, результаты настоящей работы соответствуют типичным данным, полученным другими интерференционными методами (см. табл. 1). Среднеквадратичная амплитуда флуктуаций для фиксированных эритроцитов меньше, чем для эритроцитов *in vitro*. Значения $s_{\text{кл}}$ не прикрепленных к подложке эритроцитов и лимфоцитов достоверно больше, чем у прикрепленных нормальных клеток (клетки эндотелия и макрофаги), а $s_{\text{кл}}$ прикрепленных к подложке опухолевых клеток линии HeLa больше, чем у нормальных клеток, прикрепленных к подложке, и соответствуют свободноплавающим лимфоцитам *in vitro*.

При этом измеренные медианы с.а.ф. для фиксированных клеток и теней эритроцитов досто-

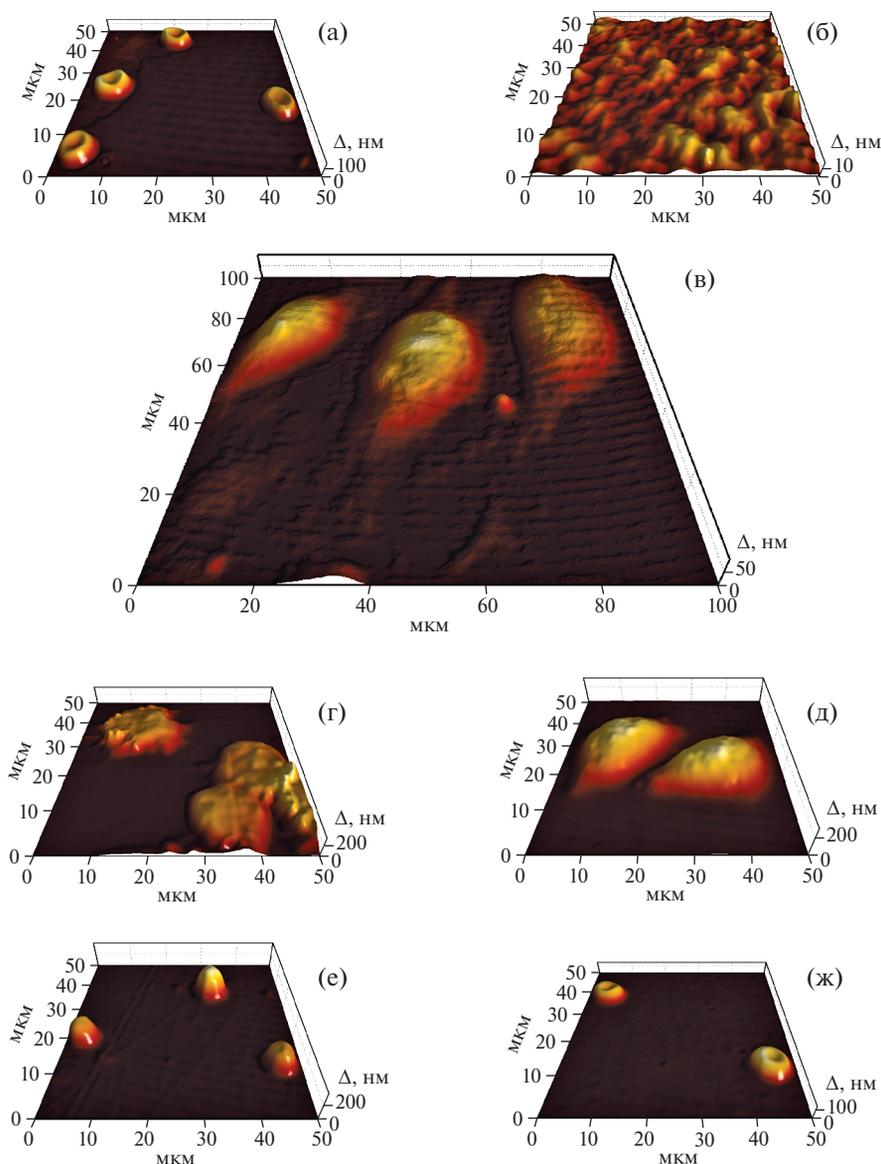


Рис. 2. Типичные фазовые изображения фиксированных эритроцитов (а), теней эритроцитов (б), клеток эндотелия (в), макрофагов (г), клеток линии HeLa (д), лимфоцитов (е), эритроцитов *in vitro* (ж).

верно не отличаются от соответствующих значений шума на подложке (см. рис. 2), в отличие от значений, измеренных для клеток других типов. Значения $s_{пр}$ в экспериментах для различных типов клеток колебались в диапазоне 0.25–0.35 нм о.р.х. Не удалось обнаружить достоверных корреляций между размерами клеток и их с.а.ф. (см. табл. 2).

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, величина $s_{кл}$ для фиксированных клеток и теней эритроцитов находится на уровне шума прибора, что не позволяет оценить величину с.а.ф. в данном случае. Однако в случае

клеток, как прикрепленных к подложке, так и свободно плавающих, оценивать величину флуктуаций методом лазерной интерференционной микроскопии вполне возможно.

При этом отсутствие корреляций между размерами (в первую очередь толщин, обусловленных главным образом цитоплазмой) клеток и величиной их с.а.ф. позволяет предположить, что цитоплазма не вносит существенного вклада в величину флуктуаций. Регистрируемая величина с.а.ф. обусловлена главным образом флуктуациями клеточных мембран, что также согласуется с рассуждениями, изложенными в разделе 2.2.

Можно заметить, что клетки крови, использованные в работе (как эритроциты, так и лимфо-

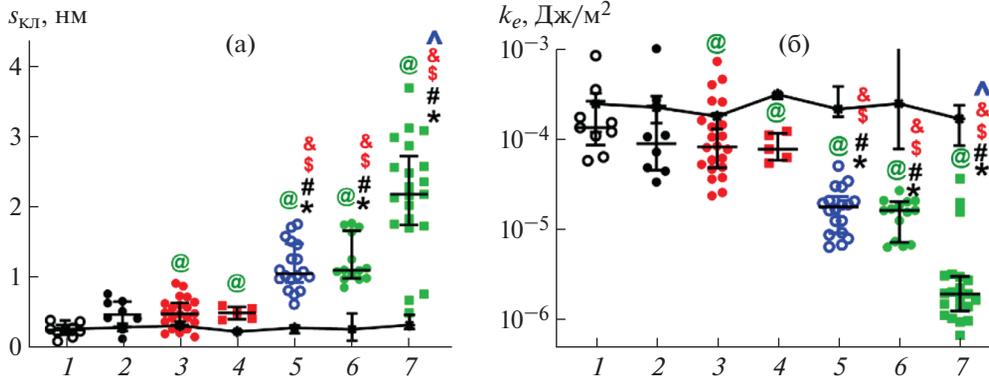


Рис. 3. Среднеквадратичная амплитуда флуктуаций о.р.х. (а) и эквивалентная константа упругости (б) различных клеток. Линии – медианы результатов измерений с интерквартильным размахом, точки – сами результаты. Цифры по горизонтальной оси: 1 – фиксированные эритроциты; 2 – тени эритроцитов; 3 – клетки эндотелия; 4 – макрофаги; 5 – клетки линии HeLa; 6 – лимфоциты; 7 – эритроциты *in vitro*. Достоверные отличия: между фиксированными эритроцитами и другими клетками (*); между тенями эритроцитов и другими клетками (#); между клетками эндотелия и другими клетками (\$); между макрофагами и другими клетками (&); между выборкой клеток линии HeLa и другими клетками (^); между измеренными флуктуациями клеток и соответствующими значениями шума на подложке (@).

циты *in vitro*), имеют значительно большие значения флуктуаций, чем прикрепленные клетки (макрофаги и клетки эндотелия). Вероятно, это связано с выполняемыми ими в организме функциями, поскольку они перемещаются внутри сосудов и им необходимо деформироваться в капиллярах, что, по-видимому, и определяет их более низкую жесткость. В случае прикрепленных клеток, возможно, микротрубочки, соединяясь с субстратом, фиксируют мембраны распластанных клеток у подложки, препятствуя таким образом ее флуктуациям. При этом флуктуации, зарегистрированные на клетках линии HeLa, достоверно больше флуктуаций, измеренных на клетках эндотелия и макрофагах, несмотря на то что эти клетки распластаны на подложке. Такой результат, возможно, связан с особенностями опухолевых клеток, характеризующихся более высокими флуктуациями мембран (см., например, [6]).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используя лазерный интерференционный микроскоп, можно оценивать флуктуации живых клеток *in vitro* путем регистрации среднеквадратичной амплитуды флуктуаций о.р.х. Зарегистрированные значения квадратичной амплитуды флуктуаций о.р.х. составили 0.3–2.7 нм о.р.х., что приблизительно соответствует квадратичной амплитуде флуктуаций толщины клетки 4–40 нм. Это соответствует результатам, полученным другими оптическими методами. Кроме того, возможно оценивать эквивалентную константу жесткости таких клеток. При этом в обычных условиях оцениваемая величина $s_{кл}$ обусловлена главным образом колебаниями мембраны клеток, хотя при определенных условиях в $s_{кл}$ могут внести вклад колебания

о.р.х., обусловленные локальными изменениями показателя преломления в цитоплазме, которые также возможно зарегистрировать при помощи лазерной интерференционной микроскопии.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-79-30062). Для А.И. Юсиповича, Е.Ю. Паршиной, А.А. Байжуманова и Г.В. Максимова работа поддержана Междисциплинарной научно-образовательной школой Московского университета “Молекулярные технологии живых систем и синтетическая биология”.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Работа не содержит исследований с использованием людей в качестве объектов исследования. Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы ухода и использования животных были соблюдены.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brochard-Wyart F, Lennon J.F. // J. Phys. (France). 1975. V. 36. P. 1035. <https://doi.org/10.1051/jphys:0197500360110103500>
2. Monzel C., Sengupta K. // Journal of Physics D: Applied Physics. 2016. V. 49. 243002. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/24/243002>

3. *Zidovska A., Sackmann E.* // Physical Review Letters. 2006. V. 96. 048103.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.048103>
4. *Yamaikina M.V., Mansurov V.A., Ivashkevich É.V.* // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 1996. V. 69. P. 283.
<https://doi.org/10.1007/bf02606946>
5. *Popescu G., Park Y., Choi W., Dasari R.R., Feld M.S., Badizadegan K.* // Blood Cells, Molecules, and Diseases. 2008. V. 41. P. 10.
<https://doi.org/10.1016/j.bcmed.2008.01.010>
6. *Majeed H., Sridharan S., Mir M., Ma L., Min E., Jung W., Popescu G.* // Journal of Biophotonics V. 10. 2017. P. 177.
<https://doi.org/10.1002/jbio.201600113>
7. Mechanobiology of Cell-Cell and Cell-Matrix Interactions. Boston, MA: Springer, 2011.
8. *Yusipovich A.I., Parshina E.Y., Brysgalova N.Y., Brazhe A.R., Brazhe N.A., Lomakin A.G., Levin G.G., Maksimov G.V.* // Journal of Applied Physics. 2009. V. 105. P. 102037.
<https://doi.org/10.1063/1.3116609>
9. *Tychinsky V.P., Tikhonov A.N.* // Cell Biochem. Biophys. 2010. V. 58. P. 107.
<https://doi.org/10.1007/s12013-010-9114-z>
10. *Svitkina T.M.* // Trends in Cell Biology. 2020. V. 30. P. 556.
<https://doi.org/10.1016/j.tcb.2020.03.005>
11. *Popescu G., Ikeda T., Goda K., Best-Popescu C.A., Laposata M., Manley S., Dasari R.R., Badizadegan K., Feld M.S.* // Physical Review Letters. 2006. V. 97. 218101.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.218101>
12. *Yusipovich A.I., Novikov S.M., Kazakova T.A., Erokhova L.A., Brazhe N.A., Lazarev G.L., Maksimov G.V.* // Quantum Electron. 2006. V. 36. P. 874.
<https://doi.org/10.1070/QE2006v036n09ABEH013408>
13. *Barer R., Joseph S.* // Quarterly Journal of Microscopical Science. 1954. V. 95. P. 399.
14. *Rappaz B., Barbul A., Hoffmann A., Boss D., Korenstein R., Depeursinge C., Magistretti P.J., Marquet P.* // Blood Cells Mol. Dis. 2009. V. 42. P. 228.
<https://doi.org/10.1016/j.bcmed.2009.01.018>
15. NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods. NIST, 2013.
<https://doi.org/10.18434/M32189>
16. *Yusipovich A.I., Cherkashin A.A., Verdiyev E.E., Sogomonyan I.A., Maksimov G.V.* // Laser Physics Letters. 2016. V. 13. P. 085601.
<https://doi.org/10.1088/1612-2011/13/8/085601>
17. *Lomakin A.Y., Nadezhdina E.S.* // Biochemistry (Moscow). 2010. V. 75. P. 7.
<https://doi.org/10.1134/S0006297910010025>
18. *Parshina E.Y., Yusipovich A.I., Brazhe A.R., Silicheva M.A., Maksimov G.V.* // Journal of Biological Physics. 2019. V. 45. P. 367.
<https://doi.org/10.1007/s10867-019-09533-5>
19. *Luneva O.G., Sidorenko S.V., Ponomarchuk O.O., Tverskoy A.M., Cherkashin A.A., Rodnenkov O.V., Alekseeva N.V., Deev L.I., Maksimov G.V., Grygorczyk R., Orlov S.N.* // Cell Physiol Biochem. 2016. V. 39. P. 81.
<https://doi.org/10.1159/000445607>
20. Лимфоциты. Методы. М.: Мир, 1990.
21. *Turovetskii V.B., Zolotilin S.A., Sarycheva N.I., Kalikhevich V.N., Kamenskii A.A.* // Biull. Eksp. Biol. Med. 1994. V. 117. P. 265.
22. *Tverskoi A.M., Sidorenko S.V., Klimanova E.A., Akimova O.A., Smolyaninova L.V., Lopina O.D., Orlov S.N.* // Biochemistry (Moscow). 2016. V. 81. P. 876.
<https://doi.org/10.1134/S0006297916080083>
23. *Левин Г.Г., Вишняков Г.Н., Минаев В.Л.* // ПТЭ. 2014. № 1. С. 79.
<https://doi.org/10.7868/S0032816214010066>
24. *Schindelin J., Arganda-Carreras I., Frise E., Kaynig V., Longair M., Pietzsch T., Preibisch S., Rueden C., Saalfeld S., Schmid B., Tinevez J.Y., White D.J., Hartenstein V., Eliceiri K., Tomancak P., Cardona A.* // Nature Methods. 2012. V. 9. P. 676.
<https://doi.org/10.1038/nmeth.2019>
25. *Shock I., Barbul A., Girshovitz P., Nevo U., Korenstein R., Shaked N.T.* // J. Biomed. Opt. 2012. V. 17. 101509.
<https://doi.org/10.1117/1.Jbo.17.10.101509>
26. *Bishitz Y., Gabai H., Girshovitz P., Shaked N.T.* // Journal of Biophotonics. 2014. V. 7. P. 624.
<https://doi.org/10.1002/jbio.201300019>

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ЯЧЕЙКА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ УСТРОЙСТВ

© 2021 г. К. П. Аймаганбетов^{a,*}, А. У. Алдияров^b, С. Р. Жантуаров^a,
Н. Ж. Алмасов^{a,c}, Е. И. Теруков^d, Н. С. Токмолдин^{e,**}

^a Satbayev University, Физико-технический институт, Алматы, Казахстан

^b Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

^c Назарбаев Университет, Нур-Султан, Казахстан

^d ООО «НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике» при ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
Санкт-Петербург, Россия

^e Universität Potsdam, Потсдам, Германия

*e-mail: kazybek012@gmail.com

**e-mail: tokmoldin@uni-potsdam.de

Поступила в редакцию 26.01.2021 г.

После доработки 12.04.2021 г.

Принята к публикации 28.04.2021 г.

Приведено описание экспериментальной измерительной ячейки, предназначенной для исследования электрофизических характеристик полупроводниковых элементов при низких температурах. В отличие от традиционных двухконтактных установок такого типа, разработанная экспериментальная ячейка имеет три измерительных контакта, позволяющих проводить электрофизические измерения плоских и объемных образцов. Рабочий температурный диапазон ячейки составляет ≥ 16 К. Проведены измерения импедансных характеристик гетеропереходного кремниевого и перовскитного солнечных элементов в диапазонах частоты от 100 Гц до 5 МГц и температуры 120–300 К. Результаты измерений удовлетворительно согласуются с литературными данными.

DOI: 10.31857/S0032816221050165

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что параметры среды, окружающей исследуемые образцы, оказывают влияние на качество измерений их электрофизических свойств [1]. Особенно чувствительными в этом отношении являются измерения свойств полупроводниковых материалов, проводимые при низких температурах. Основная проблема в таких случаях состоит в конденсации атмосферных паров на образце, что может приводить к искажению и потере сигнала. Стабилизация температуры образца и окружающей его атмосферы является важным условием проведения качественных низкотемпературных измерений. При таких измерениях обычно используют криостаты (или охлаждающие системы замкнутого цикла) [2–4]. При этом проведение конкретного вида измерений предполагает, как правило, наличие отдельного криостата или уникальной измерительной ячейки, адаптированной под тип, размер и форму образцов [5–10]. Таким образом, одной из технически важных задач при комплексном исследовании свойств ма-

териалов является поиск возможности проведения измерений образцов различных видов, дающих комплементарную информацию, при использовании одного и того же измерительного устройства.

В настоящей статье описана разработанная нами измерительная ячейка низкотемпературного криостата для исследования электрофизических свойств материалов методом импеданс-спектроскопии, а также приведены результаты измерений импедансных характеристик гетеропереходного кремниевого и органоаллоидного перовскитного солнечных элементов. В целом работа направлена на создание комплексной измерительной установки, объединяющей в себе низкотемпературную ячейку, трехконтактный универсальный держатель образцов и импеданс-спектрометр (HF2 Impedance Spectroscopy, Zurich instruments), для проведения измерений в частотном диапазоне от 0.7 мкГц до 50 МГц.

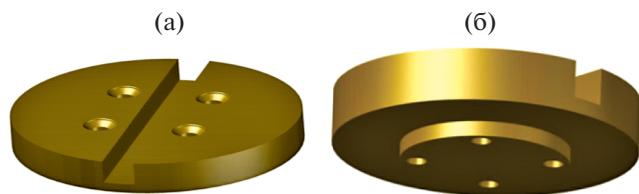


Рис. 1. Внешний вид подложки для размещения образцов: а – вид сверху, б – вид снизу.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Измерительная ячейка разработана на основе микрокриогенной машины Cryomech Model ST15 Cryostat. Основной частью измерительной ячейки является подложка с вмонтированным в нее электрическим контактом, предназначенным для снятия электрического сигнала с исследуемых образцов. Внешний вид подложки приведен на рис. 1. Подложка диаметром 45 мм и высотой 7 мм изготовлена из меди для обеспечения высокой теплопроводности. Она устанавливается на верхний охлаждаемый фланец второй ступени микрокриогенной машины, работающей по циклу Гиффорда–Мак-Магона. Для согласования размеров подложки с геометрическими размерами верхней части фланца криостата предусмотрен выступ высотой 2 мм и диаметром 25 мм. В нижней части подложки выполнена канавка для установки термодатчика. Для проведения измерений при различных температурных режимах система оснащена терморегулятором.

Одной из задач настоящей работы была разработка нижнего измерительного контакта (рис. 2) для возможности тестирования как пленочных образцов полупроводниковых фотоэлементов (с положительным и отрицательным контактами, расположенными с одной стороны фотоактивной пленки), так и объемных образцов (с электрическими контактами, расположенными по обе стороны фотоактивной пленки). Для размещения нижнего контакта был вырезан шлиц шириной и глубиной 5 мм вдоль диаметра подложки. Корпус 3 контакта выполнен из текстолитового материала и выполняет роль изолятора. Длина корпуса

45 мм, площадь поперечного сечения $3 \times 5 \text{ мм}^2$. Корпус крепится на подложке при помощи шурупов. Позолоченная плоская контактная пружина 1 установлена в специальном углублении корпуса. Текстолитовая вставка выровнена с поверхностью подложки путем полировки для обеспечения качественного теплового контакта образца с подложкой. Вдоль оси корпуса выполнено отверстие для вывода коаксиального измерительного кабеля 2.

Важным компонентом измерительной системы являются верхние измерительные контакты. Устройство верхней части контактной системы измерительной ячейки приведено на рис. 3. Верхний измерительный контакт состоит из двух изготовленных из дюралюминия стоек: подвижной 5 длиной 35 мм и неподвижной высотой 25 мм. Неподвижная стойка зафиксирована на борту микрокриогенной машины 6, при этом подвижная стойка способна поворачиваться в азимутальном направлении. Прижим контакта к образцу обеспечивается посредством спиралевидной пружины, закрепленной между подвижной 5 и вертикальной неподвижной стойками. Упругость пружины подобрана таким образом, чтобы не допустить повреждения поверхности измеряемого образца. Подвижное соединение двух частей стоек с помощью специального подшипника ($D = 4 \text{ мм}$) обеспечивает контакт исследуемого образца 1, расположенного на измерительной подложке 7, с нижним электрическим контактом. Позолоченный электрический контакт 2 с помощью изолирующего эпоксидного клея 3 закреплен на кончике подвижной стойки. Металлический контакт 2 соединен с коаксиальным кабелем 4.

Общий вид низкотемпературной измерительной установки приведен на рис. 4. Подложка 9 крепится сверху на верхний фланец микрокриогенной машины. Закрепленный на подложке образец 7 закрыт сверху дюралюминиевой крышкой 2 диаметром 80 и высотой 60 мм, в которой выполнено смотровое окно 5 диаметром 30 мм. Крышка соединяется посредством болтов с корпусом 1, что позволяет изолировать образец от окружающей среды. Борт микрокриогенной машины, на котором закреплена измерительная си-

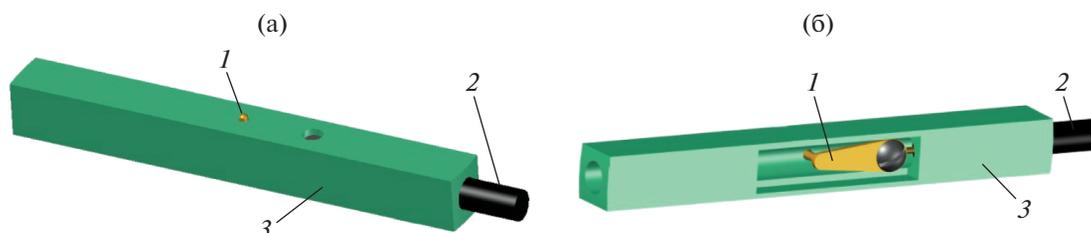


Рис. 2. Общий вид нижнего электрического контакта: а – вид сверху, б – вид снизу. 1 – позолоченная контактная пружина, 2 – коаксиальный кабель, 3 – корпус из текстолита.

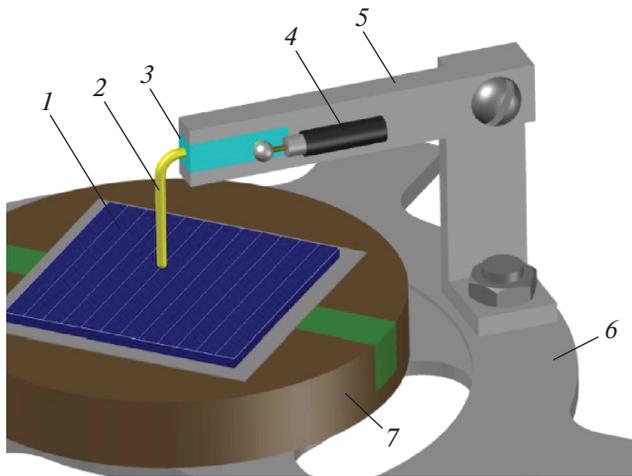


Рис. 3. Контактная система измерительной ячейки, верхняя контактная часть системы. 1 – исследуемый образец, 2 – электрический контакт, 3 – крепление контакта, 4 – коаксиальный кабель, 5 – подвижная стойка, 6 – борт микрокриогенной машины, 7 – подложка.

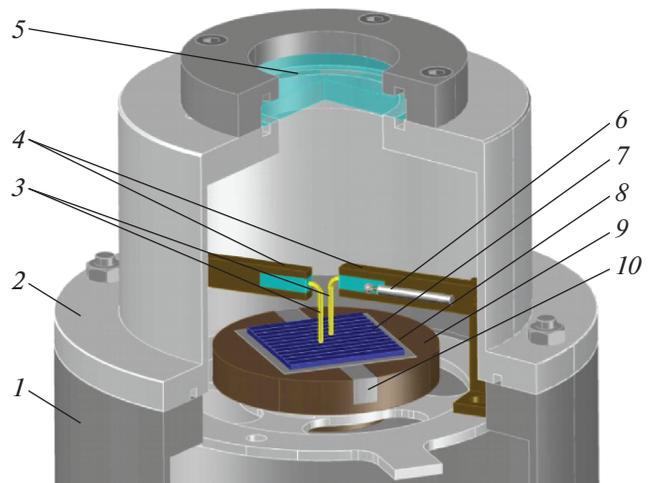


Рис. 4. Низкотемпературная измерительная установка. 1 – корпус микрокриогенной машины; 2 – крышка ячейки; 3 – электрические контакты; 4 – держатели контактов; 5 – смотровое окно; 6 – коаксиальный кабель; 7 – исследуемый образец; 8 – слюдяной изолятор; 9 – подложка; 10 – держатель нижнего контакта.

стема, не имеет теплового контакта с корпусом криогенератора. Узел, изображенный на рис. 4, является герметичным, позволяя поддерживать внутреннее давление не выше 10^{-4} Торр. Для соединения корпуса микрокриогенной машины с крышкой ячейки, а также корпуса микрокриогенной машины со смотровым окном использованы резиновые кольцевые прокладки. После стабилизации требуемой температуры сигнал с образца снимается при помощи позолоченных контактов 3, закрепленных в держателях 4 и 10 и соединенных с коаксиальным кабелем марки РК-50 (6), имеющим волновое сопротивление 50 Ом.

Для измерения и регулировки температуры подложки был установлен датчик температуры Silicon diode, Scientific Instruments, Inc. Model Si-400, управляемый регулятором температуры 9600-1 от Scientific Instruments, Inc. Реальная температура исследуемого образца устанавливается вследствие теплового баланса между внешним теплопритоком, теплопроводностью образца и электроизолирующего материала. Для точного измерения температуры на образце дополнительно установлена термопара производства LakeShore, тип E, с погрешностью измерений до 0.5 К. Измерительный конец датчика температуры находится в тепловом контакте с образцом.

ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ МИКРОКРИОГЕННОЙ ЯЧЕЙКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

При помощи изготовленной измерительной ячейки были проведены измерения полупровод-

никовых образцов методом импедансной спектроскопии. В качестве исследуемых образцов были выбраны гетеропереходный кремниевый солнечный элемент с контактами, выведенными по разные стороны подложки, и гибкий перовскитный солнечный элемент на подложке PET с контактами, расположенными с одной стороны подложки. Вследствие того что при точечных измерениях двухконтактным методом сопротивление контактов может вносить большой вклад в измеряемое сопротивление изучаемой структуры, поверхности образцов покрывали металлическими электродами для минимизации внутреннего сопротивления при измерениях и предотвращения возможности окисления. Кремниевый солнечный элемент с одной стороны покрывали слоем оксида индия–олова с токоотводящими нитями из серебросодержащей пасты, а с другой стороны – слоем серебра. На рабочую сторону перовскитного солнечного элемента термовакuumным напылением наносили контакты из золота. Размеры кремниевого солнечного элемента составляли $\sim 5 \times 5$ мм, а перовскитного солнечного элемента – 25×25 мм. Это соответственно минимальные и максимальные размеры исследуемых образцов для данной ячейки.

Были проведены измерения частотных зависимостей в диапазоне от 100 Гц до 5 МГц темновых комплексных сопротивлений гетеропереходного кремниевого солнечного элемента при различной температуре образца. Соответствующие кривые Найквиста представлены на рис. 5. Согласно полученным данным, комплексное сопро-

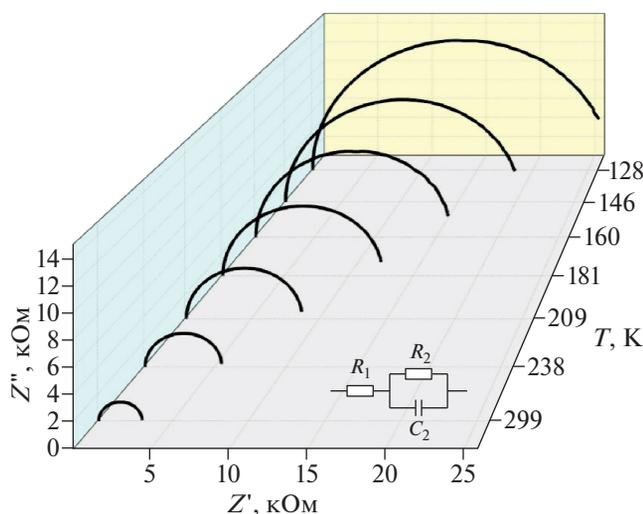


Рис. 5. Кривые Найквиста кремниевого образца при различных температурах.

тивление образца возрастает от 3 кОм при 299 К до 25 кОм при 128 К.

Далее аналогичным образом исследовался перовскитный солнечный элемент с архитектурой PЕТ/ITO/SnO₂/CH₃NH₃PbI₃/Spiro-Me-TAD/Au. Были измерены темновые комплексные сопротивления этого элемента при различной температуре образца. Температурный диапазон варьировался от комнатной температуры (298 К) до 127 К. Результаты измерений приведены на рис. 6. Амплитуда темнового комплексного сопротивления образца возрастала с уменьшением температуры от ≈25 кОм при 298 К до 120 кОм при 127 К. Параметры элементов эквивалентной схемы, представленной на рис. 5, для разных образцов приведены соответственно в табл. 1 и 2.

Полученные значения параметров эквивалентной схемы согласуются с ожидаемыми физическими характеристиками исследуемых солнечных элементов. В частности, последовательное сопротивление R₁ представляет собой суммарное омическое сопротивление, включающее в себя со-

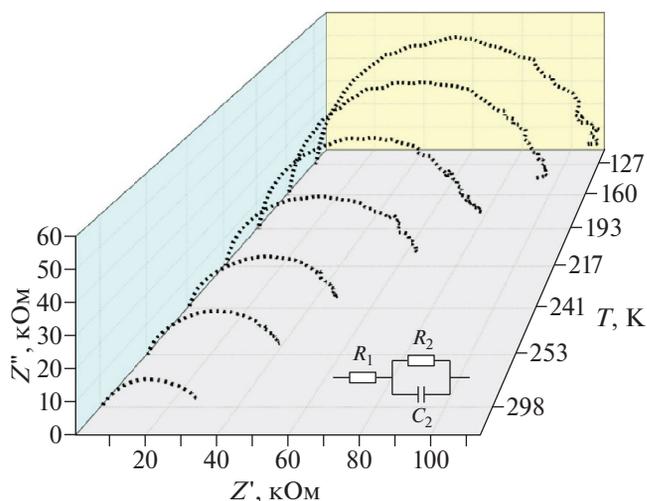


Рис. 6. Кривые Найквиста перовскитного элемента в диапазоне температур 127–298 К.

противление электродов, барьерных контактов и объемное сопротивление полупроводникового материала, в то время как параллельное сопротивление R₂ характеризует внутреннее сопротивление полупроводника и связано с процессом переноса зарядов в нем, а C₂ соответствует барьерной емкости [11]. При этом влияние температуры на каждый из этих параметров различное. Так, в рассматриваемом температурном диапазоне R₁ изменяется незначительно, а величина параллельного сопротивления R₂ (сопротивления рекомбинации) уменьшается в 4 раза при повышении температуры от 127 до 297 К. При этом изменение R₂ соответствует поведению внутреннего сопротивления полупроводниковых солнечных элементов при изменении температуры, связанному с ростом подвижности носителей заряда [12, 13]. Суммарное изменение параметров параллельной RC-цепочки рассматриваемых эквивалентных схем описывается зависимостью времени релаксации τ от температуры, демонстрируя активационный характер процессов, отвечающих за транспорт носителей в исследуемых структурах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен вариант измерительной ячейки для микрокриогенной машины, позволяющей осуществлять низкотемпературные измерения плоских тонкопленочных образцов с электрическими контактами, выведенными как на одну, так и на обе стороны образца. Ключевыми элементами низкотемпературной измерительной ячейки являются медная подложка специальной формы и электрическая трехконтактная измерительная система, состоящая из одного нижнего и двух верхних контактов. При помощи данной микрокрио-

Таблица 1. Параметры эквивалентной схемы для кремниевого гетеропереходного солнечного элемента

T, K	R ₁ , Ом · см ²	R ₂ , Ом · см ²	C ₂ , 10 ⁻⁸ Ф/см ²	τ, мс
128	78.16	13446.00	2.56	0.347
146	88.93	10095.00	2.74	0.279
160	96.00	8075.00	2.82	0.237
181	98.84	6269.50	2.76	0.172
209	96.27	4313.55	2.78	0.124
238	100.09	2698.00	3.00	0.0845
299	79.01	1443.50	3.12	0.0464

Таблица 2. Параметры эквивалентной схемы для перовскитного солнечного элемента

T, K	$R_1, \text{Ом} \cdot \text{см}^2$	$R_2, \text{Ом} \cdot \text{см}^2$	$C_2, 10^{-9} \Phi/\text{см}^2$	$\tau, \text{мс}$
127	447.80	109863.60	9.70	1.07
160	408.60	95200.20	9.81	0.934
193	369.70	81365.70	9.42	0.767
217	355.30	66651.00	10.8	0.717
241	323.90	48561.80	13.8	0.672
253	301.80	40929.50	15.4	0.629
297	299.00	28030.90	19.7	0.551

генной ячейки измерены спектры частотной зависимости комплексного сопротивления солнечных элементов на основе кремния и органогаллоидных перовскитов в диапазонах частоты от 100 Гц до 5 МГц и температур от 120 до 300 К, определены электрофизические характеристики. Представленная низкотемпературная ячейка позволяет измерять температурные зависимости импедансных спектров различных полупроводниковых приборов с целью исследования их электрофизических свойств.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан, гранты AP05133651, AP09260940.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Flickett F.R.* Electrical properties of materials and their measurement at low temperatures. Washington D.C.: Government Printing Office, 1982.
2. *Ekin J.* Experimental techniques for low-temperature measurements: cryostat design, material properties and superconductor critical-current testing. NY.: Oxford U. Press, 2006. ISBN 978-0-19-857054-7. <https://doi.org/10.1063/1.2743130>
3. *Flynn T.M.* Cryogenic Engineering. 2nd Edition. NY.: Marcel Dekker, 1997. P. 158–180.
4. *Parma V.* Cryostat Design. CERN, 2014. arXiv: 1501.07154.
5. *Das A., Das P., Banerjee S., Reza A., Bannerjee K.D.* A Study for Developing a Cryostat for Circuit Testing at Low Temperatures // Excerpt from the Proceedings of the 2015 COMSOL Conference in Pune. https://www.comsol.de/paper/download/295521/das_poster.pdf
6. *Moliá J., Ibarra A., Mariñeda J., Zamarro J.M., Hernández A.* Dielectric properties measurement system at cryogenic temperatures and microwave frequencies. Madrid: Ciemat 735, 1994. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/26/008/26008650.pdf
7. *Singh M., Chaujar R., Rakshit R.K.* // Current Science. 2018. V. 115. № 6. P. 1085. <https://doi.org/10.18520/CS/V115/I6/1085-1090>
8. *Novak P., Pechousek J., Malina O., Navarik J., Machala L.* // AIP Conference Proc. 2014. V. 1622. № 1. P. 67. <https://doi.org/10.1063/1.4898612>
9. *Thakkar H., Joshi S.U., Dave B.V., Trivedi S.J.* // Journal of Sci-Tech Research. 2010. V. 1. Issue 2. P. 30. <https://www.researchgate.net/publication/327437887>
10. *Singh Y.* // International Journal of Modern Physics: Conference Series. 2013. V. 22. P. 741. <https://doi.org/10.1142/S2010194513010969>
11. *Zhang Y., Li L., Yuan S., Li G., Zhang W.* // Electrochimica Acta. 2013. V. 109. P. 221. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.07.152>
12. *Garland J.E., Crain D.J., Roy D.* // Solar Energy. 2011. V. 85 (11). P. 2912. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.08.029>
13. *Wang M., Yim W.-L., Liao P., Shen Y.* // Chemistry Select. 2017. V. 2 (16). P. 4469. <https://doi.org/10.1002/slct.201700776>

УСТАНОВКА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ ДВУХФОТОННОЙ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ФОКУСИРОВКИ

© 2021 г. Е. О. Епифанов^а, Е. А. Мигаль^б, Ф. В. Потемкин^б, А. А. Антошин^а,
В. И. Юсупов^а, Н. В. Минаев^{а,*}

^а Институт фотонных технологий ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН
Россия, 108840, Москва, Троицк, ул. Пионерская, 2

^б Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, Москва

*e-mail: minaevn@gmail.com

Поступила в редакцию 17.05.2021 г.

После доработки 27.05.2021 г.

Принята к публикации 07.06.2021 г.

Описана установка для лазерной трехмерной печати методом двухфотонной полимеризации с использованием схемы пространственно-временной фокусировки фемтосекундного лазерного излучения. Основанная на доступных компонентах система позволяет формировать трехмерные структуры сантиметрового масштаба с микронным разрешением по всем направлениям, что является ее основным достоинством относительно других систем, в том числе коммерческих. При создании установки использовано минимальное количество оптических и оптомеханических компонент, что значительно повышает доступность таких установок в различных лабораториях. С помощью установки можно изготавливать трехмерные структуры различного назначения, в том числе скаффолд-структуры для задач тканевой инженерии.

DOI: 10.31857/S0032816221060021

1. ВВЕДЕНИЕ

Лазерные аддитивные технологии в настоящее время переживают бурное развитие. В области трехмерной печати лазерное излучение широко используется для спекания порошковых металлических и полимерных материалов методом селективного лазерного спекания [1, 2], а также для отверждения жидких полимерных материалов методом стереолитографии [3, 4]. Развиваются технологии биологической трехмерной печати, в основе которых лежит использование импульсного лазерного излучения для реализации пространственного переноса вещества и живых микрообъектов [5–13]. Изделия, сформированные с помощью лазерной трехмерной печати, в настоящее время широко используются как в серийной промышленности, так и в быту благодаря развитию новых лазерных источников и появлению доступных установок для трехмерной лазерной печати, использующих их возможности [14–16].

Среди всего многообразия технологий лазерной трехмерной печати отдельно можно выделить технологию двухфотонной полимеризации [17, 18], в основе которой лежит принцип нелинейно-

го поглощения фемтосекундного лазерного излучения в фокальной точке микрообъектива – так называемом “вокселе” (3D-аналог двумерного “пикселя”), который обычно имеет форму вытянутого вдоль оптической оси эллипсоида вращения. Благодаря высокой локальности этого процесса, отверждение может происходить в крайне компактной области, которая в случае использования микроскопических объективов с высокими кратностью и числовой апертурой может иметь субмикронные размеры. Однако у такой системы есть ряд недостатков. Из-за крайне малого размера области, в которой происходит процесс фотоотверждения материала (что изначально является преимуществом), возникают значительные проблемы с производительностью метода при формировании крупных структур. Так, процесс получения структур с характерным размером несколько миллиметров при сохранении микронного разрешения может занимать часы и даже несколько суток. Это в первую очередь связано с необходимостью “заполнения” объема формируемых структур отдельными проходами лазерного излучения, т.е. с большим количеством микроскопических “вокселей” отвержденного материала.

ла. Небольшой прирост производительности достигается при применении высокочастотных лазерных источников и систем высокоскоростного перемещения лазерного пятна (например, гальваносканеров) в сочетании с использованием быстроотверждаемых полимерных материалов. Однако малое рабочее поле микрообъектива имеет фундаментальное ограничение: для обычно используемого объектива с двадцатикратным увеличением и числовой апертурой 0.4 оно составляет 250×250 мкм, а для объектива со стократным увеличением и числовой апертурой 1.4 – 40×40 мкм. Это ограничение не позволяет формировать структуры с большими размерами в горизонтальной плоскости. Также вертикальный размер создаваемых структур в значительной степени ограничен рабочим расстоянием объектива. Формирование структур с высоким аспектным соотношением возможно лишь с помощью сложных схем [19]. Стоит отметить, что использование объективов с большим фокусным расстоянием для этих целей приводит к резкому ухудшению разрешающей способности метода в вертикальном направлении [20]. Так, при использовании микрообъектива с четырехкратным увеличением и числовой апертурой 0.1 аспектное соотношение для образованного “вокселя” может составлять уже 1 : 20. Все эти факторы значительно ограничивают возможности метода двухфотонной полимеризации при использовании его на практике, в том числе для актуальных задач формирования трехмерных конструкций из биосовместимых полимерных материалов для тканевой инженерии [21, 22]. Для решения подобных практических задач необходимо обеспечить высокую производительность с возможностью формирования относительно крупных (сантиметрового масштаба) трехмерных структур с характерным разрешением 5–10 мкм во всех направлениях.

2. МЕТОДИКА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ФОКУСИРОВКИ ДЛЯ ЗАДАЧИ ДВУХФОТОННОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ

Сформулированная выше задача может быть решена с помощью пространственно-временной фокусировки (simultaneous spatiotemporal focusing – SSTF) фемтосекундного лазерного излучения [23–25]. Пространственно-временная фокусировка обеспечивает сжатие эллиптической области в перетяжке объектива (вдоль оси распространения излучения) за счет дополнительной пространственно-временной фокусировки спектральных компонент фемтосекундного лазерного импульса, имеющего пространственный чирп (разнесение частотных компонент по пространству). Такая схема формирования фемтосекундного лазерного импульса исключительно в фокальной области объектива позволяет превратить вертикально вытянутый

эллиптический воксель, в котором формируются условия для двухфотонного поглощения лазерного излучения, практически в сферу. При этом пространственно-временная фокусировка позволяет также в значительной степени избавиться от нежелательного перегрева отверждаемого полимерного материала (благодаря более высокой концентрации энергии лазерного импульса в “вокселе” по сравнению с обычной фокусировкой).

Пространственно-временная фокусировка заключается в использовании пространственно-чирпированного импульса, малая длительность которого (а значит, и максимальная интенсивность) достигается непосредственно в фокальной плоскости микрообъектива. Для реализации этой схемы на первом этапе фемтосекундный импульс растягивается по времени до пикосекундных значений путем добавления положительного чирпа с помощью оптической схемы стретчера (расширителя импульсов). Затем с помощью оптической схемы компрессора проводится пространственное разделение спектральных компонент лазерного импульса с одновременной компенсацией разницы оптических путей отдельных компонент (устраняется временной чирп) для пространственной и временной сборки лазерного импульса после объектива. Фактически появляется дополнительная степень фокусировки, благодаря тому что спектральные компоненты лазерного излучения собираются вместе только в области фокальной точки.

Технология пространственно-временной фокусировки уже успешно применялась для решения задач, связанных с двухфотонной полимеризацией. Так, в работах [26, 27] представлены варианты конфигурации систем двухфотонной полимеризации, в которых используются дорогостоящие мощные фемтосекундные лазерные источники с низкой частотой следования лазерных импульсов. Конструктивно такие системы основаны на принципе усиления чирпированных импульсов, поэтому они уже имеют в своем составе пару “стретчер–компрессор”, которая может быть адаптирована под задачу пространственно-временной фокусировки. Однако для задач двухфотонной полимеризации также могут быть использованы и широкодоступные фемтосекундные высокочастотные (с частотой ~ 80 МГц) лазерные источники, компактные и значительно более дешевые. Для таких источников целесообразно использовать отдельную оптическую систему, позволяющую реализовать пространственно-временную фокусировку, чему и посвящена настоящая публикация.

В данной работе предлагается вариант полнофункциональной лабораторной системы двухфотонной полимеризации, реализованной с использованием схемы пространственно-временной фокусировки с минимальным количеством

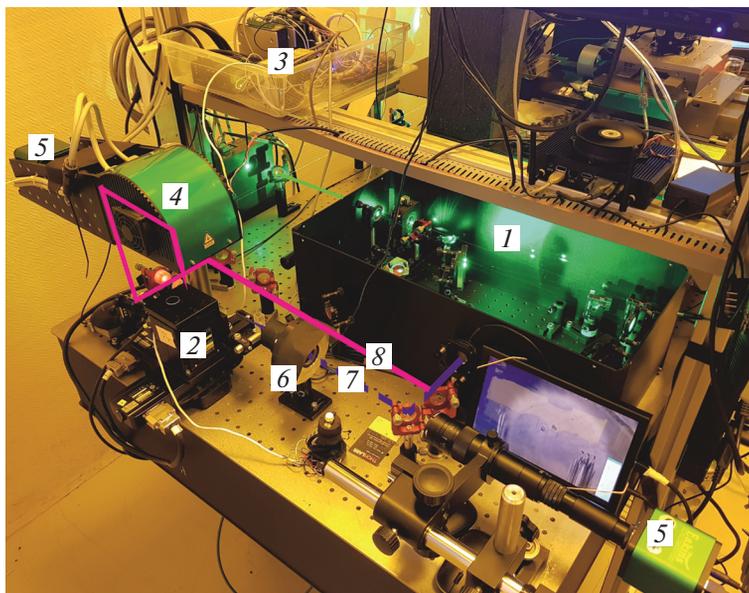


Рис. 1. Фотография экспериментальной системы. 1 – модуль стретчера и компрессора; 2 – трехкоординатная моторизированная подвижка; 3 – контроллер для управления трехмерной подвижкой с сопутствующей электроникой; 4 – гальваносканер; 5 – цифровые камеры с телескопическим объективом; 6 – фокусирующий микрообъектив. Луч 7 (штриховая линия) показывает конфигурацию системы с использованием трехмерного транслятора, 8 (сплошная линия) – с использованием гальваносканера.

доступных стандартных компонент. Эта система обладает обширным функционалом и является экономически доступной.

3. УСТРОЙСТВО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Внешний вид разработанной нами системы для формирования трехмерных структур методом двухфотонной фемтосекундной полимеризации с использованием пространственно-временной фокусировки представлен на рис. 1. Схема установки приведена на рис. 2. В установке используется излучение второй гармоники фемтосекундного лазера ТЕМА-100 (Авеста-проект, Россия) с центральной длиной волны 525 нм, шириной спектра ~4 нм, частотой следования импульсов 80 МГц и длительностью импульса 100 фс. Вся система собрана на оптической плите (см. рис. 1). Установка состоит из блока стретчера и компрессора 1; моторизированного XYZ-транслятора 2 с контроллером и блоком сопутствующей электроники 3; гальваносканирующей системы 4; а также двух цифровых камер 5 с телескопическими объективами, одна из которых установлена в гальваносканере.

Система собрана одновременно в двух конфигурациях. Первая реализует режим формирования структур с помощью только моторизированного трехмерного транслятора. В этом случае излучение заводится через объектив 6 (штриховой луч 7 на рис. 1). Вторая конфигурация обеспечи-

вает высокоскоростное формирование структур с использованием гальваносканирующей системы. При этом излучение заводится через гальваносканер 4 (сплошной луч 8 на рис. 1).

В обеих конфигурациях образцы фотоотверждаемого полимера размещают на моторизованном трехмерном трансляторе, собранном из двух моторизированных горизонтальных подвижек (оси X и Y) OSMS20-85 и одной вертикальной подвижки OSMS80-20ZF (OptoSigma, Japan). Шаговые моторы транслятора через внешние драйверы MD5-HD14 (Autonics, Корея) подключены к управляющему контроллеру Bigtreetech SKR PRO V1.2 (Bigtreetech, Китай) с прошивкой Marlin 2.0, осуществляющему управление моторизованным транслятором с помощью команд G-code и программного обеспечения с открытым кодом Pronterface. К контроллеру также подключены два дополнительных моторизированных транслятора. Первый используется для управления средней мощностью лазерного излучения с помощью модуля аттенюации 1 (см. рис. 2), состоящего из поляризационного светоделительного куба и расположенного перед ним поворотного моторизованного транслятора. В последнем закреплена полуволновая пластинка, вращением которой задается средняя мощность излучения на выходе из модуля аттенюации. Вторым транслятором 9 задействован в оптической схеме компрессора и отвечает за управление степенью пространственно-временной дисперсии; он позволяет в автоматическом режиме подстраивать параметры

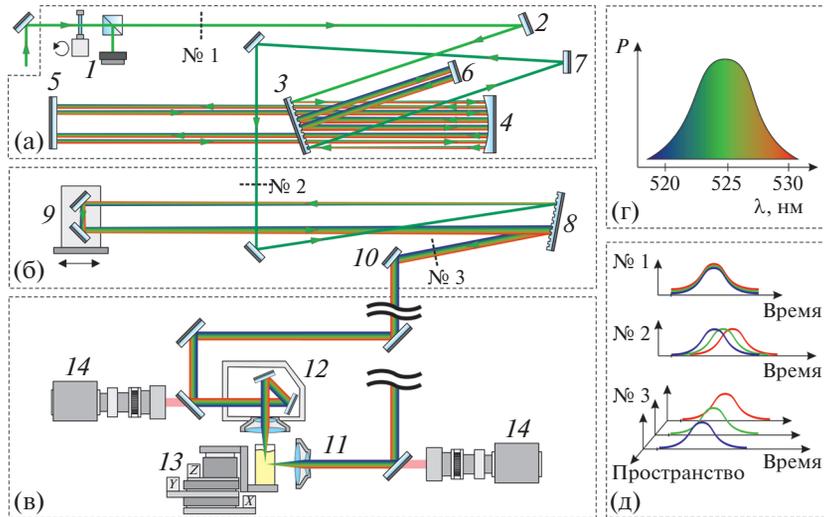


Рис. 2. Схема основной части установки двухфотонной полимеризации с использованием принципа пространственно-временной фокусировки излучения: **а** – стретчер, **б** – компрессор, **в** – система формирования трехмерных структур, **г** – условная иллюстрация цветового отображения спектра лазерного излучения, **д** – иллюстрация сечений лазерного пучка в различных точках оптической схемы. 1 – модуль аттенюации лазерного излучения; 2, 5–7, 10 – диэлектрические зеркала; 3, 8 – дифракционные решетки; 4 – сферическое зеркало; 9 – уголкового отражателя на моторизированной платформе; 11 – фокусирующий микробиоъектив; 12 – гальваносканер с установленным микробиоъективом; 13 – моторизированный трехкоординатный транслятор; 14 – цифровая камера с телескопическим объективом.

системы пространственно-временной фокусировки под используемый объектив.

Для сборки системы использовались следующие оптические элементы: диэлектрические зеркала 2, 5–7, 10 на длины волн 515–535 нм с коэффициентом отражения $>99.5\%$ для углов 0° и 45° (OPTOGAMA, Литва); сферическое зеркало (4) SM254-500-E02 (THORLABS, США) с фокусным расстоянием $f = 500$ мм; две отражающие дифракционные решетки (3 и 8) GR50-1205 (THORLABS, США) с $d = 1200$ линий/мм и длиной волны блеска 500 нм; набор стандартных оптомеханических оправок.

В качестве гальваносканирующей системы 12 использован гальваносканер LScanXY (Атеко-ТМ, Россия) с программным обеспечением LDesigner, позволяющим реализовать процесс формирования трехмерной структуры по данным цифровой трехмерной модели. В этом случае управление моторизированными трансляторами осуществлялось с помощью блока управления гальваносканера.

Для визуального контроля процесса формирования трехмерных структур и точной юстировки в системе использовались цифровые камеры (14) XFCAM1080PHV (ТорпТек, КНР) с модулем автофокусировки и телескопическим объективом, которые позволяли получать изображение из фокальной плоскости объектива.

Подготовка управляющей программы с использованием стандартных команд G-code осу-

ществлялась с помощью программы с открытым кодом Cura на основе анализа трехмерных моделей, что обеспечивало процесс лазерного “рисования” объемных структур при движении кюветы с фотоотверждаемым материалом относительно точки фокусировки лазерного луча.

Фокусировка лазерного излучения осуществлялась телецентрическим F-theta-объективом (11) TSL-532-10-56Q-D20 (RonarSmith, Сингапур) с рабочим расстоянием 22 мм, который либо размещался на оптическом столе, либо устанавливался после гальваносканера 12.

Установка для двухфотонной полимеризации с использованием схемы пространственно-временной фокусировки работает следующим образом. Лазерное излучение с длиной волны 525 нм, частотой 80 МГц и длительностью импульсов ~ 100 фс заводится в модуль пространственно-временной фокусировки, состоящий из последовательно установленных оптических схем стретчера (рис. 2а) и компрессора (рис. 2б) и размещенный на отдельной оптической плите. Вначале лазерный луч заводится через модуль ослабления энергии 1, состоящий из моторизированной поворотной подвижки, в которую установлена полуволновая пластинка, обеспечивающая поворот поляризации излучения на необходимый угол. Далее излучение проходит через светоделительный поляризационный куб, который задает соотношение между проходящим и отраженным излучением в зависимости от угла поворота поляризации падающего излучения, что позволяет

автоматически выставлять необходимую мощность лазерного излучения.

С помощью диэлектрического зеркала 2 излучение заводится в схему стретчера типа Мартинез (Martinez type) в компактной геометрии, состоящего из дифракционной решетки 3, сферического зеркала 4, плоского заднего зеркала 5 и ретро-рефлектора 6. Излучение попадает на дифракционную решетку под углом $\alpha = 10.2^\circ$ к ее нормали.

Фемтосекундный лазерный импульс представляет собой совокупность спектральных компонент с различными длинами волн (рис. 2г) с шириной спектра ~ 7 нм (по уровню $1/e^2$). Для расчетов оптической системы были приняты следующие граничные длины волн: $\lambda_b = 520$ нм и $\lambda_r = 530$ нм. Угол отражения β излучения от дифракционной решетки, соответствующий первому дифракционному максимуму, определяется из известного условия $d(\sin\alpha + \sin\beta) = \lambda$, где d – период решетки, λ – длина волны падающего излучения. Из этого соотношения можно определить углы отражения для центральной и граничных длин волн: $\beta = 26.93^\circ$ (для $\lambda = 525$ нм), $\beta_b = 26.54^\circ$ (для $\lambda_b = 520$ нм) и $\beta_r = 27.32^\circ$ (для $\lambda_r = 530$ нм).

После отражения от решетки разделенные в пространстве спектральные компоненты попадают на сферическое зеркало 4 с фокусным расстоянием $f = 500$ мм, удаленное от решетки на расстоянии 300 мм. Стоит отметить, что дифракционная решетка 3 слегка повернута вверх, чтобы отражаемые пучки уходили из горизонтальной плоскости и в дальнейшем могли проходить над решеткой. Сферическое зеркало расположено таким образом, чтобы центральная компонента $\lambda = 525$ нм (с $\beta = 26.93^\circ$) попадала в его центр. Граничные компоненты с длинами волн λ_b и λ_r ведут себя иначе. На рис. 3 представлена упрощенная схема, показывающая траекторию компоненты лазерного луча с $\lambda_b = 520$ нм.

Первое отражение от решетки в точке A (см. рис. 3) происходит под углом $\beta_b = 26.54^\circ$, после чего излучение с λ_b снова попадает на сферическое зеркало 4 и отражается от него в точке B , чтобы проследовать над дифракционной решеткой в точку C зеркала 5. На момент нахождения лазерного пучка на сферическом зеркале в точке B спектральные компоненты $\lambda_b = 520$ нм и $\lambda_r = 530$ нм разнесены на расстояние $S = 4.04$ мм. Попадая на зеркало 5 в точку C , компоненты отдаляются друг от друга уже на расстояние $S = 6.73$ мм. Далее в точке D на сферическом зеркале 4 расстояние между этими компонентами становится максимально большим: $S = 9.42$ мм. После этого излучение возвращается на дифракционную решетку в точку E . Угол падения излучения на решетку $\angle FED$ равен 26.54° и практически не отличается от $\beta_b = 26.54^\circ$, при этом расстояние между точка-

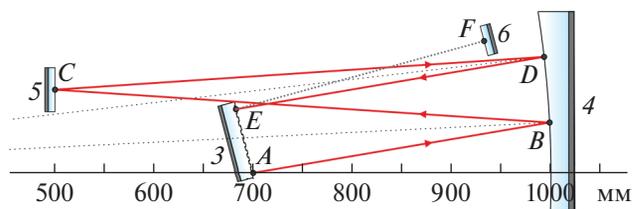


Рис. 3. Упрощенная принципиальная схема, показывающая траекторию спектральной компоненты лазерного пучка с $\lambda_b = 520$ нм. Обозначения элементов соответствуют рис. 2: 3 – дифракционная решетка; 4 – сферическое зеркало; 5, 6 – диэлектрические зеркала.

ми E и A составляет $L \approx 3.02$ мм. Красная компонента спектра лазерного пучка $\lambda_r = 530$ нм проходит такой же оптический путь, попадая на дифракционную решетку на аналогичное удаление, что дает ширину разнесения спектральных компонент лазерного пучка на решетке $L \approx 6.04$ мм.

При отражении от дифракционной решетки компоненты собираются в практически плоско-параллельный пучок, выходящий под тем же самым углом, под которым излучение падало на решетку 3. Затем, из-за наличия небольшого наклона дифракционной решетки, излучение попадает на зеркало 6, от которого отражается, и возвращается на решетку, но под небольшим углом – чуть выше положения точек первоначального отражения при первом проходе. Второй проход через оптическую систему и повторное взаимодействие с оптическими элементами 3, 4 и 5 убирают пространственное разнесение спектральных компонент (пространственный чирп) и дополнительно увеличивают длительность лазерного импульса за счет внесения положительной дисперсии спектральных компонент (временное чирпирование). После прохождения стретчера импульс приобретает дисперсию второго порядка, около $3.7 \cdot 10^5$ фс², что приводит к увеличению длительности импульса до 10 пс.

После прохождения стретчера лазерное излучение поступает в модуль компрессора типа Трейси (Treacy type) (см. рис. 2б). С помощью системы зеркал оно заводится на дифракционную решетку 8 под углом $\alpha = 15^\circ$. После отражения от дифракционной решетки центральная спектральная линия с $\lambda = 525$ нм выходит под углом $\beta = 21.79^\circ$, а спектральные компоненты начинают расходиться в пространстве под разными углами: $\beta_b = 21.42^\circ$, $\beta_r = 22.16^\circ$. Далее лазерное излучение попадает на уголкового отражателя 9, закрепленный на подвижной моторизированной платформе, что позволяет изменять длину компрессора, подстраивая его дисперсию под дисперсию стретчера. После второго отражения от дифракционной решетки лазерный пучок с разнесенными в пространстве



Рис. 4. Фотографии тестовых структур (слева и в центре), сформированных методом двухфотонной полимеризации с использованием пространственно-временной фокусировки (структуры белого цвета) и классической схемы (зеленого цвета). Справа приведена фотография фрагмента структуры с демонстрацией разрешения при рабочих параметрах (20 мкм).

спектральными составляющими (пространственно-чирпированное) становится плоскопараллельным и выходит под углом, близким к углу исходно падающего, растянутого во времени фемтосекундного импульса, после чего с помощью зеркала 10 выводится из модуля компрессора.

Изменяя расстояние между дифракционной решеткой и уголковым отражателем, можно управлять параметрами выходного излучения. Так, при расстоянии $L = 200$ мм диаметр спектрально-чирпированного пучка составит ~ 5.5 мм, при этом разность хода спектральных компонент λ_b и λ_r примерно равна 3.61 мм, что обеспечивает практически полную компенсацию положительного временного чирпирования из стретчера с получением минимальной длительности импульса ~ 120 фс. При изменении расстояния L до 300 мм диаметр пучка составит уже ~ 8.2 мм. При этом будет происходить сильная перекомпенсация дисперсии, и длительность импульса увеличится до ~ 5 пс. Возможность перекомпенсации дисперсии важна не только для точного согласования стретчера и компрессора, но также для компенсации положительной дисперсии, вносимой фокусирующими многолинзовыми объективами. Фактически такое решение позволяет в процессе эксперимента изменять вносимую дисперсию и тем самым осуществлять точную юстировку компрессора и всей системы пространственно-временной фокусировки в автоматическом режиме, что необходимо при настройке системы и смене фокусирующей оптики.

4. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ. АПРОБАЦИЯ НА ПРАКТИКЕ

С использованием разработанной установки был изготовлен набор тестовых структур (рис. 4) сантиметрового масштаба. Представленные на рисунке крупные структуры с характерным размером до 1 см были изготовлены из коммерческого материала Dental Clear (HARZ Labs, Россия) с добавлением фотоинициатора. Для их формирования были подобраны следующие параметры: мощность лазерного излучения 42 мВт, скорость

перемещения лазерного пятна 30 – 60 мм/мин, при этом перемещение осуществлялось с помощью трехмерного позиционера. Время изготовления самой крупной структуры, диаметром 10 мм и высотой 5 мм, составило более 7 ч, однако при использовании более подходящего фотоотверждаемого материала, обеспечивающего более эффективный процесс полимеризации, и схемы с гальваносканером для перемещения лазерного луча можно достичь значительно более высоких скоростей формирования структур. При используемых параметрах было получено характерное разрешение 20 мкм. На рис. 4 для сравнения приведены максимально возможные по размеру трехмерные структуры (зеленого цвета), изготовленные “классическим” методом фокусировки лазерного излучения с помощью микроскопического объектива с двадцатикратным увеличением из материала Basic Green (Anycubic, Китай).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и протестирована система для формирования трехмерных структур методом двухфотонной фемтосекундной полимеризации с использованием пространственно-временной фокусировки. Показана возможность формирования относительно крупных трехмерных структур сантиметрового масштаба с микронным разрешением во всех направлениях. Предложенная система собрана из минимального количества стандартных компонент, что делает ее экономически доступной. Система адаптирована под работу с излучением высокочастотных (80 МГц) фемтосекундных лазерных источников, которые доступны и обеспечивают высокую производительность при формировании трехмерных структур методом двухфотонной полимеризации. Предложенное решение с использованием доступного контроллера и программного обеспечения с открытым кодом позволило обеспечить полную автоматизацию системы при формировании трехмерных структур с автоматическими настройками разрешения печати и настройку системы пространственно-

временной фокусировки под различную фокусирующую оптику.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят П.И. Жарикова за помощь при сборке экспериментальной системы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-75-00108.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Awad A., Fina F., Goyanes A., Gaisford S., Basit A.W.* // Int. J. Pharm. Elsevier. May 2020. V. 586. P. 119594. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119594>
2. *Kruth J.P., Wang X., Laoui T., Froyen L.* // Assem. Autom. 2003. V. 23. № 4. P. 357. <https://doi.org/10.1108/01445150310698652>
3. *Schmidleithner C., Kalaskar D.M.* // Stereolithography. Intechopen, July 2018. V. 32. P. 137. <https://doi.org/10.5772/intechopen.78147>
4. *Bártolo P.J.* Stereolithography: materials, processes and applications. Springer Science & Business Media, 2011.
5. *Fernández-Pradas J.M., Colina M., Serra P., Domínguez J., Morenza J.L.* // Thin Solid Films. 2004. V. 453–454. P. 27. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2003.11.154>
6. *Ebrahimi Orimi H., Hosseini Kolkooh S.S., Hooker E., Narayanswamy S., Larrivé B., Boutopoulos C.* // Sci. Rep. 2020. V. 10. № 1. P. 9730. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66565-x>
7. *Willis D.A., Grosu V.* // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 86. № 24. P. 244103. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66565-x>
8. *Kuznetsov A.I., Kiyan R., Chichkov B.N.* // Opt. Express. 2010. V. 18. № 20. P. 21198. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66565-x>
9. *Mezel C., Souquet A., Hallo L., Guillemot F.* // Biofabrication. 2010. V. 2. № 1. P. 1–7. <https://doi.org/10.1088/1758-5082/2/1/014103>
10. *Antoshin A.A., Churbanov S.N., Minaev N.V., Zhang D., Zhang Y., Shpichka A.I., Timashev P.S.* // Bioprinting. 2019. V. 15. P. e00052. <https://doi.org/10.1016/j.bprint.2019.e00052>
11. *Yusupov V., Churbanov S., Churbanova E., Bardakova K., Antoshin A., Evlashin S., Timashev P., Minaev N.* // Int. J. Bioprinting. 2020. V. 6. № 3. P. 1. <https://doi.org/10.18063/ijb.v6i3.271>
12. *Yusupov V.I., Gorlenko M.V., Cheptsov V.S., Minaev N.V., Churbanova E.S., Zhigarkov V.S., Chutko E.A., Evlashin S.A., Chichkov B.N., Bagratashvili V.N.* // Laser Phys. Lett. 2018. V. 15. № 6. P. 065604. <https://doi.org/10.1088/1612-202X/aab5ef>
13. *Gorlenko M.V., Chutko E.A., Churbanova E.S., Minaev N.V., Kachesov K.I., Lysak L.V., Evlashin S.A., Cheptsov V.S., Rybaltovskiy A.O., Yusupov V.I., Zhigarkov V.S., Davydova G.A., Chichkov B.N., Bagratashvili V.N.* // Journal of Biological Engineering. 2018. V. 12. № 1. P. 27. <https://doi.org/10.1186/s13036-018-0117-4>
14. *Минаев Н.В., Епифанов Е.О., Юсупов В.И.* // ПТЭ. 2021. № 3. С. 119. <https://doi.org/10.31857/S0032816221020166>
15. *Минаев Н.В., Антонов Е.Н., Минаева С.А., Чурбанов С.Н.* // ПТЭ. 2019. № 1. С. 150. <https://doi.org/10.1134/S003281621901018X>
16. *Минаев Н.В., Миронов А.В., Минаева С.А., Миронова О.А., Сячина М.А., Krumins E., Howdle S., Попов В.К.* // ПТЭ. 2020. № 2. С. 153. <https://doi.org/10.31857/S0032816220020135>
17. *Nguyen A.K., Narayan R.J.* // Mater. Today. 2017. V. 20. № 6. P. 314. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.06.004>
18. *LaFratta C.N., Baldacchini T.* // Micromachines. 2017. V. 8. № 4. P. 1–25. <https://doi.org/10.3390/mi8040101>
19. *Obata K., El-Tamer A., Koch L., Hinze U., Chichkov B.N.* // Light. Sci. Appl. 2013. V. 2. P. 8–11. <https://doi.org/10.1038/lsa.2013.72>
20. *Cheng Y., Sugioka K., Midorikawa K., Masuda M., Toyoda K., Kawachi M., Shihoyama K.* // Opt. Lett. 2003. V. 28. № 1. P. 55. <https://doi.org/10.1364/ol.28.000055>
21. *Kaplin V.S., Glagolev N.N., Shashkova V.T., Matveeva I.A., Shershnev I.V., Zarkhina T.S., Solovieva A.B., Minaev N.V., Aksenova N.A., Shavkuta B.S., Kopylov A.S., Kuznetsova D.S., Timashev P.S., Shpichka A.I., Bezrukov E.A.* // Polymers (Basel). 2020. V. 12. № 11. P. 1. <https://doi.org/10.3390/polym12112525>
22. *Demina T., Bardakova K., Minaev N., Svidchenko E., Istomin A., Goncharuk G., Vladimirov L., Grachev A., Zelenetskii A., Timashev P., Akopova T.* // Polymers (Basel). 2017. V. 9. № 12. P. 302. <https://doi.org/10.3390/polym9070302>
23. *He F., Cheng Y., Lin J., Ni J., Xu Z., Sugioka K., Midorikawa K.* // New J. Phys. 2011. V. 13. P. 083014. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/13/8/083014>
24. *He F., Xu H., Cheng Y., Ni J., Xiong H., Xu Z., Sugioka K., Midorikawa K.* // Opt. Lett. 2010. V. 35. № 7. P. 1106. <https://doi.org/10.1364/OL.35.001106>
25. *Vitek D.N., Adams D.E., Johnson A., Tsai P.S., Backus S., Durfee C.G., Kleinfeld D., Squier J.A.* // Opt. Express. 2010. V. 18. № 17. P. 18086. <https://doi.org/10.1364/OE.18.018086>
26. *Chu W., Tan Y., Wang P., Xu J., Li W., Qi J., Cheng Y.* // Adv. Mater. Technol. 2018. V. 3. № 5. P. 1. <https://doi.org/10.1002/admt.201700396>
27. *Tan Y., Chu W., Wang P., Li W., Qi J., Xu J., Wang Z., Cheng Y.* // Phys. Scr. IOP Publishing. 2019. V. 94. № 1. P. 015501. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/aaec99>

ИЗМЕРЕНИЕ МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗОВ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКУСТИЧЕСКИХ МУЛЬТИВИБРАТОРОВ

© 2021 г. А. В. Артюхов^а, В. Г. Марков^б, Ж. А. Сухинец^с, А. И. Гулин^{д,*}

^а АО “Объединенная двигательная корпорация”
Россия, 105118, Москва, просп. Буденного, 16

^б Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова
Россия, 111116, Москва, ул. Авиамоторная, 2

^с Уфимский государственный авиационный технический университет
Россия, 450025, Уфа, ул. К. Маркса, 12

^д Уфимский государственный нефтяной технический университет
Россия, 450062, Уфа, ул. Космонавтов, 1

*e-mail: gulin1940@gmail.com

Поступила в редакцию 24.03.2021 г.

После доработки 16.05.2021 г.

Принята к публикации 18.05.2021 г.

Разработано дифференциальное устройство для измерения температуры в канале управления газотурбинного двигателя (г.т.д.), где неравномерность поля температур по радиусу и по окружности достигает 100–400 К и может меняться на переходных режимах со скоростью до 400 К/с. Устройство состоит из двух каналов измерения и блока обработки информации и обладает чувствительностью 8.5 Гц/К. Быстродействие устройства на три порядка превышает быстродействие термопар, что позволяет измерять истинную температуру газов г.т.д. Представлены функциональная схема устройства, описаны стенды для проведения испытаний, приведены результаты исследований, подтверждающие высокие метрологические характеристики устройства измерения.

DOI: 10.31857/S0032816221050189

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных параметров, определяющих прогресс в авиадвигателестроении [1], является температура газа перед турбиной, обеспечивающая энергетические и тяговые характеристики двигателя. Каждое новое поколение газотурбинного двигателя (г.т.д.), а всего их насчитывают пять, характеризуется ростом этой температуры на 100–200 К.

Камера сгорания – один из важнейших элементов г.т.д., совершенство которой в значительной мере определяет надежность и экономичность двигателя. Основное назначение камеры сгорания – преобразование химической энергии топлива в тепловую энергию. Коэффициент полезного действия и мощность г.т.д. возрастают с повышением температуры газа и давления в камере сгорания. В связи с этим основным назначением систем управления г.т.д. является обеспечение высокой точности поддержания заданной температуры на установившихся и переходных режимах [2] для получения требуемых характеристик и сохранения ресурса двигателя. Погрешно-

сти регулирования температуры газа на установившихся режимах не должны превышать 5–10 К, а на переходных режимах допустимая величина “заброса” температуры составляет 30–50 К за время не более 0.5–1 с. При этом скорость изменения температуры газа на переходных режимах может достигать 400 К/с. Неравномерность поля температур г.т.д. как перед турбиной, так и за ней по радиусу и по окружности [3] составляет 100–400 К и изменяется в зависимости от режима работы двигателя. Наблюдается также нерегулярность поля температур газа, т.е. в одной и той же точке измерения при неизменном режиме работы двигателя температура газа во времени изменяется по произвольному закону. Это объясняется непостоянной подачей топлива в г.т.д. и большой турбулентностью потока воздуха.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАЗРАБОТКИ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗА Г.Т.Д.

Используемые в настоящее время термопары имеют большую инерционность и не позволяют

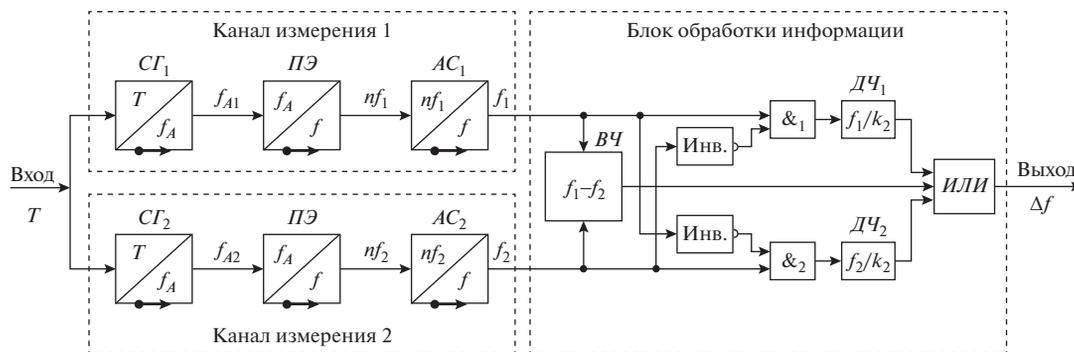


Рис. 1. Дифференциальное устройство измерения температуры газового потока. *СГ* – струйный генератор; *ПЭ* – пьезоэлемент; *АС* – адаптивный селектор; *ВЧ* – вычитатель частот; *ДЧ* – делитель частоты.

измерить истинную температуру газа в двигателе. Поэтому вместо локальной температуры измеряют лишь приближенно среднюю, усредненную температуру. Обычно устанавливают от 8 до 24 и более экранированных термопар, позволяющих измерять температуру с погрешностью не более ± 2 К. Экранирование термопар ухудшает их динамические свойства, т.е. увеличивает постоянную времени, которая находится в пределах 0.5–8 с. Для ее компенсации вводят последовательное корректирующее устройство по составу, пропорциональному изменению э.д.с. термопары и ее производной. При этом компенсация, близкая к оптимальной, обеспечивается только при устойчивых режимах работы двигателя на автопилоте. На других же режимах будет или недокомпенсация, или перекомпенсация.

В работе [4] рассмотрен оптический метод спектрального контроля процессов в камерах сгорания г.т.д. Разработанная лабораторная установка позволяет контролировать параметры горения как косвенно, так и в режиме реального времени, не нарушая первичный поток горения. Метод основан на регистрации излучения, испускаемого в узких спектральных диапазонах видимого излучения, от молекул, присутствующих в продуктах сгорания в газообразном несмешанном топливном пламени. Излучение от радикалов C_2 и CN используется для установления корреляции с температурой пламени и коэффициентом эквивалентности топлива/воздуха. Измерения проводились на специально разработанном испытательном стенде с пропановой горелкой с температурой более 1400 К. Дальнейшее развитие этого метода позволит проводить исследовательские работы по двигателям на стационарных стендах.

Можно констатировать, что в настоящее время нет прямых быстродействующих методов измерения температуры газов г.т.д., позволяющих создавать системы управления параметрами работы двигателя вблизи их функциональных, прочностных и температурных ограничений [5, 6]

с предотвращением выхода за пределы допустимых значений за десятые доли секунды. Необходимо отметить, что превышение температуры лопаток г.т.д. выше предельных на 5 К приводит к перерасходу топлива и уменьшению ресурса двигателя примерно на 7–10%. Таким образом, работы по исследованию и созданию систем для динамических измерений температуры газов г.т.д. являются весьма актуальными.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Струйные системы измерения температуры более перспективны [7], так как обладают высоким быстродействием, на три-четыре порядка выше термопреобразователей, нечувствительностью к электромагнитным и радиационным полям, простой конструкцией и высокой надежностью.

Рассмотрим работу дифференциального устройства измерения температуры [8, 9] газового потока (рис. 1). Два струйных генератора $СГ_1$ и $СГ_2$ устанавливают на посадочное место термопар и помещают в газовый поток, абсолютную температуру T которого измеряют. В струйных генераторах, являющихся акустическими мультивибраторами, расположенными в одном корпусе, но относящихся к двум каналам измерения 1 и 2, возбуждаются акустические колебания прямоугольной формы с частотами f_{A1} и f_{A2} . С помощью пьезоэлементов *ПЭ* они преобразуются в электрические полигармонические колебания nf_1 и nf_2 , поступающие на входы адаптивных селекторов *АС*. *ПЭ* вместо прямоугольных импульсов воспроизводят, в соответствии с преобразованием Фурье, спектр синусоидальных частот электрических напряжений. В *АС* осуществляется отбор первых гармоник f_1 и f_2 , пропорциональных измеряемой температуре T газового потока каждым *СГ*.

В блоке обработки информации с выхода вычитателя частот *ВЧ*, реализующего дифференциальный принцип измерения, разница частот

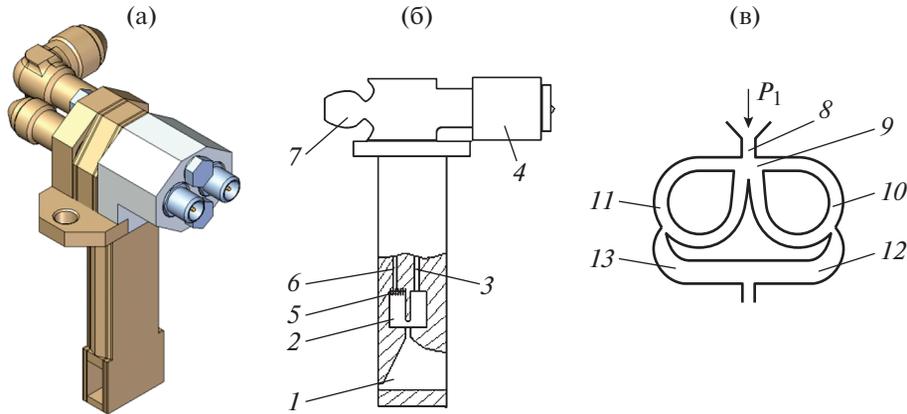


Рис. 2. Внешний вид (а) и схема (б) струйно-акустического датчика температуры и пневматическая схема струйного генератора (в). 1 – входное устройство, 2 – резонатор, 3 – звуковод, 4 – пьезоэлемент, 5 – выхлопной жиклер, 6 – канал, 7 – штуцер, 8 – сопло питания, 9 – рабочая камера, 10 – первый канал обратной связи, 11 – второй канал обратной связи, 12 – первый выходной канал, 13 – второй выходной канал.

$\Delta f = f_1 - f_2$, также пропорциональная температуре газового потока, через элемент *ИЛИ* поступает на выход устройства. Дифференциальное включение повышает быстродействие устройства [10] в два с лишним раза за счет сокращения переходного процесса установления измеряемой разницы частот. При выходе из строя одного из каналов измерения, например первого, схема *И* запирается нулевым потенциалом с выхода AC_2 , и через инвертор *НЕ* открывается схема *И* второго канала, пропуская частоту f_2 после ее деления в k_2 раз делителем частоты *ДЧ* через элемент *ИЛИ* на выход устройства в виде Δf . Аналогичным образом работает схема при выходе из строя второго канала измерения. Коэффициенты деления k_1 и k_2 *ДЧ* выбирают таким образом, чтобы частоты на их выходах были равны разности частот Δf , т.е.

$$\Delta f = \frac{f_1}{k_1} = \frac{f_2}{k_2} = f_1 - f_2.$$

ПРИНЦИП РАБОТЫ СТРУЙНОГО ГЕНЕРАТОРА

Струйный генератор представляет собой миниатюрную звуковую или ультразвуковую замкнутую автоколебательную нелинейную систему [11], являющуюся акустическим мультивибратором, выходной сигнал которой частотой f_A имеет прямоугольную форму. Частота f_A связана с измеряемой абсолютной температурой T выражением

$$f_A = b\sqrt{T}, \quad (1)$$

где b – коэффициент, зависящий от конструктивных параметров *СГ*.

Струйно-акустический датчик, внешний вид которого представлен на рис. 2а, снабжен вход-

ным устройством 1 (рис. 2б) и резонатором 2, который через звуковод 3 сообщается с пьезоэлементом 4. Газ, протекающий через *СГ*, сбрасывается через выхлопной жиклер 5 и канал 6, соединенный со штуцером 7, в область пониженного давления. Разница давлений на входе и выходе, необходимая для нормальной работы *СГ*, должна различаться не менее чем вдвое.

Процесс возникновения автоколебаний в *СГ* (рис. 2в) происходит следующим образом. Поток, вытекающий из сопла питания 8, первоначально (вследствие имеющейся естественной несимметрии конструкции) отклоняется к одной из боковых стенок рабочей камеры 9, при этом повышается давление на входе, например, в канале обратной связи 10. Взаимодействие основного потока, вытекающего из сопла питания 8, с управляющим потоком из канала обратной связи 10 приводит к вытеснению основного потока к противоположной стенке. В результате в каналах обратной связи 10, 11 и в выходных каналах 12, 13 создаются колебания давлений с частотой, определяемой временными задержками развития процессов в рабочей камере 9 и каналах обратной связи 10, 11.

Следует отметить, что для частот 3000–36000 Гц, соответствующих рассматриваемому температурному диапазону 293–2000 К, *СГ* имеет конструктивные размеры, позволяющие его устанавливать на те же посадочные места, что и термопары.

Выбор начальной частоты генерации важен с точки зрения получения необходимой разрешающей способности струйно-акустического датчика температуры. Производная частоты от температуры может быть определена как:

$$df/dT = \frac{f}{2T}.$$

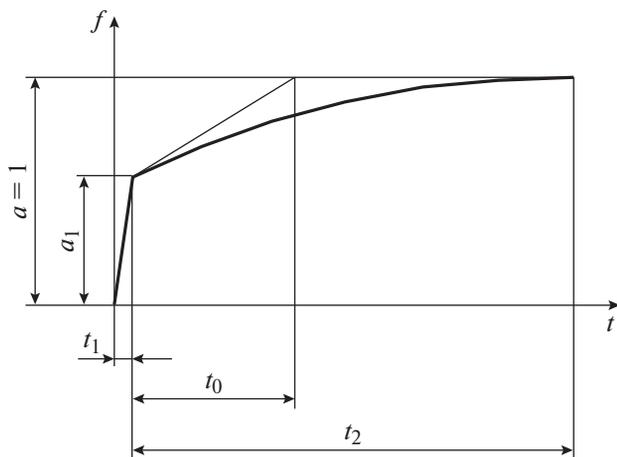


Рис. 3. Типовая переходная характеристика СГ.

Согласно приведенной формуле, увеличение начальной частоты положительно сказывается на чувствительности датчика. Частота колебаний при нормальной температуре ($T = 293 \text{ К}$) и давлении среды $P = 1.01 \text{ бар}$ для аналогичных генераторов составляет порядка 5 кГц. При выборе такого значения номинальной частоты руководствовались, с одной стороны, возможностью иметь высокую чувствительность генератора по температуре, а с другой – ограничениями, возникающими при передаче колебаний давления по специальному каналу к пьезопреобразователю.

К преимуществам струйно-акустических генераторов с резонаторами перед генераторами других типов следует отнести:

- высокую чувствительность при $T = 293 \text{ К}$ и $f = 5 \text{ кГц}$: $df/dT = 8.5 \text{ Гц/К}$;
- малую инерционность, так как каналы имеют интенсивный проток газа;
- меньшую вероятность засорения (нет длинных и узких каналов);
- простую конфигурацию проточной части, т.е. технологичность в изготовлении.

Сложность процессов, происходящих при течении газа в каналах СГ, и отсутствие аналитического описания газодинамических и пневмоакустических явлений привели к тому, что в настоящее время зависимость частоты f от таких параметров, как геометрические размеры и форма проточной части, полное давление в потоке, а также степень расширения газа в сопле питания, необходимо исследовать экспериментально, путем снятия статических и динамических характеристик для конкретного типа СГ:

$$f = \varphi(k, R, \lambda_1, l_1, P).$$

Здесь k – показатель адиабаты (для воздуха $k = 1.4$); R – газовая постоянная (для воздуха $R = 287.14 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$); l_1 – характерные размеры

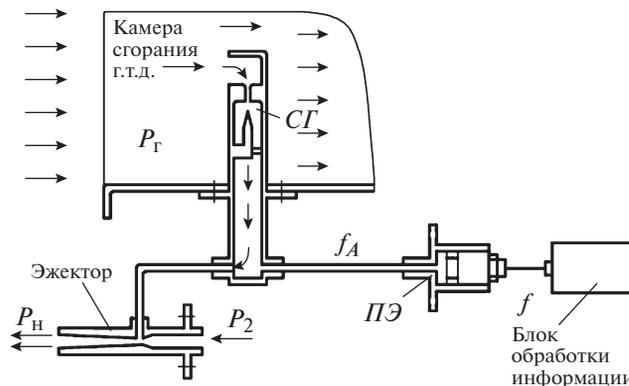


Рис. 4. Схема измерения температуры газа г.т.д.

проточной части; λ_1 – безразмерная скорость внутреннего потока, однозначно связанная с отношением давлений $J = P_{\text{вх}}/P_{\text{вых}}$, где $P_{\text{вх}}$ – полное давление на входе СГ, а $P_{\text{вых}}$ – статическое давление на выходе.

Исследования различных СГ показали, что частота f колебаний в них, при прочих неизменных условиях, пропорциональна скорости распространения возмущений в газе, заполняющем рабочую полость и каналы обратной связи, т.е.:

$$f = \frac{\sqrt{kRT}}{\lambda},$$

где T – абсолютная температура газа на входе в СГ; λ – длина волны акустических колебаний СГ, равная суммарной длине каналов обратной связи 10, 11 датчика на рис. 2в.

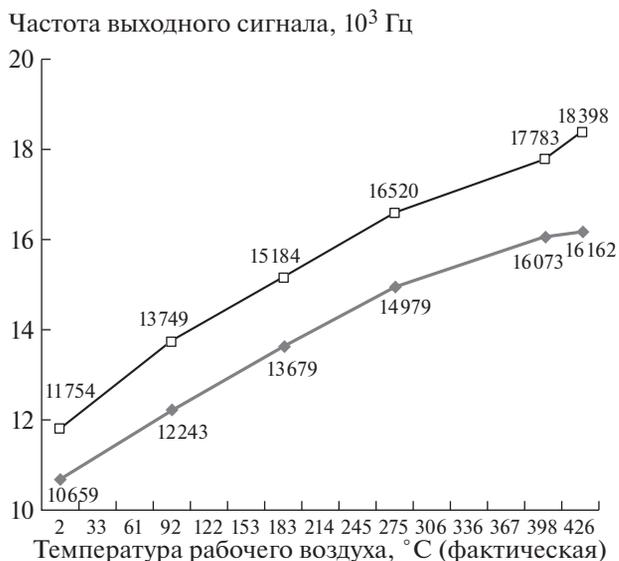


Рис. 5. Зависимости установившихся значений выходных частот от температуры газов г.т.д. в обоих каналах устройства измерения.

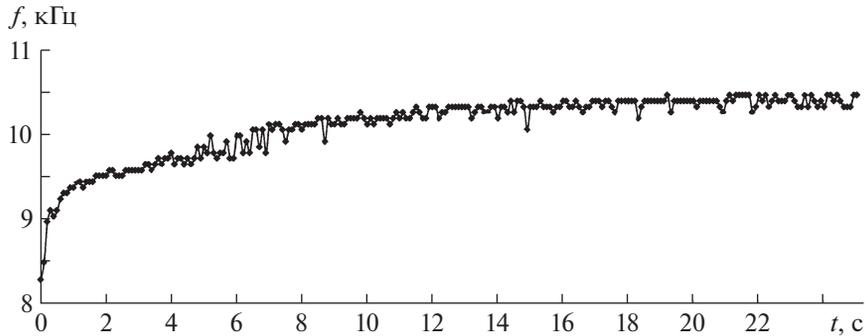


Рис. 6. Динамическая характеристика при скачке температуры на 300°С.

Типовая переходная характеристика CG при скачкообразном изменении температуры представлена на рис. 3. Она состоит из двух участков. Первый — характеризуется отработкой выходного сигнала на величину a_1 за время t_1 , которое равно времени прохождения газа по каналам генератора. Поскольку скорость W потока газа в генераторе больше 10 м/с, а длина L резонансных каналов менее 0.02 м, то $t_1 = L/W < 0.002$ с. Величина a_1 определяется [12] процессами теплообмена во внутренних полостях CG .

Второй участок характеристики определяется прогревом стенок датчика. При скачкообразном изменении температуры газа до значения T_r изменение температуры стенки $T_{ст}$ датчика по времени равно

$$T_{ст} = T_r - (T_r - T_{ст0})e^{-t/t_0},$$

где $T_{ст0}$ — температура стенки в начальный момент времени; t — время от момента скачка темпе-

ратуры газа; t_0 — постоянная времени прогрева стенок датчика.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Схема измерения температуры газа в камере сгорания г.т.д. представлена на рис. 4.

Зависимости установившихся значений выходных частот от температуры газов г.т.д. в обоих каналах устройства измерения приведены на рис. 5.

На рис. 6 представлена динамическая характеристика, полученная при скачке температуры на 300°С, на которой видны выбросы температуры, связанные с турбулентностью подаваемого горячего воздуха в тепловую камеру.

Выбросы температуры в основном составляют ± 10 К, а некоторые — до 40 К и связаны с турбулентностью подаваемого воздуха.

На рис. 7 представлены динамические характеристики термопары (штриховая линия) и струйно-акустического датчика (сплошная линия) и

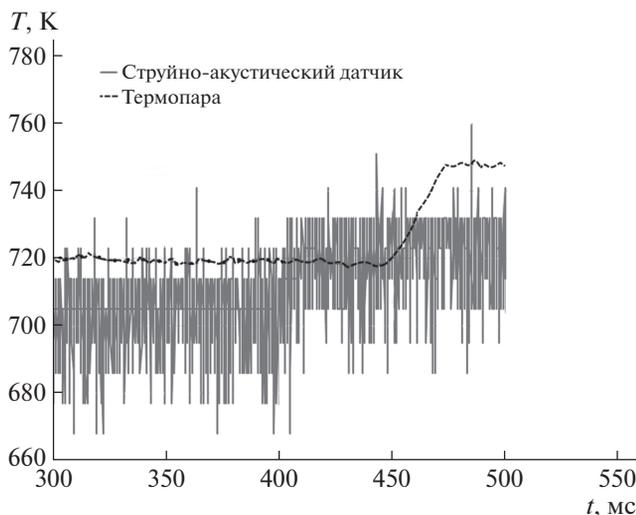


Рис. 7. Графики динамических характеристик термопары (штриховая линия) и струйно-акустического датчика (сплошная линия).

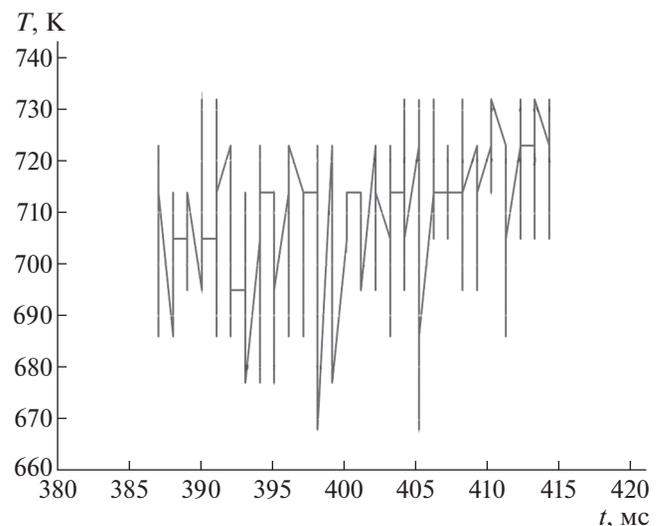


Рис. 8. Увеличенный фрагмент графика изменения температуры в камере сгорания г.т.д.

струйно-акустического датчика (сплошная линия), полученные при испытаниях реального г.д.т. Выбросы температуры в основном составляют ± 10 К, а некоторые – до 40 К и связаны как с турбулентностью газов, так и с неравномерностью процессов горения топлива.

Увеличенный фрагмент графика изменения температуры в камере сгорания г.д.т., представленный на рис. 8, демонстрирует высокое быстродействие дифференциального устройства измерения температуры газового потока.

В работе [13] представлены результаты испытаний спектральной системы измерения температуры газового потока на брэгговских решетках внутри камеры сгорания г.д.т. Результаты показывают, что быстродействие предлагаемой системы измерений находится на уровне пирометрических. Спектральная система основана на методе многоволновой пирометрии сажи в видимом оптическом диапазоне и содержит мультиспектральный сенсорный датчик на кристалле, который позволяет измерять температуру в диапазоне от 1083 до 1393 К с погрешностью 3%.

ВЫВОДЫ

Испытания, проведенные на стенде-имитаторе газотурбинного двигателя, подтвердили высокие быстродействие и точность измерения температуры газового потока г.д.т. разработанного дифференциального устройства. Устройство может быть использовано для исследования теплообменных процессов в камерах сгорания как вновь создаваемых г.д.т., так и уже используемых, но с различными видами топлива, а также для выявления предпомпажных явлений.

Испытания, проведенные на г.д.т., выявили возможность управления его работой на переходных режимах в реальном времени.

Температура использования струйно-акустического датчика ограничена материалом, из которого он изготовлен.

В отличие от устройств на основе оптических методов, имеющих такой недостаток, как заком-

чение, разработанное устройство позволит создавать автоматические системы взлета и посадки летательных аппаратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. <https://www.elektro-expo.ru/ru/articles/2016/gazoturbinnye-ustanovki-dlya-proizvodstva-elektroenergii/>
2. <http://avia.pro/blog/regulirovanie-temperatury-gazav-gtd>
3. *Сухинец Ж.А., Гулин А.И., Галиев А.Л.* // Сб. трудов IV Международной научно-практической конференции “Актуальные проблемы науки и образования в современном вузе” / Под ред. А.Л. Галиева. (Стерлитамак, 23–25 мая 2019 г.) Уфа: Башкирский государственный университет, 2019. С. 544–553.
4. *Mekhgrenin M.V., Guriev V.I., Meshkovskii I.K., Smirnov D.S., Sukhinets A.V.* / IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS) 2018. P. 876. <https://doi.org/10.1109/EWDTS.2018.8524839>
5. *Юнаков Л.П.* Основы теории авиационных газотурбинных двигателей: учебное пособие / Под ред. Л.П. Юнакова. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2013.
6. *Иноземцев А.А.* Основы конструирования авиационных двигателей энергетических установок: учебник. Т. 1 / Под ред. А.А. Иноземцева, М.А. Нихамкина, В.Л. Сандрацкого. М.: Машиностроение, 2008.
7. *Сухинец Ж.А., Галиев А.Л., Гулин А.И.* // Авиакосмическое приборостроение. 2015. № 10. С. 4.
8. *Сухинец Ж.А., Гатчина Ю.А., Гулин А.И.* // Датчики и системы. 2017. № 4. С. 31.
9. *Гатчин Ю.А., Сухинец Ж.А., Гулин А.И.* Патент № 2626232 РФ // Бюл. № 21. Оpubл. 24.07.2017.
10. *Гулин А.И.* // Авиакосмическое приборостроение. 2012. № 9. С. 10.
11. *Залманзон Л.А.* Теория элементов пневмоники. М.: Наука, 1969.
12. *Sukhinets Zh.A., Sukhinets A.V., Gulin A.I.* // 2017 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). 2017. P. 1. doi 10,1109 / EWDTS.2017.8110088
13. *Mekhgrenin M.V., Meshkovskii I.K., Tashkinov V.A., Guriev V.I., Sukhinets A.V., Smirnov D.S.* // Measurement. 2019. V. 139. P. 355. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.02.084>

КРИОГЕННАЯ ОЧИСТКА ГЕЛИЯ И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ЯЧЕЕК И ПРОВЕДЕНИЯ НЕОПТИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЯДЕР ^3He

© 2021 г. А. С. Макаrenchенко^а, В. В. Кузьмин^{а,*}, К. Р. Сафиуллин^а,
Д. В. Кан^а, М. С. Тагиров^{а,б}

^а Казанский федеральный университет, Институт физики
Россия, Республика Татарстан, 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18

^б Академия наук Республики Татарстан,
Россия, 420111, Казань, ул. Баумана, 20

*e-mail: slava625@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.04.2021 г.

После доработки 13.05.2021 г.

Принята к публикации 17.05.2021 г.

Описано применение криогенной методики очистки изотопов гелия и их смесей от сопутствующих примесей, пригодной для использования при поляризации ^3He методом РАРМ (Polarization of Atoms in a Magnetized Plasma). Очистка основана на длительной выдержке газа в трубке, помещенной в транспортный дюар, при температуре жидкого гелия. Наблюдаемый эмиссионный оптический спектр плазмы гелия и оценка ядерной поляризации (примерно 1%) ^3He , полученной при комнатной температуре, свидетельствуют об эффективности описанной процедуры для очистки гелия и поляризионных ячеек.

DOI: 10.31857/S0032816221050232

Значительного повышения чувствительности методов ядерного магнитного резонанса (я.м.р.) можно добиться путем увеличения поляризации ядерных спинов. Гиперполяризация благородных газов, таких как ^3He и ^{129}Xe , позволяет получать степень поляризации ядерных спинов, на много порядков превышающую термодинамически равновесную. Это дает возможность использовать благородные газы в качестве зонда для исследования различных пористых структур при комнатной температуре и низких концентрациях газов [1, 2], а также для проведения магнитно-резонансной томографии легких [3, 4]. Среди методов поляризации ^3He наибольшее применение нашли два оптических метода [5]. Первый метод состоит в лазерной накачке электронно-ядерных подуровней метастабильных атомов, возникающих в плазме, с последующим обменом ядерной намагниченностью при соударениях атомов ^3He , находящихся в основном и метастабильных состояниях (метод МЕОР — metastability exchange optical pumping). Второй метод основан на оптической накачке электронных уровней примесных атомов, например Rb, с последующей передачей поляризации ядрам ^3He (метод SEOP — spin exchange optical pumping). Данные методы позволяют получать поляризацию ядерных спинов ^3He

вплоть до 90%, однако требуют применения дорогих и сложных в настройке и эксплуатации оптических систем и лазерного оборудования.

В 2018 г. европейскими учеными [6] было обнаружено, что относительно высокая степень поляризации газа ^3He при давлениях порядка нескольких миллибар может быть получена более простым и недорогим способом, получившим название РАРМ (polarization of atoms in a magnetized plasma). Способ основан на создании плазмы в газе ^3He при давлении 1–15 мбар в постоянном магнитном поле. На данный момент это позволяет получать поляризацию до 9% в стеклянных ячейках размером 1–2 см. Данный метод обеспечивает меньшую по сравнению с оптическими методами достижимую поляризацию, однако его потенциал, максимально возможные уровни поляризации и физика процесса изучены лишь частично. При этом полученная величина сигнал/шум сигналов я.м.р. является достаточной для применения этого метода поляризации в магнитометрии и для исследования пористых сред методами я.м.р. ^3He .

На данный момент считается, что метод РАРМ связан с образованием метастабильных атомов ^3He в плазме, а значит, его эффективность, по

аналогии с МЕОР, зависит от времени их жизни в плазме ^3He . Наличие примесей в газе существенно снижает время жизни атомов ^3He в метастабильных состояниях [5] (стоит отметить, что под примесями подразумеваются любые находящиеся в газе молекулы или атомы, кроме изотопов гелия). По этой причине для эффективности процесса поляризации методом РАМР, вероятно, требуется спектроскопическая чистота гелия в плазме (концентрация примесей порядка 1 ppm и менее). Требования к чистоте поляризационных ячеек также являются высокими, поскольку необходимо поддержание постоянной чистоты плазмы ^3He . Для выполнения этих требований поляризационные ячейки подвергаются тщательной промывке, глубокому вакуумированию, отжигу при температурах 400–500°C и многократной очистке плазмой гелия, возбуждаемой радиочастотным (р.ч.) полем большой мощности [7].

В данной работе описана экспериментальная установка для криогенной очистки газов ^3He и ^4He , позволяющая проводить изучение возможностей метода РАМР. С помощью данной установки нами была проведена очистка поляризационных ячеек и успешно наблюдаются первые сигналы я.м.р. поляризованного ^3He методом РАМР. В дальнейшем планируется исследование возможностей метода РАМР и поиск оптимальных условий для получения максимальной степени поляризации ^3He .

На первых этапах развития метода МЕОР в начале 1960-х гг. очистка ячеек плазмой ^4He осуществлялась, как правило, с помощью коммерчески доступного спектроскопически чистого ^4He с содержанием примесей менее 1 ppm. Очистка газа ^3He осуществлялась либо фильтрованием примесей при диффузии ^3He сквозь мембраны из кварцевого стекла при высокой температуре [8], либо криоочисткой при пропускании ^3He через криоловушку с активированным углем при температуре жидкого азота [9], либо очисткой в потоковом режиме через криоловушку без угля, помещенную в жидкий гелий [7]. Несмотря на успешное получение высокой поляризации методом МЕОР в упомянутых работах, очистка с помощью азотной ловушки, тем не менее, является неудовлетворительной [8], очистка с помощью фильтрации диффузией является технологически сложной, а очистка на потоке через гелиевую ловушку не всегда дает необходимую степень чистоты газа. На сегодняшний день для очистки изотопов гелия в методе МЕОР используют коммерческие геттеры [5], являющиеся достаточно дорогими устройствами. Криогенная очистка с помощью жидкого гелия при температуре 4.2 К может быть более доступным и экономичным способом очистки изотопов гелия в лабораториях, работающих с низ-

кими температурами и имеющих доступ к хладагентам.

В рамках данной работы было решено проводить очистку изотопов гелия не в режиме потока, как в работе [7], а при длительной (несколько часов) выдержке газа в U-образной трубке, помещенной в транспортный дюар с жидким гелием. Используемый газ имел начальный состав, соответствующий технической марке гелия Б, в случае ^3He содержание ^4He составляло менее 0.01%. При температуре жидкого гелия все газы, кроме водорода и гелия, конденсируются в твердую фазу с ничтожно малым давлением насыщенных паров [10]. Водород, возможно, содержащийся в небольшом количестве в подаваемом неочищенном гелии, адсорбируется при 4.2 К и образует на холодной поверхности твердую пленку, однако продолжительность данного процесса определяется диффузией газа и может составлять от нескольких часов до нескольких суток [11]. По этой причине в собранной нами системе подвергающийся очистке гелий медленно поступает в U-образную трубку (рис. 1) и выдерживается в ней несколько часов до подачи в ячейку.

Была собрана мобильная газовая система, адаптированная под использование с транспортным гелиевым дюаром СТГ-25 или СТГ-40. Данная система может применяться как для чистки стеклянных поляризационных ячеек, так и для заполнения их газом ^3He перед последующей запайкой.

Упрощенная схема системы очистки приведена на рис. 1. В систему входит азотная ловушка 2 для предварительной очистки газа, заполненная активированным углем и размещенная стационарно вблизи хранилища газов. Основным узлом системы очистки является U-образная нержавеющая трубка 4 с внешним диаметром 1/8 дюйма, толщиной стенок 0.4 мм и радиусом изгиба 10 мм. Почти все коммуникации собраны с использованием электрохимически полированных трубок (уровень шероховатости $R_a < 0.25$ мкм) из нержавеющей стали марки S316L диаметром 1/4 дюйма. Это обеспечивает минимизацию площади поверхности внутри коммуникаций, на которую могут осажаться атомы или молекулы примесей. Подавляющее большинство соединений выполнено с помощью обжимных фитингов Swagelok, исключаящих пайку, а следовательно, внесение дополнительных примесей через флюс и припой.

В системе имеется емкостной датчик давления Pfeiffer CMR-263 (14), подключаемый через вакуумное соединение KF-16 с витоновым уплотнителем типа O-ринг. Датчик давления используется для контроля давления в системе при наполнении поляризационной ячейки гелием.

В системе очистки используются два основных типа вентиля производства Swagelok: сильфон-

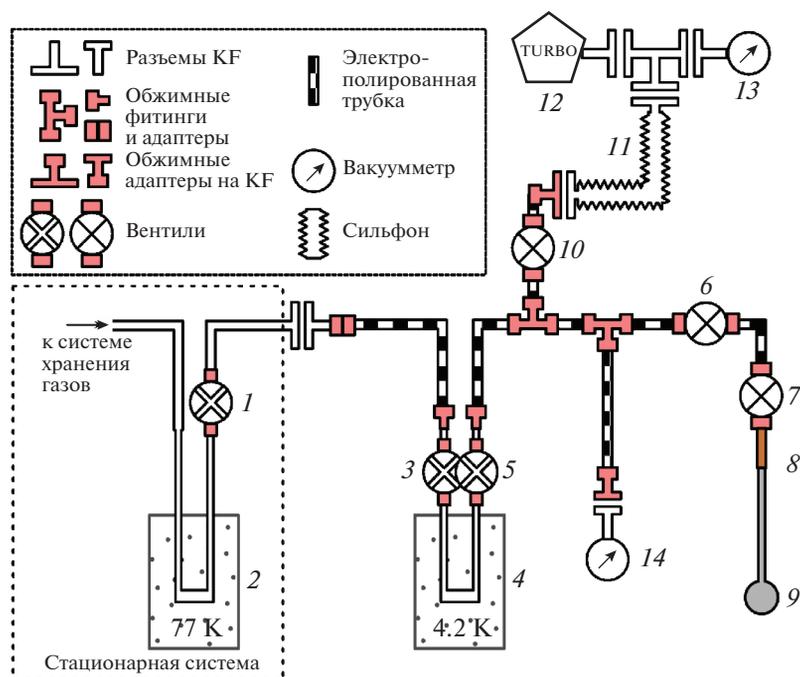


Рис. 1. Схема системы очистки газа гелия от примесей. 1, 3, 5 – вентили Swagelok SS-2H; 2 – азотная ловушка; 4 – U-образная трубка для очистки при гелиевой температуре; 6, 7, 10 – вентили Swagelok SS-DSS4; 8 – переход стекло–медь; 9 – поляризационная ячейка; 11 – сильфон; 12 – турбомолекулярный насос; 13, 14 – вакуумные датчики.

ные SS-2H (стандартной чистоты) и мембранные SS-DSS4 (повышенной чистоты с применением электрохимической полировки, $R_a < 0.5$ мкм). Сильфонные вентили расположены в тех местах газовой системы, где требуется контроль потока гелия: на входе 3 и выходе 5 U-образной трубки и на выходе 1 стационарной газовой системы.

Предназначенная для поляризационных исследований ячейка 9 припаивается при помощи стеклянного капилляра (пирекс) к переходу 8 стекло–медь с внешним диаметром медной трубки 1/4 дюйма, который герметично подключен к вентилю Swagelok SS-DSS4 (7) системы очистки при помощи обжимного фитинга. Использование перехода стекло–медь предусматривает возможность присоединения абсолютно любых стеклянных ячеек к системе очистки. Мембранный вентиль 6 установлен для обеспечения возможности снятия поляризационной ячейки вместе с вентиляем 7.

Предусмотрена возможность глубокой откачки системы турбомолекулярным насосом 12, который подключается к системе очистки при помощи сильфона 11 через вентиль 10. Давление в этом случае контролируется расположенным вблизи входа турбомолекулярного насоса вакуумным датчиком с горячим катодом Pfeiffer IMR-265 (13).

Процедуру чистки и заполнения поляризационной ячейки можно разделить на три условных этапа. На первом этапе вся система (5–11), в том числе витонные уплотнители на вакуумных со-

единениях KF-25 и KF-16, подвергаются постоянной и длительной откачке турбомолекулярным насосом до давления 10^{-8} мбар и нагреву до 180–200°C (кроме датчика давления) с целью удаления остаточных газов со стенок. При этом поляризационная ячейка нагревается до температуры 400°C при помощи электрического нагревателя. Первый этап по времени занимает, как правило, примерно одну неделю.

На втором этапе проводится более глубокая чистка поляризационной ячейки плазмой гелия. Для этого U-образная трубка откачанной системы очистки помещается в транспортный дюар СТГ-25, заполненный жидким гелием. Далее гелий, прошедший предварительную очистку в азотной ловушке, подается в U-образную трубку через вентили 1 и 3 до давления 50–100 мбар. По нашим оценкам, дополнительный расход жидкого гелия в СТГ-25, связанный с размещением в нем U-образной трубки, составляет около 0.5 л в неделю. После 12 ч отстаивания гелия в трубке небольшие порции очищенного газа (1–10 мбар) подаются через вентили 5–7 в поляризационную ячейку. В процессе чистки поляризационной ячейки в ней при подаче радиочастотной (р.ч.) мощности 10–15 Вт создается плазма гелия. Процесс целесообразно продолжать до появления примесных линий в оптическом спектре плазмы (их интенсивность зависит от степени чистоты ячейки на данной стадии чистки). После этого

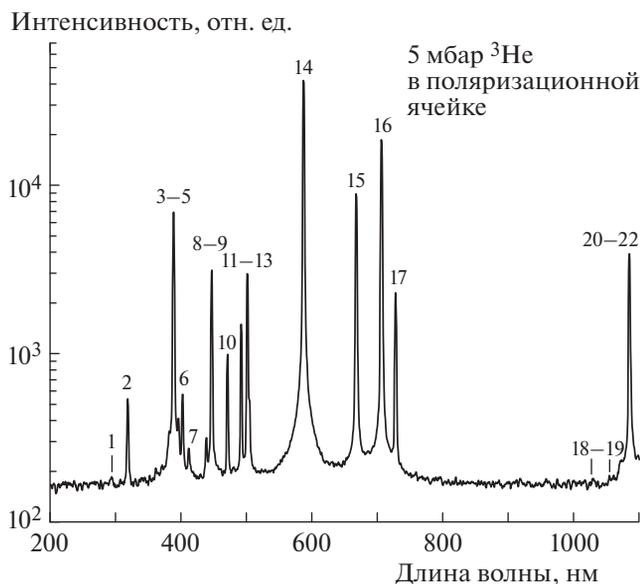


Рис. 2. Оптический спектр плазмы ^3He , содержащейся под давлением 5 мбар в поляризационной ячейке и прошедшей очистку. Номерами обозначены линии гелия, указанные в табл. 1.

поляризационная ячейка откачивается турбомолекулярным насосом, и в систему подается новая порция очищенного гелия. Чистка плазмой проводится до тех пор, пока линии примесей в плазме гелия в поляризационной ячейке спустя несколько часов горения плазмы станут незаметными на уровне шумов. Длительность этого этапа зависит от объема и площади поверхности ячейки. Для сферических ячеек диаметром 7–10 мм данный этап обычно длится около двух суток.

После завершения второго этапа чистки U-образная трубка вынимается из гелиевого дюара и отогревается, оставшийся в ней газ удаляется. Откачка проводится через вентили 1 и 3 форвакуумным насосом и азотную ловушку с активированным углем, чтобы не загрязнять коммуникации, находящиеся справа за вентилем 5 (см. рис. 1).

Третий этап аналогичен второму, но ^4He в U-образной трубке заменяется на ^3He , и многократная чистка поляризационной ячейки не требуется. После заполнения поляризационной ячейки очищенным ^3He до требуемого давления вентиль 7 закрывается и временно демонтируется вместе с ячейкой. При подготовке запаянных поляризационных ячеек стеклянный капилляр заплавляется. Остатки ^3He из U-образной трубки собираются в хранилище ^3He с помощью крионасоса (на рис. 1 не показаны).

Радиочастотный тракт для создания плазмы гелия в ячейке был собран из стандартного лабораторного оборудования, не требующего особых пояснений. Он включал в себя генератор синусо-

идальных р.ч.-сигналов, р.ч.-усилитель, измеритель коэффициента стоячей волны (КСВ-метр) и колебательный контур. В нашем случае р.ч.-тракт позволял создавать плазму гелия в поляризационной ячейке в диапазоне 20–30 МГц мощностью до 20 Вт. Катушка колебательного контура представляла собой соленоид, состоящий из 4–10 витков и намотанный из медной проволоки диаметром 0.56 мм. Диаметр и длина намотки катушки соответствовали диаметру и размеру участка поляризационной ячейки, который подвергался чистке плазмой. Колебательный контур настраивался на нужную частоту и согласовывался на сопротивление 50 Ом с использованием керамических конденсаторов с нулевым температурным коэффициентом (диэлектрик типа NP0). Небольшое отклонение центральной частоты контура, регистрируемое КСВ-метром в процессе нагрева ячейки и проводов р.ч.-катушки, компенсировалось подстройкой частоты генератора.

Работоспособность собранной системы очистки можно оценить двумя способами: первый — путем контроля чистоты газа по эмиссионному спектру его плазмы, второй — наблюдением сигнала я.м.р. ^3He , поляризованного методом РАРМ.

В работе контроль чистоты ячеек и газа осуществлялся ручным оптическим спектрометром Kruss 1501, и после очистки поляризационных ячеек в спектре наблюдались только гелиевые линии. Оптический спектр также был записан спектрометром StellarNet spectrometer со спектральным разрешением 0.5 нм. На рис. 2 приведен оптический спектр гелия под давлением 5 мбар в ячейке с внутренним диаметром 8 мм. Анализ полученного спектра показывает, что все линии соответствуют атомам гелия — они пронумерованы и более подробная информация по ним приведена в табл. 1. Справочные данные о спектральных линиях гелия и их длинах волн были взяты из открытой спектроскопической базы данных Национального института стандартов и технологии (США) [12]. В полученных оптических спектрах не наблюдаются линии, связанные с сопутствующими примесями гелия: водорода, неона, иных благородных газов, а также компонентов воздуха. Это позволяет сделать вывод о работоспособности собранной системы очистки.

Эксперименты по поляризации ^3He методом РАРМ и последующие я.м.р.-эксперименты проводились в “теплой дыре” сверхпроводящего магнита в поле 3.66 Тл. Для наблюдения я.м.р.-сигнала был использован импульсный я.м.р.-спектрометр лабораторного изготовления [13]. Колебательный контур для наблюдения сигнала я.м.р. поляризованного ^3He представлял собой катушку из четырех витков медного провода сечением 2 мм², расположенную вокруг поляризационной ячейки, и подстроечный конденсатор. Длительность и

Таблица 1. Информация об отмеченных спектральных линиях гелия на рис. 2

Номер	Длина волны, нм	Переход между уровнями	
1	294.5	$1s2s, ^3S, J = 1$	$1s5p, ^3P^{\circ}, J = 0, 1, 2$
2	318.8	$1s2s, ^3S, J = 1$	$1s4p, ^3P^{\circ}, J = 1, 2$
3	382.0	$1s2p, ^3P^{\circ}, J = 0, 1, 2$	$1s6d, ^3D, J = 0, 1, 2$
4	388.8	$1s2s, ^3S, J = 1$	$1s3p, ^3P^{\circ}, J = 1, 2$
5	396.5	$1s2s, ^1S, J = 0$	$1s4p, ^1P^{\circ}, J = 1$
6	402.6	$1s2p, ^3P^{\circ}, J = 0, 1, 2$	$1s5d, ^3D, J = 1, 2, 3$
7	412.0	$1s2p, ^3P^{\circ}, J = 0, 1, 2$	$1s5s, ^3S, J = 1$
8	438.8	$1s2p, ^1P^{\circ}, J = 1$	$1s5d, ^1D, J = 2$
9	447.2	$1s2p, ^3P^{\circ}, J = 0, 1$	$1s4d, ^3D, J = 1, 2$
10	471.3	$1s2p, ^3P^{\circ}, J = 0, 1, 2$	$1s4s, ^3S, J = 1$
11	492.2	$1s2p, ^1P^{\circ}, J = 1$	$1s4d, ^1D, J = 2$
12	501.6	$1s2s, ^1S, J = 0$	$1s3p, ^1P^{\circ}, J = 1$
13	504.8	$1s2p, ^1P^{\circ}, J = 1$	$1s4s, ^1S, J = 0$
14	587.6	$1s2p, ^3P^{\circ}, J = 0, 1, 2$	$1s3d, ^3D, J = 1, 2, 3$
15	667.8	$1s2p, ^1P^{\circ}, J = 1$	$1s3d, ^1D, J = 2$
16	706.5	$1s2p, ^3P^{\circ}, J = 0, 1, 2$	$1s3s, ^3S, J = 1$
17	728.1	$1s2p, ^1P^{\circ}, J = 1$	$1s3s, ^1S, J = 0$
18	1031.1	$1s2p, ^3P^{\circ}, J = 0, 1, 2$	$1s6d, ^3D, J = 1, 2, 3$
19	1066.8	$1s3p, ^3P^{\circ}, J = 0, 1, 2$	$1s6s, ^3S, J = 1$
20	1083.0	$1s2s, ^3S, J = 1$	$1s2p, ^3P^{\circ}, J = 0, 1, 2$
21	1091.3	$1s3d, ^3D, J = 1, 2, 3$	$1s6f, ^3F^{\circ}, J = 1, 2, 3, 4$
22	1099.6	$1s3d, ^3D, J = 1, 2, 3$	$1s6p, ^3P^{\circ}, J = 0, 1, 2$

амплитуда ($\pi/2$)-импульса подбиралась в предварительных я.м.р.-экспериментах с помощью реперного образца, представляющего собой стеклянную сферическую ячейку схожего размера, заполненную смесью $^3\text{He}-\text{O}_2$ в примерно одинаковой пропорции при общем давлении порядка 2 бар.

На рис. 3 представлен типичный сигнал спада свободной индукции ядер ^3He , поляризованного методом РАМР, полученный при комнатной температуре на частоте 118.8 МГц и длительности возбуждающего ($\pi/2$)-импульса 17 мкс. Поляризационная ячейка имела сферическую форму с внутренним диаметром 8 мм и содержала ^3He под давлением 10 мбар. Поляризация ^3He в этом эксперименте составляла примерно 1%, данная величина получена из отношения амплитуд сигналов спада свободной индукции в нулевой момент времени в ячейке с поляризованным ^3He и реперного образца $^3\text{He}-\text{O}_2$ (равновесная поляризация в поле 3.66 Тл составляет 0.001%). Стоит отметить, что меньший уровень поляризации, 1%, по сравнению с полученным в работе [6], в первую очередь,

может быть связан с отличающимися индукцией магнитного поля, давлением газа и мощностью создаваемой р.ч.-плазмы, так как оптимальные величины параметров процесса поляризации на данный момент не установлены. Полученный уровень поляризации свидетельствует о применимости предложенного способа очистки в экспериментах по изучению эффекта РАМР.

Таким образом, описанная в данной работе система очистки изотопов гелия и их смесей от сопутствующих примесей применима для проведения поляризации ^3He методом РАМР. Предложенная система позволяет исключить из гелия примеси (до уровня менее 1 ppm): водород, компоненты воздуха, органические соединения и др. Помимо этого, предложенная система успешно применена для очистки поляризационных ячеек плазмой гелия. Продемонстрирована эффективная работа системы очистки при поляризации методом РАМР в поле 3.66 Тл. Методами импульсного я.м.р. определено, что уровень полученной поляризации в сферической ячейке с

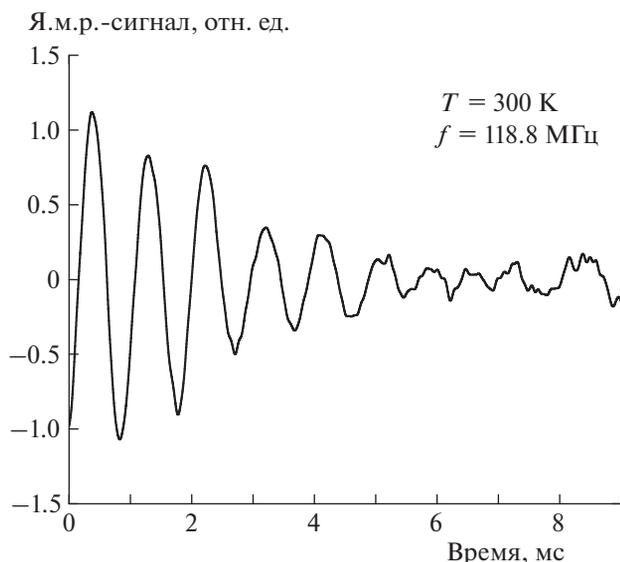


Рис. 3. Наблюдаемый я.м.р.-сигнал спада свободной индукции поляризованного методом РАМР газа ^3He после проведения очистки газа и описываемой системы. Сигнал я.м.р. получен с использованием возбуждающего ($\pi/2$)-импульса длительностью 17 мкс при комнатной температуре в ячейке с внутренним диаметром 8 мм, содержащей ^3He под давлением 10 мбар.

внутренним диаметром 8 мм, содержащей ^3He под давлением 10 мбар, составляет 1%.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 19-72-10061). Авторы благодарят Т.Р. Сафина за помощь в приготовлении стеклянных ячеек и А.Р. Хадиева за помощь в записи оптических спектров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wisser D., Hartmann M.* // *Adv. Mater. Interfaces.* 2020. V. 8 Article number 2001266. <https://doi.org/10.1002/admi.202001266>
2. *Tastevin G., Nacher P.-J.* // *J. Chem. Phys.* 2005. V. 123. № 6. Article number 064506. <https://doi.org/10.1063/1.1997130>
3. *van Beek E.J.R., Wild J.M., Kauczor H.-U., Schreiber W., Mugler III J.P., de Lange E.E.* // *J. Magn. Reson. Imaging.* 2004. V. 20. № 4. P. 540. <https://doi.org/10.1002/jmri.20154>
4. *Bidinosti C.P., Choukeife J., Tastevin G., Nacher P.-J., Vignaud A.* // *Magn. Reson. Mater. Phys.* 2004. V. 16. № 6. P. 255. <https://doi.org/10.1007/s10334-004-0035-y>
5. *Gentile T.R., Nacher P.-J., Saam B., Walker T.G.* // *Rev. Mod. Phys.* 2017. V. 89. № 4. Article number 045004. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.89.045004>
6. *Maul A., Blümmler P., Nacher P.-J., Otten E., Tastevin G., Heil W.* // *Phys. Rev. A.* 2018. V. 98. № 6. Article number 063405. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.98.063405>
7. *Colegrove F.D., Scheerer L.D., Walters G.K.* // *Phys. Rev.* 1963. V. 132. № 6. P. 2561. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.132.2561>
8. *Timsit R.S., Daniels J.M., Dennig E.I., Kiang A.K.C., May A.D.* // *Can. J. Phys.* 1971. V. 49. № 5. P. 508. <https://doi.org/10.1139/p71-068>
9. *Gamblin R.L., Carver T.R.* // *Physical. Rev.* 1965. V. 138. № 4A. P. A946. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.138.A946>
10. *Малков М.П., Данилов И.Б., Зельдович А.Г., Фрадков А.Б.* Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения. М.: Госэнергоиздат, 1963.
11. *Leduc M., Crampton S.B., Nacher P.-J., Laloe F.* // *Nucl. Sci. Appl. Sect. A.* 1984. V. 2. № 1. P. 1. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01383488>
12. *Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J., and NIST ASD Team.* NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.8), [Online]. Available: <https://physics.nist.gov/asd> [2021, April 20]. National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, MD. <https://doi.org/10.18434/T4W30F>
13. *Kuzmin V.V., Bogaychuk A.V., Nekrasov I.K., Safiullin K.R., Salakhov M.H., Alakshin E.M., Klochkov A.V., Tagirov M.S.* // *Magn. Reson. Solid.* 2019. V. 21. № 1. P. 19104. <https://doi.org/10.26907/mrsej-19104>

КРИОМАГНИТНАЯ СИСТЕМА СО СВЕРХПРОВОДНИКОВЫМИ ОБМОТКАМИ ДЛЯ МАГНИТНОГО СЕПАРАТОРА

© 2021 г. Д. В. Варюхин^а, Н. В. Таряник^а, П. Н. Постол^а, Д. О. Федюк^{а,*}

^а Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина
Украина, 83114, Донецк, ул. Р. Люксембург, 72

*e-mail: fedukoleg@yandex.ua

Поступила в редакцию 13.05.2021 г.

После доработки 15.06.2021 г.

Принята к публикации 17.06.2021 г.

Описана криомагнитная система со сверхпроводниковыми обмотками, создающая в зоне сепарации (под криостатом) объемом $1200 \times 200 \times 100$ мм³ магнитное поле с индукцией до 2 Тл. Для создания протяженной зоны сепарации магнитная система выполнена из трех последовательно соединенных сверхпроводниковых соленоидов, при этом оси соленоидов параллельны, а сами соленоиды установлены в одной плоскости друг за другом в направлении большей стороны зоны сепарации. Гелиевый криостат выполнен в виде параллелепипеда с округлыми торцевыми поверхностями и обеспечивает наклон до 15° вдоль продольной оси. Ресурс работы по жидкому гелию составляет 170 ч; по жидкому азоту – 100 ч.

DOI: 10.31857/S0032816221060070

Источником магнитного поля в классических сепараторах служат электромагниты, которые отличаются большими массой (десятки тонн) и габаритами, а также большой мощностью потребляемой электроэнергии (100–200 кВт). При этом они создают магнитное поле с индукцией ≤ 0.8 –1.0 Тл [1].

Более эффективным и экономичным решением является использование в сепараторах в качестве источника магнитного поля сверхпроводниковых соленоидов, индукция поля которых в несколько раз больше, а потребляемая мощность в десятки раз меньше.

Криомагнитная система сепаратора [2, 3] для обогащения слабомагнитных руд и минералов состоит из цилиндрического криостата с горизонтальной осью симметрии и сверхпроводниковой магнитной системы. Для обеспечения большой зоны магнитного поля и соответственно большой производительности магнитную систему изготавливают в виде четырех седлообразных обмоток эллиптической формы, которые закреплены на внешней поверхности массивного железного ярма.

Изготовление таких обмоток сопряжено с большими трудностями, главная из которых заключается в необходимости использования нестандартного намоточного оборудования, а также бандажей – ярма для компенсации больших растягивающих механических усилий электромаг-

нитного происхождения на линейных участках обмотки.

В работах [4, 5] представлены конструкции криомагнитных сепараторов, однако они имеют малый объем магнитного поля.

Целью данной разработки является упрощение конструкций сверхпроводниковой магнитной системы и гелиевого криостата, обеспечивающих большой объем магнитного поля в зоне сепарации.

В работе представлены конструкция и результаты исследований криомагнитной системы сепаратора сухого обогащения отходов железной руды в составе сверхпроводниковой магнитной системы (с.м.с.) и гелиевого криостата.

К с.м.с. предъявляются особые требования по пространственному распределению магнитного поля в зоне сепарации: эта зона расположена за пределами криостата (под его дном) и представляет собой параллелепипед с размерами $1200 \times 200 \times 100$ мм. Сторона параллелепипеда длиной 1200 мм расположена в направлении движения исходного продукта обогащения, а высота параллелепипеда, равная 100 мм, – в направлении вектора индукции магнитного поля. Максимальное значение индукции поля в зоне сепарации составляет ≥ 2 Тл, а минимальное – 1 Тл.

С целью обеспечения большого объема магнитного поля в зоне сепарации разработана конструкция с.м.с., которая состоит из трех соеди-

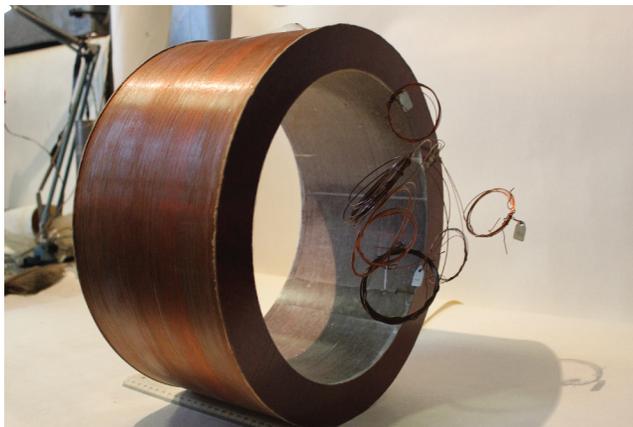


Рис. 1. Бескаркасная обмотка соленоида.

ненных последовательно одинаковых соленоидов цилиндрической формы, при этом оси соленоидов параллельны, а сами соленоиды установлены в одной плоскости один за другим в направлении большой стороны зоны сепарации. Такая с.м.с. моделирует соленоид с эллиптической формой обмотки.

В качестве рабочего варианта для с.м.с. выбран соленоид с диаметром внутреннего отверстия 300 мм, внешним диаметром 385 мм и длиной 180 мм. Внешний диаметр соленоидов ограничен диаметром гелиевой емкости криостата, равным 400 мм, в котором проводились предварительные испытания соленоидов. По размерам, массе и запасаемой энергии магнитного поля такой соленоид относится к классу средних, и для их изготовления, как правило, используют полностью стабилизированный сверхпроводниковый провод с коэффициентом заполнения по сверхпроводнику 5–7%. Однако, ввиду того что критический ток такого провода существенно меньше критического тока частично стабилизированного провода с коэффициентом заполнения по сверхпроводнику 30–50%, использование полностью стабилизированного провода ведет к увеличению размеров и массы обмотки (в 3–5 раз), а также к дополнительным затратам жидкого гелия. Поэтому для изготовления соленоидов использовался частично стабилизированный провод с диаметрами 1.2, 1.0 и 0.85 мм из сплава НТ-50 с коэффициентом заполнения $\leq 30\%$.

Соленоиды изготовлены по бескаркасной технологии путем отверждения обмоток эпоксидной композицией УП-6-101 с наполнителем ЭА-1-6 – мелкодисперсным β -эвкриптитом марки Ситалл [6]. Бескаркасная обмотка соленоида показана на рис. 1. Масса сверхпроводника для изготовления одного соленоида составила примерно 50 кг. Снаружи обмотки соленоида установлен бандаж из стали 12Х18Н10Т.

Для регистрации момента перехода соленоида из сверхпроводящего в нормальное состояние параллельно каждой секции подключали диод с лампочкой, по загоранию которой фотокамерой регистрировали этот момент.

Испытания первого соленоида показали, что он выдерживал ток 242 А без перехода в нормальное состояние, в то время как второй и третий соленоиды вели себя иначе – у них наблюдалась “тренировка” критического тока. Максимальный критический ток второго соленоида составил 233 А и был достигнут после четвертого перехода в нормальное состояние, а максимальный критический ток третьего соленоида 231.5 А был достигнут после третьего перехода. Индукция магнитного поля в центре первого соленоида составила 5.2 Тл, в центре второго и третьего – 5.1 Тл, а в обмотке – 7.5 Тл.

Конструктивно соленоиды объединены в блок магнитов – с.м.с. (рис. 2), при этом средний соленоид включен встречно крайним, что позволило увеличить модуль магнитной индукции в рабочей зоне на 11% по сравнению с включением соленоидов в одном направлении. К выводам с.м.с. подключен сверхпроводниковый ключ, обеспечивающий замкнутый режим работы. Для компенсации силы магнитного взаимодействия соленоидов в блоке магнитов используется устройство компенсации. Оно представляет собой две параллельные плиты 2 (см. рис. 2) из сплава Д16, в отверстиях которых установлены и закреплены три соленоида 1, при этом третий соленоид установлен в дополнительной гелиевой емкости 3. Масса с.м.с. составляет 175 кг.

Рассчитана сила магнитного взаимодействия двух соседних соленоидов в с.м.с. [7]:

$$F = \frac{dU}{dx} = \frac{c}{2} \left[\frac{\Delta L I^2}{\Delta x} \right],$$

где L , Гн – индуктивность; I , А – ток; F , Н – сила; ΔL , Гн – изменение индуктивности; Δx , м – виртуальное перемещение соленоида; $c = 10^2/9.8$.

Общая индуктивность системы из двух соленоидов равна $L = L_1 + L_2 + 2M$, где M – взаимная индуктивность. Изменение общей индуктивности при перемещении соленоидов обусловлено изменением взаимной индуктивности. Измеренная индуктивность каждого соленоида равна 10.9 Гн. Расчеты взаимной индуктивности, согласно работе [8], показали, что при перемещении одного из соленоидов на расстояние $\Delta x = 0.05$ м ее изменение составило $\Delta L = 0.08$ Гн. Тогда при токе в соленоидах $I = 200$ А сила магнитного взаимодействия двух соленоидов будет равна $F = 6.4$ т.

Для нахождения неоднородности магнитного поля в зоне сепарации определены компоненты индукции магнитного поля B_x , B_y и B_z с помощью

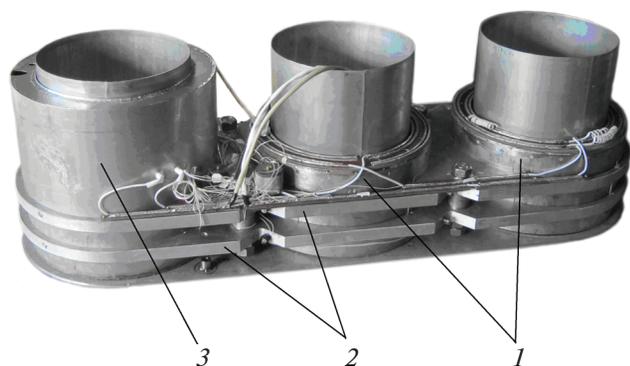


Рис. 2. Сверхпроводниковая магнитная система из трех соленоидов. 1 – соленоиды; 2 – параллельные плиты; 3 – гелиевая емкость.

измерителя магнитной индукции Ш1-8 на основе датчика Холла. Неоднородность магнитного поля вдоль большой оси на длине 1200 мм составила 11%, а вдоль малой оси на длине 200 мм – не более 9%.

Геометрия с.м.с. предопределила форму гелиевого криостата, который выполнен в виде параллелепипеда с закругленными углами на торцевых поверхностях. Такая форма криостата, в сравнении с цилиндрической, потребовала дополнительного упрочнения плоских тонкостенных оболочек кожуха ребрами жесткости, что существенно уменьшило массу криостата.

Криостат представляет собой цельнометаллическую сварную конструкцию, состоящую из ге-

лиевой и азотной емкостей, охватывающих их радиационных экранов и вакуумного кожуха (рис. 3) [9]. Три вертикальные трубы, образующие теплые каналы, проходящие вдоль осей соленоидов, выполняют роль компенсаторов атмосферного давления, действующего на верхний и нижний плоские фланцы криостата.

Особенностью криостата также является то, что он обеспечивает наклон вдоль большой оси на 15° . Чтобы исключить оголение обмотки соленоидов от жидкого гелия при наклонах криостата, соленоид был помещен в дополнительную гелиевую емкость 3 (см. рис. 2).

Для предотвращения перетекания жидкого азота при наклонах криостата в азотной емкости установлены перегородки.

С целью обеспечения надежной работы криостата в горизонтальном и наклонном положениях в пространстве между верхней крышкой азотной емкости и верхним фланцем криостата, а также между нижней крышкой азотной емкости и верхней крышкой гелиевой емкости установлены стеклопластиковые опоры. Схема распределения усилий в криостате выполнена таким образом, что конечным звеном приложения усилий от гелиевой и азотной емкостей служит верхний фланец криостата.

Радиационные экраны криостата выполнены с разрезами и скреплены в местах разреза стекло-текстолитовыми пластинами, что исключает наведение в них токов Фуко.



Рис. 3. Внешний вид криомагнитной системы.

На горловинах криостата установлен коллектор для сбора газообразного гелия и сброса его в газгольдерную систему.

Криостат укомплектован двумя индикаторами температуры и уровня жидкого гелия, а также съемными силовыми и управляющими токовводами.

Геометрические размеры криостата: длина 1540 мм, ширина 640 мм, высота по фланцам 750 мм, полная высота 1380 мм; масса криостата 650 кг. Ресурс непрерывной работы с одной заправкой жидким гелием 170 ч, жидким азотом 100 ч.

Криомагнитная система в составе гелиевого криостата, с.м.с. и блоков питания и управления показана на рис. 3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сумцов В.Ф.* Электромагнитные железотделители. М.: Машиностроение, 1978.
2. Superconductive high intensity magnetic separator DESCOS. Фирма "KHD Humboldt Wedag", Germany.
3. *Рис Г., Юнгст К.-П., Фёрстер З., Граф Ф., Леманн В., Ункельбах К.-Х., Дюрен Г.* (ФРГ) Патент № 743567. М. Кл² В 03 С 1/10 // Бюл. № 23. Оpubл. 25.06.80.
4. *Unkelbach К.Н., Wasmuth H.D.* A Superconductive Drum Type Magnetic Separator for the Benefication of ores and Minerals // XV International Mineral Processing Congress. (2–9 July 1985) 1985. V. 1. P. 371.
5. *Кейлин В.Е., Лепехин В.М., Черноплеков Н.А.* А.с. № 1461507 СССР, МПК В03С 1/30 // Оpubл. 28.02.1989.
6. *Кочашко А.М., Стецюк М.Ф., Батог А.Е., Зайцев Ю.С., Зарайская Л.Е., Матвеевко Э.Г., Лаптевко А.Е., Курочкин В.И., Гавриш И.Г.* А.с. № 1210443 СССР. МКИ³ С 08 L63/00 // Зарегистрировано 08.10.1985 (Публикации не подлежат).
7. *Монтгомери Д.* Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов. М.: Мир, 1971.
8. *Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А.* Расчет индуктивностей. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
9. *Постол П.Н., Дворников Е.А., Варюхин Д.В.* // ФТВД. 2013. Т. 23. № 4. С. 128.

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ
В ЛАБОРАТОРИЯХ

УДК 681.785.574

ТРЕХКАНАЛЬНЫЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТР

© 2021 г. В. А. Вагин, А. И. Хорохорин

Поступила в редакцию 25.03.2021 г.

После доработки 07.04.2021 г.

Принята к публикации 08.04.2021 г.

DOI: 10.31857/S0032816221050141

В Научно-технологическом центре уникального приборостроения РАН (НТЦ УП РАН) разработан трехканальный инфракрасный фурье-спектрометр [1], предназначенный для работы с оптоволоконными зондами. Фурье-спектрометр позволяет проводить спектральные измерения без подготовки проб объектов исследования, удаленных от прибора либо расположенных в труднодоступных местах или в местах, опасных для здоровья человека. Его особенностью является возможность одновременного проведения спектральных измерений трех исследуемых объектов или одного объекта в трех спектральных диапазонах, что определяется конструкцией используемого трехканального зонда (рис. 1). Спектрометр работает как от источника переменного напряжения 220 В, так и от низковольтного автономного источника питания (12 В). Управление прибором осуществляется от ноутбука. С его помощью обрабатывается регистрируемая спектральная информация, выполняется спектральный анализ и

делается заключение об исследуемых спектральных образцах (например, о химическом составе).

Основные технические характеристики трехканального инфракрасного фурье-спектрометра. Инфракрасная область спектра от 400 до 5000 см⁻¹; предельное разрешение 1 см⁻¹; вариации отклонения уровня 100%-ного пропускания по всей области спектра не превышают ±1%; отношение сигнал/шум (в области 2000–2100 см⁻¹) за время измерения 2 мин (16 сканов) при спектральном разрешении 1 см⁻¹ не менее 10³; время установления рабочего режима (после включения прибора) не более 15 мин; габаритные размеры 500 × 450 × 200 мм; масса (без э.в.м.) 10 кг.

Фурье-спектрометр оснащен охлаждаемым инфракрасным приемником (на основе HgCdTe), размещенным в заливном (жидким азотом) криостате, и двумя пироприемниками, а также трехканальным оптоволоконным зондом, предназначенным для измерения нарушенного полного внутреннего отражения и пропускания жидкостей посредством единой измерительной головки.

Изготовленным опытным образцом прибора записаны спектры пропускания ряда жидкостей (спирт, ацетон, бензин) и их поглощения в режиме нарушенного полного внутреннего отражения, что подтвердило работоспособность прибора и его заявленные характеристики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вагин В.А., Хорохорин А.И. // Физические основы приборостроения. 2020. Т. 9 (38). № 4. С. 64. <https://doi.org/10.25210/jfor-2004-064071>

Адрес для справок: Россия, 117342, Москва, ул. Бутлерова, 15, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН (НТЦ УП РАН). Тел. 8-495-333-11-42. E-mail: vaguine@mail.ru

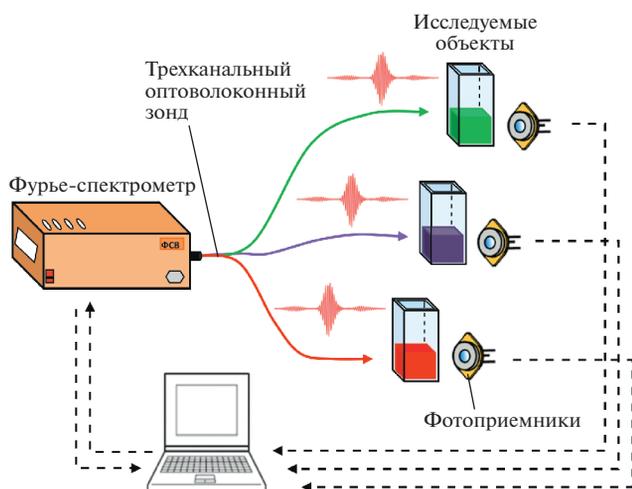


Рис. 1. Схема одновременной регистрации сигнала от нескольких объектов.

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ
В ЛАБОРАТОРИЯХ

УДК 534.7

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕДЕНЧЕСКИХ
РЕАКЦИЙ ЛАБОРАТОРНЫХ ЖИВОТНЫХ

© 2021 г. С. П. Драган, И. А. Веселовский, Д. Б. Комаров, А. В. Богомолов

Поступила в редакцию 29.05.2021 г.

После доработки 14.06.2021 г.

Принята к публикации 29.06.2021 г.

DOI: 10.31857/S0032816221060082

Для экстраполяции с животных на человека млеко-биологических эффектов воздействия экстремальных физических факторов используют биологические модели, построенные по результатам экспериментальных исследований поведенческих реакций животных при таких воздействиях [1]. Спецификой таких исследований является необходимость предварительного обучения большой группы животных в сравнительно короткий срок [2, 3]. Для сокращения времени обучения разработан аппаратно-программный комплекс “Трехлучевой лабиринт” для экспериментального исследования поведенческих реакций лабораторных животных, внешний вид которого приведен на рис. 1.

Аппаратно-программный комплекс состоит из пяти вертикально расположенных, функционально самостоятельных, одинаковых трех лучевых (Y-образных) радиальных лабиринтов и блока управления. Каждый лабиринт изготовлен в виде трех прямоугольных лучей (рукавов) длиной 16 см, шириной 10 см и высотой от металлического пола до потолка 8 см. Высота лабиринта, включая выдвижной в торцевую сторону поддон для сбора продуктов жизнедеятельности животного, составляет 12 см. В торцевой стенке каждого луча установлена дверь для посадки и изъятия животного. Животное может свободно перемещаться внутри всех трех лабиринтов. В дверцах лабиринтов установлены смотровые окна. Каждый рукав лабиринта оснащен выдвижным съемным полом (электрополом), состоящим из круглых металлических стержней диаметром 5 мм, уложенных на расстоянии 1 см друг от друга. Для контроля месторасположения крыс в каждом рукаве лабиринта установлены фотодиоды – датчики регистрации перемещений.

Блок управления, расположенный сверху над лабиринтами, обеспечивает коммутацию светового и звукового условных сигналов, а также задание напряжения, длительности и скважности импульсов, подаваемых на секции электропола независимо для каждого лабиринта. Управление осуществляется в соответствии с алгоритмом, задаваемым оператором с помощью программного интерфейса, реализуемого внешним персональным компьютером.

Основные технические характеристики. Аппаратно-программный комплекс оборудован авто-



Рис. 1. Общий вид аппаратно-программного комплекса “Трехлучевой лабиринт”.

номным источником питания (аккумулятор с выходным напряжением 12 В), может также работать от сети электропитания. Продолжительность автономной работы от внутреннего источника питания составляет не менее 12 ч (при соотношении режимов: “ожидание” – 11 ч, “работа” – 1 ч). Время полного заряда аккумулятора составляет 8 ч. Обеспечивается генерация импульсов напряжения “бегущая волна” с периодом от 0.1 до 5 с, регулируемой длительностью импульсов от 8 до 500 мс, скважностью от 0 до 500 мс и ограничителем силы тока (≤ 5 мА). Заданные в диапазоне 20–90 В значения напряжения для каждого лабиринта в течение эксперимента поддерживаются автоматически при помощи многоканальной системы отрицательной обратной связи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов И.В., Ушаков И.Б.* // Военно-медицинский журнал. 2019. № 12. С. 50.
2. *Нотова С.В., Казакова Г.В., Маршинская О.В.* // Животноводство и кормопроизводство 2018. Т. 101. № 1. С. 106.
3. *Муртазина Е.П., Буянова И.С., Гинзбург-Шик Ю.А.* // Зоологический журнал. 2021. Т. 100. № 5. С. 540. <https://doi.org/10.31857/S0044513421050093>

Адрес для справок: Россия, 123182, Москва, ул. Живописная, 46; Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России. E-mail: s.p.dragan@mail.ru

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ
В ЛАБОРАТОРИЯХ

УДК 621.317.7

ЩИТОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ
И СИЛЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ

© 2021 г. Ю. А. Андреев, С. Ю. Буров, Ю. А. Кремзуков

Поступила в редакцию 28.06.2021 г.
После доработки 09.07.2021 г.
Принята к публикации 10.07.2021 г.

DOI: 10.31857/S003281622106015X

Щитовые измерители активно применяются в автоматизированных системах управления технологическими процессами в энергетике, металлургии, химической, пищевой и других отраслях промышленности и народного хозяйства в качестве устройств сбора, обработки, представления и передачи данных.

Существующие отечественные и зарубежные приборы этого типа во многих случаях отстают от современных тенденций в развитии средств обработки и представления информации и в том числе обладают невысокой точностью, не превышающей в основном 0.1%. В то же время микроэлектронная промышленность предлагает широкий спектр преобразователей аналоговых сигналов в

цифровые, а использование современной микропроцессорной техники позволяет создавать высокотехнологичные цифровые приборы, обеспечивающие максимальную автоматизацию измерений при одновременном обеспечении высокой точности [1–3].

В НИИ автоматики и электромеханики ТУСУР [4] был разработан точный щитовой прибор для измерения постоянного тока и напряжения, имеющий расширенный набор интерфейсов передачи данных. Блок-схема прибора приведена на рис. 1.

Прибор состоит из двух модулей. В модуле измерения используется 24-разрядный сигма-дель-

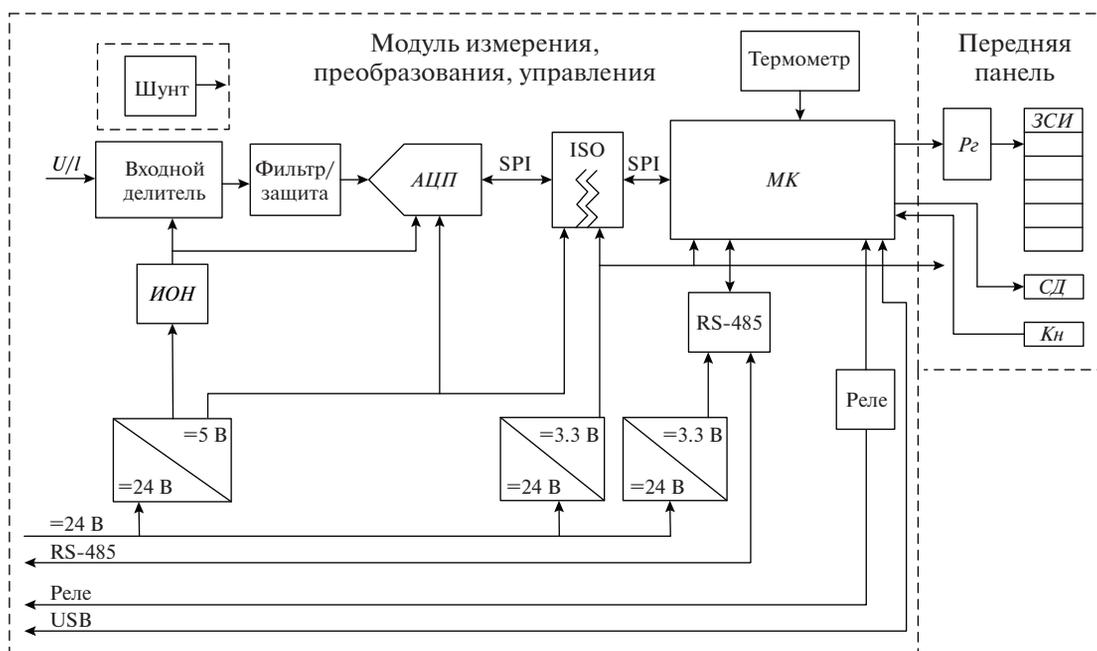


Рис. 1. Блок-схема щитового прибора. АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ИОН – источник опорного напряжения, ЗСИ – знакосинтезирующие индикаторы, Кн – кнопки, МК – микроконтроллер, Рг – регистр, СД – светодиод; ISO – galvanic isolation (гальваническая развязка), SPI – Serial Peripheral Interface (последовательный периферийный интерфейс).

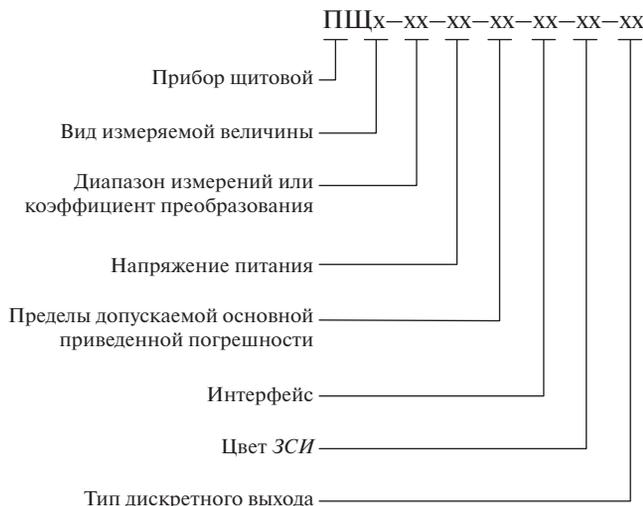


Рис. 2. Код условного обозначения прибора.

та аналого-цифровой преобразователь (*АЦП*) со встроенным программируемым дифференциальным усилителем. Для достижения высоких точностных характеристик использован внешний источник опорного напряжения с температурным коэффициентом $3 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, а также резисторы с малым температурным коэффициентом сопротивления во входном делителе-преобразователе входного сигнала в дифференциальный сигнал.

В состав прибора также входят:

- микроконтроллер (*МК*) с термометром для корректировки показаний при изменении температуры в интервале $10\text{--}35^\circ\text{C}$;

- передняя панель, на которой размещены: знакосинтезирующие индикаторы (*ЗСИ*) с числом десятичных разрядов, равным шести, и с высотой знака 14.22 мм ; светодиодные индикаторы для отображения режимов работы прибора; многофункциональные кнопки управления для программирования или изменения режимов работы прибора;

- интерфейс связи RS-485 с гальванической изоляцией;

- преобразователи для питания схем прибора, позволяющие совместно с изолятором ISO SPI-интерфейса на выходе *АЦП* гальванически разделить цепи и снизить помехи в процессе измерения.

Прибор функционирует в одном из следующих режимов:

- измерения;
- программирования (настройки и просмотра параметров);
- прошивки (обновления) программного обеспечения;
- аварийном.

Режим измерения является основным эксплуатационным режимом прибора, в котором прибор отображает результат измерения на *ЗСИ*, управляет дискретным выходом в соответствии с заданным алгоритмом и передает информацию по интерфейсным каналам.

Режим программирования предназначен для редактирования программируемых параметров прибора и может быть активирован тремя способами: 1) при отключенном питании подключением прибора к персональному компьютеру через интерфейс USB; 2) через интерфейс RS-485, используя регистры управления; 3) с помощью интерактивного меню команд посредством кнопок, расположенных на передней панели.

Режим прошивки п.о. (программного обеспечения) предназначен для обновления внутреннего п.о. прибора через USB-интерфейс.

Аварийный режим активируется в случае, если внутреннее п.о. определит, что нормальная работа прибора по каким-либо причинам невозможна. В этом режиме на знакосинтезирующем индикаторе отображается код возникшей ошибки.

Приборы имеют различные исполнения. Информация об исполнении прибора приведена в коде условного обозначения, приведенном на рис. 2.

Вид измеряемой величины: А – постоянный ток, В – напряжение постоянного тока.

Диапазон измерений напряжения: 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 750 В. Диапазон измерения тока с внутренним шунтом 1, 2 А. С внешним шунтом с выходным напряжением 60, 75, 100, 150 мВ.

Номинальное напряжение питания прибора: 5, 12, 24, 48 В.

Пределы допускаемой основной приведенной погрешности прибора при измерении напряжения 0.01% , при измерении тока – 0.02% (без учета погрешности шунта при внешнем его подключении) в рабочем диапазоне температур $+10\text{...}+35^\circ\text{C}$.

Интерфейс прибора соответствует: R – RS-485, протокол обмена данными MODBUS RTU.

Цвет *ЗСИ* прибора соответствует: К – красный, З – зеленый, О – оранжевый.

Тип дискретного выхода прибора соответствует: Р – реле, Т – транзистор (открытый коллектор), С – симистор.

Внешний вид прибора приведен на рис. 3.

Прибор является однопредельным, с автоматическим определением полярности измеряемого сигнала и возможностью автоматического определения положения точки, разделяющей целую и дробные части числа, имеет меню команд управления режимами измерения. Управление и настройка режимов может осуществляться двумя способами:



Рис. 3. Внешний вид прибора.

– через интерфейс RS-485 с использованием специальной программы-конфигуратора;

– с использованием кнопок, расположенных на передней панели прибора.

Опытная партия приборов прошла все испытания в соответствии с ГОСТ 14014-91 [5]. Приборы щитовые цифровые электроизмерительные ПЩА,

ПЩВ внесены в Госреестр СИ РФ № 81748-21, срок действия свидетельства до 05.05.2026 [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Раннев Г.Г., Суругина В.А., Калашников В.И., Тарасенко А.П., Нефедов С.В. Информационно-измерительная техника и электроника: учебник для студентов вузов. М.: Издательский центр “Академия”, 2006.
2. Атамаян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин: учебное пособие для вузов. М.: Дрофа, 2005.
3. Афонский А.А., Дьяконов В.П. Измерительные приборы и массовые электронные измерения. М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2007.
4. www.niiaem.tomsk.ru
5. ГОСТ 14014-91. Приборы и преобразователи измерительные цифровые напряжения, тока, сопротивления. Общие технические требования и методы испытаний.
6. www.fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/1387992

Адрес для справок: Россия, 634034, Томск, ул. Белинского, 53, НИИ автоматики и электромеханики Томского университета автоматизированных систем управления и радиоэлектроники. E-mail: info@niiaem.tomsk.ru, aem@tusur.ru

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ ЖУРНАЛА
“ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА”
ЗА 2021 ГОД

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

DOI: 10.31857/S0032816221060215

- Afrasyab Khan, Khairuddin Sanaullah, Спиридонов Е.К., Подзерко А.В., Хабарова Д.Ф., Ahmad Hasan Ali, Ahmad Salam Farooqi, Mohammed Zwawi, Mohammed Algarni, Bassem F. Felemban, Ali Bahadar, Atta Ullah, Bawadi Abdullah.** Разработка и применение системы на основе датчиков проводимости для исследования взаимодействия между сверхзвуковой паровой струей и водой. № 4, 141.
- Ahmad Hasan Ali** см. Afrasyab Khan
Ahmad Salam Farooqi см. Afrasyab Khan
Ali Bahadar см. Afrasyab Khan
Atta Ullah см. Afrasyab Khan
Bassem F. Felemban см. Afrasyab Khan
Bawadi Abdullah см. Afrasyab Khan
- Elif Ebru Ermis.** Выявление гамма-пиков ^{60}Co с помощью многопиксельного счетчика фотонов. № 5, 147.
- Herrmann M.** см. Алукер Н.Л.
Kdib Dj.E. см. Акимов Д.Ю.
Khairuddin Sanaullah см. Afrasyab Khan
Medjiadj T., Ксенофонтов А.И., Климанов В.А., Далечина А.В., Кирпичев Ю.С. Экспериментальная валидация расчетов методом Монте-Карло для аппарата Leksell Gamma Knife Perfexion с помощью радиохромной дозиметрической пленки EBТ3 и алмазного детектора T60019 РТW. № 1, 129.
- Mohammed Algarni** см. Afrasyab Khan
Mohammed Zwawi см. Afrasyab Khan
Raulin J.-P. см. Филиппов М.В.
Tacza J. см. Филиппов М.В.
- Агроскин В.Я., Бравый Б.Г., Васильев Г.К., Гурьев В.И., Каштанов С.А., Макаров Е.Ф., Сотниченко С.А., Чернышев Ю.А.** Эффективный импульсно-периодический химический HF(DF)-лазер. № 6, 53.
- Аймаганбетов К.П., Алдияров А.У., Жантуаров С.Р., Алмасов Н.Ж., Теруков Е.И., Токмолдин Н.С.** Низкотемпературная ячейка для проведения высокочастотных электрофизических измерений полупроводниковых устройств. № 6, 102.
- Акимов Д.Ю., Александров И.С., Белов В.А., Боллоздыня А.И., Ефременко Ю.В., Этенко А.В., Галаванов А.В., Гусс Д.В., Гусаков Ю.В., Kdib Dj.E., Хромов А.В., Коновалов А.М., Корноухов В.Н., Коваленко А.Г., Козлов А.А., Козлова Е.С., Кумпан А.В., Лукьяшин А.В., Пинчук А.В., Разуваева О.Е., Рудик Д.Г., Шакиров А.В., Симанков Г.Е., Сосновцев В.В., Васин А.А.** Пассивная защита нейтринного детектора РЭД-100. № 2, 32.
- Алабин К.А., Воробьев Н.С., Заровский А.И.** Измерение времени задержки запуска электронно-оптической камеры. № 1, 142.
- Алдияров А.У.** см. Аймаганбетов К.П.
Александров И.С. см. Акимов Д.Ю.
Алексеев В.И. см. Загнитько А.В.
Алексеев В.И., Басков В.А., Варфоломеева Е.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кольцов А.В., Кречетов Ю.Ф., Полянский В.В., Сидорин С.С. Энергетические характеристики многоканального сцинтилляционного спектрометра. № 5, 28.
- Алексеев В.И., Басков В.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кольцов А.В., Кречетов Ю.Ф., Полянский В.В., Сидорин С.С.** Сцинтилляционный годоскопический спектрометр. № 1, 40.
- Алексеев И.Е., Бахланов С.В., Дербин А.В., Драчнев И.С., Котина И.М., Муратова В.Н., Ниязова Н.В., Семенов Д.А., Трушин М.В., Унжаков Е.В., Чмель Е.А.** Кремниевый 4π-спектрометр электронов β-распада с энергией до 3 МэВ. № 2, 19.
- Алмасов Н.Ж.** см. Аймаганбетов К.П.
Алукер Н.Л., Артамонов А.С., Herrmann M. Термолюминесцентные детекторы ионизирующего излучения высокой плотности. № 3, 98.
- Алукер Н.Л., Артамонов А.С., Гимадова Т.И., Зверев А.С.** Термолюминесцентные дозиметры на основе керамики из оксида и нитрида алюминия. № 6, 75.
- Алферов В.Н., Бритвич Г.И., Васильев Д.А., Костин М.Ю., Лутчев А.В., Сухих А.В., Федорченко В.Н., Черниченко С.К., Янович А.А.** Радиационный транспортный монитор. № 4, 60.
- Андреев С.В., Воробьев Н.С., Михальков Ю.М., Смирнов А.В., Шашков Е.В., Турьянский А.Г., Сенков В.М., Пиршин И.В., Фишман Р.И., Гижга С.С.** Источник рентгеновского излучения среднего диапазона энергий на основе электронно-оптического преобразователя. № 2, 93.

- Андреев Ю.А., Буров С.Ю., Кремзуков Ю.А.** Щитовой измеритель напряжения и силы постоянного тока повышенной точности. № 6, 133.
- Антипин А.В.** см. Мочалов С.Э.
- Антипов Ю.М., Бритвич Г.И., Иванов С.В., Калинин В.А., Лебедев О.П., Людмирский Э.А., Максимов А.В., Минченко А.В., Солдатов А.П., Хитев Г.В.** Медленный вывод пучка ядер углерода из синхротрона У-70. № 3, 5.
- Антонов С.Н.** Акустооптический сумматор-модулятор излучения лазеров. № 4, 51.
- Антонов С.Н., Резвов Ю.Г.** Акустооптический дефлектор на парателлурите – повышение тепловой стабильности параметров. № 5, 100.
- Антонов С.Н., Резвов Ю.Г.** Акустооптический модулятор для лазерных доплеровских анемометров потоков жидкости и газа. № 5, 105.
- Антошин А.А.** см. Епифанов Е.О.
- Анфимов И.М.** см. Дробышевский Ю.В.
- Арзев А.Г., Галахов И.В., Ганин Л.С., Гришанин А.В., Елисеев В.В., Картаев В.Н., Коженков Е.В., Креков А.В., Мартыненко В.А., Мускатынцев В.Г., Наумов Д.А., Немаев Д.Ю., Осин В.А., Свиридов В.В., Фролов О.В., Хапугин А.А.** Коммутаторы импульсов тока на основе реверсивно-включаемых динисторов для мощных электрофизических установок. № 4, 33.
- Аристов Ю.В.** см. Коротков С.В.
- Артамонов А.С.** см. Алукер Н.Л.
- Артемьев А.Н.** см. Гурьева П.В.
- Артемьев Н.А.** см. Гурьева П.В.
- Артохов А.В., Марков В.Г., Сухинец Ж.А., Гулин А.И.** Измерение мгновенных значений температуры газов газотурбинного двигателя с использованием акустических мультивибраторов. № 6, 114.
- Аруев П.Н., Бобашев С.В., Красильщиков А.М., Николаев А.В., Петров Д.Ю., Шерстнев Е.В.** Архитектура гибридного матричного высокоскоростного детектора формата 32 × 32 для спектрального диапазона вакуумный ультрафиолет–жесткий рентген. № 1, 98.
- Архангельский А.И.** см. Сучков С.И.
- Асадчиков В.Е.** см. Тихонов А.М.
- Ахмедов Г.М.** см. Муминов Р.А.
- Ахмедов Р.А.** см. Гасанов А.Р.
- Багдинова А.Н.** см. Демихов Е.И.
- Баженов А.Н., Коваль А.Н., Толстяков С.Ю., Мухин Е.Е., Дмитриев А.М., Самсонов Д.С.** Стенд для термовакуумных механических испытаний. № 1, 151.
- Байжуманов А.А.** см. Юсипович А.И.
- Бак П.А., Батраков А.М., Бехтенёв Е.А., Васильев М.Ю., Живанков К.И., Котов Е.С., Мачерет Я.М., Павленко А.В., Павлов О.А., Сенченко А.И., Середняков С.С., Фаткин Г.А., Штро К.С.** Комплекс цифровой осциллографии ускорителя ЛИУ-20. № 2, 49.
- Балабин Ю.В.** см. Михалко Е.А.
- Баранник М.Б.** см. Колобов В.В.
- Баранов А.Г., Басков В.А., Герасимов Д.П., Губер Ф.Ф., Дронов В.А., Ивашкин А.П., Известный А.В., Карпушкин Н.М., Львов А.И., Морозов С.В., Наумов П.Ю., Полянский В.В., Решетин А.И., Салахутдинов Г.Х.** Передние годоскопы заряженных фрагментов ядер для эксперимента VM@N. № 5, 42.
- Баранов А.Г., Губер Ф.Ф., Ивашкин А.П., Известный А.В., Морозов С.В., Решетин А.И., Басков В.А., Дронов В.А., Львов А.И., Полянский В.В., Салахутдинов Г.Х., Наумов П.Ю.** Амплитудные параметры прототипов передних годоскопов для эксперимента VM@N. № 3, 15.
- Барахвостов С.В.** см. Липчак А.И.
- Барков Ф.Л.** см. Кривошеев А.И.
- Басков В.А.** см. Алексеев В.И.
- Басков В.А.** см. Баранов А.Г.
- Басков В.А.** см. Сучков С.И.
- Батраков А.М.** см. Бак П.А.
- Бахланов С.В.** см. Алексеев И.Е.
- Безуглов В.В., Брызгин А.А., Власов А.Ю., Воронин Л.А., Кокин Е.Н., Коробейников М.В., Сидоров А.В., Ткаченко В.О., Штарклев Е.А.** Разработка трехмодуляторной системы импульсного питания ускорителя электронов ИЛУ-14. № 1, 93.
- Безуглов В.В., Брызгин А.А., Власов А.Ю., Воронин Л.А., Коробейников М.В., Максимов С.А., Пак А.В., Радченко В.М., Сидоров А.В., Ткаченко В.О., Штарклев Е.А.** Импульсный источник питания для ускорителей серии ИЛУ на основе емкостных накопителей. № 2, 44.
- Белов В.А.** см. Акимов Д.Ю.
- Белокрылов М.Е.** см. Бурдин В.В.
- Беляев А.Д.** см. Гурьева П.В.
- Беляев Б.А., Боев Н.М., Горчаковский А.А., Галеев Р.Г.** Измерительные головки сканирующего спектрометра ферромагнитного резонанса. № 2, 107.
- Беринцев А.В.** см. Сергеев В.А.
- Бехтенёв Е.А.** см. Бак П.А.
- Бобашев С.В.** см. Аруев П.Н.
- Богомоллов А.В.** см. Драган С.П.
- Богомоллов А.В., Драган С.П., Оленина И.В.** Аппаратно-программный комплекс для ипсилатерального измерения порога акустического рефлекса. № 4, 95.
- Боев Н.М.** см. Беляев Б.А.
- Бойко А.А., Ерушин Е.Ю., Костюкова Н.Ю., Мирошниченко И.Б., Колкер Д.Б.** Параметриче-

- ский генератор света в среднем инфракрасном диапазоне на основе веерной периодически-поляризованной структуры ниобата лития с задающим узкополосным лазером. № 2, 83.
- Бокучава Г.Д.** см. Кузьмин Е.С.
- Болоздыня А.И.** см. Акимов Д.Ю.
- Болховская О.В., Елохин А.В., Кокарев А.О., Сергеев В.С., Сорокин И.С., Спирин А.А., Мальцев А.А.** Программно-аппаратный комплекс для проектирования и натурно-модельных испытаний широкополосных систем радиосвязи, радиолокации и навигации высокоскоростных объектов. № 3, 27.
- Бондаренко Е.А.** см. Градобоев А.В.
- Бравый Б.Г.** см. Агроскин В.Я.
- Бритвич Г.И.** см. Алферов В.Н.
- Бритвич Г.И.** см. Антипов Ю.М.
- Брызгин А.А.** см. Безуглов В.В.
- Будаговская О.Н., Будаговский А.В., Будаговский И.А.** Метод коррекции показаний при оценке контраста интерференционных полос с помощью 8-битовых веб-камер. № 3, 75.
- Будаговский А.В.** см. Будаговская О.Н.
- Будаговский И.А.** см. Будаговская О.Н.
- Бурдин В.В., Константинов Ю.А., Клюд Д., Латкин К.П., Белокрылов М.Е., Кривошеев А.И., Цибиногина М.К.** Многостадийный контроль качества активных волоконных световодов. № 5, 138.
- Буркин Е.Ю., Свиридов В.В., Чумерин П.Ю.** Импульсный магнетронный генератор сверхвысокой частоты на основе твердотельного коммутатора. № 3, 34.
- Буров С.Ю.** см. Андреев Ю.А.
- Буякас В.И.** см. Демихов Е.И.
- Бызов И.В.** см. Мысик А.А.
- Вагин В.А., Хорохорин А.И.** Трехканальный фурье-спектрометр. № 6, 130.
- Варламов Д.О.** см. Зуев С.М.
- Варлачев В.А.** см. Градобоев А.В.
- Варлачев В.А.** см. Дробышевский Ю.В.
- Варфоломеева Е.А.** см. Алексеев В.И.
- Варюхин Д.В.** см. Таряник Н.В.
- Варюхин Д.В., Таряник Н.В., Постол П.Н., Федюк Д.О.** Криомагнитная система со сверхпроводниковыми обмотками для магнитного сепаратора. № 6, 126.
- Васеленок А.А., Гурашвили В.А., Джигайло И.Д., Кириленко Д.А., Кондратенко А.К., Кузьмин В.Н., Немчинов В.С., Полтанов А.Е., Сень В.И., Туркин Н.Г.** Источник питания газоразрядного лазера на основе литий-полимерной аккумуляторной батареи. № 1, 81.
- Василенкова Т.В.** см. Ксенофонтов С.Ю.
- Васильев Г.К.** см. Агроскин В.Я.
- Васильев Д.А.** см. Алферов В.Н.
- Васильев И.А., Джилкибаев Р.М., Хлюстин Д.В.** Гамма-детектор установка ИНЕС для измерения нейтронных сечений. № 1, 56.
- Васильев М.Ю.** см. Бак П.А.
- Васин А.А.** см. Акимов Д.Ю.
- Васянович М.Е.** см. Назаров Е.И.
- Вафин И.Ю.** см. Мещеряков А.И.
- Вельмакин С.М.** см. Загнитько А.В.
- Веселовский И.А.** см. Драган С.П.
- Власов А.Ю.** см. Безуглов В.В.
- Волков Ю.О.** см. Тихонов А.М.
- Волкович А.Г., Игнатов С.М.** Одновременная регистрация спектров от нескольких детекторов гамма-излучения одним амплитудным анализатором. № 1, 153.
- Воробьев М.С.** см. Шин В.И.
- Воробьев Н.С.** см. Алабин К.А.
- Воробьев Н.С.** см. Андреев С.В.
- Воронин Л.А.** см. Безуглов В.В.
- Воронко А.И.** см. Котов В.М.
- Воропай Е.С., Ермалицкий Ф.А., Радько А.Е., Самцов М.П.** Пикосекундные лазерные диодные излучатели. № 2, 155.
- Вьюхин В.Н.** Измеритель малых токов с автономным питанием. № 4, 152.
- Гайдайчук А.В.** см. Линник С.А.
- Гайнулина Е.Ю., Корнев Н.С., Минеев К.В., Назаров А.В., Орехов Ю.И.** Применение линий передачи с малыми потерями в составе к.в.ч.-радиометра при проведении газодинамических экспериментов. № 1, 137.
- Галаванов А.В.** см. Акимов Д.Ю.
- Галахов И.В.** см. Арзев А.Г.
- Галеев Р.Г.** см. Беляев Б.А.
- Галуза А.А.** см. Дзюбенко М.И.
- Гальпер А.М.** см. Сучков С.И.
- Ганин Л.С.** см. Арзев А.Г.
- Гасанов А.Р., Гасанов Р.А., Ахмедов Р.А., Садыхов М.В.** Оптимизация эксплуатационных параметров акустооптической линии задержки. № 3, 82.
- Гасанов Р.А.** см. Гасанов А.Р.
- Геликонов Г.В.** см. Ксенофонтов С.Ю.
- Герасимов Д.П.** см. Баранов А.Г.
- Герасимова С.К., Гололобов П.Ю., Григорьев В.Г., Зверев А.С., Стародубцев С.А., Егоров А.Г., Неустроев Н.И., Михеев А.А., Сорокин Е.Е., Кармадонов А.Я., Пахмуллов А.В.** Мюонный телескоп на сцинтилляционных счетчиках. № 4, 65.
- Германенко А.В.** см. Михалко Е.А.
- Гижа С.С.** см. Андреев С.В.

- Гимадова Т.И.** см. Алукер Н.Л.
Гиппиус А.А. см. Демихов Е.И.
Гиппиус А.А. см. Журенко С.В.
Глазков В.П. см. Мурашев М.М.
Глинкин Е.В., Климов П.А., Мурашов А.С., Чернов Д.В. Детектор излучения атмосферы АУРА на основе кремниевых фотоумножителей для малых космических аппаратов типа кубсат. № 2, 121.
Глуховский Е.М., Егоров А.И., Карапетянц М.И. Разработка алгоритма кодирования звука для системы кохлеарной имплантации. № 4, 105.
Глявин М.Ю. см. Проявин М.Д.
Гололобов П.Ю. см. Герасимова С.К.
Горбатов С.А., Иванов И.А., Тихонов А.В., Тихонов В.Н., Шестериков А.Ю. Микроволновый источник нетермальной плазмы при атмосферном давлении. № 1, 155.
Горчаковский А.А. см. Беляев Б.А.
Госткин М.И., Донец Д.Е., Кобец В.В., Леушин Д.О., Ноздрин М.А., Понкин Д.О., Трифонов А.Н., Шириков И.В. Система автоматизированного управления магнитными элементами для фокусировки и коррекции положения пучка ускорителя ЛИНАК-200. № 3, 152.
Градобоев А.В., Бондаренко Е.А., Варлачев В.А., Емец Е.Г., Седнев В.В. Методика исследования стойкости светодиодов к облучению быстрыми нейтронами на реакторе ИРТ-Т. № 4, 129.
Градобоев А.В., Орлова К.Н., Симонова А.В., Седнев В.В. Имитация различных внешних воздействий на светодиоды схемным моделированием объемных каналов утечки тока. № 5, 90.
Грачев Е.Ю. см. Трубицын А.А.
Григорьев В.Г. см. Герасимова С.К.
Гришанин А.В. см. Арзев А.Г.
Гришина И.А. см. Мещеряков А.И.
Губер Ф.Ф. см. Баранов А.Г.
Гулин А.И. см. Артюхов А.В.
Гунбин А.В. см. Журенко С.В.
Гурашвили В.А. см. Васеленок А.А.
Гуров Ю.Б., Лапушкин С.В., Розов С.В., Сандуковский В.Г., Чернышев Б.А. Отбор событий в реакциях поглощения π^- - мезонов ядрами. № 4, 18.
Гурьев В.И. см. Агроскин В.Я.
Гурьева П.В., Марченков Н.В., Артемьев А.Н., Артемьев Н.А., Беляев А.Д., Демкив А.А., Шишков В.А. Спектрометр для исследований кристаллов методом дифракции синхротронного излучения на углы, близкие к обратным. № 2, 132.
Гусаков Ю.В. см. Акимов Д.Ю.
Гусс Д.В. см. Акимов Д.Ю.
Далечина А.В. см. Medjjadj T.
Далькаров О.Д. см. Сучков С.И.
Дахов Н.Ф. см. Дзюбенко М.И.
Девятков В.Н. см. Шин В.И.
Дегтярев Н.В. см. Рябов И.В.
Дементьев Д.В., Лыгденова Т.З., Харламов П.И. Исследование и оптимизация прототипа системы охлаждения модуля кремниевой трековой системы эксперимента VM@N. № 1, 47.
Демихов Е.И., Протопопов А.В., Дмитриев Д.С., Багдинова А.Н., Лысенко В.В., Рыбаков А.С., Константинов М.В., Ивлев Д.А., Буякас В.И., Гиппиус А.А. Радиочастотные катушки для магнитно-резонансного микроскопа на основе безгелиевого томографа с полем 1.5 Тл. № 1, 123.
Демкив А.А. см. Гурьева П.В.
Денисов Г.Г. см. Проявин М.Д.
Дербин А.В. см. Алексеев И.Е.
Джигайло И.Д. см. Васеленок А.А.
Джилкибаев Р.М. см. Васильев И.А.
Джилкибаев Р.М. Черенковский монитор протонного пучка. № 4, 10.
Дзюбенко М.И., Колонов И.В., Пелипенко В.П., Дахов Н.Ф., Галуза А.А. Блок питания для полупроводниковой системы накачки эрбий-иттербиевого лазера. № 1, 157.
Дмитриев А.М. см. Баженов А.Н.
Дмитриев Д.С. см. Демихов Е.И.
Долгих Г.И. см. Пивоваров А.А.
Донец Д.Е. см. Госткин М.И.
Дорошкевич С.Ю. см. Шин В.И.
Драган С.П. см. Богомоллов А.В.
Драган С.П., Веселовский И.А., Комаров Д.Б., Богомоллов А.В. Аппаратно-программный комплекс для экспериментального исследования поведенческих реакций лабораторных животных. № 6, 131.
Драчнев И.С. см. Алексеев И.Е.
Дробышевский Ю.В., Анфимов И.М., Варлачев В.А., Кобелева С.П., Некрасов С.А., Столбов С.Н. Анизотропные структуры для концентрации потоков тепловых нейтронов. № 1, 34.
Дронов В.А. см. Алексеев В.И.
Дронов В.А. см. Баранов А.Г.
Дулатов А.К. см. Юрков Д.И.
Егоров А.Г. см. Герасимова С.К.
Егоров А.И. см. Глуховский Е.М.
Егоров В.К., Егоров Е.В., Калинин Б.А., Сафонов Д.А. Неразрушающая элементная диагностика поверхности оболочек твэлов ионно-пучковыми и рентгеновскими аналитическими методами. № 1, 72.
Егоров Е.В. см. Егоров В.К.

- Екидин А.А.** см. Назаров Е.И.
Елисеев В.В. см. Арзев А.Г.
Елохин А.В. см. Болховская О.В.
Емец Е.Г. см. Градобоев А.В.
Епифанов Е.О. см. Минаев Н.В.
Епифанов Е.О., Мигаль Е.А., Потемкин Ф.В., Антошин А.А., Юсупов В.И., Минаев Н.В. Установка для формирования трехмерных структур методом двухфотонной фемтосекундной полимеризации с использованием пространственно-временной фокусировки. № 6, 107.
Еремкин В.В. см. Рыбин Ю.В.
Ермалицкий Ф.А. см. Воропай Е.С.
Ерушин Е.Ю. см. Бойко А.А.
Ефимченко В.С. см. Черткова Н.В.
Ефременко Ю.В. см. Акимов Д.Ю.
- Жаков С.В.** см. Мысик А.А.
Жамалетдинов Н.М. см. Потапов В.Т.
Жантуаров С.Р. см. Аймаганбетов К.П.
Жарков Я.Е., Ребров И.Е., Хомич В.Ю., Ямщиков В.А. Особенности работы коммутаторов на основе транзисторов в полумостовой схеме для формирования высоковольтных прямоугольных импульсов с высокой скоростью нарастания. № 6, 25.
Живанков К.И. см. Бак П.А.
Жидков Н.В., Поздняков Е.В., Суслов Н.А. Фокусировка рентгеновского излучения с энергией квантов 9.5 кэВ эллипсоидом с кристаллом HOPG. № 5, 110.
Жмодиков А.Л. см. Коротков С.В.
Журенко С.В., Ткачёв А.В., Гунбин А.В., Гишпиус А.А. Модернизация спектрометров ядерного магнитного резонанса Bruker на современной цифровой базе. № 3, 88.
- Завилопуло А.Н.** см. Шпеник О.Б.
Загнитько А.В., Зарецкий Н.П., Алексеев В.И., Вельмакин С.М., Мацуков И.Д., Сальников С.Е., Пименов В.В., Федин Д.Ю. Дистанционный анализатор криогенных паров и капель в выбросах сжиженного природного газа в атмосфере. № 4, 156.
Загрядский В.А., Кравец Я.М., Латушкин С.Т., Маламут Т.Ю., Новиков В.И., Рыжков А.В., Удалова Т.А., Унежев В.Н., Чувилин Д.Ю. Установка для извлечения радиоизотопов рения из облученной вольфрамовой мишени. № 4, 125.
Зарецкий Н.П. см. Загнитько А.В.
Заровский А.И. см. Алабин К.А.
Захарченко Е.С. см. Черткова Н.В.
Зверев А.С. см. Алукер Н.Л.
- Зверев А.С.** см. Герасимова С.К.
Зенкин С.П. см. Линник С.А.
Зимин И.Ю. см. Кузьмин Е.С.
Зотов А.А. см. Лубков А.А.
Зуев С.М., Варламов Д.О., Кукса В.В. К анализу характеристик лазерного осветительного устройства. № 6, 57.
Зуфаров М.А. см. Муминов Р.А.
- Иванов А.Д.** см. Юсипович А.И.
Иванов И.А. см. Горбатов С.А.
Иванов О.П., Игнатов С.М., Потапов В.Н., Самойлова М.А., Семин И.А. Гамма-сканер с антиколлиматором для визуализации источников γ -излучения. № 2, 115.
Иванов С.В. см. Антипов Ю.М.
Ивашкин А.П. см. Баранов А.Г.
Ивлев Д.А. см. Демихов Е.И.
Игнатов С.М. см. Волкович А.Г.
Игнатов С.М. см. Иванов О.П.
Известный А.В. см. Баранов А.Г.
Исмагилов Р.Р., Логинов А.Б., Малыхин С.А., Клещ В.И., Образцов А.Н. Анализ низкотемпературной плазмы методом оптической эмиссионной спектроскопии с пространственным сканированием. № 5, 67.
- Каблуков С.И.** см. Смолянинов Н.Н.
Калин Б.А. см. Егоров В.К.
Калинин В.А. см. Антипов Ю.М.
Калинкин П.Н. см. Назаров Е.И.
Кан Д.В. см. Макаренченко А.С.
Кандауров А.А., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И. Система для моделирования процессов генерации брызг при ветроволновом взаимодействии в лабораторных условиях. № 2, 148.
Капустин Ю.В. см. Рогов А.В.
Карамшук Е.В. см. Пальчикова И.Г.
Карапетянц М.И. см. Глуховский Е.М.
Кармадонов А.Я. см. Герасимова С.К.
Карнаушкин П.В., Константинов Ю.А. Экспериментальная методика юстировки соединения канального оптического волновода с волоконным световодом по отражениям от дальнего торца волновода. № 5, 78.
Карпушкин Н.М. см. Баранов А.Г.
Картаев В.Н. см. Арзев А.Г.
Каштанов С.А. см. Агроскин В.Я.
Квашнин А.Н. см. Филиппов М.В.
Кириленко Д.А. см. Васеленок А.А.
Кирпичев Ю.С. см. Medjiadj T.
Клещ В.И. см. Исмагилов Р.Р.
Климанов В.А. см. Medjiadj T.

- Климов П.А.** см. Глинкин Е.В.
- Климов П.А., Сигаева К.Ф., Шаракин С.А.** Полетная калибровка фотоприемника детектора ТУС. № 3, 112.
- Клод Д.** см. Бурдин В.В.
- Клоков А.Ю., Шарков А.И.** Формирователь импульсов управления электрооптическими модуляторами. № 2, 40.
- Кобелева С.П.** см. Дробышевский Ю.В.
- Кобец В.В.** см. Госткин М.И.
- Коваленко А.Г.** см. Акимов Д.Ю.
- Коваль А.Н.** см. Баженов А.Н.
- Коваль Н.Н.** см. Шин В.И.
- Коженков Е.В.** см. Арзев А.Г.
- Козлов А.А.** см. Акимов Д.Ю.
- Козлова Е.С.** см. Акимов Д.Ю.
- Кокарев А.О.** см. Болховская О.В.
- Кокин Е.Н.** см. Безуглов В.В.
- Коленов И.В.** см. Дзюбенко М.И.
- Колесников Я.А., Остринов Г.М., Пономарев П.Д., Савинов С.С., Таскаев С.Ю., Щудло И.М.** Измерение тока пучка ионов аргона, сопутствующего пучку протонов, в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией. № 4, 5.
- Колкер Д.Б.** см. Бойко А.А.
- Колобов В.В., Баранник М.Б.** Прецизионный малошумящий источник высокого напряжения. № 6, 15.
- Колосницын В.С.** см. Мочалов С.Э.
- Колосницын Д.В.** см. Мочалов С.Э.
- Кольцов А.В.** см. Алексеев В.И.
- Комаров Д.Б.** см. Драган С.П.
- Кондратенко А.К.** см. Васеленок А.А.
- Коновалов А.М.** см. Акимов Д.Ю.
- Константинов М.В.** см. Демихов Е.И.
- Константинов Ю.А.** см. Бурдин В.В.
- Константинов Ю.А.** см. Карнаушкин П.В.
- Константинов Ю.А.** см. Кривошеев А.И.
- Корнев Н.С.** см. Гайнулина Е.Ю.
- Корнеев В.С., Шергин С.Л.** Измерительный стенд для экспериментальных исследований динамических параметров микроэлектромеханических систем с электромагнитным управлением. № 4, 154.
- Корноухов В.Н.** см. Акимов Д.Ю.
- Коробейников М.В.** см. Безуглов В.В.
- Коротков Д.А.** см. Коротков С.В.
- Коротков С.В., Аристов Ю.В., Жмодиков А.Л., Коротков Д.А.** Высокоэффективный генератор мощных высоковольтных импульсов с микросекундной длительностью. № 3, 50.
- Коротков С.В., Жмодиков А.Л.** Мощный диодно-динисторный генератор для газоразрядных технологий. № 5, 49.
- Коротков С.В., Жмодиков А.Л., Коротков Д.А.** Высоковольтный тиристорный генератор мощных импульсов тока с субмикросекундным фронтом. № 3, 55.
- Коротков С.В., Жмодиков А.Л., Коротков Д.А.** Тиристорный генератор микросекундных прямоугольных импульсов высокого напряжения. № 3, 45.
- Коротков С.В., Кузнецов А.С., Аристов Ю.В.** Генератор мощных объемных разрядов наносекундной длительности. № 5, 53.
- Корсков И.В.** Аппаратурный комплекс для многочастотного акустического зондирования морской среды. № 2, 151.
- Костин М.Ю.** см. Алферов В.Н.
- Костюкова Н.Ю.** см. Бойко А.А.
- Котина И.М.** см. Алексеев И.Е.
- Котов В.М., Воронко А.И.** Акустооптический фильтр пространственных частот двухцветного излучения, оперирующий в первом дифракционном порядке. № 4, 54.
- Котов В.Н.** см. Лубков А.А.
- Котов Е.С.** см. Бак П.А.
- Кочубей Г.С.** см. Шувалов В.А.
- Кравец Я.М.** см. Загрядский В.А.
- Кравчук К.С.** см. Федоткин А.П.
- Красильщиков А.М.** см. Аруев П.Н.
- Креков А.В.** см. Арзев А.Г.
- Кремзуков Ю.А.** см. Андреев Ю.А.
- Кречетов Ю.Ф.** см. Алексеев В.И.
- Кривошеев А.И.** см. Бурдин В.В.
- Кривошеев А.И., Константинов Ю.А., Барков Ф.Л., Первадчук В.П.** Сравнительный анализ точности определения сдвига бриллюэновской частоты в экстремально зашумленных спектрах различными корреляционными методами. № 5, 84.
- Круглов А.А.** см. Кузьмин Е.С.
- Кружалов А.В.** см. Назаров Е.И.
- Крышталь Р.Г., Медведь А.В.** Динамические магнетонные кристаллы для измерения дисперсии объемных магнитостатических спиновых волн, обусловленных магнитной анизотропией в пленках железиттриевого граната. № 1, 116.
- Ксенофонтов А.И.** см. Medjiadj T.
- Ксенофонтов С.Ю., Купаев А.В., Василенкова Т.В., Терпелов Д.А., Шилиягин П.А., Моисеев А.А., Геликонов Г.В.** Высокопроизводительный модуль сбора данных и управления широкополосным спектрометром ближнего инфракрасного диапазона на основе интерфейса USB 3.0. № 5, 131.

- Кузнецов А.С. см. Коротков С.В.
 Кузьмин А.В. см. Стерлядкин В.В.
 Кузьмин В.В. см. Макаренченко А.С.
 Кузьмин В.Н. см. Васеленок А.А.
 Кузьмин Е.С., Бокучава Г.Д., Зимин И.Ю., Круглов А.А., Кучинский Н.А., Малышев В.Л. Монте-Карло-модель сцинтилляционного детектора нейтронов на основе литиевого стекла. № 2, 25.
 Кузьмин Е.С., Зимин И.Ю. Оптимизация структуры гетерогенного сцинтиллятора для регистрации тепловых нейтронов. № 5, 22.
 Кукса В.В. см. Зуев С.М.
 Куликовский К.В. см. Стерлядкин В.В.
 Кумпан А.В. см. Акимов Д.Ю.
 Кунцевич А.Ю. Простой подвижный металлографический микроскоп высокого увеличения. № 5, 156.
 Купаев А.В. см. Ксенофонов С.Ю.
 Куцаев С.В. Выбор ускоряющей структуры малогабаритного линейного ускорителя электронов для лучевой терапии. № 6, 84.
 Куцаев С.В. Новые технологии для создания малогабаритных линейных ускорителей электронов (обзор). № 5, 5.
 Кучинский Н.А. см. Кузьмин Е.С.
- Лавренин В.А. см. Юрков Д.И.
 Лактионов И.В. см. Федоткин А.П.
 Лаптиенко А.Я. см. Таряник Н.В.
 Лапушкин С.В. см. Гурув Ю.Б.
 Ларченко А.В. см. Пильгаев С.В.
 Латкин К.П. см. Бурдин В.В.
 Латушкин С.Т. см. Загрядский В.А.
 Лебедев О.П. см. Антипов Ю.М.
 Левин Г.Г. см. Юсипович А.И.
 Лемешко Б.Д. см. Юрков Д.И.
 Лемзяков С.А., Эдельман В.С. Низкотемпературные приемники излучения на основе рутений-оксидных резисторов. № 2, 143.
 Леушин Д.О. см. Госткин М.И.
 Линник С.А., Зенкин С.П., Гайдайчук А.В. Гетероэпитаксиальный рост алмаза из газовой фазы: проблемы и перспективы (обзор). № 2, 5.
 Липчак А.И., Барахвостов С.В. Исследование стабильности включения сильноточного импульсного ускорителя с оптическим управлением. № 3, 40.
 Лисин Д.В. Компактный приемопередатчик для организации резервной радиолнии управления научной аппаратурой при проведении космических экспериментов. № 5, 159.
 Литвин Ю.А. см. Черткова Н.В.
- Лихачева М.В. см. Стерлядкин В.В.
 Лобач И.А. см. Смолянинов Н.Н.
 Логинов А.Б. см. Исмагилов Р.Р.
 Лошилов А.Г. см. Тренкаль Е.И.
 Лубков А.А., Котов В.Н., Перебейнос С.В., Зотов А.А. Генератор высоковольтных биполярных импульсов. № 5, 57.
 Лукьяшин А.В. см. Акимов Д.Ю.
 Лутчев А.В. см. Алферов В.Н.
 Лучинин А.Г. см. Проявин М.Д.
 Лыгденова Т.З. см. Дементьев Д.В.
 Лысенко В.В. см. Демихов Е.И.
 Львов А.И. см. Алексеев В.И.
 Львов А.И. см. Баранов А.Г.
 Львов А.И. см. Сучков С.И.
 Людмирский Э.А. см. Антипов Ю.М.
- Макаров А.Н., Соколова Е.О., Таскаев С.Ю. Люминесценция литиевой мишени при облучении протонным пучком. № 1, 30.
 Макаров Е.Ф. см. Агроскин В.Я.
 Макаренченко А.С., Кузьмин В.В., Сафиуллин К.Р., Кан Д.В., Тагиров М.С. Криогенная очистка гелия и его использование для подготовки поляризационных ячеек и проведения неоптической поляризации ядер ^3He . № 6, 120.
 Максимов А.В. см. Антипов Ю.М.
 Максимов Г.В. см. Юсипович А.И.
 Максимов С.А. см. Безуглов В.В.
 Максумов О.С. см. Филиппов М.В.
 Маламут Т.Ю. см. Загрядский В.А.
 Маликов Е.Л. см. Сорокин В.Б.
 Малыхин С.А. см. Исмагилов Р.Р.
 Малышев В.Л. см. Кузьмин Е.С.
 Мальцев А.А. см. Болховская О.В.
 Малютин Н.Д. см. Тренкаль Е.И.
 Марабян А.С. см. Рыбин Ю.В.
 Маркелова Т.В. см. Снытников В.Н.
 Марков В.Г. см. Артюхов А.В.
 Мартыненко В.А. см. Арзев А.Г.
 Марченков Н.В. см. Гурьева П.В.
 Маслеников И.И. см. Федоткин А.П.
 Масюк Н.С. см. Снытников В.Н.
 Маурчев Е.А. см. Михалко Е.А.
 Махмутов В.С. см. Филиппов М.В.
 Мацуков И.Д. см. Загнитько А.В.
 Мачерет Я.М. см. Бак П.А.
 Медведь А.В. см. Крышталь Р.Г.
 Мелетов К.П. см. Черткова Н.В.
 Мещеряков А.И., Гришина И.А., Вафин И.Ю. К вопросу о существовании “рентгеновской ямы” в режимах омического и электронного цикло-

- тронного резонанса нагрева плазмы в стеллараторе Л-2М. № 5, 73.
- Мигаль Е.А.** см. Епифанов Е.О.
- Минаев В.Л.** см. Юсипович А.И.
- Минаев Н.В.** см. Епифанов Е.О.
- Минаев Н.В., Епифанов Е.О., Юсупов В.И.** Установка для лазерной инженерии микробиологических систем. № 3, 119.
- Минаев Н.В., Юсупов В.И.** Установка для лазерных волоконных перфораций биоматериалов. № 2, 128.
- Минеев К.В.** см. Гайнулина Е.Ю.
- Минченко А.В.** см. Антипов Ю.М.
- Мирошниченко И.Б.** см. Бойко А.А.
- Михайлов Ю.В.** см. Юрков Д.И.
- Михалко Е.А., Маурцев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В.** Направленный детектор нейтронов умеренных энергий. № 4, 89.
- Михальков Ю.М.** см. Андреев С.В.
- Михеев А.А.** см. Герасимова С.К.
- Моисеев А.А.** см. Ксенофонов С.Ю.
- Молодцов В.О., Смирнов В.Ю., Солнушин С.Д., Чихман В.Н.** Устройство ввода ответов для психофизических экспериментов. № 2, 153.
- Морозкин М.В.** см. Проявин М.Д.
- Морозов С.В.** см. Баранов А.Г.
- Москвин П.В.** см. Шин В.И.
- Мочалов С.Э., Антипин А.В., Нургалиев А.Р., Колосницын Д.В., Колосницын В.С.** Аппаратно-программный комплекс для исследования зарядно-разрядных характеристик вторичных химических источников тока. № 4, 133.
- Муллагалиева Ф.Г.** см. Муминов Р.А.
- Муминов Р.А., Раджапов С.А., Муллагалиева Ф.Г., Раджапов Б.С., Зуфаров М.А., Нурбоев К.М., Ахмедов Г.М.** Разработка высокоэффективных кремниевых детекторов и электронных блоков для радиометра α -излучения. № 3, 106.
- Мунтян А.Н., Петров С.И., Романова Н.М., Санкин Е.В.** Методика регистрации абсолютных потоков рентгеновского излучения лазерной плазмы в спектральном диапазоне 0.15–1.0 кэВ со спектральным $\lambda/\Delta\lambda \approx 20$ и временным 30 пс разрешениями. № 2, 65.
- Мунтян А.Н., Петров С.И., Романова Н.М., Таран С.С.** Методики измерения параметров распространения рентгеновского излучения в замкнутых полостях и определения времени теплового пробоя фольг. № 2, 100.
- Муратова В.Н.** см. Алексеев И.Е.
- Мурашев М.М., Глазков В.П., Эм В.Т.** Визуализация дифракционного контраста между ферритной и мартенситной фазами стали методом нейтронной радиографии. № 3, 147.
- Мурашов А.С.** см. Глинкин Е.В.
- Мускатиный В.Г.** см. Арзев А.Г.
- Мухин Е.Е.** см. Баженов А.Н.
- Мысик А.А., Бызов И.В., Жаков С.В.** Термостабилизация частоты протонного релаксометра на основе ядерного магнитного резонанса с магнитной системой на постоянных магнитах. № 6, 70.
- Назаров А.В.** см. Гайнулина Е.Ю.
- Назаров Е.И., Кружалов А.В., Екидин А.А., Васянович М.Е., Пархомчук В.В., Растигеев С.А., Калинин П.Н., Пархомчук Е.В.** Приборы и методы измерения ^{14}C (*обзор*). № 6, 8.
- Нам И.В.** см. Небесный А.Ф.
- Наумов Д.А.** см. Арзев А.Г.
- Наумов П.Ю.** см. Баранов А.Г.
- Небесный А.Ф., Нам И.В., Раджапов С.А., Пиндюрин Ю.С.** USB-анализатор для спектрометрии ядерных излучений. № 2, 157.
- Некрасов С.А.** см. Дробышевский Ю.В.
- Немаев Д.Ю.** см. Арзев А.Г.
- Немчинов В.С.** см. Васеленок А.А.
- Неустроев Н.И.** см. Герасимова С.К.
- Никитенко А.С.** см. Пильгаев С.В.
- Николаев А.В.** см. Аруев П.Н.
- Николаев Э.О.** см. Семенов А.П.
- Ниязова Н.В.** см. Алексеев И.Е.
- Новиков А.П.** см. Черткова Н.В.
- Новиков В.И.** см. Загрядский В.А.
- Новиков С.Г.** см. Сергеев В.А.
- Ноздрин М.А.** см. Госткин М.И.
- Нуждин А.Д.** см. Тихонов А.М.
- Нурбоев К.М.** см. Муминов Р.А.
- Нургалиев А.Р.** см. Мочалов С.Э.
- Образцов А.Н.** см. Исмагилов Р.Р.
- Оленина И.В.** см. Богомолов А.В.
- Орехов Ю.И.** см. Гайнулина Е.Ю.
- Орлова К.Н.** см. Градобоев А.В.
- Осин В.А.** см. Арзев А.Г.
- Остринов Г.М.** см. Колесников Я.А.
- Павленко А.В.** см. Бак П.А.
- Павлов О.А.** см. Бак П.А.
- Пак А.В.** см. Безуглов В.В.
- Пальчиков Е.И.** см. Пальчикова И.Г.
- Пальчикова И.Г., Карамшук Е.В., Смирнов Е.С., Пальчиков Е.И., Самойленко М.С.** Автономный спектральный осветительный прибор с функцией белого света с высоким индексом цветопередачи. № 3, 155.
- Паппе Н.Ю.** см. Сучков С.И.

- Пармон В.Н. см. Снытников В.Н.
 Пархомчук В.В. см. Назаров Е.И.
 Пархомчук Е.В. см. Назаров Е.И.
 Паршина Е.Ю. см. Юсипович А.И.
 Пахмуллов А.В. см. Герасимова С.К.
 Пелипенко В.П. см. Дзюбенко М.И.
 Первадчук В.П. см. Кривошеев А.И.
 Перебейнос С.В. см. Лубков А.А.
 Петров Д.Ю. см. Аруев П.Н.
 Петров С.И. см. Мунтян А.Н.
 Пивоваров А.А., Ярошук И.О., Долгих Г.И., Швырев А.Н., Самченко А.Н. Автономный акустический регистратор и его применение в составе гидрофизического комплекса. № 3, 123.
 Пильгаев С.В., Ларченко А.В., Федоренко Ю.В., Филатов М.В., Никитенко А.С. Трехкомпонентный приемник сигналов очень низкого частотного диапазона с прецизионной привязкой данных к Мировому Времени. № 5, 115.
 Пименов В.В. см. Загнитько А.В.
 Пиндюрин Ю.С. см. Небесный А.Ф.
 Пинчук А.В. см. Акимов Д.Ю.
 Пирутин С.К. см. Юсипович А.И.
 Пиршин И.В. см. Андреев С.В.
 Письменный Н.И. см. Шувалов В.А.
 Подзерко А.В. см. Afrasyab Khan
 Поздняков В.С. см. Тренкаль Е.И.
 Поздняков Е.В. см. Жидков Н.В.
 Полтанов А.Е. см. Васеленок А.А.
 Полянский В.В. см. Алексеев В.И.
 Полянский В.В. см. Баранов А.Г.
 Полянский В.В. см. Сучков С.И.
 Понкин Д.О. см. Госткин М.И.
 Пономарев П.Д. см. Колесников Я.А.
 Попик Т.Ю. см. Шпенник О.Б.
 Постол П.Н. см. Варюхин Д.В.
 Потапов В.Н. см. Иванов О.П.
 Потапов В.Т., Жамалетдинов Н.М. Возможности повышения точности измерений абсолютных расстояний методом спектральной низкокогерентной интерферометрии. № 4, 47.
 Потемкин Ф.В. см. Епифанов Е.О.
 Прокуратов И.А. см. Юрков Д.И.
 Протопопов А.В. см. Демихов Е.И.
 Проявин М.Д., Морозкин М.В., Лучинин А.Г., Глявин М.Ю., Денисов Г.Г. Экспериментальное исследование влияния профиля продольного распределения магнитного поля на выходные характеристики гиротрона. № 1, 102.
 Радаев О.А. см. Фролов И.В.
 Раджапов Б.С. см. Муминов Р.А.
 Раджапов С.А. см. Муминов Р.А.
 Раджапов С.А. см. Небесный А.Ф.
 Радченко В.М. см. Безуглов В.В.
 Радько А.Е. см. Воропай Е.С.
 Разин В.И. К вопросу о механизмах пробоя в микроструктурных газовых детекторах (*обзор*). № 6, 5.
 Разуваева О.Е. см. Акимов Д.Ю.
 Растигеев С.А. см. Назаров Е.И.
 Ребров И.Е. см. Жарков Я.Е.
 Резвов Ю.Г. см. Антонов С.Н.
 Решетин А.И. см. Баранов А.Г.
 Рогов А.В., Капустин Ю.В. Разработка системы плазменной очистки входного зеркала оптической диагностики ИТЭР “Активная спектроскопия” на основе разряда с сеточным полым катодом. № 3, 60.
 Рожков А.В. Высоковольтный высокочастотный генератор субнаносекундных импульсов на основе арсенид-галлиевых дрейфовых диодов с резким восстановлением. № 5, 46.
 Розов С.В. см. Гуров Ю.Б.
 Романова Н.М. см. Мунтян А.Н.
 Рошин Б.С. см. Тихонов А.М.
 Рудик Д.Г. см. Акимов Д.Ю.
 Рыбаков А.С. см. Демихов Е.И.
 Рыбин Ю.В., Еремкин В.В., Мараян А.С. Генератор высоковольтных импульсов с фронтом субнаносекундной длительности, формируемым гиромангнитной передающей линией. № 1, 88.
 Рыжков А.В. см. Загрядский В.А.
 Рютин С.Б. Установка для исследования нестационарного теплообмена в жидких средах. № 5, 152.
 Рябов И.В., Стрельников И.В., Дегтярев Н.В. Высокочастотный цифровой вычислительный синтезатор сложных широкополосных сигналов для телекоммуникационных систем. № 4, 23.
 Савинов С.С. см. Колесников Я.А.
 Садыхов М.В. см. Гасанов А.Р.
 Салахутдинов Г.Х. см. Баранов А.Г.
 Сальников С.Е. см. Загнитько А.В.
 Самодуров П.С. см. Хамдохов З.М.
 Самойленко М.С. см. Пальчикова И.Г.
 Самойлова М.А. см. Иванов О.П.
 Самсонов Д.С. см. Баженов А.Н.
 Самцов М.П. см. Воропай Е.С.
 Самченко А.Н. см. Пивоваров А.А.
 Сандуковский В.Г. см. Гуров Ю.Б.
 Санкин Е.В. см. Мунтян А.Н.
 Сафиуллин К.Р. см. Макараченко А.С.
 Сафонов Д.А. см. Егоров В.К.
 Сафонов О.Г. см. Черткова Н.В.

- Свиридов В.В.** см. Арзев А.Г.
Свиридов В.В. см. Буркин Е.Ю.
Седнев В.В. см. Градобоев А.В.
Семенов А.П., Семенова И.А., Цыренов Д.Б.-Д., Николаев Э.О. Физическое распыление медного анода планарного магнетрона пучком ускоренных ионов аргона энергией 1–10 кэВ. № 4, 44.
Семенов Д.А. см. Алексеев И.Е.
Семенова И.А. см. Семенов А.П.
Семин И.А. см. Иванов О.П.
Сенков В.М. см. Андреев С.В.
Сенченко А.И. см. Бак П.А.
Сень В.И. см. Васеленок А.А.
Сергеев В.А. см. Фролов И.В.
Сергеев В.А., Беринцев А.В., Новиков С.Г., Фролов И.В. Измерение температурного сдвига спектра излучения светодиодов при их включении с помощью фотоприемной КМОП-матрицы. № 1, 107.
Сергеев В.С. см. Болховская О.В.
Сергеев Д.А. см. Кандауров А.А.
Середняков С.С. см. Бак П.А.
Сигаева К.Ф. см. Климов П.А.
Сидорин С.С. см. Алексеев В.И.
Сидоров А.В. см. Безуглов В.В.
Сиксин В.В. Особенности совместной работы координатно-чувствительной камеры на “теплой жидкости” и детектора телевизионного типа. № 1, 66.
Симаков Г.Е. см. Акимов Д.Ю.
Симонова А.В. см. Градобоев А.В.
Смирнов А.В. см. Андреев С.В.
Смирнов В.Ю. см. Молодцов В.О.
Смирнов Е.С. см. Пальчикова И.Г.
Смолина Е.В. Способ передачи сигнала в условиях высокого уровня помех со стороны мощной плазменной установки. № 2, 139.
Смолянинов Н.Н., Ткаченко А.Ю., Лобач И.А., Каблуков С.И. Модуль обработки оптических сигналов с устройств на основе волоконного лазера с самосканированием частоты. № 2, 76.
Снытников В.Н., Снытников Вл.Н., Масюк Н.С., Маркелова Т.В., Пармон В.Н. Стенд лазерного катализа. № 3, 129.
Снытников Вл.Н. см. Снытников В.Н.
Сокол-Кутыловский О.Л. Магнитный шум феррозондов и магнитомодуляционных датчиков с аморфным ферромагнитным сердечником. № 5, 126.
Соколова Е.О. см. Макаров А.Н.
Солдатов А.П. см. Антипов Ю.М.
Солнушин С.Д. см. Молодцов В.О.
Сорокин В.Б., Маликов Е.Л. Определение размера фокусного пятна тормозного излучения бетатрона с использованием коллиматоров. № 3, 138.
Сорокин Е.Е. см. Герасимова С.К.
Сорокин И.С. см. Болховская О.В.
Сосновцев В.В. см. Акимов Д.Ю.
Сотниченко С.А. см. Агроскин В.Я.
Спивак А.В. см. Черткова Н.В.
Спиридонов Е.К. см. Afrasyab Khan
Спирин А.А. см. Болховская О.В.
Стародубцев С.А. см. Герасимова С.К.
Стерлядкин В.В., Куликовский К.В., Кузьмин А.В., Шарков Е.А., Лихачева М.В. Струнный волнограф с инфракрасной регистрацией длины струн. № 4, 119.
Стожков Ю.И. см. Филиппов М.В.
Столбов С.Н. см. Дробышевский Ю.В.
Стрельников И.В. см. Рябов И.В.
Суслов Н.А. см. Жидков Н.В.
Сухинец Ж.А. см. Артюхов А.В.
Сухих А.В. см. Алферов В.Н.
Сучков С.И., Архангельский А.И., Басков В.А., Гальпер А.М., Далькаров О.Д., Львов А.И., Паппе Н.Ю., Полянский В.В., Топчиев Н.П., Чернышева И.В. Калибровка макета калориметра гамма-телескопа ГАММА-400 на пучке позитронов ускорителя “Пахра”. № 5, 34.
Тагиров М.С. см. Макаренченко А.С.
Таран С.С. см. Мунтян А.Н.
Таряник Н.В. см. Варюхин Д.В.
Таряник Н.В., Варюхин Д.В., Лаптиенко А.Я., Федюк Д.О. Магнитные системы для радиоспектрометра электронного парамагнитного резонанса. № 3, 95.
Таскаев С.Ю. см. Колесников Я.А.
Таскаев С.Ю. см. Макаров А.Н.
Терпелов Д.А. см. Ксенофонтов С.Ю.
Теруков Е.И. см. Аймаганбетов К.П.
Тихонов А.В. см. Горбатов С.А.
Тихонов А.М., Асадчиков В.Е., Волков Ю.О., Нурдин А.Д., Рошин Б.С. Термостатная камера для рентгеновских исследований тонкопленочных структур на жидких подложках. № 1, 146.
Тихонов В.Н. см. Горбатов С.А.
Ткачёв А.В. см. Журенко С.В.
Ткаченко А.Ю. см. Смолянинов Н.Н.
Ткаченко В.О. см. Безуглов В.В.
Токмак Н.А. см. Шувалов В.А.
Токмолдин Н.С. см. Аймаганбетов К.П.
Толстяков С.Ю. см. Баженов А.Н.
Топчиев Н.П. см. Сучков С.И.

- Тренкаль Е.И., Поздняков В.С., Лоцилов А.Г., Малютин Н.Д.** Стенд для исследования обратного рассеяния радиочастотных импульсов. № 6, 41.
- Трифонов А.Н.** см. Госткин М.И.
- Троицкая Ю.И.** см. Кандауров А.А.
- Трубицын А.А., Грачев Е.Ю.** Цифровой детектор рентгеновских изображений. № 6, 63.
- Трушин М.В.** см. Алексеев И.Е.
- Туркин Н.Г.** см. Васеленок А.А.
- Турьянский А.Г.** см. Андреев С.В.
- Удалова Т.А.** см. Загрядский В.А.
- Унежев В.Н.** см. Загрядский В.А.
- Унжаков Е.В.** см. Алексеев И.Е.
- Усеинов А.С.** см. Федоткин А.П.
- Фатькин Г.А.** см. Бак П.А.
- Федин Д.Ю.** см. Загнисько А.В.
- Федоренко Ю.В.** см. Пильгаев С.В.
- Федорченко В.Н.** см. Алферов В.Н.
- Федоткин А.П., Лактионов И.В., Кравчук К.С., Маслеников И.И., Усеинов А.С.** Автоматическая обработка отпечатков микротвердомеров методами компьютерного зрения. № 3, 20.
- Федотова Г.В.** см. Хамдохов З.М.
- Федюк Д.О.** см. Варюхин Д.В.
- Федюк Д.О.** см. Таряник Н.В.
- Филатов М.В.** см. Пильгаев С.В.
- Филиппов М.В., Махмутов В.С., Квашнин А.Н., Максумов О.С., Стожков Ю.И., Raulin J.-P., Tacza J.** Наземная установка для детектирования космических лучей "Гамма-спектрометр" в астрономическом комплексе CASLEO. № 4, 74.
- Фишман Р.И.** см. Андреев С.В.
- Фролов И.В.** см. Сергеев В.А.
- Фролов И.В., Сергеев В.А., Радаев О.А.** Измерение профиля распределения граничных частот электролюминесценции по площади светоизлучающей гетероструктуры. № 2, 88.
- Фролов О.В.** см. Арзев А.Г.
- Хабарова Д.Ф.** см. Afrasyab Khan
- Хамдохов З.М., Федотова Г.В., Самодуров П.С., Шерметова М.А.** Холодные катоды на основе сборки микроканальных пластин для маломощных рентгеновских трубок. № 1, 112.
- Хапугин А.А.** см. Арзев А.Г.
- Харламов П.И.** см. Дементьев Д.В.
- Харлов А.В.** Многокулонные газовые разрядники и их применение в импульсной технике (обзор). № 1, 5.
- Хитев Г.В.** см. Антипов Ю.М.
- Хлюстин Д.В.** см. Васильев И.А.
- Хомич В.Ю.** см. Жарков Я.Е.
- Хорохорин А.И.** см. Вагин В.А.
- Хромов А.В.** см. Акимов Д.Ю.
- Цибинोगина М.К.** см. Бурдин В.В.
- Цыренов Д.Б.-Д.** см. Семенов А.П.
- Черниченко С.К.** см. Алферов В.Н.
- Чернов Д.В.** см. Глинкин Е.В.
- Чернышев Б.А.** см. Гуров Ю.Б.
- Чернышев Ю.А.** см. Агроскин В.Я.
- Чернышева И.В.** см. Сучков С.И.
- Черткова Н.В., Спивак А.В., Захарченко Е.С., Литвин Ю.А., Сафонов О.Г., Новиков А.П., Ефимченко В.С., Мелетов К.П.** Установка высокого давления с внешним нагревом для in situ исследований фазовых переходов. № 3, 158.
- Чихман В.Н.** см. Молодцов В.О.
- Чмель Е.А.** см. Алексеев И.Е.
- Чувилин Д.Ю.** см. Загрядский В.А.
- Чумерин П.Ю.** см. Буркин Е.Ю.
- Шакиров А.В.** см. Акимов Д.Ю.
- Шаракин С.А.** см. Климов П.А.
- Шарков А.И.** см. Клоков А.Ю.
- Шарков Е.А.** см. Стерлядкин В.В.
- Шашков Е.В.** см. Андреев С.В.
- Швырев А.Н.** см. Пивоваров А.А.
- Шергин С.Л.** см. Корнеев В.С.
- Шерметова М.А.** см. Хамдохов З.М.
- Шерстнев Е.В.** см. Аруев П.Н.
- Шестериков А.Ю.** см. Горбатов С.А.
- Шилягин П.А.** см. Ксенофонтов С.Ю.
- Шин В.И., Москвин П.В., Воробьев М.С., Девятков В.Н., Дорошкевич С.Ю., Коваль Н.Н.** Повышение электрической прочности ускоряющего зазора в источнике электронов с плазменным катодом. № 2, 69.
- Шириков И.В.** см. Госткин М.И.
- Шишков В.А.** см. Гурьева П.В.
- Шошин Е.Л.** Дискретные поляризационные модуляторы радиолокационных сигналов. № 6, 33.
- Шпеник О.Б., Попик Т.Ю., Завилопуло А.Н.** Коаксиальный цилиндрический электростатический анализатор энергии электронов (спиратрон) и его характеристики. № 3, 68.
- Штарклев Е.А.** см. Безуглов В.В.
- Штро К.С.** см. Бак П.А.
- Шувалов В.А., Токмак Н.А., Письменный Н.И., Кочубей Г.С.** Физическое моделирование воздействия атомарного кислорода ионосферы

- Земли на полимеры космических аппаратов.
№ 4, 79.
- Щудло И.М.** см. Колесников Я.А.
- Эдельман В.С.** см. Лемзяков С.А.
- Эм В.Т.** см. Мурашев М.М.
- Этенко А.В.** см. Акимов Д.Ю.
- Юрков Д.И., Лавренин В.А., Лемешко Б.Д., Михайлов Ю.В., Прокуратов И.А., Дулатов А.К.**
Генератор газа на основе пористого титана в составе отпаянных камер плазменного фокуса.
№ 6, 47.
- Юсипович А.И., Паршина Е.Ю., Байжуманов А.А., Пирутин С.К., Иванов А.Д., Минаев В.Л., Левин Г.Г., Максимов Г.В.** Использование лазерного интерференционного микроскопа для оценки флуктуаций и эквивалентной константы упругости мембран клеток. № 6, 93.
- Юсупов В.И.** см. Епифанов Е.О.
- Юсупов В.И.** см. Минаев Н.В.
- Ямщиков В.А.** см. Жарков Я.Е.
- Янович А.А.** см. Алферов В.Н.
- Ярощук И.О.** см. Пивоваров А.А.

**УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ ЖУРНАЛА
“ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА”
ЗА 2021 ГОД**

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

DOI: 10.31857/S0032816221060227

Номер Стр.

ОБЗОРЫ

Многокулонные газовые разрядники и их применение в импульсной технике. <i>Харлов А.В.</i>	1	5
Гетероэпитаксиальный рост алмаза из газовой фазы: проблемы и перспективы. <i>Линник С.А., Зенкин С.П., Гайдайчук А.В.</i>	2	5
Новые технологии для создания малогабаритных линейных ускорителей электронов. <i>Куцаев С.В.</i>	5	5
К вопросу о механизмах пробоя в микроструктурных газовых детекторах. <i>Разин В.И.</i>	6	5
Приборы и методы измерения ¹⁴ C. <i>Назаров Е.И., Кружалов А.В., Екидин А.А., Васянович М.Е., Пархомчук В.В., Растигеев С.А., Калинин П.Н., Пархомчук Е.В.</i>	6	8

УСКОРИТЕЛИ И ПУЧКИ ЧАСТИЦ

Люминесценция литиевой мишени при облучении протонным пучком. <i>Макаров А.Н., Соколова Е.О., Таскаев С.Ю.</i>	1	30
Импульсный источник питания для ускорителей серии ИЛУ на основе емкостных накопителей. <i>Безуглов В.В., Брызгин А.А., Власов А.Ю., Воронин Л.А., Коробейников М.В., Максимов С.А., Пак А.В., Радченко В.М., Сидоров А.В., Ткаченко В.О., Штарклев Е.А.</i>	2	44
Комплекс цифровой осциллографии ускорителя ЛИУ-20. <i>Бак П.А., Батраков А.М., Бехтенёв Е.А., Васильев М.Ю., Живанков К.И., Котов Е.С., Мачерет Я.М., Павленко А.В., Павлов О.А., Сенченко А.И., Середняков С.С., Фаткин Г.А., Штро К.С.</i>	2	49
Медленный вывод пучка ядер углерода из синхротрона У-70. <i>Антипов Ю.М., Бритвич Г.И., Иванов С.В., Калинин В.А., Лебедев О.П., Людмирский Э.А., Максимов А.В., Минченко А.В., Солдатов А.П., Хитев Г.В.</i>	3	5
Исследование стабильности включения сильноточного импульсного ускорителя с оптическим управлением. <i>Липчак А.И., Барахвостов С.В.</i>	3	40
Определение размера фокусного пятна тормозного излучения бетатрона с использованием коллиматоров. <i>Сорокин В.Б., Маликов Е.Л.</i>	3	138
Система автоматизированного управления магнитными элементами для фокусировки и коррекции положения пучка ускорителя ЛИНАК-200. <i>Госткин М.И., Донец Д.Е., Кобец В.В., Леушин Д.О., Ноздрин М.А., Понкин Д.О., Трифонов А.Н., Шириков И.В.</i>	3	152

Измерение тока пучка ионов аргона, сопутствующего пучку протонов, в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией. <i>Колесников Я.А., Остреинов Г.М., Пономарев П.Д., Савинов С.С., Таскаев С.Ю., Щудло И.М.</i>	4	5
Черенковский монитор протонного пучка. <i>Джилкибаев Р.М.</i>	4	10
Новые технологии для создания малогабаритных линейных ускорителей электронов (<i>обзор</i>). <i>Куцаев С.В.</i>	5	5
Выбор ускоряющей структуры малогабаритного линейного ускорителя электронов для лучевой терапии. <i>Куцаев С.В.</i>	6	84

НЕЙТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

Анизотропные структуры для концентрации потоков тепловых нейтронов. <i>Дробышевский Ю.В., Анфимов И.М., Варлачев В.А., Кобелева С.П., Некрасов С.А., Столбов С.Н.</i>	1	34
Неразрушающая элементная диагностика поверхности оболочек твэлов ионно-пучковыми и рентгеновскими аналитическими методами. <i>Егоров В.К., Егоров Е.В., Калинин Б.А., Сафонов Д.А.</i>	1	72
Монте-Карло-модель сцинтилляционного детектора нейтронов на основе литиевого стекла. <i>Кузьмин Е.С., Бокучава Г.Д., Зимин И.Ю., Круглов А.А., Кучинский Н.А., Малышев В.Л.</i>	2	25
Оптимизация структуры гетерогенного сцинтиллятора для регистрации тепловых нейтронов. <i>Кузьмин Е.С., Зимин И.Ю.</i>	5	22
Генератор газа на основе пористого титана в составе отпаянных камер плазменного фокуса. <i>Юрков Д.И., Лаврентин В.А., Лемешко Б.Д., Михайлов Ю.В., Прокуратов И.А., Дулатов А.К.</i>	6	47

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЧАСТИЦ

Сцинтилляционный годоскопический спектрометр. <i>Алексеев В.И., Басков В.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кольцов А.В., Кречетов Ю.Ф., Полянский В.В., Сидорин С.С.</i>	1	40
Энергетические характеристики многоканального сцинтилляционного спектрометра. <i>Алексеев В.И., Басков В.А., Варфоломеева Е.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кольцов А.В., Кречетов Ю.Ф., Полянский В.В., Сидорин С.С.</i>	5	28

ДЕТЕКТОРЫ ЧАСТИЦ

Гамма-детектор установка ИНЕС для измерения нейтронных сечений. <i>Васильев И.А., Джилкибаев Р.М., Хлюстин Д.В.</i>	1	56
Особенности совместной работы координатно-чувствительной камеры на “теплой жидкости” и детектора телевизионного типа. <i>Сиксин В.В.</i>	1	66
Кремниевый 4π-спектрометр электронов β-распада с энергией до 3 МэВ. <i>Алексеев И.Е., Бахланов С.В., Дербин А.В., Драчнев И.С., Котина И.М., Муратова В.Н., Ниязова Н.В., Семенов Д.А., Трушин М.В., Унжаков Е.В., Чмель Е.А.</i>	2	19
Монте-Карло-модель сцинтилляционного детектора нейтронов на основе литиевого стекла. <i>Кузьмин Е.С., Бокучава Г.Д., Зимин И.Ю., Круглов А.А., Кучинский Н.А., Малышев В.Л.</i>	2	25

Пассивная защита нейтринного детектора РЭД-100.

<i>Акимов Д.Ю., Александров И.С., Белов В.А., Болоздыня А.И., Ефременко Ю.В., Этенко А.В., Галаванов А.В., Гусс Д.В., Гусаков Ю.В., Kdib Dj. E., Хромов А.В., Коновалов А.М., Корноухов В.Н., Коваленко А.Г., Козлов А.А., Козлова Е.С., Кумпан А.В., Лукьяшин А.В., Пинчук А.В., Разуваева О.Е., Рудик Д.Г., Шакиров А.В., Симаков Г.Е., Сосновцев В.В., Васин А.А.</i>	2	32
---	---	----

USB-анализатор для спектрометрии ядерных излучений.

<i>Небесный А.Ф., Нам И.В., Раджапов С.А., Пиндюрин Ю.С.</i>	2	157
---	---	-----

Отбор событий в реакциях поглощения π^- - мезонов ядрами.

<i>Гуров Ю.Б., Лапушкин С.В., Розов С.В., Сандуковский В.Г., Чернышев Б.А.</i>	4	18
---	---	----

Направленный детектор нейтронов умеренных энергий.

<i>Михалко Е.А., Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В.</i>	4	89
---	---	----

Калибровка макета калориметра гамма-телескопа ГАММА-400
на пучке позитронов ускорителя "Пахра".

<i>Сучков С.И., Архангельский А.И., Басков В.А., Гальпер А.М., Далькаров О.Д., Львов А.И., Паппе Н.Ю., Полянский В.В., Топчиев Н.П., Чернышева И.В.</i>	5	34
--	---	----

Передние годоскопы заряженных фрагментов ядер для эксперимента VM@N.

<i>Баранов А.Г., Басков В.А., Герасимов Д.П., Губер Ф.Ф., Дронов В.А., Ивашкин А.П., Известный А.В., Карпушкин Н.М., Львов А.И., Морозов С.В., Наумов П.Ю., Полянский В.В., Решетин А.И., Салахутдинов Г.Х.</i>	5	42
--	---	----

К вопросу о механизмах пробоя в микроструктурных газовых детекторах (обзор).

<i>Разин В.И.</i>	6	5
------------------------	---	---

ТРЕКОВЫЕ СИСТЕМЫИсследование и оптимизация прототипа системы охлаждения модуля
кремниевой трековой системы эксперимента VM@N.

<i>Дементьев Д.В., Лыгденова Т.З., Харламов П.И.</i>	1	47
---	---	----

Амплитудные параметры прототипов передних годоскопов для эксперимента VM@N.

<i>Баранов А.Г., Губер Ф.Ф., Ивашкин А.П., Известный А.В., Морозов С.В., Решетин А.И., Басков В.А., Дронов В.А., Львов А.И., Полянский В.В., Салахутдинов Г.Х., Наумов П.Ю.</i>	3	15
--	---	----

**ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ
И ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ**

Автоматическая обработка отпечатков микротвердомеров методами компьютерного зрения.

<i>Федоткин А.П., Лактионов И.В., Кравчук К.С., Маслеников И.И., Усеинов А.С.</i>	3	20
--	---	----

РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА**Усилители, измерители, преобразователи, источники питания**Источник питания газоразрядного лазера на основе литий-полимерной
аккумуляторной батареи.

<i>Васеленок А.А., Гурашвили В.А., Джигайло И.Д., Кириленко Д.А., Кондратенко А.К., Кузьмин В.Н., Немчинов В.С., Полтанов А.Е., Сень В.И., Туркин Н.Г.</i>	1	81
---	---	----

Блок питания для полупроводниковой системы накачки
эрбий-иттербиевого лазера.

<i>Дзюбенко М.И., Коленов И.В., Пелипенко В.П., Дахов Н.Ф., Галуза А.А.</i>	1	157
--	---	-----

Способ передачи сигнала в условиях высокого уровня помех со стороны мощной плазменной установки.		
<i>Смолина Е.В.</i>	2	139
Программно-аппаратный комплекс для проектирования и натурно-модельных испытаний широкополосных систем радиосвязи, радиолокации и навигации высокоскоростных объектов.		
<i>Болховская О.В., Елохин А.В., Кокарев А.О., Сергеев В.С., Сорокин И.С., Спирин А.А., Мальцев А.А.</i>	3	27
Высокочастотный цифровой вычислительный синтезатор сложных широкополосных сигналов для телекоммуникационных систем.		
<i>Рябов И.В., Стрельников И.В., Дегтярев Н.В.</i>	4	23
Измеритель малых токов с автономным питанием.		
<i>Вьюхин В.Н.</i>	4	152
Прецизионный малошумящий источник высокого напряжения.		
<i>Колобов В.В., Баранник М.Б.</i>	6	15
Щитовой измеритель напряжения и силы постоянного тока повышенной точности.		
<i>Андреев Ю.А., Буров С.Ю., Кремзуков Ю.А.</i>	6	133

Импульсная техника

Многокулонные газовые разрядники и их применение в импульсной технике (<i>обзор</i>).		
<i>Харлов А.В.</i>	1	5
Генератор высоковольтных импульсов с фронтом субнаносекундной длительности, формируемым гиромангнитной передающей линией.		
<i>Рыбин Ю.В., Еремкин В.В., Марабян А.С.</i>	1	88
Разработка трехмодуляторной системы импульсного питания ускорителя электронов ИЛУ-14.		
<i>Безуглов В.В., Брызгин А.А., Власов А.Ю., Воронин Л.А., Кокин Е.Н., Коробейников М.В., Сидоров А.В., Ткаченко В.О., Штарклев Е.А.</i>	1	93
Формирователь импульсов управления электрооптическими модуляторами.		
<i>Клоков А.Ю., Шарков А.И.</i>	2	40
Импульсный источник питания для ускорителей серии ИЛУ на основе емкостных накопителей.		
<i>Безуглов В.В., Брызгин А.А., Власов А.Ю., Воронин Л.А., Коробейников М.В., Максимов С.А., Пак А.В., Радченко В.М., Сидоров А.В., Ткаченко В.О., Штарклев Е.А.</i>	2	44
Комплекс цифровой осциллографии ускорителя ЛИУ-20.		
<i>Бак П.А., Батраков А.М., Бехтенёв Е.А., Васильев М.Ю., Живанков К.И., Котов Е.С., Мачерет Я.М., Павленко А.В., Павлов О.А., Сенченко А.И., Середняков С.С., Фатькин Г.А., Штро К.С.</i>	2	49
Импульсный магнетронный генератор сверхвысокой частоты на основе твердотельного коммутатора.		
<i>Буркин Е.Ю., Свиридов В.В., Чумерин П.Ю.</i>	3	34
Исследование стабильности включения сильноточного импульсного ускорителя с оптическим управлением.		
<i>Липчак А.И., Барахвостов С.В.</i>	3	40
Тиристорный генератор микросекундных прямоугольных импульсов высокого напряжения.		
<i>Коротков С.В., Жмодиков А.Л., Коротков Д.А.</i>	3	45
Высокоэффективный генератор мощных высоковольтных импульсов с микросекундной длительностью.		
<i>Коротков С.В., Аристов Ю.В., Жмодиков А.Л., Коротков Д.А.</i>	3	50

Высоковольтный тиристорный генератор мощных импульсов тока с субмикросекундным фронтом. <i>Коротков С.В., Жмодиков А.Л., Коротков Д.А.</i>	3	55
Коммутаторы импульсов тока на основе реверсивно-включаемых динисторов для мощных электрофизических установок. <i>Арзев А.Г., Галахов И.В., Ганин Л.С., Гришанин А.В., Елисеев В.В., Картаев В.Н., Коженков Е.В., Креков А.В., Мартыненко В.А., Мускатиньев В.Г., Наумов Д.А., Немаев Д.Ю., Осин В.А., Свиридов В.В., Фролов О.В., Хапугин А.А.</i>	4	33
Высоковольтный высокочастотный генератор субнаносекундных импульсов на основе арсенид-галлиевых дрейфовых диодов с резким восстановлением. <i>Рожков А.В.</i>	5	46
Мощный диодно-динисторный генератор для газоразрядных технологий. <i>Коротков С.В., Жмодиков А.Л.</i>	5	49
Генератор мощных объемных разрядов наносекундной длительности. <i>Коротков С.В., Кузнецов А.С., Аристов Ю.В.</i>	5	53
Генератор высоковольтных биполярных импульсов. <i>Лубков А.А., Котов В.Н., Перебийнос С.В., Зотов А.А.</i>	5	57
Особенности работы коммутаторов на основе транзисторов в полумостовой схеме для формирования высоковольтных прямоугольных импульсов с высокой скоростью нарастания. <i>Жарков Я.Е., Ребров И.Е., Хомич В.Ю., Ямщиков В.А.</i>	6	25

С.в.ч.-техника

Экспериментальное исследование влияния профиля продольного распределения магнитного поля на выходные характеристики гиротрона. <i>Проявин М.Д., Морозкин М.В., Лучинин А.Г., Глявин М.Ю., Денисов Г.Г.</i>	1	102
Применение линий передачи с малыми потерями в составе к.в.ч.-радиометра при проведении газодинамических экспериментов. <i>Гайнулина Е.Ю., Корнев Н.С., Минеев К.В., Назаров А.В., Орехов Ю.И.</i>	1	137
Импульсный магнетронный генератор сверхвысокой частоты на основе твердотельного коммутатора. <i>Буркин Е.Ю., Свиридов В.В., Чумерин П.Ю.</i>	3	34
Дискретные поляризационные модуляторы радиолокационных сигналов. <i>Шошин Е.Л.</i>	6	33
Стенд для исследования обратного рассеяния радиочастотных импульсов. <i>Тренкаль Е.И., Поздняков В.С., Лоцилов А.Г., Малютин Н.Д.</i>	6	41

ПЛАЗМЕННЫЕ И ИОННЫЕ ПРИБОРЫ

Архитектура гибридного матричного высокоскоростного детектора формата 32 × 32 для спектрального диапазона вакуумный ультрафиолет–жесткий рентген. <i>Аруев П.Н., Бобашев С.В., Красильщиков А.М., Николаев А.В., Петров Д.Ю., Шерстнев Е.В.</i>	1	98
Микроволновый источник нетермальной плазмы при атмосферном давлении. <i>Горбатов С.А., Иванов И.А., Тихонов А.В., Тихонов В.Н., Шестериков А.Ю.</i>	1	155
Методика регистрации абсолютных потоков рентгеновского излучения лазерной плазмы в спектральном диапазоне 0.15–1.0 кэВ со спектральным $\lambda/\Delta\lambda \approx 20$ и временным 30 пс разрешениями <i>Мунтян А.Н., Петров С.И., Романова Н.М., Санкин Е.В.</i>	2	65

Способ передачи сигнала в условиях высокого уровня помех со стороны мощной плазменной установки.		
<i>Смолина Е.В.</i>	2	139
Разработка системы плазменной очистки входного зеркала оптической диагностики ИТЭР “Активная спектроскопия” на основе разряда с сеточным полым катодом.		
<i>Рогов А.В., Капустин Ю.В.</i>	3	60
Физическое распыление медного анода планарного магнетрона пучком ускоренных ионов аргона энергией 1–10 кэВ.		
<i>Семенов А.П., Семенова И.А., Цыренов Д.Б.-Д., Николаев Э.О.</i>	4	44
Анализ низкотемпературной плазмы методом оптической эмиссионной спектроскопии с пространственным сканированием.		
<i>Исмагилов Р.Р., Логинов А.Б., Малыхин С.А., Клещ В.И., Образцов А.Н.</i>	5	67
К вопросу о существовании “рентгеновской ямы” в режимах омического и электронного циклотронного резонанса нагрева плазмы в стеллараторе Л-2М.		
<i>Мещеряков А.И., Гришина И.А., Вафин И.Ю.</i>	5	73
Генератор газа на основе пористого титана в составе отпаянных камер плазменного фокуса.		
<i>Юрков Д.И., Лаврентин В.А., Лемешко Б.Д., Михайлов Ю.В., Прокуратов И.А., Дулатов А.К.</i>	6	47

ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ

Разработка трехмодуляторной системы импульсного питания ускорителя электронов ИЛУ-14.		
<i>Безуглов В.В., Брызгин А.А., Власов А.Ю., Воронин Л.А., Кокин Е.Н., Коробейников М.В., Сидоров А.В., Ткаченко В.О., Штарклев Е.А.</i>	1	93
Экспериментальное исследование влияния профиля продольного распределения магнитного поля на выходные характеристики гиротрона.		
<i>Проявин М.Д., Морозкин М.В., Лучинин А.Г., Глявин М.Ю., Денисов Г.Г.</i>	1	102
Повышение электрической прочности ускоряющего зазора в источнике электронов с плазменным катодом.		
<i>Шин В.И., Москвин П.В., Воробьев М.С., Девятков В.Н., Дорошкевич С.Ю., Коваль Н.Н.</i>	2	69
Коаксиальный цилиндрический электростатический анализатор энергии электронов (спиратрон) и его характеристики.		
<i>Шпеник О.Б., Попик Т.Ю., Завилопуло А.Н.</i>	3	68

ОПТИКА

Оптические приборы и измерения

Модуль обработки оптических сигналов с устройств на основе волоконного лазера с самосканированием частоты.		
<i>Смолянинов Н.Н., Ткаченко А.Ю., Лобач И.А., Каблуков С.И.</i>	2	76
Метод коррекции показаний при оценке контраста интерференционных полос с помощью 8-битовых веб-камер.		
<i>Будаговская О.Н., Будаговский А.В., Будаговский И.А.</i>	3	75
Оптимизация эксплуатационных параметров акустооптической линии задержки.		
<i>Гасанов А.Р., Гасанов Р.А., Ахмедов Р.А., Садыхов М.В.</i>	3	82
Возможности повышения точности измерений абсолютных расстояний методом спектральной низкокогерентной интерферометрии.		
<i>Потапов В.Т., Жамалетдинов Н.М.</i>	4	47
Акустооптический сумматор-модулятор излучения лазеров.		
<i>Антонов С.Н.</i>	4	51

Акустооптический фильтр пространственных частот двухцветного излучения, оперирующий в первом дифракционном порядке.		
<i>Котов В.М., Воронко А.И.</i>	4	54
Экспериментальная методика юстировки соединения канального оптического волновода с волоконным световодом по отражениям от дальнего торца волновода.		
<i>Карнаушкин П.В., Константинов Ю.А.</i>	5	78
Сравнительный анализ точности определения сдвига бриллюэновской частоты в экстремально зашумленных спектрах различными корреляционными методами.		
<i>Кривошеев А.И., Константинов Ю.А., Барков Ф.Л., Первадчук В.П.</i>	5	84
Простой подвижный металлографический микроскоп высокого увеличения.		
<i>Кунцевич А.Ю.</i>	5	156
Трехканальный фурье-спектрометр.		
<i>Вагин В.А., Хорохорин А.И.</i>	6	130
Установка для формирования трехмерных структур методом двухфотонной фемтосекундной полимеризации с использованием пространственно-временной фокусировки.		
<i>Епифанов Е.О., Мигаль Е.А., Потемкин Ф.В., Антошин А.А., Юсупов В.И., Минаев Н.В.</i>	6	107

Излучатели света, лазеры и лазерные приборы

Источник питания газоразрядного лазера на основе литий-полимерной аккумуляторной батареи.		
<i>Васеленок А.А., Гурашвили В.А., Джигайло И.Д., Кириленко Д.А., Кондратенко А.К., Кузьмин В.Н., Немчинов В.С., Полтанов А.Е., Сень В.И., Туркин Н.Г.</i>	1	81
Измерение температурного сдвига спектра излучения светодиодов при их включении с помощью фотоприемной КМОП-матрицы		
<i>Сергеев В.А., Беринцев А.В., Новиков С.Г., Фролов И.В.</i>	1	107
Блок питания для полупроводниковой системы накачки эрбий-иттербиевого лазера.		
<i>Дзюбенко М.И., Коленов И.В., Пелипенко В.П., Дахов Н.Ф., Галуза А.А.</i>	1	157
Параметрический генератор света в среднем инфракрасном диапазоне на основе веерной периодически-поляризованной структуры ниобата лития с задающим узкополосным лазером.		
<i>Бойко А.А., Ерушин Е.Ю., Костюкова Н.Ю., Мирошниченко И.Б., Колкер Д.Б.</i>	2	83
Измерение профиля распределения граничных частот электролюминесценции по площади светоизлучающей гетероструктуры.		
<i>Фролов И.В., Сергеев В.А., Радаев О.А.</i>	2	88
Пикосекундные лазерные диодные излучатели.		
<i>Воропай Е.С., Ермалицкий Ф.А., Радько А.Е., Самцов М.П.</i>	2	155
Автономный спектральнонаправленный осветительный прибор с функцией белого света с высоким индексом цветопередачи.		
<i>Пальчикова И.Г., Карамушк Е.В., Смирнов Е.С., Пальчиков Е.И., Самойленко М.С.</i>	3	155
Имитация различных внешних воздействий на светодиоды схемным моделированием объемных каналов утечки тока.		
<i>Градобоев А.В., Орлова К.Н., Симонова А.В., Седнев В.В.</i>	5	90
Эффективный импульсно-периодический химический HF(DF)-лазер.		
<i>Агроскин В.Я., Бравый Б.Г., Васильев Г.К., Гурьев В.И., Каштанов С.А., Макаров Е.Ф., Сотниченко С.А., Чернышев Ю.А.</i>	6	53
К анализу характеристик лазерного осветительного устройства.		
<i>Зуев С.М., Варламов Д.О., Кукса В.В.</i>	6	57

АКУСТИКА, ВЫСОКИЕ ДАВЛЕНИЯ

Установка высокого давления с внешним нагревом для <i>in situ</i> исследований фазовых переходов. <i>Черткова Н.В., Спивак А.В., Захарченко Е.С., Литвин Ю.А., Сафонов О.Г., Новиков А.П., Ефимченко В.С., Мелетов К.П.</i>	3	158
Акустооптический сумматор-модулятор излучения лазеров. <i>Антонов С.Н.</i>	4	51
Акустооптический фильтр пространственных частот двухцветного излучения, оперирующий в первом дифракционном порядке. <i>Котов В.М., Воронко А.И.</i>	4	54
Акустооптический дефлектор на парателлурите – повышение тепловой стабильности параметров. <i>Антонов С.Н., Резвов Ю.Г.</i>	5	100
Акустооптический модулятор для лазерных доплеровских анемометров потоков жидкости и газа. <i>Антонов С.Н., Резвов Ю.Г.</i>	5	105

РЕНТГЕНОВСКАЯ ТЕХНИКА

Холодные катоды на основе сборки микроканальных пластин для маломощных рентгеновских трубок. <i>Хамдохов З.М., Федотова Г.В., Самодуров П.С., Шерметова М.А.</i>	1	112
Одновременная регистрация спектров от нескольких детекторов гамма-излучения одним амплитудным анализатором. <i>Волкович А.Г., Игнатов С.М.</i>	1	153
Источник рентгеновского излучения среднего диапазона энергий на основе электронно-оптического преобразователя. <i>Андреев С.В., Воробьев Н.С., Михальков Ю.М., Смирнов А.В., Шашков Е.В., Турьянский А.Г., Сенков В.М., Пиришин И.В., Фишман Р.И., Гижа С.С.</i>	2	93
Методики измерения параметров распространения рентгеновского излучения в замкнутых полостях и определения времени теплового пробоя фольг. <i>Мунтян А.Н., Петров С.И., Романова Н.М., Таран С.С.</i>	2	100
Фокусировка рентгеновского излучения с энергией квантов 9.5 кэВ эллипсоидом с кристаллом HOPG. <i>Жидков Н.В., Поздняков Е.В., Суслов Н.А.</i>	5	110
Цифровой детектор рентгеновских изображений. <i>Трубицын А.А., Грачев Е.Ю.</i>	6	63

МАГНИТНЫЕ ПРИБОРЫ

Динамические магнитные кристаллы для измерения дисперсии объемных магнитостатических спиновых волн, обусловленных магнитной анизотропией в пленках железоиттриевого граната. <i>Крышталь Р.Г., Медведь А.В.</i>	1	116
Измерительные головки сканирующего спектрометра ферромагнитного резонанса. <i>Беляев Б.А., Боев Н.М., Горчаковский А.А., Галеев Р.Г.</i>	2	107
Модернизация спектрометров ядерного магнитного резонанса Bruker на современной цифровой базе. <i>Журенко С.В., Ткачёв А.В., Гунбин А.В., Гиппиус А.А.</i>	3	88
Магнитные системы для радиоспектрометра электронного парамагнитного резонанса. <i>Таряник Н.В., Варюхин Д.В., Лаптиенко А.Я., Федюк Д.О.</i>	3	95

Измерительный стенд для экспериментальных исследований динамических параметров микроэлектромеханических систем с электромагнитным управлением. <i>Корнеев В.С., Шергин С.Л.</i>	4	154
Магнитный шум феррозондов и магнитомодуляционных датчиков с аморфным ферромагнитным сердечником. <i>Сокол-Кутыловский О.Л.</i>	5	126
Криомагнитная система со сверхпроводниковыми обмотками для магнитного сепаратора. <i>Варюхин Д.В., Таряник Н.В., Постол П.Н., Федюк Д.О.</i>	6	126
Термостабилизация частоты протонного релаксометра на основе ядерного магнитного резонанса с магнитной системой на постоянных магнитах. <i>Мысик А.А., Бызов И.В., Жаков С.В.</i>	6	70

РАДИОМЕТРИЯ

Особенности совместной работы координатно-чувствительной камеры на “тепловой жидкости” и детектора телевизионного типа. <i>Сиксин В.В.</i>	1	66
Гамма-сканер с антиколлиматором для визуализации источников γ -излучения. <i>Иванов О.П., Игнатов С.М., Потапов В.Н., Самойлова М.А., Семин И.А.</i>	2	115
Термолюминесцентные детекторы ионизирующего излучения высокой плотности. <i>Алукер Н.Л., Артамонов А.С., Herrmann M.</i>	3	98
Разработка высокоэффективных кремниевых детекторов и электронных блоков для радиометра α -излучения. <i>Муминов Р.А., Раджапов С.А., Муллагалиева Ф.Г., Раджапов Б.С., Зуфаров М.А., Нурбоев К.М., Ахмедов Г.М.</i>	3	106
Радиационный транспортный монитор. <i>Алферов В.Н., Бритвич Г.И., Васильев Д.А., Костин М.Ю., Лутчев А.В., Сухих А.В., Федорченко В.Н., Черниченко С.К., Янович А.А.</i>	4	60
Термолюминесцентные дозиметры на основе керамики из оксида и нитрида алюминия. <i>Алукер Н.Л., Артамонов А.С., Гимадова Т.И., Зверев А.С.</i>	6	75
Приборы и методы измерения ^{14}C (обзор). <i>Назаров Е.И., Кружалов А.В., Екидин А.А., Васянович М.Е., Пархомчук В.В., Растигеев С.А., Калинин П.Н., Пархомчук Е.В.</i>	6	8

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Неразрушающая элементная диагностика поверхности оболочек твэлов ионно-пучковыми и рентгеновскими аналитическими методами. <i>Егоров В.К., Егоров Е.В., Калинин Б.А., Сафонов Д.А.</i>	1	72
Стенд для термовакуумных механических испытаний. <i>Баженов А.Н., Коваль А.Н., Толстяков С.Ю., Мухин Е.Е., Дмитриев А.М., Самсонов Д.С.</i>	1	151
Микроволновый источник нетермальной плазмы при атмосферном давлении. <i>Горбатов С.А., Иванов И.А., Тихонов А.В., Тихонов В.Н., Шестериков А.Ю.</i>	1	155
Гетероэпитаксиальный рост алмаза из газовой фазы: проблемы и перспективы (обзор). <i>Линник С.А., Зенкин С.П., Гайдайчук А.В.</i>	2	5
Визуализация дифракционного контраста между ферритной и мартенситной фазами стали методом нейтронной радиографии. <i>Мурашев М.М., Глазков В.П., Эм В.Т.</i>	3	147
Многостадийный контроль качества активных волоконных световодов. <i>Бурдин В.В., Константинов Ю.А., Клод Д., Латкин К.П., Белокрылов М.Е., Кривошеев А.И., Цибиногина М.К.</i>	5	138

ЭКОЛОГИЯ

Дистанционный анализатор криогенных паров и капель в выбросах сжиженного природного газа в атмосферу. <i>Загитко А.В., Зарецкий Н.П., Алексеев В.И., Вельмакин С.М., Мацуков И.Д., Сальников С.Е., Пименов В.В., Федин Д.Ю.</i>	4	156
---	---	-----

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, АСТРОНОМИЯ

Детектор излучения атмосферы АУРА на основе кремниевых фотоумножителей для малых космических аппаратов типа кубсат. <i>Глинкин Е.В., Климов П.А., Мурашов А.С., Чернов Д.В.</i>	2	121
Полетная калибровка фотоприемника детектора ТУС. <i>Климов П.А., Сигаева К.Ф., Шаракин С.А.</i>	3	112
Мюонный телескоп на сцинтилляционных счетчиках. <i>Герасимова С.К., Гололобов П.Ю., Григорьев В.Г., Зверев А.С., Стародубцев С.А., Егоров А.Г., Неустроев Н.И., Михеев А.А., Сорокин Е.Е., Кармадонов А.Я., Пахмуллов А.В.</i>	4	65
Наземная установка для детектирования космических лучей “Гамма-спектрометр” в астрономическом комплексе CASLEO. <i>Филиппов М.В., Махмутов В.С., Квашнин А.Н., Максумов О.С., Стожков Ю.И., Raulin J.-P., Tacza J.</i>	4	74
Физическое моделирование воздействия атомарного кислорода ионовосферы Земли на полимеры космических аппаратов. <i>Шувалов В.А., Токмак Н.А., Письменный Н.И., Кочубей Г.С.</i>	4	79
Направленный детектор нейтронов умеренных энергий. <i>Михалко Е.А., Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В.</i>	4	89
Калибровка макета калориметра гамма-телескопа ГАММА-400 на пучке позитронов ускорителя “Пахра”. <i>Сучков С.И., Архангельский А.И., Басков В.А., Гальпер А.М., Далькаров О.Д., Львов А.И., Паппе Н.Ю., Полянский В.В., Топчиев Н.П., Чернышева И.В.</i>	5	34
Компактный приемопередатчик для организации резервной радиолинии управления научной аппаратурой при проведении космических экспериментов. <i>Лисин Д.В.</i>	5	159

ПРИБОРЫ ДЛЯ БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЫ

Радиочастотные катушки для магнитно-резонансного микроскопа на основе безгелиевого томографа с полем 1.5 Тл. <i>Демихов Е.И., Протопопов А.В., Дмитриев Д.С., Багдинова А.Н., Лысенко В.В., Рыбаков А.С., Константинов М.В., Ивлев Д.А., Буякас В.И., Гуппиус А.А.</i>	1	123
Экспериментальная валидация расчетов методом Монте-Карло для аппарата Leksell Gamma Knife Perfexion с помощью радиохромной дозиметрической пленки ЕВТЗ и алмазного детектора Т60019 РТW. <i>Medjadj T., Ксенофонтов А.И., Климанов В.А., Далечина А.В., Кирпичев Ю.С.</i>	1	129
Установка для лазерных волоконных перфораций биоматериалов. <i>Минаев Н.В., Юсупов В.И.</i>	2	128
Устройство ввода ответов для психофизических экспериментов. <i>Молодцов В.О., Смирнов В.Ю., Солнушин С.Д., Чихман В.Н.</i>	2	153
Установка для лазерной инженерии микробиологических систем. <i>Минаев Н.В., Епифанов Е.О., Юсупов В.И.</i>	3	119
Аппаратно-программный комплекс для ипсилатерального измерения порога акустического рефлекса. <i>Богомоллов А.В., Драган С.П., Оленина И.В.</i>	4	95

Разработка алгоритма кодирования звука для системы кохлеарной имплантации. <i>Глуховский Е.М., Егоров А.И., Карапетянц М.И.</i>	4	105
Высокопроизводительный модуль сбора данных и управления широкополосным спектрометром ближнего инфракрасного диапазона на основе интерфейса USB 3.0. <i>Ксенофонтов С.Ю., Купаев А.В., Василенкова Т.В., Терпелов Д.А., Шилигин П.А., Моисеев А.А., Геликонов Г.В.</i>	5	131
Аппаратно-программный комплекс для экспериментального исследования поведенческих реакций лабораторных животных. <i>Драган С.П., Веселовский И.А., Комаров Д.Б., Богомоллов А.В.</i>	6	131
Выбор ускоряющей структуры малогабаритного линейного ускорителя электронов для лучевой терапии. <i>Куцаев С.В.</i>	6	84
Использование лазерного интерференционного микроскопа для оценки флуктуаций и эквивалентной константы упругости мембран клеток. <i>Юсипович А.И., Паршина Е.Ю., Байжуманов А.А., Пирутин С.К., Иванов А.Д., Минаев В.Л., Левин Г.Г., Максимов Г.В.</i>	6	93

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ

Аппаратурный комплекс для многочастотного акустического зондирования морской среды. <i>Корсков И.В.</i>	2	151
Автономный акустический регистратор и его применение в составе гидрофизического комплекса. <i>Пивоваров А.А., Ярошук И.О., Долгих Г.И., Швырев А.Н., Самченко А.Н.</i>	3	123
Струнный волнограф с инфракрасной регистрацией длины струн. <i>Стерлядкин В.В., Куликовский К.В., Кузьмин А.В., Шарков Е.А., Лихачева М.В.</i>	4	119
Трехкомпонентный приемник сигналов очень низкого частотного диапазона с прецизионной привязкой данных к Мировому Времени. <i>Пильгаев С.В., Ларченко А.В., Федоренко Ю.В., Филатов М.В., Никитенко А.С.</i>	5	115
Приборы и методы измерения ^{14}C (обзор). <i>Назаров Е.И., Кружалов А.В., Екидин А.А., Васянович М.Е., Пархомчук В.В., Растигеев С.А., Калинин П.Н., Пархомчук Е.В.</i>	6	8

ЛАБОРАТОРНАЯ ТЕХНИКА

Общие вопросы

Применение линий передачи с малыми потерями в составе к.в.ч.-радиометра при проведении газодинамических экспериментов. <i>Гайнулина Е.Ю., Корнев Н.С., Минеев К.В., Назаров А.В., Орехов Ю.И.</i>	1	137
Измерение времени задержки запуска электронно-оптической камеры. <i>Алабин К.А., Воробьев Н.С., Заровский А.И.</i>	1	142
Спектрометр для исследований кристаллов методом дифракции синхротронного излучения на углы, близкие к обратным. <i>Гурьева П.В., Марченков Н.В., Артемьев А.Н., Артемьев Н.А., Беляев А.Д., Демкив А.А., Шишков В.А.</i>	2	132
Способ передачи сигнала в условиях высокого уровня помех со стороны мощной плазменной установки. <i>Смолина Е.В.</i>	2	139
Стенд лазерного катализа. <i>Снытников В.Н., Снытников Вл.Н., Масюк Н.С., Маркелова Т.В., Пармон В.Н.</i>	3	129

Определение размера фокусного пятна тормозного излучения бетатрона с использованием коллиматоров. <i>Сорокин В.Б., Маликов Е.Л.</i>	3	138
Визуализация дифракционного контраста между ферритной и мартенситной фазами стали методом нейтронной радиографии. <i>Мурашев М.М., Глазков В.П., Эм В.Т.</i>	3	147
Установка для извлечения радиоизотопов рения из облученной вольфрамовой мишени. <i>Загрядский В.А., Кравец Я.М., Латушкин С.Т., Маламут Т.Ю., Новиков В.И., Рыжков А.В., Удалова Т.А., Унежев В.Н., Чувилин Д.Ю.</i>	4	125
Методика исследования стойкости светодиодов к облучению быстрыми нейтронами на реакторе ИРТ-Т. <i>Градобоев А.В., Бондаренко Е.А., Варлачев В.А., Емец Е.Г., Седнев В.В.</i>	4	129
Аппаратно-программный комплекс для исследования зарядно-разрядных характеристик вторичных химических источников тока. <i>Мочалов С.Э., Антипин А.В., Нургалеев А.Р., Колосницын Д.В., Колосницын В.С.</i>	4	133
Многостадийный контроль качества активных волоконных световодов. <i>Бурдин В.В., Константинов Ю.А., Клод Д., Латкин К.П., Белокрылов М.Е., Кривошеев А.И., Цибинозина М.К.</i>	5	138
Выявление гамма-пииков ⁶⁰ Со с помощью многопиксельного счетчика фотонов. <i>Elif Ebru Ermis.</i>	5	147
Низкотемпературная ячейка для проведения высокочастотных электрофизических измерений полупроводниковых устройств. <i>Аймаганбетов К.П., Алдияров А.У., Жантуаров С.Р., Алмасов Н.Ж., Теруков Е.И., Токмолдин Н.С.</i>	6	102
Установка для формирования трехмерных структур методом двухфотонной фемтосекундной полимеризации с использованием пространственно-временной фокусировки. <i>Епифанов Е.О., Мигаль Е.А., Потемкин Ф.В., Антошин А.А., Юсупов В.И., Минаев Н.В.</i>	6	107

Тонкие слои, микро- и наночастицы

Гетероэпитаксиальный рост алмаза из газовой фазы: проблемы и перспективы (обзор). <i>Линник С.А., Зенкин С.П., Гайдайчук А.В.</i>	2	5
--	---	---

Газы и жидкости

Термостатная камера для рентгеновских исследований тонкопленочных структур на жидких подложках <i>Тихонов А.М., Асадчиков В.Е., Волков Ю.О., Нурдин А.Д., Роцин Б.С.</i>	1	146
Система для моделирования процессов генерации брызг при ветроволновом взаимодействии в лабораторных условиях. <i>Кандауров А.А., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И.</i>	2	148
Разработка и применение системы на основе датчиков проводимости для исследования взаимодействия между сверхзвуковой паровой струей и водой. <i>Afrasyab Khan, Khairuddin Sanaullah, Спиридонов Е.К., Подзерко А.В., Хабарова Д.Ф., Ahmad Hasan Ali, Ahmed Salam Farooqi, Mohammed Zwawi, Mohammed Algarni, Bassem F.Felemban, Ali Bahadar, Atta Ullah, Bawadi Abdullah.</i>	4	141
Измерение мгновенных значений температуры газов газотурбинного двигателя с использованием акустических мультивибраторов. <i>Артюхов А.В., Марков В.Г., Сухинец Ж.А., Гулин А.И.</i>	6	114

Тепловые и криогенные приборы

Низкотемпературные приемники излучения на основе рутений-оксидных резисторов. <i>Лемзяков С.А., Эдельман В.С.</i>	2	143
Установка для исследования нестационарного теплообмена в жидких средах. <i>Рютин С.Б.</i>	5	152
Криогенная очистка гелия и его использование для подготовки поляризационных ячеек и проведения неоптической поляризации ядер ^3He . <i>Макарченко А.С., Кузьмин В.В., Сафиуллин К.Р., Кан Д.В., Тагиров М.С.</i>	6	120

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ В ЛАБОРАТОРИЯХ

Стенд для термовакуумных механических испытаний. <i>Баженов А.Н., Коваль А.Н., Толстяков С.Ю., Мухин Е.Е., Дмитриев А.М., Самсонов Д.С.</i>	1	151
Одновременная регистрация спектров от нескольких детекторов гамма-излучения одним амплитудным анализатором. <i>Волкович А.Г., Игнатов С.М.</i>	1	153
Микроволновый источник нетермальной плазмы при атмосферном давлении. <i>Горбатов С.А., Иванов И.А., Тихонов А.В., Тихонов В.Н., Шестериков А.Ю.</i>	1	155
Блок питания для полупроводниковой системы накачки эрбий-иттербиевого лазера. <i>Дзюбенко М.И., Коленов И.В., Пелипенко В.П., Дахов Н.Ф., Галуза А.А.</i>	1	157
Система для моделирования процессов генерации брызг при ветроволновом взаимодействии в лабораторных условиях. <i>Кандауров А.А., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И.</i>	2	148
Аппаратурный комплекс для многочастотного акустического зондирования морской среды. <i>Корсков И.В.</i>	2	151
Устройство ввода ответов для психофизических экспериментов. <i>Молодцов В.О., Смирнов В.Ю., Солнушин С.Д., Чихман В.Н.</i>	2	153
Пикосекундные лазерные диодные излучатели. <i>Воропай Е.С., Ермалицкий Ф.А., Радько А.Е., Самцов М.П.</i>	2	155
USB-анализатор для спектрометрии ядерных излучений. <i>Небесный А.Ф., Нам И.В., Раджапов С.А., Пиндюрин Ю.С.</i>	2	157
Система автоматизированного управления магнитными элементами для фокусировки и коррекции положения пучка ускорителя ЛИНАК-200. <i>Госткин М.И., Донец Д.Е., Кобец В.В., Леушин Д.О., Ноздрин М.А., Понкин Д.О., Трифонов А.Н., Шириков И.В.</i>	3	152
Автономный спектрозональный осветительный прибор с функцией белого света с высоким индексом цветопередачи. <i>Пальчикова И.Г., Карамшук Е.В., Смирнов Е.С., Пальчиков Е.И., Самойленко М.С.</i>	3	155
Установка высокого давления с внешним нагревом для <i>in situ</i> исследований фазовых переходов. <i>Черткова Н.В., Спивак А.В., Захарченко Е.С., Литвин Ю.А., Сафонов О.Г., Новиков А.П., Ефимченко В.С., Мелетов К.П.</i>	3	158
Измеритель малых токов с автономным питанием. <i>Вьюхин В.Н.</i>	4	152
Измерительный стенд для экспериментальных исследований динамических параметров микроэлектромеханических систем с электромагнитным управлением. <i>Корнеев В.С., Шергин С.Л.</i>	4	154

Дистанционный анализатор криогенных паров и капель в выбросах сжиженного природного газа в атмосфере. <i>Загнитько А.В., Зарецкий Н.П., Алексеев В.И., Вельмакин С.М., Мацуков И.Д., Сальников С.Е., Пименов В.В., Федин Д.Ю.</i>	4	156
Простой подвижный металлографический микроскоп высокого увеличения. <i>Кунцевич А.Ю.</i>	5	156
Компактный приемопередатчик для организации резервной радиолинии управления научной аппаратурой при проведении космических экспериментов. <i>Лисин Д.В.</i>	5	159
Трехканальный фурье-спектрометр. <i>Вагин В.А., Хорохорин А.И.</i>	6	130
Аппаратно-программный комплекс для экспериментального исследования поведенческих реакций лабораторных животных. <i>Драган С.П., Веселовский И.А., Комаров Д.Б., Богомолов А.В.</i>	6	131
Щитовой измеритель напряжения и силы постоянного тока повышенной точности. <i>Андреев Ю.А., Буров С.Ю., Кремзуков Ю.А.</i>	6	133

АННОТАЦИИ СТАТЕЙ, НАМЕЧАЕМЫХ
К ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ ПТЭ

DOI: 10.31857/S0032816221060240

ОБЗОРЫ

Харлов А.В. Установки для электроразрядных технологий и их технические применения (обзор). – 50 с., 28 рис.

Высоковольтная импульсная технология является одним из эффективных методов дезинтеграции и измельчения горных пород, разделения руд и синтезированных материалов, переработки строительных и упругопластических материалов. В отделе импульсной техники ИСЭ СО РАН с 2007 года ведутся исследования по разработке установок для электроимпульсных технологий. Были созданы установки с энергией от 100 Дж до 8 кДж, работающие в импульсно-пакетном режиме, с полной автоматизацией управления. Высоковольтный импульсный генератор может быть выполнен с использованием схемы Маркса или высоковольтного трансформатора. Оба варианта рассмотрены в этом обзоре. Представлены результаты проектирования и испытаний компактных генераторов, предназначенных для дробления материалов, хотя для них возможны и другие технологические применения.

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Баранов А.Г., Басков В.А., Василенко В.К., Герасимов Д.П., Губер Ф.Ф., Дронов В.А., Ивашкин А.П., Известный А.В., Карпушкин Н.М., Львов А.И., Морозов С.В., Полянский В.В., Салахутдинов Г.Х. Измерение параметров детекторов передней сцинтилляционной стенки эксперимента VM@N. – 7 с., 4 рис.

Приведены результаты измерений световых выходов и неоднородности светосбора прототипов сцинтилляционных детекторов с поперечными размерами 75×75 мм и 150×150 мм, являющихся элементами сцинтилляционной стенки в установке эксперимента VM@N, предназначенной для измерения зарядов легких фрагментов в столкновениях тяжелых ионов. Измерения были выполнены на электронном пучке синхротрона “Пахра” Физического института им. П.Н. Лебедева РАН.

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Мамонтов Е.В., Громова З.Ф., Двойнин В.Н., Дятлов Р.Н., Шевяков А.Г. Радиочастотный времяпролетный масс-анализатор ионов с малым расстоянием между планарными дискретными электродами. – 9 с., 4 рис.

Рассмотрен метод масс-разделения ионов по времени пролета в двумерном линейном высокочастотном поле с возвратным дрейфом по одной координате и малыми колебаниями по другой координате. Равно-

мерное движение ионов в направлении отсутствия поля обеспечивает пространственное разделение входов и выходов анализатора. За счет сокращения расстояния между планарными дискретными электродами разрешение возросло в 2 раза. Разработан и исследован экспериментальный образец анализатора с разрешением 550.

Рогов А.В., Капустин Ю.В. Влияние протока газа на эффективность плазменной системы очистки входного зеркала оптической диагностики ИТЭР “Активная спектроскопия”. – 8 с., 6 рис.

Представлены результаты исследования влияния протока газа через область разряда и близкого к разрядной ячейке расположения стенок диагностического порта на эффективность плазменной системы очистки входного зеркала оптической диагностики “Активная спектроскопия”, разрабатываемой в России для реактора ИТЭР. Эксперименты проводились на полномасштабном функциональном макете разрядной ячейки, работающей на постоянном или однополярном импульсном токе, электрически изолированной от стенок вакуумной камеры. Материал макета входного зеркала – Мо, рабочий газ – Аг. Использовалась вакуумная установка с динамической стабилизацией давления рабочего газа. Отсутствие протока газа через область разряда и близость стенок диагностического порта ИТЭР к разрядной ячейке моделировались размещением разрядной ячейки внутри коробчатого газодинамического обтекателя, помещенного в вакуумную камеру. Эксперименты с протоком газа при большом расстоянии от разрядной ячейки до стенок вакуумной камеры проводились без использования обтекателя. Выявлено, что отсутствие протока газа при малом удалении элементов разрядной ячейки от стенок вакуумной камеры увеличивает эффективность очистки.

Сатов Ю.А., Шумшуров А.В., Лосев А.А., Балабаев А.Н., Хрисанов И.А., Васильев А.А. Влияние металлических сеток на характеристики ионного пучка в лазерно-плазменном источнике. – 12 с., 11 рис.

В рамках разработки лазерно-плазменного источника для инжектора тяжелых ионов исследовано влияние металлических сеток на характеристики потока частиц, экстрагируемых из плазмы. Плазма из углерода и вольфрама создавалась при облучении мишени импульсами CO_2 -лазера при плотности потока $\sim 10^{11}$ Вт/см². Влияние металлических сеток на поток ионов оценивалось по сигналам детектора-анализатора энергетического спектра ионов, измерениям полного ионного тока и эмиттанса ионного пучка на выходе экстракционной системы. Обнаружено существенное влияние геометрических параметров сетки и массового числа ионов на характеристики формируемого пучка. Полученные результаты качественно объясняются распылением ма-

териала сетки высокоэнергетической “головкой” ионного пучка и последующим воздействием образованного “облака” атомарного газа на его прохождение.

Гаржанов В.И. Использование метода оптического рычага для получения ударных адиабат материалов. — 22 с., 11. рис.

Рассматривается метод оптического рычага, используемый для получения ударных адиабат материалов. Представлен анализ волновых процессов в исследуемых клиновых образцах с выводом расчетных формул для случаев регистрации одной ударной волны и двухволновых упругопластических конфигураций при нагружении образцов нормально падающей ударной или детонационной волной. Применительно к регистрации одиночных ударных волн построен векторный аналог правила удвоения, позволяющий в гидродинамическом приближении корректно вычислять массовую скорость и другие параметры состояния сжатого материала по измеряемым нормальной компоненте скорости свободной поверхности образца W_N и волновой скорости. Для двухволновых конфигураций разработана вычислительная процедура перехода от W_N к массовой скорости с использованием модели идеального упругопластического поведения исследуемого материала. Приведены погрешности метода.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

Багдинова А.Н., Рыбаков А.С., Демидов Е.И., Демидов Т.Е., Лысенко В.В., Тарасов В.П., Шумм Б.А., Дмитриев Д.С. Моделирование градиентной системы для безгелиевого магнитно-резонансного томографа. — 14 с., 17 рис.

В настоящее время многие ведущие мировые производители магнитно-резонансных томографов (м.р.т.) уделяют значительное внимание сокращению потребления жидкого гелия в современных магнитных системах для м.р.т. Это определяется, в первую очередь, значительным удорожанием жидкого гелия в последние годы и сохранением этой тенденции в перспективе, а также дополнительными расходами и трудностями, связанными с его доставкой, хранением и использованием. По этим причинам ведутся разработки сверхпроводящих магнитных систем для м.р.т., не требующих жидкого гелия. Одной из проблем безгелиевых магнитных систем является повышенный риск перехода из сверхпроводящего состояния даже при кратковременном превышении теплопритока над производительностью охладителя, что в традиционных системах компенсируется испарением жидкого гелия. Наряду с теплопритоком, происходящим за счет теплопроводности криостата и подводящих элементов, источником тепла являются также вихревые токи, возникающие в проводящих конструкциях магнита при генерации переменного магнитного поля градиентной системой м.р.т. При разработке градиентной системы безгелиевого м.р.т. был учтен подобный дополнительный теплоприток. В данной работе представлены расчет и моделирование градиентной системы для безгелиевого м.р.т.

ЛАБОРАТОРНАЯ ТЕХНИКА

Abhishek Saraswat, Ashokkumar Prajapati, Rajendraprasad Bhattacharyay, Paritosh Chaudhuri, Sateesh Gedupudi. Develop-

ment of a compact multivariable sensor probe for two-phase detection in high-temperature PbLi-Argon vertical columns. — 13 p., 10 fig. (публикуется только в английской версии ПТЭ).

Existence of a two-phase flow in lithium-based Liquid-Metal (LM) breeders for nuclear fusion blankets are a cause of concern due to critical issues including reduced Tritium Breeding Ratio (TBR), generation of hot-spots and improper nuclear shielding. Additionally, a large density ratio between LM and gas requires experimental database towards development and validation of numerical models. Lead-lithium (PbLi) has gained immense focus for its various advantages and is utilized in several breeding-blanket concepts. In this view, a LM – gas two-phase detection diagnostics is imperative for PbLi environment. Two-phase detection in high electrical-conductivity fluids like LMs is greatly facilitated by electrical-conductivity probes due to ruggedness, fabrication ease and operational simplicity. However, corrosive nature of PbLi with high operational temperature severely restricts commercial electrical-insulations, a foremost requirement for electrical-conductivity based detection-schemes. In this study, an electrical-conductivity and temperature based multivariable two-phase detection probe is developed using high-purity alumina coatings. Probe validation is performed in PbLi-Ar vertical column with LM temperature upto 400°C and time-averaged void-fractions upto 0.95, covering flow-regimes from bubbly flow upto in-box Loss of Coolant Accident (LOCA). Developed probe provides high-reliability and temporal-resolution towards individual bubble detection through electrical-conductivity principle alongwith simultaneous temperature trends for two-phase mixture. Present paper discusses probe fabrication and calibration, LM-gas two-phase facility, time-averaged void-fraction estimations, bubble-frequency and residence-time estimations alongwith critical observations from the preliminary tests.

Jiabin Qian, Jian Yang, Haipeng Hou, Haojie Yan, Tieyu Zhu, Jiang Chen, Rumiao Wang, Mingsheng Jin. A Novel High-Performance Draw-Wire Displacement Sensor for Automobile Crash Test. — 17 p., 11 fig. (публикуется только в английской версии ПТЭ).

To accurately measure the displacement of the dummy's head and neck under the conditions of high speed, high acceleration, and certain impact, a novel high-performance draw-wire displacement sensor applied to the field of automobile crash test is designed. A structural scheme is proposed by using a potentiometer as a rotation sensor, a flat spiral spring to provide the reset power, and a spiral groove hub to match with an auxiliary boss of the outer housing. Experiments on key performance indexes of the draw-wire displacement sensor are carried out. The allowable maximum working speed, acceleration, and tolerable impact of the draw-wire displacement sensor are greater than 20 m/s, 60 g, and 100 g, respectively. Further, sensor's linearity and repeatability are 0.0346% and 0.0140% according to JJF 1305-2011 calibration specification for linear displacement sensors. All the test results of the draw-wire displacement sensor generally meet the technical requirements of the automobile crash test.

Jiajie Lei, Meiling Liang, Shan Qing, Zhumei Luo, Aimin Zhang. Measurement method of nanofluids average velocity based on laser speckle image. — 22 p., 16 fig. (публикуется только в английской версии ПТЭ).

In this paper, based on the optical properties of speckle, the correlation between laser speckle image and nanoparti-

cles is analyzed, and a method to measure the flow velocity of nanofluids using speckle image is proposed. The influence of nanofluids type, temperature and concentration on speckle image was investigated. On the basis of grating spatial filtering, based on PIV (Particle Image Velocimetry) cross-correlation algorithm and optical flow field algorithm, the principle of gray conservation and interpretation window are introduced to extract the spectral characteristic curve of speckle image signal. Considering the interference of the environment noise, the wavelet packet decomposition method is proposed to separate the low-frequency features and obtain the peak frequency of the signal. The static and dynamic speckle images are analyzed by establishing a circular tube flow measurement system with laser speckle circulation to verify the rationality and feasibility of the velocity measurement method. The experimental results show that the speckle image of CuO nanofluids in static experiment is better than that of Al₂O₃ nanofluids, and increasing temperature has no obvious effect of improving image quality. The average relative error between the calculated results and the measured results is 4.9 and 4.5%, which proves that this method is reasonable and feasible.

Lakshmi Srinivas, Sridhar B.T.N. Experimental Study of Strut Insertion Technique in a Convergent-Divergent Nozzle for Thrust Vector Control. – 18 p., 11 fig. (публикуется только в английской версии ПТЭ).

The purpose of this paper is to present the findings from the data obtained from experiments conducted on a solid strut insertion technique with a convergent-divergent nozzle and to assess the possibility of this technique as an alternative thrust vector control technique. Independent and inceptive experiments were conducted to obtain supersonic nozzle wall pressure distributions by inserting a solid strut in the wall at two different positions from the nozzle throat in the diverging section of the nozzle. Experimental investigation was conducted using a convergent-divergent nozzle of design Mach number 1.8 at an inlet total pressure of 690 kPa (under-expansion conditions). The strut height was varied to obtain wall pressure distributions on both strut and opposite to strut sides. Forces and moments generated by the asymmetrical wall pressure distribution in a plane through the wall pressure ports on either side of the nozzle axis were calculated. From the wall pressure distributions corresponding to each strut height, the side force, and axial force and pitching moment coefficients (2D) were calculated. The variations of side force and pitching coefficients with respect to strut height were nonlinear and that to axial force were more or less linear. The present experimental study will help design and develop a solid strut insertion-based thrust vector control technique for aerospace flight vehicles.

Ермачихин А.В., Воробьев Ю.В., Трусов Е.П. Установка по измерению спектральной дисперсии квантового выхода. – 9 с., 6 рис.

Описана установка для измерения спектральной дисперсии квантового выхода в широком температурном диапазоне. Установка может отслеживать изменение мощности светового потока и вносит корректи-

ровку при расчете значения квантового выхода. Отличительной особенностью установки является отсутствие второго светового канала для мониторинга изменения световой мощности. Это позволяет отказаться от механически подвижных частей, что упрощает устройство и не требует синхронизирующих устройств.

Калашников В.С., Коледов В.В., Кучин Д.С., Петров А.В., Шавров В.Г., Быбик М.С., Несоленов А.В. Установка для определения термомеханических свойств микропроволок из сплавов с эффектом памяти формы. – 7 с., 3 рис.

Описана экспериментальная установка для определения термомеханических свойств микропроволок из сплавов с эффектом памяти формы в диапазоне температур –190 до +270°C, механических напряжений до 2000 МПа и деформаций до 50%. Принцип работы установки основан на методе растяжения образца при переменной температуре и постоянной нагрузке. Измерение удлинения образца осуществляется оптическим датчиком перемещения. Установка испытана на микропроводах из известного сплава с эффектом памяти формы системы никель–титан состава Ni_{49,8}Ti_{50,2}. Установка позволяет исследовать функциональные свойства образцов микропроволок с эффектом памяти формы, перспективных для применений в микросистемной технике, нанотехнологии и медицинской технологии.

Радаев А.В., Мухамадиев А.А., Сабирзянов А.Н. Экспериментальный стенд для исследования растворимости и фазовых переходов в системе “углекислый газ–сверхкритический CO₂” в широком диапазоне давлений и температур. – 10 с., 5 рис.

Разработаны система насыщения пористой среды углекислым газом и сверхкритическим CO₂ и методика проведения эксперимента по насыщению пористой среды углекислым газом и сверхкритическим CO₂. Создана новая конструкция экспериментальной ячейки с пористой средой, которая позволяет измерять давление и температуру по всей длине экспериментальной ячейки и контролировать состояние диоксида углерода. Стенд для измерения растворимости сверхкритического CO₂ в углекислом газе модернизирован путем внедрения в его схему экспериментальной ячейки новой конструкции и системы насыщения пористой среды углекислым газом и сверхкритическим CO₂. Модернизированный экспериментальный стенд позволяет проводить исследования фазовых переходов сверхкритического CO₂ из растворенного в углекислом газе и обратно и может быть использован для исследования влияния пористой среды на фазовое поведение системы “углекислый газ–сверхкритический CO₂”. Результаты исследований могут быть использованы в нефтедобывающей, нефтехимической промышленности и в машиностроительной области при исследовании теплофизических свойств газонасыщенных углеводородов.

СИГНАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

ПРАВИЛА ПУБЛИКАЦИИ В ПТЭ

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Журнал издается на русском языке и в переводе на английский язык. К публикации в журнале принимаются рукописи обзорных, оригинальных работ, краткие сообщения, комментарии, содержащие дискуссию по существу статей, ранее опубликованных в ПТЭ, рекламные объявления о новых физических приборах и материалах. Статьи принимаются от граждан любой страны на русском или английском языке (от авторов из стран дальнего зарубежья).

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ СТАТЕЙ

1. Предмет статьи должен иметь конкретные применения к задачам экспериментов, использующих физические методы, описанные и проиллюстрированные в статье.

2. Описываемый прибор или метод должен быть осуществлен и испытан в эксперименте, показавшем преимущества по сравнению с опубликованными ранее, и эти преимущества нужно четко указать в статье.

3. Обзор должен быть написан достаточно подробно и ясно для понимания физиками любой специальности. Рекомендуется снабжать обзор сжатым введением, разъясняющим основные задачи, понятия и термины.

4. Статья должна быть достаточно полна и подробна для обеспечения возможности с учетом цитированных публикаций воспроизведения квалифицированным читателем метода и прибора, осуществленного и испытанного авторами. Статья должна давать ясное представление о цели работы, принципе метода или устройства прибора, технических характеристиках, погрешностях измерений, возможностях и особенностях его применения.

5. Комментарий, как и ответ автора, должен касаться только существа обсуждаемой статьи: физических ошибок, неточностей, указания более удачных альтернативных решений и подходов.

6. Краткая информация о новом приборе и материале, изготовленных в лабораториях, не переводится на английский язык и публикуется только в русской версии ПТЭ. Она, должна содержать наименование, основные технические и эксплуатационные характеристики. Информация о приборе может сопровождаться его фотографией, информация о материале — только в том случае,

если фотография может дать наглядное представление о его качествах. Допускается второй рисунок — график или схема, характеризующие возможности прибора. Необходимо указывать адрес, по которому следует обращаться за получением дополнительной информации.

7. Объем присылаемых для опубликования в журнале обзоров и оригинальных статей формально не ограничен. Однако в интересах читателей не следует перегружать статью материалами, достаточно известными из журнальных публикаций, обзоров, монографий, справочников, а также подробным описанием достаточно очевидных или второстепенных деталей. Для подобных материалов предусмотрена возможность их размещения в электронном виде. Разъяснения по дополнительным материалам приведены на сайте: <http://pleiades.online/ru/authors/guidlines/prepare-electronic-version/supplementary-materials/>. Объем остальных материалов не должен превышать: комментариев и ответов на них — 2 страниц и 1 рисунок, краткой информации о приборах, изготовленных в лабораториях, — 2–3 страниц текста и 1–2 рисунков, рекламных объявлений — 1 страницы и 1 рисунок на каждую оплаченную полосу.

Посылая рукопись в журнал, автор гарантирует, что соответствующий материал (в оригинале или в переводе на другие языки или с других языков) ранее нигде не публиковался и не находится на рассмотрении для публикации в других журналах.

Для принятия редколлегией решения о публикации статьи в журнале авторам необходимо представить в редакцию рукопись статьи в формате MS Word сопроводительное письмо от авторов или организации, направляющей статью, и авторские договоры с издателями журнала (русской и английской версий), заполненные и подписанные автором и всеми соавторами. Авторские договоры вступают в силу в случае и с момента принятия статьи к публикации. Формы договоров с издателями и дополнительная юридическая информация размещены на сайтах <https://sciencejournals.ru/journal/pribory/> (русская версия) и <https://www.pleiades.online/ru/journal/instr/authors-instructions/> (английская версия). Необходимо иметь в виду, что договоры являются юридически обязывающими документами, поэтому надо строго следовать их форме и требованиям издательства. Авторы, статьи которых публикуются в разделе “Приборы, изготов-

ленные в лабораториях”, должны оформить только лицензионный договор, приведенный на сайте <https://sciencejournals.ru/journal/pribory/>, т.к. этот раздел не включается в английскую версию ПТЭ.

Статьи, основанные на работах, выполненных в учреждении, должны содержать точное название и адрес учреждения, публикуемые в статье. Направление от учреждения, содержащее эти данные, желательно предоставить вместе со статьей. Экспертное заключение от учреждения предоставляется в том случае, если это требуют его правила. В сопроводительном письме авторы могут назвать 3–5 возможных рецензентов для представленной работы.

Рукопись необходимо отправлять через Издательский портал, используя браузер Google Chrome 60+ (<https://sciencejournals.ru/submit-manuscript/>). Зарегистрируйтесь на портале как автор и следуйте инструкциям системы. Желательно продублировать поданные материалы по электронной почте в адрес редакции (instr@pleiadesonline.com). Файлы рукописи, подписанных договоров и сопроводительных документов должны быть собраны в один архив (желательно ZIP). Дополнительные файлы большого объема (например, оригинальные файлы иллюстраций) могут быть переданы в редакцию после принятия статьи к публикации. В случае возникновения у редакции вопросов по предоставленному варианту рукописи редколлегия вправе запросить у авторов ее печатный вариант (или вызвавший вопросы фрагмент). Если предполагается, что публикация статьи осуществляется в режиме открытого доступа, то необходимо вместо заполнения авторского договора следовать инструкциям по ссылке <https://www.pleiades.online/ru/authors/openaccess/how-to-publish/>

Все материалы, поступившие для публикации, проходят анонимное рецензирование. Авторам в течение недели со дня поступления рукописи в редакцию направляется уведомление о ее получении с указанием даты поступления.

Рукопись, направленная авторам на доработку, должна быть возвращена в исправленном виде в течение двух месяцев. По истечении этого срока она рассматривается как вновь поступившая. К переработанной рукописи необходимо приложить письмо от авторов, описывающее сделанные исправления и содержащее ответы на все замечания рецензента.

После принятия рукописи к публикации и согласования с ним окончательного варианта статьи перед сдачей в набор автор не может вносить существенных изменений и добавлений. После публикации автор получает копию статьи в формате PDF.

Рукописи авторам не возвращаются. Редакция вправе не вступать в переписку с автором относительно причин (оснований) отказа в публикации статьи.

2. СТРУКТУРА РУКОПИСИ

Обязательными являются следующие элементы статьи.

1. **Название статьи**, максимально конкретное и информативное.

2. **Полный список авторов** (инициалы и фамилии). Необходимо указать, кто из авторов ответственен за переписку.

3. **Место работы авторов**. Полное (без сокращений) название организации, почтовый адрес с указанием города, страны и почтового индекса. Если авторы работают в разных организациях, то должно быть понятно, кто и в какой именно организации работает. Для иностранных учреждений приводится оригинальное название и адрес латинскими литерами.

4. **Электронный адрес автора**, ответственного за переписку. Так как статьи для проверки авторам рассылаются только по электронной почте, то в случае, когда у статьи только один автор, желательно указать альтернативный адрес электронной почты на случай возможных технических проблем. В качестве альтернативного рекомендуется указывать почтовый ящик, который проверяется во время отпуска или командировки. Если у статьи несколько авторов, желательно указать адреса электронной почты двух или трех авторов, которые регулярно проверяют поступающие сообщения.

5. **Аннотация статьи** (Abstract). Обзору и статье должно быть предпослано краткое (10–15 строк) изложение их сути (аннотация) с четким определением новизны предмета и указанием его численных характеристик (погрешности, чувствительности и т.п.). Аннотация должна быть предельно содержательной и понятной в отрыве от статьи в связи с тем, что в каждом номере ПТЭ публикуются аннотации статей, намечаемых к публикации в следующих номерах. Аннотация не должна содержать ссылок на другие работы.

6. Собственно **рукопись** (основной текст). При подготовке рукописи следует соблюдать единообразие терминов. Не стоит называть одно и то же разными именами. Следует соблюдать единообразие в обозначениях, системах единиц измерения, номенклатуре. Следует по мере возможности избегать сокращений, кроме общеупотребительных. Если все-таки используются сокращения, то они должны быть расшифрованы в тексте при их первом упоминании. Аббревиатура строчными буквами с точками – это традиция журнала, и наши авторы, как правило, ее принимают, отдавая дань уважения отцам-основателям журнала, существующего с 1956 года.

7. **Список литературы**. Список литературы должен в достаточной мере отражать современное состояние дел в исследуемой области и не быть избыточным. Он должен содержать ссылки на доступные источники. Цитируемую литературу сле-

дует давать общим списком в конце статьи с указанием в тексте статьи ссылки порядковой цифрой на строке в прямых скобках (например, [1]). Цитируемая литература должна быть оформлена в следующем порядке:

а) для журнальных статей указываются фамилии и инициалы авторов, название журнала, год, номер, страница, целесообразно приводить ссылки на DOI тех статей, у которых они есть;

б) для книг надо указать фамилии и инициалы авторов, полное название книги, издательство, место издания, год, страницу (для книг иностранного происхождения указать также данные русского перевода, если таковой имеется);

в) для сборников и трудов конференций надо указать фамилии и инициалы авторов, название сборника (конференции), где и кем изданы (город и издательство или институт), год, том, номер и страницу;

г) при ссылке на статью, вышедшую в журнале нашего издательства, необходимо дать ссылку и на ее перевод;

д) не допускаются ссылки на более чем один источник под одним номером и на один источник под разными номерами.

Для каждого источника должен быть указан ПОЛНЫЙ перечень авторов, без сокращений.

8. При наличии **иллюстраций или таблиц** располагать их следует в конце статьи на отдельных листах. К каждой иллюстрации должна быть указана подрисовочная подпись. При наличии нескольких частей в одной иллюстрации они должны располагаться последовательно и иметь общую подпись. Возможна публикация цветных иллюстраций только в on line версии журнала. Требования по оформлению цветных иллюстраций см. на сайте <https://www.pleiades.online/ru/authors/guidlines/prepare-electronic-version/images/>. Упоминаемые в статье или заметке выпускаемые промышленностью приборы или материалы должны именоваться их паспортным наименованием с указанием типа или марки, а также фирмы-изготовителя с указанием города, страны или Интернет-сайта. Чертежи, графики и схемы должны быть четко выполнены в формате, обеспечивающем ясность понимания всех деталей. Рисунки следует выполнять компактно в целях экономии места. Полезно иметь в виду, что наиболее удобны для типографского воспроизведения рисунки шириной в одну колонку (~8 см), две колонки (~17 см) или во весь лист (17 × 23 см). Поэтому желательно изображать отдельные элементы и надписи на рисунке так, чтобы при уменьшении масштаба рисунка до одного из указанных размеров буквы и цифры приобрели высоту 1.5–2 мм, элементы радиосхем – 3–5 мм, отдельные точки – 1 мм, а линии должны быть при этом разнесены на расстояние не менее

1–2 мм. Величины деталей радиосхем следует указывать непосредственно на чертежах с десятичными приставками, но без наименования единиц, за исключением величины емкостей в микрофарадах, которые пишутся без десятичных приставок (например, 1 Ом – 1; 5.6 кОм – 5.6 к; 2.0 МОм – 2 М; 1.1 ГОм – 1.1 Г; 15 пФ – 15 п; 2.2 нФ – 2 н; 1.0 мкФ – 1). Для изображения элементов схем следует пользоваться стандартными обозначениями. Редакция обращает внимание авторов на необходимость особенно тщательной проверки представляемых рисунков. Фотографии, изображающие наиболее интересные детали или общий вид описываемых приборов или полученные на экспериментальных установках (осциллограммы, треки в камерах, микрофотограммы и т.п.), представляются в виде, соответствующем требованиям издателя (<https://www.pleiades.online/ru/authors/guidlines/prepare-electronic-version/images/>).

9. К статье должен быть приложен список специфических терминов, материалов и их принятого перевода на английский язык. Необходимо привести также авторский вариант перевода заглавия и аннотации, названия учреждения, направляющего работу, и написание латинскими литерами имен авторов. В списке литературы необходимо указывать ссылку не только на оригинал статьи, но и на ее перевод, если статья вышла в журнале нашего издательства.

При отсутствии хотя бы одного из указанных выше элементов рукопись может быть отклонена без рассмотрения по существу.

3. ФОРМАТ РУКОПИСИ

Общие требования к формату рукописи представлены на сайте <https://www.pleiades.online/ru/authors/guidlines/prepare-electronic-version/>

Технические требования к подготовке текстовой части статьи и иллюстраций размещены на сайтах <https://www.pleiades.online/ru/authors/guidlines/prepare-electronic-version/text> и <https://www.pleiades.online/ru/authors/guidlines/prepare-electronic-version/images/>.

Текстовую часть статей желательно готовить с использованием стилевого файла.

4. РАБОТА С ЭЛЕКТРОННОЙ КОРРЕКТУРОЙ

Для работы с электронной корректурой авторам высылается по электронной почте PDF-файл верстки статьи. Файлы можно прочитать и отредактировать с помощью программы Adobe Reader (версии 9 и выше), которую можно бесплатно скачать через Интернет: <http://get.adobe.com/reader>. На все письма необходимо дать ответ, не изменяя тему письма, даже если замечания или исправления отсутствуют.

Замечания нужно вносить прямо в PDF-файл статьи, используя панель инструментов “Комментарии и пометки” программы Adobe Reader версии 9+. **Не используйте другие программы для правки PDF-файлов**, иначе авторские замечания могут быть потеряны при автоматической обработке ответов.

Нельзя изменять название pdf-файла статьи и тему e-mail сообщения по той же причине.

Подробная инструкция Вам будет выслана вместе с корректурой статьи. Дополнительно ознакомиться с требованиями по внесению исправлений можно на сайте <https://www.pleiades.online/ru/authors/guidlines/electronic-proofreading/>