
СОДЕРЖАНИЕ

Номер 3, 2022

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Текущие характеристики полей ионизирующих излучений облучательной установки реактора ИБР-2 для исследований радиационной стойкости материалов

*М. О. Петрова, М. В. Булавин, А. Д. Rogov,
А. Бскаков, А. В. Галушко*

5

Метод улучшения энергетического разрешения при регистрации гамма-квантов органическим сцинтилляционным детектором ВС-420

Elif Ebru Ermis, Cuneyt Celiktas

10

Исследование детектора нейтронов радиационного монитора

Я. В. Лужанчук

17

Лазерный стенд для тестирования кремниевых микростриповых детекторов

*П. И. Харламов, М. О. Шитенков, Д. В. Дементьев,
В. В. Леонтьев, М. М. Меркин*

21

ЭЛЕКТРОНИКА И РАДИОТЕХНИКА

Разработка и испытания устройства для регулирования и стабилизации мощного излучения миллиметрового диапазона

*М. В. Каменский, М. А. Кошелев, А. А. Орловский,
А. С. Седов, С. А. Скороходов, А. И. Цветков*

29

Мощные импульсные устройства для исследования реверсивно включаемых динисторов

*С. В. Коротков, Ю. В. Аристов,
А. Л. Жмодиков*

34

Генератор мощных наносекундных импульсов на основе блока дрейфовых диодов с резким восстановлением и блока динисторов с ударной ионизацией

*С. В. Коротков, Ю. В. Аристов,
А. Л. Жмодиков*

40

Программируемый формирователь
импульсов в стандарте КАМАК

*С. А. Горохов, А. А. Киряков,
М. К. Полковников*

45

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Экспериментальный комплекс для исследований высокоскоростных
магнитогидродинамических течений

*И. А. Маслобоев, В. П. Фомичев,
А. Б. Шевченко, М. А. Ядренкин*

48

Стенд для экспериментального исследования локальных параметров
химически активной плазмы индукционного разряда

*С. В. Синцов, Е. И. Преображенский, Р. А. Корнев,
А. В. Водопьянов, Д. А. Мансфельд*

56

Инициализация разряда в системе очистки входного зеркала диагностики
“Активная спектроскопия” реактора ИТЭР при использовании
термоэмиссионного катода

А. В. Рогов, Ю. В. Капустин

63

Субнаносекундный ускоритель электронов,
состоящий из трех секций

В. Ф. Тарасенко, С. Б. Алексеев, Е. Х. Бакит

70

Измерение температуры с помощью кремниевых микроинтерферометров
Фабри–Перо методом спектральной низкокогерентной интерферометрии

В. Т. Потапов, Н. М. Жамалетдинов

77

Приставка к фурье-спектрометру для регистрации
инфракрасных спектров жидкостей в паровой фазе

Д. С. Нехорошева, Х. Б. о. Таги-заде, Л. С. Клименко

81

Двухступенчатый холловский магнитометр с улучшенными
характеристиками, обеспечиваемыми сенсором
из высокотемпературного сверхпроводника

Х. Р. Ростами

87

Ударный магнит для вывода пучка из Бустера в канал
“Бустер–Нуклотрон” комплекса NICA

*О. В. Анчуглов, Д. А. Шведов, В. А. Киселев,
А. Н. Журавлев, С. В. Синяткин, Д. И. Бажутов,
А. В. Тузиков, А. А. Фатеев, А. С. Петухов*

100

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

Исследование некоторых свойств минеральных удобрений с использованием гамма- и рентгеновской флуоресцентной спектрометрии

Canel Eke 108

Лабораторная установка для хроматографического выделения ^{186}Re без носителя из облученных мишеней из вольфрама

*Е. Б. Фуркина, А. В. Курочкин, Р. А. Алиев,
В. А. Загрядский, Т. Ю. Маламут, В. И. Новиков,
В. Н. Унежев* 117

Техника регистрации спектров флуоресценции биоактивных препаратов и их математическая обработка

А. Д. Кудрявцева, М. Ф. Умаров 121

Радиолокационный метод определения угла крена летательного аппарата

В. Л. Гулько, А. А. Мещеряков, Н. К. Блинковский 126

ЛАБОРАТОРНАЯ ТЕХНИКА

Регистрация быстропротекающих процессов скоростной камерой Наногейт-22/16

*С. И. Герасимов, М. И. Крутик, В. С. Роженцов,
А. Г. Сироткина, К. В. Тотышев* 135

К возможности использования стеклянных капилляров в качестве зонда атомно-силового микроскопа, работающего в гибридной моде

А. А. Жуков, С. Г. Романова 141

Исследование термического газовыделения материалов, используемых в высоковакуумных системах

*А. В. Бурдаков, А. В. Варанд, А. А. Краснов,
О. И. Мешков, М. А. Михайленко, А. М. Семенов,
Б. П. Толочко, А. А. Шошин* 146

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ДЕМОНСТРАЦИОННОГО И УЧЕБНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследование характеристик антенны Вивальди

Е. Л. Шошин 152

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ В ЛАБОРАТОРИЯХ

Блок управления научной аппаратурой для космических экспериментов с автоматическим вводом резерва

Д. В. Лисин

159

СИГНАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Аннотации статей, намечаемых к публикации в журнале ПТЭ

161

Правила публикации в ПТЭ

165

ТЕКУЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЕЙ ИОНИЗИРУЮЩИХ
ИЗЛУЧЕНИЙ ОБЛУЧАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ РЕАКТОРА ИБР-2
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ

© 2022 г. М. О. Петрова^{a,*}, М. В. Булавин^a,
А. Д. Рогов^a, А. Ёскаков^{a,b}, А. В. Галушко^a

^a Объединенный институт ядерных исследований
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

^b Евразийский национальный университет им Л.Н. Гумилева
Казахстан, 010008, Алматинский район, Нур-Султан, ул. Сатбаева, 2

*e-mail: mbelova@jinr.ru

Поступила в редакцию 22.11.2021 г.

После доработки 07.12.2021 г.

Принята к публикации 08.12.2021 г.

Приведены текущие характеристики полей ионизирующих излучений облучательной установки, предназначенной для проведения исследований радиационной стойкости материалов на канале № 3 реактора ИБР-2. Уточнены плотности потоков быстрых нейтронов для мощности 1.55 МВт реактора ИБР-2. Впервые экспериментально получены величины поглощенных доз γ -излучения. Значения, превышающие измеряемый дозиметрами диапазон поглощенных доз, вблизи водяного замедлителя ИБР-2 рассчитаны методом Монте-Карло. Описаны приборы и методы для количественной оценки характеристик. Диапазон плотностей быстрых нейтронов вдоль облучательной установки составил $3 \cdot 10^6 - 8 \cdot 10^{11}$ нейтронов/(см² · с), а мощностей доз γ -излучения — $3 \cdot 10^{-4} - 12$ Гр/с.

DOI: 10.31857/S0032816222030041

ВВЕДЕНИЕ

На данный момент в мире ведется строительство большого количества экспериментальных установок, которые будут работать в полях мощного ионизирующего излучения. Прикладные исследования радиационной стойкости материалов, применяемых в таких установках, являются одной из ключевых задач.

С 2012 г. и по настоящее время на пучке № 3 реактора ИБР-2 была модернизирована и введена в эксплуатацию облучательная установка для проведения исследований радиационной стойкости материалов. За это время с ее помощью было проведено большое количество исследований радиационной стойкости в самых разных областях науки.

С 2018 г. средняя мощность реактора ИБР-2, составлявшая 1.85 МВт, постепенно снижалась, достигнув к настоящему моменту 1.55 МВт, в связи с чем появилась необходимость уточнить характеристики полей ионизирующих излучений вдоль облучательной установки, полученные ранее и опубликованные в работах [1, 2], а также получить новые данные о поглощенных дозах γ -излучения на различном расстоянии от водяного замедлителя.

ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЙТРОННОГО ПОЛЯ

При проведении исследований радиационной стойкости материалов количество созданных дефектов соотносят с количественными характеристиками полей ионизирующих излучений, прошедших через образец.

Нейтронный спектр, представленный на рис. 1, был измерен с помощью образцов-спутников нейтронно-активационного анализа (н.а.а.), состоящих из восьми элементов и десяти изотопов: V, Al, Ti (3 изотопа), Ni, Sn, Au, Co, Na [3]. Спектр нейтронов реактора, показанный на рис. 1, не имеет резонансных пиков, так как в промежутке 0.1–1 МэВ существует только два пороговых спутника, и спектр был аппроксимирован без учета возможных резонансов. Наибольший вклад в процесс дефектообразования вносят быстрые нейтроны (с энергией >1 МэВ). Образцом-спутником н.а.а. для определения плотностей потоков быстрых нейтронов является Ni [4]. Он активируется до ⁵⁸Co, по активности которого и определяют плотность потока быстрых нейтронов. Для никеля существуют только две реакции захвата нейтрона, приводящие к возникновению ⁵⁸Co:

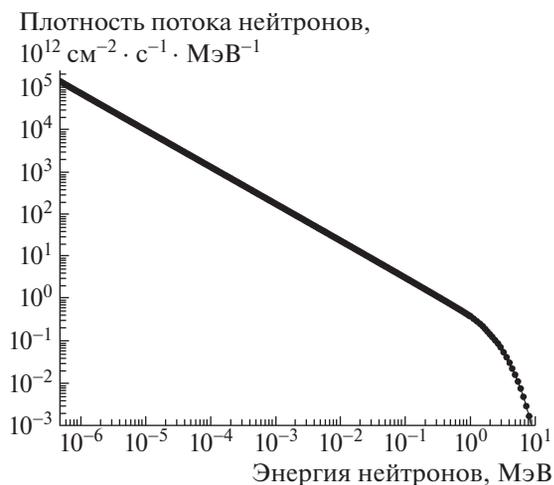


Рис. 1. Дифференциальная энергетическая плотность потока нейтронов на расстоянии 30 см от водяного замедлителя [3].



На рис. 2 и 3 представлены энергетические зависимости сечений этих реакций [5]. Согласно рис. 2б, реакция (n, p) протекает как раз в интересующем нас диапазоне энергий. Сечение этой реакции на плато составляет десятые доли барн. Согласно рис. 3б, реакция (n, t) начинает протекать при энергии > 16 МэВ, а ее сечение составляет десятые доли миллибарн.

Для проведения н.а.а. с высокой точностью применяются лабораторный γ -спектрометр Can-

berra GC10021 и многоканальный анализатор Lynx. Диапазон регистрируемых энергий рентгеновского и γ -излучения составляет от 40 кэВ до 10 МэВ, хотя используемый в лабораторных исследованиях энергетический диапазон, как правило, не превышает 3 МэВ. Интегральная нелинейность спектрометра Canberra GC10021 составляет 0.025%, что говорит о четком соответствии канал–энергия [6].

Для спектрометра Canberra GC10021 разрешающая способность составляет 1.1 кэВ на линии 122 кэВ и 1.8 кэВ на линии 1332 кэВ.

Для выполнения расчетов плотностей потоков быстрых нейтронов используется эффективное сечение $\sigma_{\text{эфф}} = 92$ мб. Это значение рассчитано с учетом соотношения ядер ${}^{60}\text{Ni}$ к ядрам ${}^{58}\text{Ni}$ в используемой для измерений проволоке и интегральных сверток сечений реализуемых реакций. Формула для расчета плотности потока быстрых нейтронов с учетом переходных коэффициентов имеет вид:

$$\Pi = \frac{\alpha A_{\infty}}{\rho \sigma} \text{ [нейтронов/(см}^2 \cdot \text{с)],} \quad (3)$$

где l , см – длина проволоки; σ , мб – эффективное сечение; A_{∞} , Бк – активность, которую будет иметь ${}^{58}\text{Co}$ при вечном облучении (скорость распада равна скорости образования изотопа); $\rho = 8.47556$ г/см³ – объемная плотность спутника; $\alpha = 0.000092$ г · 10⁻²⁷/см² – переходной коэффициент.

A_{∞} определяется как

$$A_{\infty} = A_k / (1 - 2^{-t/T}), \quad (4)$$

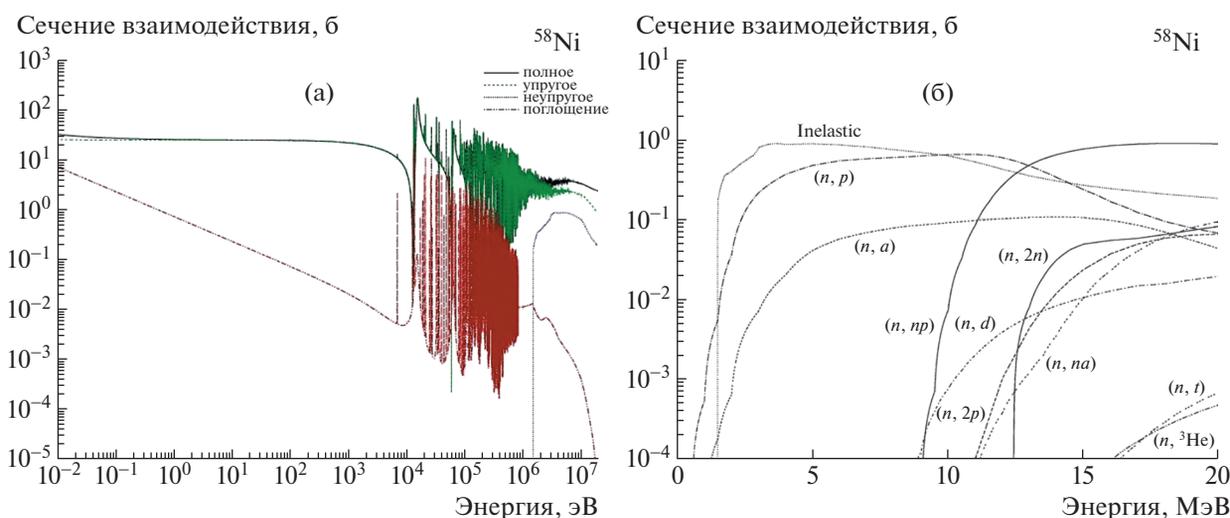


Рис. 2. Энергетические зависимости: а – эффективного ядерного сечения реакций взаимодействия нейтронов с ядрами ${}^{58}\text{Ni}$; б – сечений реакций захвата нейтронов для ${}^{58}\text{Ni}$ [5].

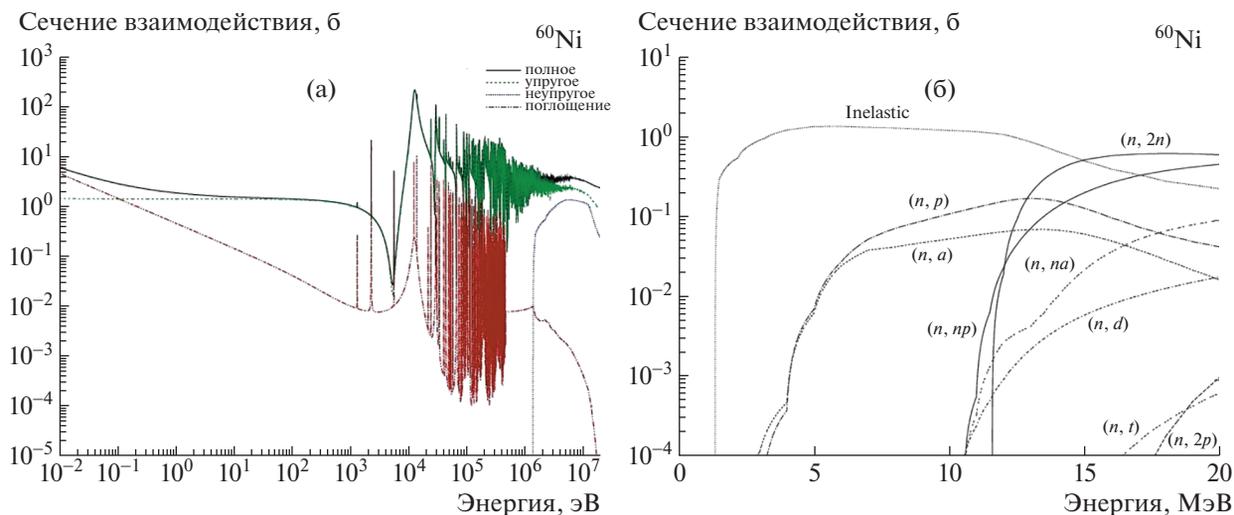


Рис. 3. Энергетические зависимости: а – эффективного ядерного сечения реакций взаимодействия нейтронов с ядрами ^{60}Ni ; б – сечений реакций захвата нейтронов для ^{60}Ni [5].

где t – время облучения; T – период полураспада (~ 71 день для ^{58}Co); A_k , Бк – активность ^{58}Co на конец облучения.

Активность на конец цикла облучения, согласно закону радиоактивного распада, определяется из измеренной активности спутника и времени от конца облучения до момента исследования образца. Спектр измеренного спутника представлен на рис. 4, положение пика полного поглощения при энергии $E_\gamma = 810.7$ кэВ соответствует ^{58}Co .

Расчетная плотность потока нейтронов с учетом экспериментально полученных активностей изотопов в зависимости от расстояния до водяного замедлителя реактора представлена на рис. 5.

Флюенс определялся путем умножения плотности потока на время облучения.

Как было отмечено выше, средняя мощность реактора постепенно снижалась с 1.85 до 1.55 МВт. Полученные ранее и новые значения плотности потока быстрых нейтронов в сравнении представлены на рис. 6. Согласно рис. 6, среднее абсолютное изменение плотности потока быстрых нейтронов при снижении средней мощности реактора составило 15%. Это значение вполне соотносится с изменением средней мощности реактора. Существенное отклонение на расстоянии ~ 5 м

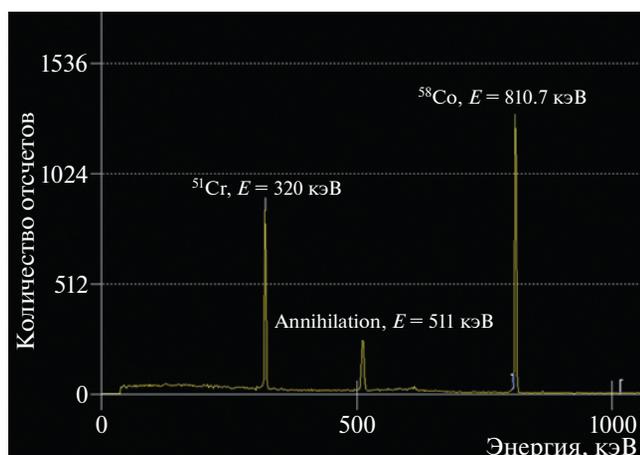


Рис. 4. Измеренный спектр γ -квантов спутника н.а.а. после облучения.

Плотность потока быстрых нейтронов, нейтронов/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)

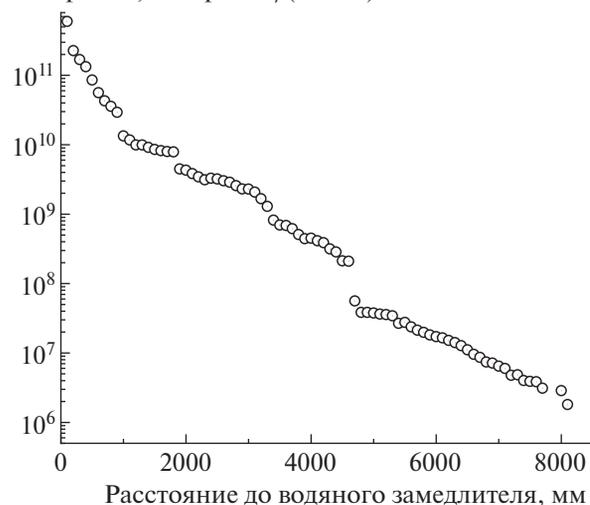


Рис. 5. Зависимость плотности потока быстрых нейтронов от расстояния до водяного замедлителя.

Плотность потока быстрых ($E > 1$ МэВ) нейтронов, нейтронов/(см² · с)

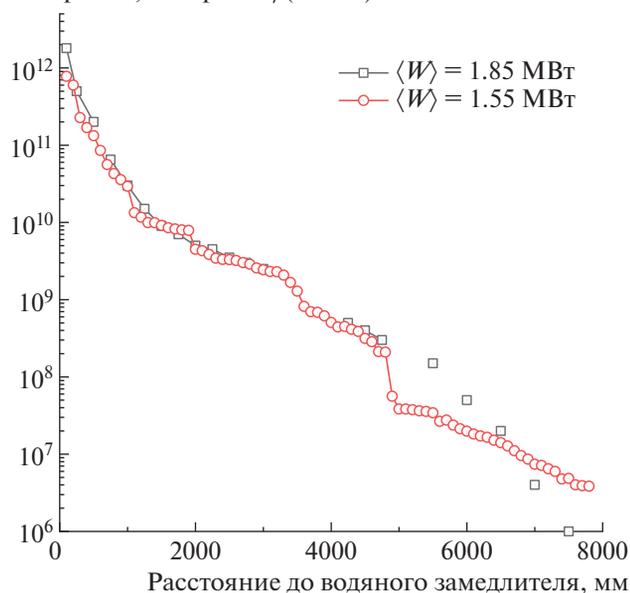


Рис. 6. Плотности потока быстрых нейтронов при разных средних мощностях W реактора ИБР-2.

от водяного замедлителя обусловлено использованием другого нейтронотода внутри облучательной установки.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЯ ГАММА-КВАНТОВ

Методом Монте-Карло был рассчитан приведенный к одному нейтрону спектр γ -квантов на минимально возможном удалении, ~ 100 мм, образцов от водяного замедлителя (рис. 7).

При проведении экспериментов с облучением биологических систем и различных полимеров важным вкладом в общую дозовую нагрузку будет являться поглощенная доза γ -излучения. Величина поглощенной дозы определялась при помощи радиоохромных дозиметров FWT-60-00, содержащих в нейлоновой матрице лейкокраситель парарозанилин цианид [7], и фотометра FWT-92D фирмы Far West Technology inc. Поглощенная γ -доза в пленке определялась по изменению ее оптической плотности до и после облучения.

Стандартные дозиметры имеют размеры 10×10 мм и толщину ~ 42.5 мкм. Химический состав (в процентах от массы) дозиметра: 63.7% С, 12.0% N, 9.5% H и 14.8% O. Дозиметр не теряет гибкости и остается простым в обращении, даже после воздействия значительной поглощенной дозы, порядка нескольких десятков мегарад. Данные дозиметры характеризуются небольшим затуханием после облучения, линейным откликом в широком диапазоне доз, минимальной зависимостью

Поток γ -квантов, 10^{-7} квантов/см²

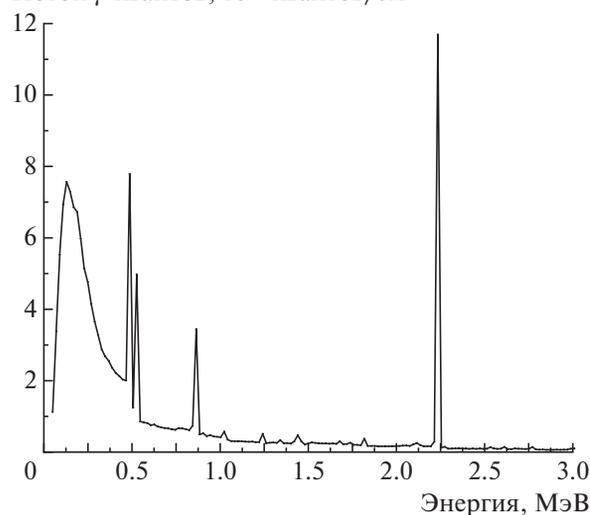


Рис. 7. Рассчитанный методом Монте-Карло спектр γ -квантов на один нейтрон на расстоянии 100 мм от водяного замедлителя.

от параметров окружающей среды, продолжительным сроком службы. Принцип работы фотометра и дозиметров описан в работах [7, 8]. Измеренные поглощенные дозы γ -излучения, приведенные к мощности поглощенных доз (отношение поглощенной в пленках дозы ко времени облучения), представлены на рис. 8.

В силу ограниченности диапазона измеряемых поглощенных доз γ -излучения дозиметрами FWT-

Мощность поглощенной дозы γ -излучения, Гр/с

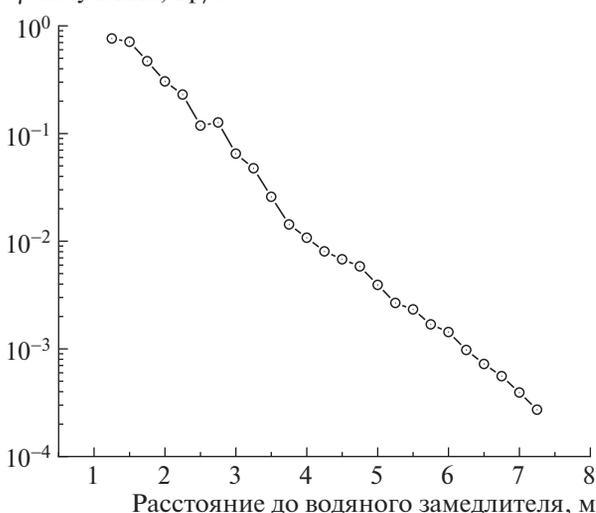


Рис. 8. Измеренные мощности поглощенных в FWT-60-00 доз γ -излучения для облучательной установки в канале № 3 реактора ИБР-2.

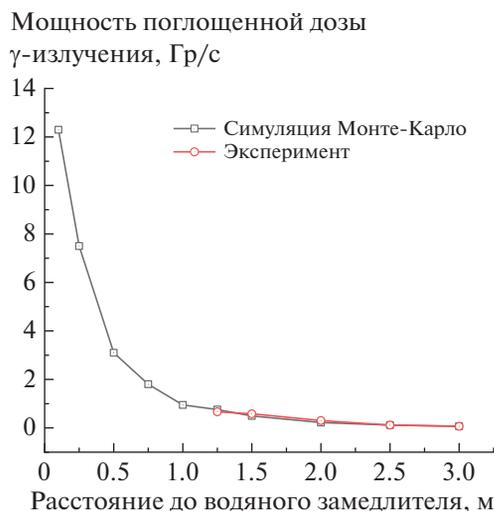


Рис. 9. Измеренная и рассчитанная мощности поглощенной в FWT-60-00 дозы γ -излучения.

60-00 было проведено моделирование мощностей доз в программе MCNP для остальной части облучательной установки, где измерения уже невозможны. MCNP представляет собой программу, позволяющую моделировать методом Монте-Карло перенос и взаимодействие ионизирующего излучения в конкретных материалах и системах. Результаты расчетов и экспериментальные данные представлены на рис. 9. Как видно, они отлично соотносятся друг с другом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены текущие характеристики полей ионизирующего излучения и методики их количественной оценки для облучательной установки канала № 3 реактора ИБР-2. Уточнены плотности потоков быстрых нейтронов для мощности 1.55 МВт реактора ИБР-2. Впервые экспериментально получены величины поглощенных доз γ -излучения. Значения, превышающие измеряемый дозиметрами диапазон поглощенных доз, вблизи водяно-

го замедлителя были рассчитаны методом Монте-Карло. Полученные характеристики облучательной установки позволяют пользователям самостоятельно выбирать положения образца с учетом требуемых количественных величин полей ионизирующих излучений.

Облучательная установка позволяет обеспечить широкий диапазон плотностей потоков быстрых нейтронов (6 порядков) и поглощенной дозы γ -излучения (5 порядков) вдоль своей длины, поэтому может быть использована для проведения большого числа экспериментов на радиационную стойкость материалов и систем.

Данная работа была написана при поддержке Минобрнауки РФ № 075-15-2021-1352.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булавин М.В., Верхоглядов А.Е., Кулагин Е.Н., Афанасьев С.В., Замятин Н.И., Шафрановская А.И. // Сообщение ОИЯИ № РЗ-2017-55. Дубна, 2017.
2. Bulavin M.V., Cheplakov A.P., Kukhtin V.V., Kulagin E.N., Kulikov S.A., Shabalin E.P., Verkhoglyadov A.E. // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. Section B Beam Interactions with Materials and Atoms. 2015. V. 12. № 2. P. 26. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2014.11.024>
3. Shabalin E.P., Verkhoglyadov A.E., Bulavin M.V., Rogov A.D., Kulagin E.N., Kulikov S.A. // Phys. of Particles and Nucl. Lett. 2015. V. 12. № 2. P. 344. <https://doi.org/10.1134/S154747711502020X>
4. Handbook of Radioactivity Analysis. 2nd Ed. / Ed. by M.F. L'Annunziata. San Diego: Acad. Press, 2003.
5. <https://www.ndc.jaea.go.jp/jendl/j40/j40f28.html>
6. Гамма-спектрометры многоканальные для измерения рентгеновского и гамма-излучения CANBERRA. Руководство по эксплуатации. Mirion Technologies (Canberra). Inc. M., 2018.
7. Радиохромные дозиметры серии FWT-60: [Электронный ресурс] // Far West Technology, Inc. © M., 2002. URL: <http://www.fwt.com/racm/fwt60ds.htm>. (Дата обращения 05.03.2021).
8. Radiachromic reader FWT-92D. Operation manual. Far West Technology. California, Inc. Goleta, 1996.

МЕТОД УЛУЧШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАЗРЕШЕНИЯ
ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ГАММА-КВАНТОВ ОРГАНИЧЕСКИМ
СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫМ ДЕТЕКТОРОМ ВС-420© 2022 г. Elif Ebru Ermis^{a,*}, Cuneyt Celiktaş^b^a *Izmir Tinaztepe University, Vocational School of Health Services, Medical Imaging Techniques Department, 35400, Buca, Izmir, TURKEY*^b *Ege University, Faculty of Science, Physics Department, 35100, Bornova, Izmir, TURKEY**e-mail: elermis@hotmail.com

Поступила в редакцию 17.12.2021 г.

После доработки 17.01.2022 г.

Принята к публикации 20.01.2022 г.

Используемые в настоящее время в новых устройствах позитронной томографии (PET), например типа J-PET, пластические (органические) сцинтилляторы не обладают нужными параметрами для детектирования гамма-квантов. Предлагается экспериментальный метод улучшения энергетического разрешения детектора γ -квантов на основе сцинтиллятора ВС-420 с использованием метода временной привязки с постоянным порогом. Гамма-кванты от радиоактивного источника ^{137}Cs регистрируются либо непосредственно, либо с использованием метода временной привязки с последующим сравнением полученных результатов. Результаты показывают, что использованный метод значительно улучшает энергетическое разрешение детектора этого типа. Таким образом, характеристики системы J-PET могут быть улучшены, если в электронике прибора будет использован предлагаемый метод.

DOI: 10.31857/S0032816222030156

ВВЕДЕНИЕ

Определенные уровни энергии γ -излучения радиоизотопа при регистрации образуют набор резких линий, образующих в приборе фотопики. Основную информацию для построения изображений дает фотопоглощение γ -квантов, в то время как случаи рассеяния малоинформативны или даже рассматриваются как шум или помехи. Поэтому, чтобы выделить желательные первичные фотоны и исключить нежелательные рассеянные, в амплитудном спектре обычно устанавливают окно в центре фотопики.

Выходной сигнал получается при взаимодействии падающего γ -кванта с веществом детектора. В случае многократного рассеяния падающих квантов некоторые кванты могут быть пропущены, а другие ошибочно зарегистрированы в детекторе как единичное взаимодействие с неправильной амплитудой и/или длительностью импульса [1]. Такие эффекты отрицательно влияют на энергетическое разрешение. Поэтому работа детектора требует усовершенствования.

Свойства сцинтилляторов ВС-420 исследуются в настоящее время довольно подробно. Резуль-

таты калибровки сцинтиллятора ВС-420 при облучении нейтронами и γ -квантами представлены в работе Pozzi et al. [2]. Работа сцинтиллятора в спектрометрическом режиме для измерения времени жизни позитрона была исследована Sago et al. [3]. Смирский и др. изучили возможность улучшения пространственного разрешения PET-сканера с пластическими сцинтилляторами [4]. Использование некоторых пластических сцинтилляторов, включая ВС-420, для различных радиационных применений представлено в кратком обзоре Mukhopadhyay and Nevada [5]. Характеристики этого сцинтиллятора при регистрации пионов исследованы Ahmad et al. [6].

Известно, что измерение длительности импульсов используется для разделения частиц различных типов. Разделение основано на определении временных характеристик импульсов, генерируемых в детекторе падающими частицами. Один из самых часто используемых и эффективных методов разделения — метод временной привязки с постоянным порогом. В этом методе регистрируемый импульс делится на два. Одна часть импульса задерживается на время длительности фронта импульса, а другая — инвертируется

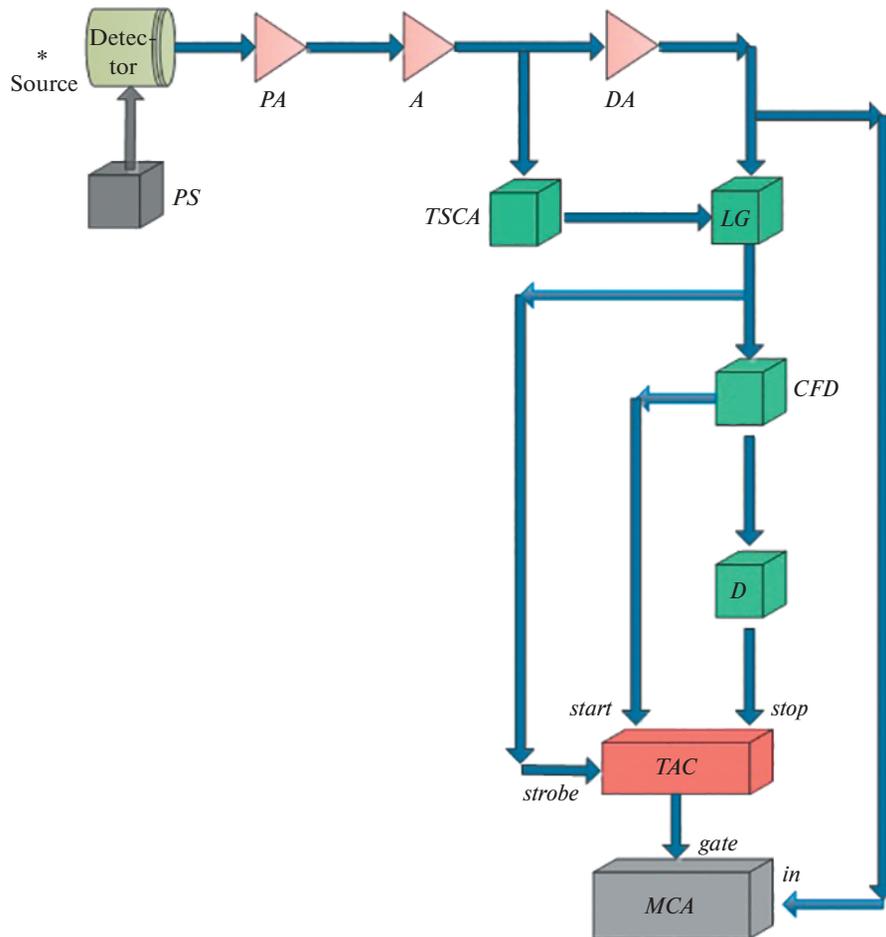


Рис. 1. Принципиальная схема используемого спектрометра. *PS* – источник напряжения ORTEC 556; *PA* – предусилитель ORTEC 113; *A* – основной усилитель ORTEC 485; *DA* – усилитель с задержкой сигнала ORTEC 427A; *TSCA* – временной одноканальный анализатор ORTEC 420A; *LG* – линейные ворота ORTEC 426; *CFD* – дискриминатор с постоянным порогом ORTEC 584; *D* – блок задержки ORTEC 425A; *TAC* – времяамплитудный конвертер ORTEC 566; *MCA* – многоканальный анализатор ORTEC Easy MCA 2k.

и уменьшается по амплитуде в определенное число раз. Сформированные таким образом импульсы суммируются и в результате получается биполярный импульс [7].

Пластические сцинтилляторы чувствительны к γ -квантам и имеют значительный световыход и малую длительность сцинтилляции. Это делает этот материал подходящим для временных измерений [8], а также для использования при сканировании тела пациента в томографии. Пластические сцинтилляторы были впервые использованы в Jagiellonian Positron Emission Tomograph (J-PET) [9]. Органические сцинтилляторы типа BC-420 применяли в своих работах с J-PET авторы статьи [9], а также Gnatek [10] и Moskal et al. [11]. Хотя пластические сцинтилляторы имеют лучшие временные характеристики, у них эффективность регистрации γ -квантов меньше, чем у неорганических кристаллов. По этой причине

проведена экспериментальная работа по улучшению энергетического разрешения детекторов такого типа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использован сцинтилляционный детектор с пластическим сцинтиллятором BC-420 фирмы Saint Gobain диаметром 2 дюйма и высотой 2 дюйма с фотоумножителем R1828-01 фирмы Hamamatsu в магнитном экране. Среди самых быстрых пластических сцинтилляторов исследованный нами сцинтиллятор занимает второе место по длительности сигнала (1.5 нс) [12].

Облучение осуществлялось точечным источником ^{137}Cs активностью 5 мкКи фирмы Spectrum Techniques Co., нанесенным на майларовый диск диаметром 25 мм и толщиной 5 мм. Использовалось пассивное подавление фона, время измере-

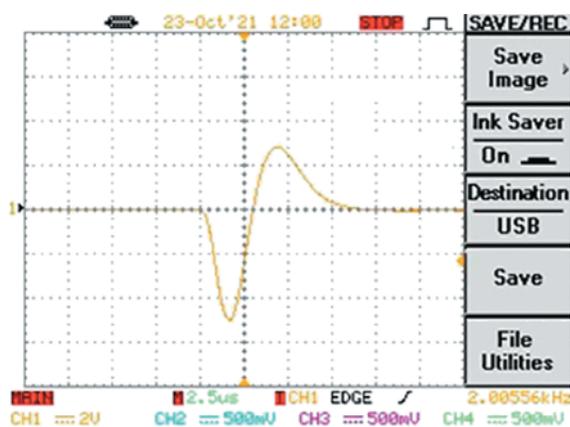


Рис. 2. Форма выходного сигнала усилителя.

ния равно 100 с. Схема установки показана на рис. 1.

В данном спектрометре γ -кванты от источника регистрируются детектором. Сигналы с детектора поступают на предусилитель *PA* и усиливаются основным усилителем *A*. Биполярный сигнал (рис. 2) с усилителя разделяется на два канала, разделенные сигналы поступают на временной одноканальный анализатор *TSCA* (см. рис. 1) и усилитель с задержкой сигнала *DA*. Так осуществляется выделение фотопика от ^{137}Cs .

Выходные сигналы этих устройств подаются на линейные ворота *LG*, а выходной сигнал линейных ворот поступает на дискриминатор с постоянным порогом *CFD*. Блок *CFD* генерирует два выходных сигнала. Один из них умножается на некоторый коэффициент f для получения импульса с желательной амплитудой. Другой сигнал, кроме того, инвертируется и задерживается на время, превышающее длительность фронта исходного сигнала. Длительность фронта принимается равной интервалу от 10 до 90% максимальной амплитуды (рис. 3). Задержанный и инвертированный сигналы затем суммируются, создавая окончательную форму импульса [13]. Для дискриминации шумовых сигналов в дискриминаторе

CFD устанавливается порог, равный 10 мВ. Форма выходного сигнала дискриминатора с постоянным порогом *CFD* показана на рис. 4.

Выходные сигналы с *CFD* подаются на входы “Start” и “Stop” времяамплитудного преобразователя *TAC*, который стробируется сигналом с линейных ворот, задающим цикл считывания. При этом генерируется временной сигнал, пропорциональный длительности интервала между импульсами *start* и *stop*. Лучший результат получен при задержке, равной 16 нс. Сигнал с выхода усилителя с задержкой *DA* подается на многоканальный анализатор *MCA*, управляемый временным сигналом с времяамплитудного преобразователя *TAC*. В результате анализатор регистрирует только импульсы от детектора, которые разрешает регистрировать временной сигнал. Это краткое описание временной части системы регистрации, называемой методом временной привязки с постоянным порогом. Детальное описание метода приведено в [13]. Описанная процедура позволяет выделить сигналы, соответствующие фотопику. На рис. 5 показана форма выходного логического сигнала *TAC*.

Полученные результаты работы схемы приведены ниже.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Система регистрации γ -квантов одним из самых быстрых органических сцинтилляторов (BC-420) фирмы Saint Gobain Co. была испытана и проведены исследования, направленные на улучшение энергетического разрешения фотопика установки РЕТ. Спектр γ -квантов ^{137}Cs непосредственно от детектора показан на рис. 6.

Как видно из рис. 6, хотя спектр и напоминает типичный спектр ^{137}Cs , фотопик выделяется очень плохо. По этой причине был использован предложенный временной процесс, при котором на регистрацию проходят только сигналы, соответствующие фотопику. Полученный результат показан на рис. 7. Прошедшие нашу систему

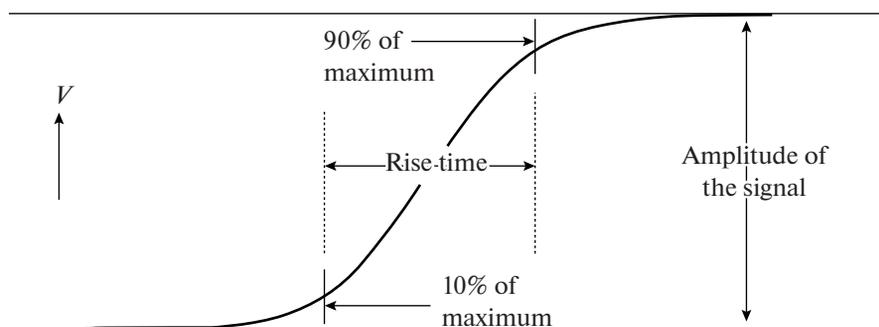


Рис. 3. Схематическое представление фронта импульса [14].

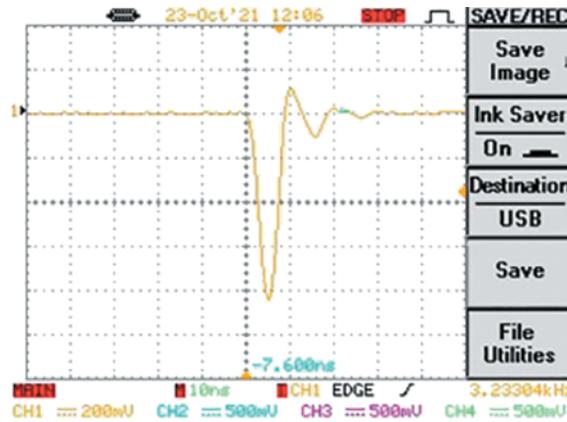


Рис. 4. Форма выходного сигнала дискриминатора с постоянным порогом *CFD*.

стробируемые импульсы, образующие фотопик, и исходный спектр с детектора в сравнении показаны на рис. 8.

Спектр, полученный после применения процесса временной обработки, показан на рис. 9. Изменения, полученные в результате временной обработки импульсов фотопика, показаны на рис. 10.

Как правило, уменьшенная ширина пика означает лучшее энергетическое разрешение. Согласно рис. 10, некоторые импульсы, соответствующие фотопику, но не попадающие в регистрируемый временной интервал, исключаются из регистрации, поэтому пик становится тоньше. Это показывает, что временной процесс весьма эффективно дискриминирует сигналы, не относящиеся к фотопику, улучшая энергетическое разрешение. Согласно рис. 7 и 9, энергетическое разрешение улучшается с 24.5 до 12.6%, т.е. почти вдвое. Это очень хороший результат.

Считается, что органические сцинтилляторы будут более предпочтительными материалами по

сравнению с неорганическими кристаллами, особенно в медицинской визуализации, из-за их малого времени срабатывания. Достичь лучших временных характеристик можно, если органические сцинтилляторы использовать совместно с новыми современными кремниевыми фотоумножителями. Это будет способствовать построению времяпролетных ПЕТ. Улучшенное энергетическое разрешение в совокупности с высоким временным разрешением оказывается важным свойством для различения частиц с разной энергией и улучшения визуализации, что приводит к снижению электронного шума в электронике и повышению качества изображения. Ожидается, что такая техника будет более полезной при разработке медицинской диагностической аппаратуры.

Как известно, детекторы ПЕТ для получения четких томограмм и успешного лечения должны иметь максимально быстрое время отклика и высокое энергетическое разрешение. Поэтому любой способ обеспечения таких характеристик

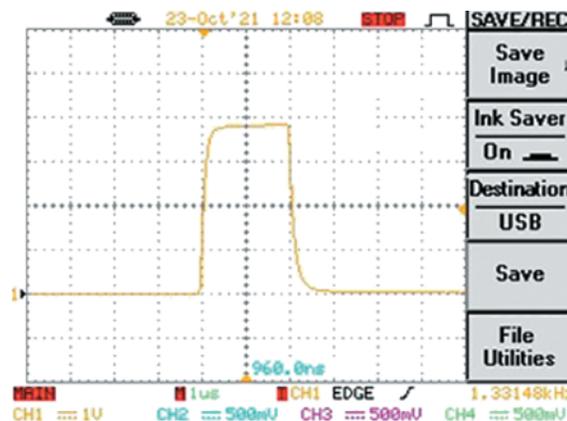


Рис. 5. Форма выходного сигнала времяамплитудного преобразователя *TAC*.

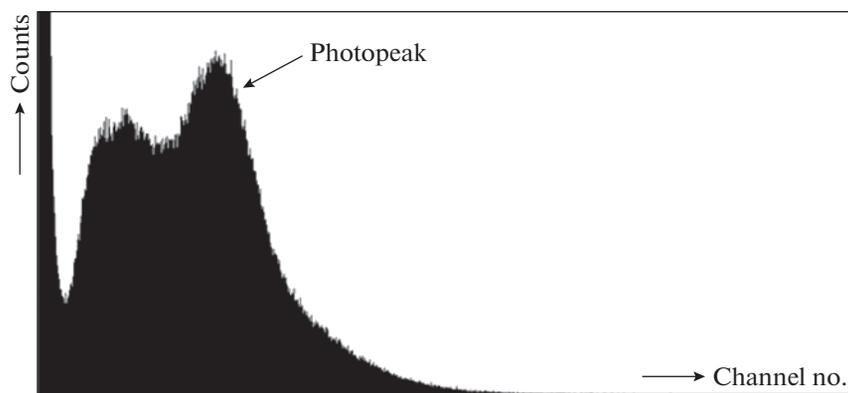


Рис. 6. Спектр γ -квантов ^{137}Cs от детектора со сцинтилятором BC-420.

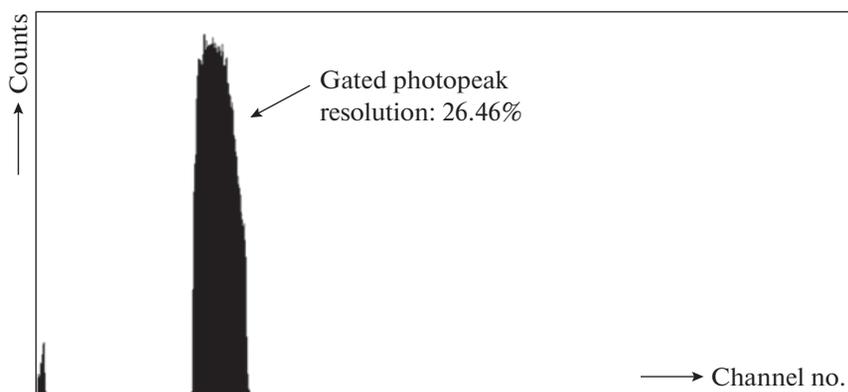


Рис. 7. Стробируемый фотопик (662 кэВ).



Рис. 8. Сравнение спектров: спектр непосредственно от детектора (красный); стробируемый фотопик (черный).

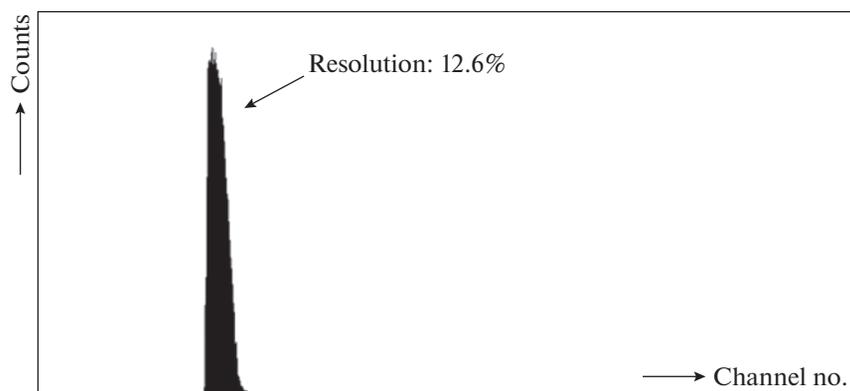


Рис. 9. Фотопик после временной обработки.



Рис. 10. Сравнение спектров: стробируемый фотопик (красный); фотопик после временной обработки (черный).

оказывается полезен для медицинского сообщества.

Таким образом, внедрение предложенного метода улучшения энергетического разрешения детектора со сцинтиллятором ВС-420, используемым в устройствах J-РЕТ, позволит усовершенствовать возможности медицинской диагностики.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа была поддержана The Scientific and Technological Research Council of TURKEY under project no. 121F012.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chen, C.T., Kao, C.M., *Radiation Detection in SPECT and PET in Radiation Detectors for Medical Imaging*, ed. by J.S. Iwanczyk, Boca Raton: CRC Press, 2016.
2. Pozzi, S.A., Mullens, J.A., Mihalcz, J.T., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, 2004, vol. 524, p. 92, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2003.12.036>
3. Saro, M., Petriska, M., Slugen, V., *AIP Conf. Proc.* 1996, 2018, vol. 020040, p. 1, <https://doi.org/10.1063/1.5048892>
4. Smyrski, J., Alfsa, D., Bednarska, T., Białasa, P., Czerwińska, E., Dulskia, K., Gajosa, A., Głowaczka, B., Gupta-Sharma, N., Gorgolb, M., Jasińskab, B., Kajetanowicz, M., Kamińska, D., Korcyła, G., Kowalski, P., et al., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, 2017, vol. 851, p. 39, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.01.045>
5. <https://www.osti.gov/servlets/purl/811396>
6. Ahmad, S., Bonner, B.E., Gere, W., Mutchler, G.S., Rambo, P., Toshkov, S., Platner, E., Crawford, H.J., Engelage, J.M., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, 1993, vol. 330, issue 3, p. 416, [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(93\)90570-8](https://doi.org/10.1016/0168-9002(93)90570-8)
7. Ermis, E.E., *Instrum. Exp. Techn.*, 2021, vol. 64, no. 5, p. 776. <https://doi.org/10.1134/S0020441221050183>
8. <https://www.crystals.saint-gobain.com/radiation-detection-scintillators/plastic-scintillators>

9. *Niedźwiecki, S., Białas, P., Curceanu, C., Czerwiński, E., Dulski, K., Gajos, A., Głowacz, B., Gorgol, M., Hiesmayr, B.C., Jasińska, B., Kapłon, Ł., Kisielewska-Kamińska, D., Korcyl, G., Kowalski, P., Koziket, T., et al., Acta Phys. Pol., Sect. B, 2017, Vol. 48, no. 10, p.1567. <https://doi.org/10.5506/APhysPolB.48.1567>*
10. *Gnatek, J.A., Ph.D. Thesis, no. 1100752, Krakow: Uniwersytet Jagielloński w Krakowie, 2017.*
11. *Moskal, P., Niedźwiecki, S., Bednarski, T., Czerwiński, E., Kapłon, Ł., Kubicz, E., Moskal, I., Pawlik-Niedźwiecka, M., Sharma, N.G., Silarski, M., Zieliński, M., Zoń, N., Bi-
ałas, P., Gajos, A., Korcyl, G., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, 2014, vol. 764, p. 317, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.07.052>*
12. <https://www.crystals.saint-gobain.com/products/organic-scintillation-materials>
13. *Knoll, G.F., Radiation Detection and Measurement, NY.: John Wiley and Sons, 2000.*
14. *Celiktas, C., Instrum. Sci. Technol., 2006, vol. 34, p. 335, <https://doi.org/10.1080/10739140600609458>*

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРА

© 2022 г. Я. В. Лужанчук^{a,*}^a ВНИИ автоматики им. Н.Л. Духова
Россия, 127055, Москва, Суцневская ул., 22

*e-mail: Luzhanchuk@mail.ru

Поступила в редакцию 24.01.2022 г.

После доработки 31.01.2022 г.

Принята к публикации 01.02.2022 г.

Представлены результаты исследований эффективности регистрации нейтронов детектора на основе ³He-счетчиков в приборах радиационного мониторинга. Рассмотрены факторы, влияющие на эффективность регистрации нейтронов. Показана возможность оптимизации детектора с точки зрения отношения полезного сигнала к фону.

DOI: 10.31857/S0032816222040061

ВВЕДЕНИЕ

Принцип работы радиационного монитора основан на регистрации γ - и n -излучения ядерных материалов с последующей обработкой результатов измерений и принятием решения о значимом превышении полученных результатов над уровнем фона. Поток нейтронов, создаваемый ядерными материалами, очень мал и составляет, например, для плутония $60 \text{ (г} \cdot \text{с)}^{-1}$ [1]. Для обнаружения меньшего количества ядерных материалов необходимо, чтобы нейтронный фон естественного излучения был как можно меньше, а полезный сигнал – как можно больше.

В работе рассмотрено влияние конструкции замедлителя на эффективность пропорциональных ³He-счетчиков с полиэтиленовым замедлителем. Показана возможность повышения отношения полезного сигнала от ядерного материала к фону естественного излучения за счет отличия в энергетическом спектре.

ВЛИЯНИЕ ЗАМЕДЛИТЕЛЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ НЕЙТРОНОВ

Эффективность регистрации ϵ определяется отношением числа отсчетов, зарегистрированных детектором, к количеству излученных нейтронов ядерным материалом. Эффективность регистрации нейтронов ³He-счетчиками растет с уменьшением энергии нейтронов и для тепловых нейтронов составляет 80%. Регистрация нейтронов в счетчике проходит по реакции: ${}^3\text{He} + n \rightarrow$

$\rightarrow {}^3\text{H} + p + 760 \text{ кэВ}$, сечение которой для тепловых нейтронов равно 5300 б. Таким образом, расположение полиэтиленового замедлителя может существенно влиять на эффективность регистрации.

В данной работе с помощью метода Монте-Карло и данных, приведенных в работе [2], проведены расчеты для детектора нейтронного излучения на основе пропорционального ³He-счетчика, помещенного в замедлитель. Счетчик наполнен ³He под давлением 4 атм и имеет размеры $\varnothing 30 \times 320$ мм. Полиэтилен имеет длину $b = 320$ мм, ширину $a = 100$ мм и толщину, складывающуюся из двух размеров h_1 и h_2 , мм, относительно центра счетчика. Источник нейтронов ²⁵²Cf размещен на расстоянии $r = 500$ мм от центра детектора на линии, перпендикулярной к ³He-счетчику (рис. 1). Для расчетов был использован спектр деления Уатта со средней энергией нейтронов 2.306 МэВ:

$$f(E) = 0.30033e^{-E/1.025} \text{sh}(\sqrt{2.926E}), \quad (1)$$

где E , МэВ – энергия нейтронов.

Результаты расчета представлены на рис. 2. Статистическая погрешность эффективности регистрации составила <1%. Толщина полиэтилена отсчитывалась от центра счетчика вверх h_1 и вниз h_2 . Наиболее высокую эффективность регистрации обеспечивали слои полиэтилена, один из которых, толщиной 60 мм, установлен перед ³He-счетчиком, а второй, толщиной 80 мм, – за ним. При заданной толщине полиэтилена, находяще-

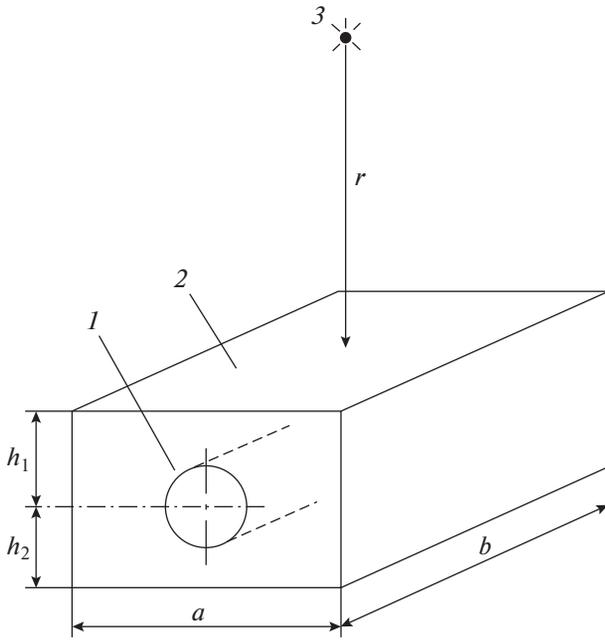


Рис. 1. Схема измерений нейтронного излучения. 1 – счетчик нейтронов, заполненный ^3He ; 2 – полиэтилен; 3 – источник нейтронов.

гося за счетчиком, с увеличением толщины полиэтилена перед счетчиком эффективность регистрации сначала увеличивается, а затем снижается, что связано с захватом нейтронов водородом.

При заданной толщине полиэтилена перед счетчиком с увеличением толщины полиэтилена за счетчиком эффективность регистрации приближается к асимптотическому значению. Этот эффект объясняется отражением нейтронов от полиэтилена, находящегося за счетчиком.

СНИЖЕНИЕ ФОНА ЕСТЕСТВЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Основными источниками нейтронного излучения на поверхности Земли являются вторичное космическое излучение и земная кора. Экспериментальные данные, полученные сотрудниками НИИЯФ МГУ в Москве на Воробьевых горах, в здании физического факультета Московского университета, на высоте порядка 20 м, показывают, что потоки нейтронов с энергией не более 0.45 эВ (70%) достигают значений до $2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ [3]. Учитывая этот факт, представляется возможным снизить естественный фон, используя кадмиевый фильтр. Последний обеспечит снижение эффективности регистрации падающих нейтронов всех энергий, но больший эффект будет достигнут для нейтронов более низких энергий – фоновых нейтронов космического излучения и земной коры.

На рис. 3 представлена зависимость эффективности регистрации от энергии нейтронов для кадмиевых фильтров разной толщины. Для расчетов использована геометрия эксперимента,

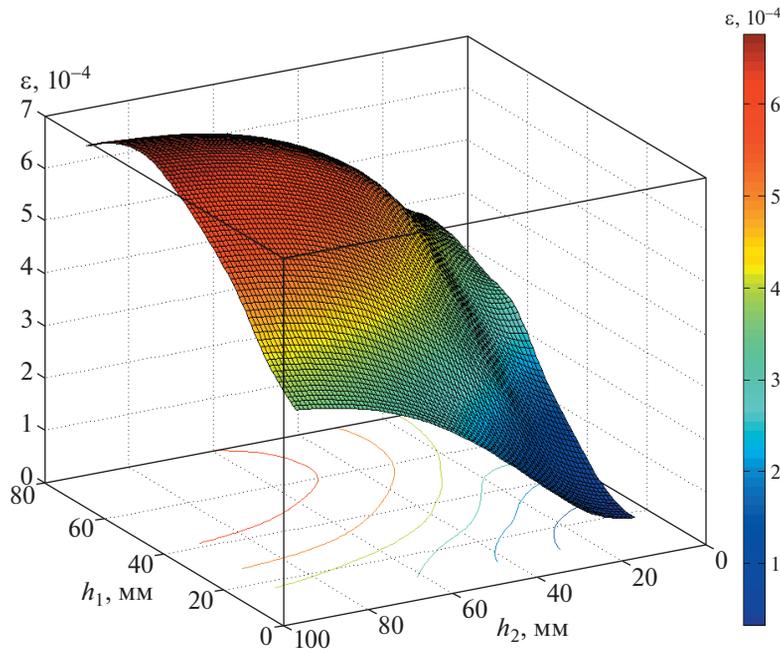


Рис. 2. Зависимость эффективности регистрации ϵ детектора нейтронов от толщины полиэтилена относительно центра счетчика сверху h_1 и снизу h_2 .

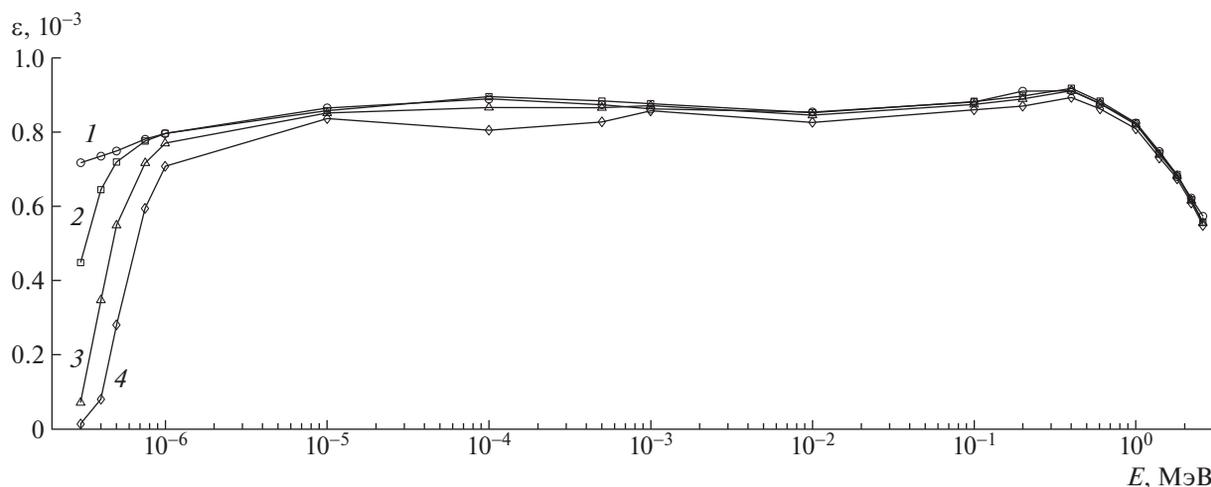


Рис. 3. Зависимость эффективности регистрации детектора от энергии нейтронов при толщине кадмиевого фильтра: 0 (1), 0.1 (2), 0.5 (3), 1.5 мм (4).

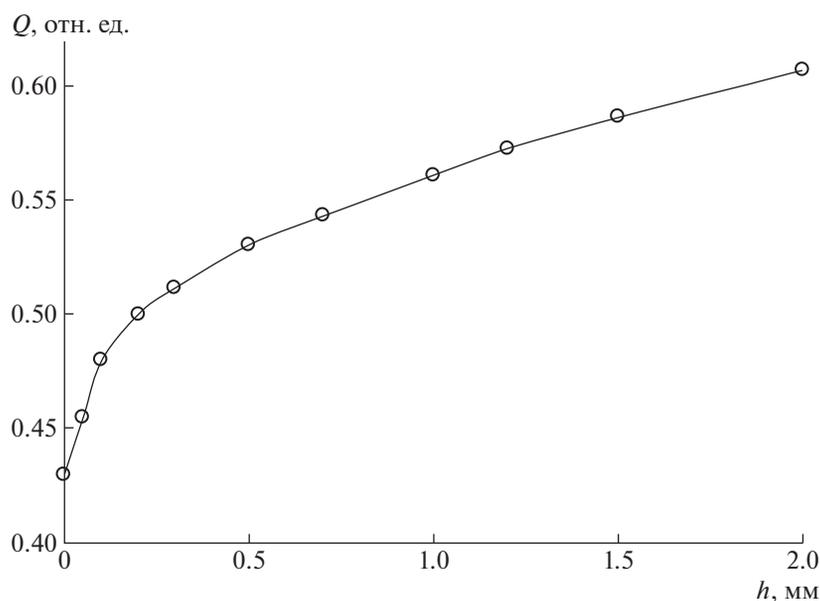


Рис. 4. Зависимость коэффициента качества Q от толщины кадмиевого фильтра h .

представленная на рис. 1, с добавлением кадмиевого фильтра размером 320×100 мм, размещенного на верхней части полиэтиленового замедлителя. Результаты расчета показали, что при использовании кадмиевого фильтра эффективность регистрации падающих нейтронов с энергией до 1 эВ снижается значительно, а с большей энергией — незначительно. Спад эффективности в области энергий более 0.5 МэВ обусловлен недостаточным количеством замедлителя.

Для выяснения суммарного эффекта фильтрации фоновых нейтронов проведен расчет коэффициента качества $Q = N/\sqrt{N_{\text{ф}}}$, который показывает

превышение полезного сигнала от источника N над фоном $N_{\text{ф}}$. В качестве источника фонового излучения было использовано распределение Максвелла со средней энергией нейтронов 0.75 эВ, для источника нейтронов ^{252}Cf — спектр деления Уатта со средней энергией нейтронов 2.306 МэВ.

Результаты расчета позволили установить, что добавление кадмиевого фильтра позволяет в разы уменьшить фон естественного излучения при снижении полезного сигнала на единицы процентов (рис. 4). Например, для кадмиевого фильтра толщиной 1 мм фон естественного излучения

Таблица 1. Порог обнаружения нейтронов детектором

	Без фильтра		С фильтром	
	Фон, с ⁻¹	0.09	0.13*	0.06
Порог обнаружения ²³⁹ Pu, Г	97	47*	83	37*

* В детекторе установлено два ³He-счетчика

уменьшается в 1.76 раза при снижении полезного сигнала на 2%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Для измерений использовали детектор нейтронного излучения на основе пропорциональных ³He-счетчиков, помещенных в замедлитель. Измерения проводили как с использованием кадмиевого фильтра толщиной 1 мм, который размещали со всех сторон детектора, так и без него. Порог обнаружения определялся измерением скоростей счета фона и сигнала с фоном. Под порогом обнаружения понимают минимальную массу ядерного материала, которую способен обнаружить радиационный монитор с вероятностью 0.5 и доверительной вероятностью 0.95 [4]. Скорость счета сигнала с фоном определялась расположением источника нейтронов ²⁵²Cf на расстоянии 50 см от эффективного центра детектора. Результаты измерений фона и порога обнаружения представлены в табл. 1.

Анализ полученных результатов показал, что применение кадмиевого фильтра позволяет уменьшить фон естественного излучения и, как след-

ствие, снизить порог обнаружения ядерного материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования позволили установить оптимальную толщину полиэтилена, при которой обеспечивается высокая эффективность регистрации ядерных материалов, она составила 60 мм перед ³He-счетчиком и 80 мм за ним. Было установлено, что применение кадмиевого фильтра позволяет снизить фон естественного излучения и порог обнаружения. С увеличением количества ³He-счетчиков эффект кадмиевого фильтра становится существеннее, например, добавление кадмиевого фильтра толщиной 1 мм позволяет снизить порог обнаружения ядерного материала на 17% для одного ³He-счетчика и на 27% – для двух.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бойко В.И., Силаев М.Е.* Методы и приборы для измерения ядерных материалов и других радиоактивных материалов. М.: МНТЦ Ответственная наука, 2011.
2. *Райли Д., Энслин Н., Смит Х., мл. Крайнер С.* Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов / Пер. с англ. ВНИИА. М.: Бином, 2000. С. 431.
3. *Кадиллин В.В., Рябева Е.В., Самосадный В.Т.* Прикладная нейтронная физика: учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2011. С. 14.
4. ГОСТ Р51635-2000. Мониторы радиационные ядерных материалов. Общие технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 2000.

**ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА**

УДК 539.1.075+539.1.08

**ЛАЗЕРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ КРЕМНИЕВЫХ
МИКРОСТРИПОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ**© 2022 г. П. И. Харламов^{a,b,*}, М. О. Шитенков^b, Д. В. Дементьев^b,
В. В. Леонтьев^{a,b}, М. М. Меркин^{a,b}^a НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, строение 2б^b Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория физики высоких энергий
им. В.И. Векслера и А.М. Балдина
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

*e-mail: pi.kharlamov@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 19.01.2022 г.

После доработки 30.01.2022 г.

Принята к публикации 01.02.2022 г.

Описана установка для проведения поканального тестирования и калибровки микроstriповых кремниевых детекторов при помощи коллимированных лазерных импульсов. Особенностью установки является использование инфракрасного лазерного диода для имитации сигнала от прохождения заряженной частицы через вещество детектора. Система линз позволяет получить поперечный размер пучка до 50 мкм, что в совокупности с использованием прецизионного шагового двигателя позволяет проводить тестирование каждого канала детектора в автоматическом режиме. Продемонстрирована работа системы на модулях кремниевой трековой системы VM@N.

DOI: 10.31857/S003281622204005X

ВВЕДЕНИЕ

Кремниевые координатно-чувствительные сенсоры широко используются для создания трековых систем физических установок в области физики высоких энергий. Применение данных детекторов обусловлено, в первую очередь, высокой гранулярностью и пространственным разрешением, которое может достигать 5 мкм, например, в монолитных активных пиксельных сенсорах ALPIDE, применяемых в эксперименте ALICE [1]. Наряду с пиксельными сенсорами, в ряде современных экспериментов используются двусторонние микроstriповые детекторы. В качестве примеров таких экспериментов можно привести CBM@FAIR [2], VM@N [3]. Координатное разрешение микроstriповых детекторов не уступает пиксельным и может составлять несколько микрометров в случае аналогового съема сигнала. При этом кремниевые сенсоры данного типа обладают большей радиационной стойкостью. Так, например, микроstriповые детекторы, которые планируется использовать в экспериментах VM@N и CBM@FAIR, способны сохранять работоспособность при поглощенных дозах излучения свыше 10^{14} 1-МэВ нейтронных эквивалентов/см² [4]. Наиболее полно особенности кремниевых детекторов описаны в [5].

Высокая гранулярность кремниевых координатно-чувствительных детекторов требует большого количества каналов считывающей электроники, а также сложной архитектуры системы сбора данных с каналов детектора. Из-за высокой плотности каналов зачастую необходимо использование технологии ультразвуковой микросварки, применяемой для монтажа бескорпусной микроэлектроники. Все это делает процедуру сборки кремниевых детекторных модулей сложной и дорогостоящей процедурой. Поэтому, для того чтобы убедиться в качестве детекторных модулей перед установкой трековых систем, необходимо проводить процедуру тестирования и сертификации компонентов и готовых изделий.

Процедура сертификации детекторных модулей включает в себя как функциональные тесты, необходимые для определения работоспособности устройства, так и долговременные тесты в условиях периодических перезагрузок питания и термоциклирования. Для проведения ряда испытаний необходим источник для генерации сигналов детектора. В качестве такого источника могут использоваться радиоактивные источники, выведенные пучки ускоренных заряженных частиц, а также лазерные импульсы. Лазерный стенд имеет ряд существенных преимуществ перед другими

методами. В отличие от радионуклидов, где излучение носит стохастический характер, параметры лазерного импульса можно регулировать, что особенно важно для настройки электроники считывания детектора. Кроме того, оборудование для лазерного стенда стоит относительно недорого и может применяться для серийного тестирования, в отличие от сложных в обслуживании и дорогостоящих ускорителей частиц.

Основной задачей данной работы являлось создание лазерного стенда для тестирования детекторных модулей на основе кремниевых сенсоров. Стенд был оптимизирован для задач тестирования модулей кремниевой трековой системы (к.т.с.) VM@N, а также для отладки электроники считывания данной системы.

Модуль к.т.с. VM@N описан в [6, 7]. Основным компонентом модуля является двусторонний микростриповый кремниевый сенсор с шириной стрипа 58 мкм, общее количество стрипов на каждой стороне сенсора составляет 1024. Считывающая электроника модуля включает в себя восемь бескорпусных специализированных интегральных микросхем (с.и.м.с.) STS-XYTER [8], установленных на специализированной плате, для чтения каждой из сторон сенсора. Считывающая электроника соединяется с сенсором при помощи специализированного сверхлегкого алюминиевого кабеля на полиамидной основе с шириной сигнальной линии 100 мкм [6]. Длина кабеля при этом может составлять до 30 см.

Принцип работы стенда состоит в имитации при помощи лазерного излучения прохождения ионизирующей частицы через кремниевый сенсор детекторного модуля. Основной задачей стенда является проведение пострипового сканирования сенсора лазерными импульсами с целью определения неработающих каналов. Причиной появления неработающего канала при этом может быть, как отсутствие электрического контакта между стрипом сенсора и входом считывающего канала с.и.м.с., так и неработающий тракт микросхемы. Отдельной задачей ставилось определение возможности использования лазерного стенда для калибровки аналого-цифровых преобразователей каналов с.и.м.с., а также определение разброса коэффициентов усиления каналов чтения.

УСТРОЙСТВО СТЕНДА

Основные составляющие части стенда следующие: оптическая система с закрепленным лазерным светодиодом, система позиционирования тестируемого модуля, а также система чтения и управления трековым модулем. Компоненты стенда, помещенные в светозащитный экранирующий кожух, имеющий внутреннее черное матовое покрытие, показаны на рис. 1.

Фокусирующая головка 1 формирует пятно света, проходящего по оптическому волокну 2 от лазерного светодиода через переменный аттенюатор 3. В качестве фокусирующей головки используется конденсор PS-2 “СоларЛС”, который может фокусировать свет из оптоволоконной линии в пятно диаметром 50 мкм (полная энергия) и имеет фокусное расстояние 4 см. Аттенюаторы VOA630-FC и VOA1064-FC фирмы “Thorlabs” обеспечивают ослабление до 50 дБ.

В качестве лазерных светодиодов использовались светодиоды “Нолатех” двух видов, оба мощностью 1 мВт. Диод марки FPL-1064-14BF-1 генерирует инфракрасный свет с длиной волны 1064 нм и глубиной проникновения в кремний 1040 мкм, что позволяет наиболее полным образом воспроизвести прохождение минимально ионизирующих частиц через исследуемые детекторы с типичной толщиной 300 мкм. Диод марки FPL-635-14BF-1 генерирует красный свет с длиной волны 635 нм, а глубина его проникновения в кремний — 3.17 мкм [9]. Преимуществом диода данного вида является удобство использования видимого глазом света для настройки работы стенда при помощи микроскопа 4.

Источник питания диода размещен снаружи кожуха, в качестве источника задействован генератор сигналов, управляемый через персональный компьютер по локальной сети Ethernet. Генератор Tektronix AFG3052C может обеспечивать последовательности прямоугольных импульсов длиной от 12 нс с временами нарастания и спада сигнала 7 нс в широком диапазоне амплитуд и частот. Таким образом, можно создавать импульсы длительностью, сопоставимой с типичным временем сбора заряда в сенсоре ~20 нс.

Каждый исследуемый полупроводниковый детектор с электроникой считывания размещен в индивидуальной лабораторной оснастке 5.

На рис. 1 также отображены следующие компоненты системы позиционирования: координатный стол 6 с креплениями для детекторного модуля; шаговый двигатель ДШИ-200-2 (7) с валом для перемещения координатного стола; пара концевых выключателей 8. Также в эту систему входят управляющий блок (драйвер) двигателя, подключенный к последовательному порту персонального компьютера через концентратор последовательных портов RS-232, и источник питания двигателя, они размещаются снаружи кожуха. Программное управление системой позиционирования написано на высокоуровневом языке программирования Python на основе библиотеки pyserial. Драйвер управляет питанием обмоток двигателя с помощью логических ключей и схем сдвига уровней. Движение координатного стола ограничивается концевыми выключателями 8,

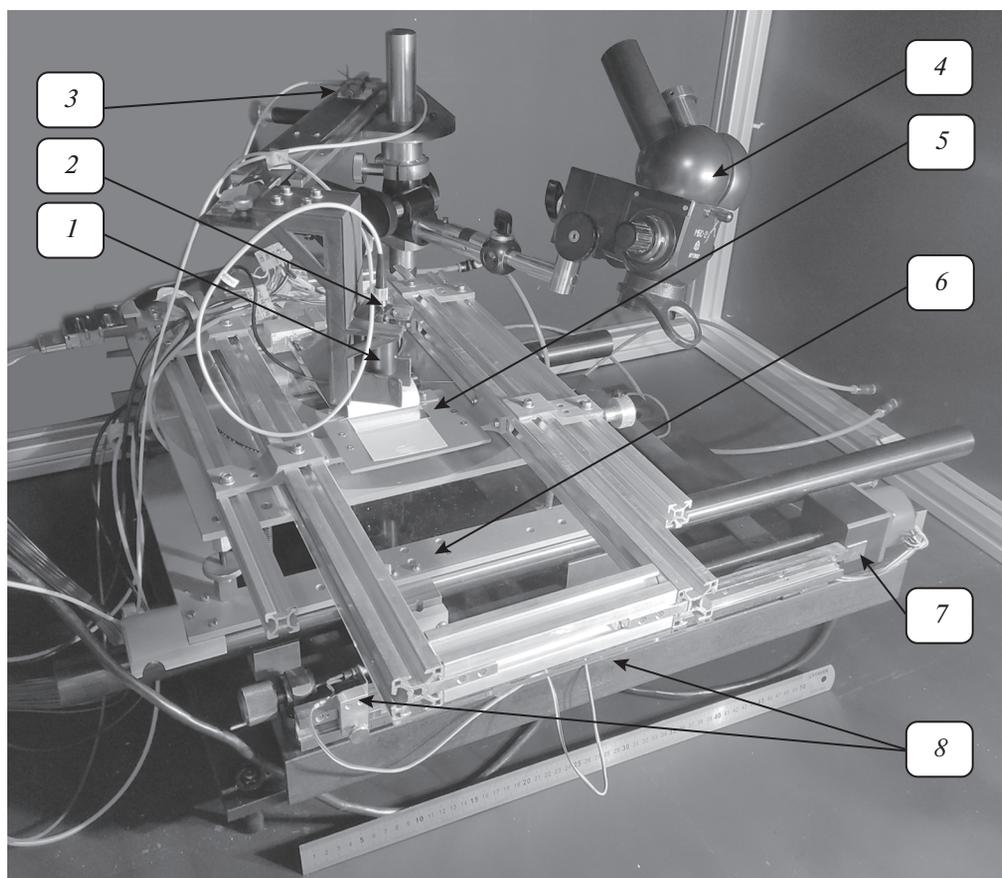


Рис. 1. Фотография компонентов стенда внутри экранирующего кожуха. 1 – фокусирующая головка; 2 – выход светового излучения от диода из оптоволоконного кабеля; 3 – аттенюатор; 4 – микроскоп для настройки; 5 – исследуемый детектор и электроника в лабораторной оснастке; 6 – стол с креплениями; 7 – двигатель; 8 – концевые датчики.

информация об их состоянии также передается через последовательный порт.

Считывающая электроника, используемая для чтения сигналов с модуля к.т.с. VM@N, описана в [10, 11].

ВОЗМОЖНОСТИ СТЕНДА

Одним из ключевых параметров стенда является размер лазерного пятна в области регистрации. Под этим понятием мы понимаем радиус окружности, равный среднеквадратическому отклонению распределения зарегистрированной энергии от номера стрипа, которое имеет вид нормального распределения. Минимальный диаметр пучка не должен превышать ширину зоны между соседними стрипами, которая свободна от металлизации. Металлизация наносится на каждый стрип для создания электрического поля, необходимого для сбора выделившегося заряда в веществе детектора. При попадании лазерного излучения на области металлизации происходит отражение, как показано, например, в статье [12]. Для сенсоров к.т.с. VM@N ширина свободной от

металлизации зоны на поверхности сенсора составляет 38 мкм, поэтому минимальный размер пятна нашего стенда равен 50 мкм. Однако в ряде случаев, когда, например, требуется имитировать события с большим кластером сработавших стрипов, размер лазерного пятна нужно увеличить. Этого эффекта можно добиться использованием расфокусированного пучка.

На рис. 2а отображено распределение амплитуд сигналов на одной из сторон сенсора в случае использования расфокусированного красного лазера. Уширение сигнала в кремниевом сенсоре возникает, в первую очередь, из-за перетекания заряда на соседние стрипы за счет паразитной емкости как самих стрипов, так и используемого кабеля для передачи сигналов от детектора к считывающей электронике и, во вторую очередь, из-за диффузии носителей заряда, эффект которой в нашем случае невелик по причине полного обеднения сенсора и высокой скорости сбора заряда. Для пострипового сканирования использовалось сфокусированное пятно лазера размером 50 мкм (рис. 2б).

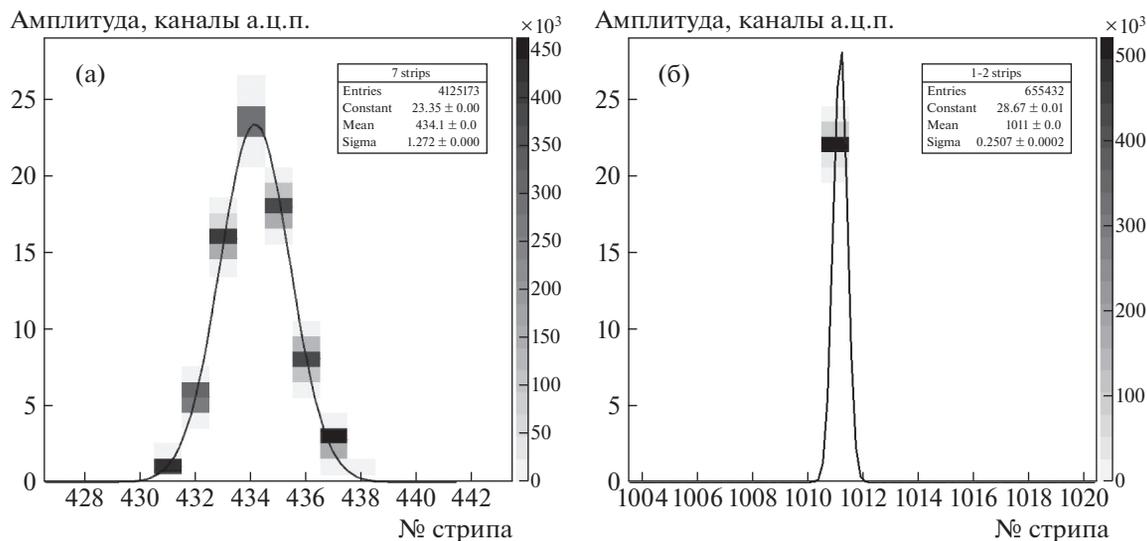


Рис. 2. Распределение амплитуд сигналов относительно порядковых номеров сработавших стрипов для p -стороны: **а** – для ширины пятна лазера 7 стрипов, **б** – 1 стрип.

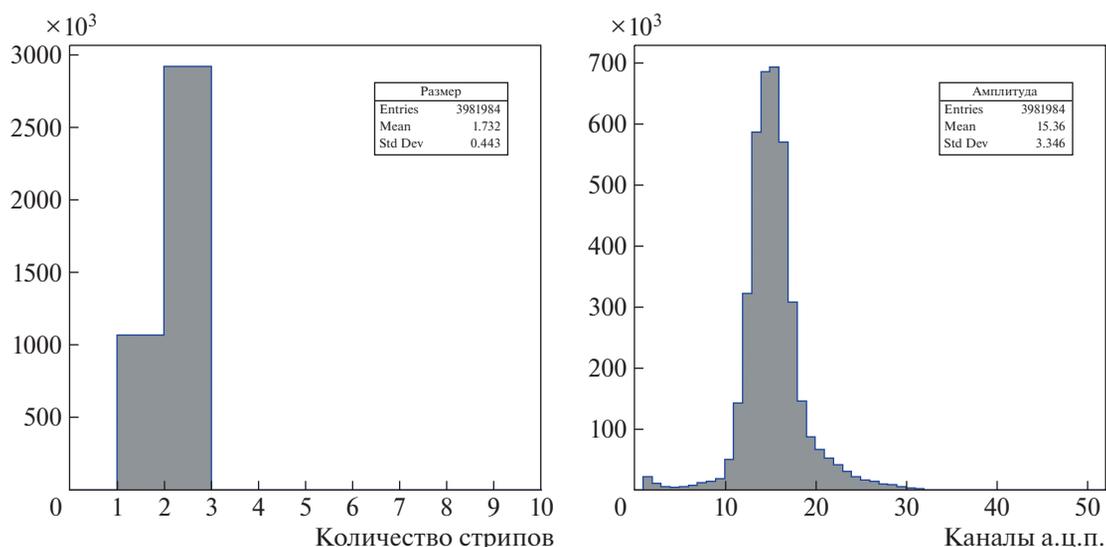


Рис. 3. Распределение размера восстановленного кластера сработавших стрипов (слева) и суммарная амплитуда кластера (справа).

Свободные носители заряда, образующиеся при взаимодействии фотонов лазерного излучения с кремнием, делятся, как правило, между несколькими соседними стрипами. Группу стрипов, сработавших от одного лазерного импульса, принято называть кластером. На рис. 3 представлен восстановленный кластер одновременно сработавших каналов (хитов) на одной стороне сенсора – количество стрипов в нем и распределение суммарных амплитуд сигналов. Процедура определения кластеров используется для восстановления координат попадания частиц в сенсор и подсчета ее суммарных энергетических потерь. Для

включения хита в кластер применяются два критерия: 1) одновременность срабатывания (± 20 нс); 2) локальность (хит должен находиться не более чем в 5 стрипах от центра рассматриваемого кластера).

Пример пострипового сканирования сенсора показан на рис. 4. Так как угол между стрипами на разных сторонах сенсора (в проекции на плоскость сенсора) составляет 7.5° , это позволяет проводить тестирование стрипов на обеих сторонах сенсора при перемещении вдоль одной координаты.

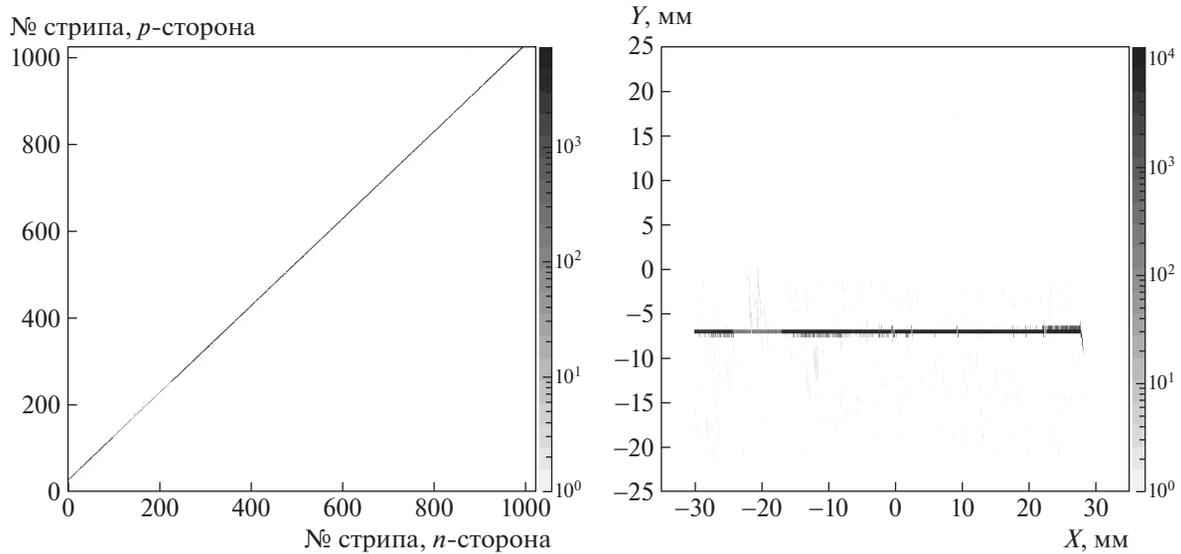


Рис. 4. Сканирование пучком вдоль поверхности сенсора: слева – отношение номеров сработавших стрипов на *n*- и *p*-стороне; справа – вертикальные и горизонтальные координаты пятна.

Нами было проведено сравнение двух вариантов режима работы шагового двигателя, перемещающего координатный стол с модулем относительно фокусирующей головки лазера: режим полного шага, соответствующий перемещению на 20 мкм, и четверти шага – на 5 мкм. Поскольку шаг стрипов кремниевого сенсора составляет 58 мкм, то при сканировании модуля лазерным излучением (для попадания луча между поверхностной металлизацией стрипов) необходимо вносить поправки в ход координатного стола. Например, в случае режима полного шага процедура перемещения между соседними стрипами состоит из трех шагов (60 мкм), при этом каждый 15-й шаг пропускается из-за необходимости компенсации отклонения положения фокусирующей головки лазера. Тем не менее, из-за несовпадения дискретности движения лазера и ширины стрипа при сканировании всех 1024 каналов сенсора возникает картина систематического смещения лазерного пятна как в зону металлизации, так и в пограничную зону между соседними стрипами. Результатом является “пилообразное” распределение амплитуд сигнала (рис. 5а), вызванное как систематическим отражением части лазерного импульса, так и делением заряда между соседними стрипами в разном соотношении. В случае использования режима четверти шага – более сложного и медленного – вносится более точная поправка 5 мкм, что дает более равномерную картину распределения амплитуды сигнала (рис. 5б). Этот эффект также служит косвенным свидетельством того, что трековый модуль чувствителен к смещению лазера на 20 мкм и обладает хорошим пространственным разрешением. Кроме того, на рис. 5 наблюдаются два неработающих канала: № 44 и

№ 75. Причиной отсутствия сигналов на этих каналах является отсутствие электрического контакта между стрипом детектора и каналом с.и.м.с. Можно также заметить повышенный уровень сигнала на соседних стрипах вследствие отсутствия эффекта деления заряда между соседними каналами за счет емкостной связи кабеля.

Таким образом, сканирование модуля на лазерном стенде позволяет получить информацию о неработающих и/или шумящих стрипах путем анализа гистограмм количества хитов. В частности, у исследованного опытного сенсора на *p*-стороне оказалось 11 неработающих стрипов (1%), а на *n*-стороне – 13 стрипов (1.3%).

Помимо поиска неработающих стрипов, ставилась задача определения возможности использования лазерного стенда для калибровки считывающей электроники детектора. Каждая микросхема с.и.м.с. имеет 128 независимых каналов. Каждый канал имеет аналоговый тракт, состоящий из зарядочувствительного усилителя, усилителя формирователя и аналого-цифрового преобразователя, а также других элементов. Для аналогового тракта каждого канала используется встроенная в каждую микросхему внутренняя калибровочная цепочка. Однако параметры этой калибровочной цепочки могут варьироваться в разных микросхемах в связи с технологическими допусками на производстве. При этом разброс коэффициентов усиления составляет менее 3%, однако существенный вклад в уровень сигнала дает разница в положении базовой линии для разных калибровочных цепей. На рис. 6 показаны восстановленные амплитуды кластеров на обеих сторонах сенсора при проведении пострипового

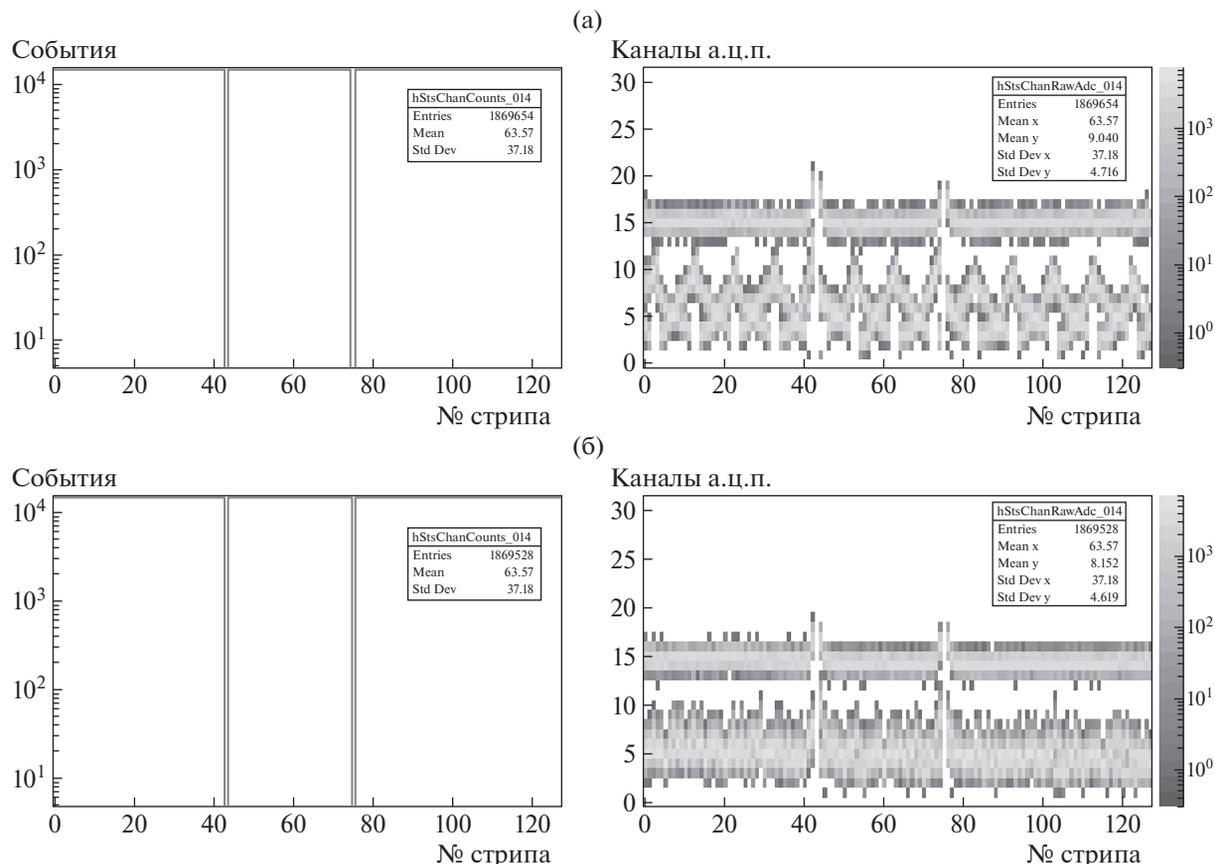


Рис. 5. Сравнение режимов сканирования для шага перемещения 20 мкм (а) и 5 мкм (б). Слева – гистограммы количества хитов в каналах с.и.м.с., справа – их амплитуды сигналов.

сканирования. Распределение амплитуд кластеров в виде “ступеней” вызвано разницей в калибровках между разными микросхемами, используемыми для чтения сигналов с одной из сторон сенсора.

Для введения поправок, компенсирующих этот эффект, использовался следующий алгоритм: 1) определение положений пиков сигналов в стрипах; 2) вычисление среднего для каждой с.и.м.с. положения пиков сигналов; 3) вычисление индивидуального коэффициента пересчета функций отклика для каждой микросхемы, корректирующего к средней для всего модуля амплитуде. В результате для исследованного модуля разброс амплитуд (σ) сократился на 20% на n -стороне и на 30% на p -стороне (рис. 7).

ВЫВОДЫ

Лазерный стенд полностью собран, все компоненты протестированы и откалиброваны. Набранные первичные данные позволяют судить о правильной работе методики. Стенд позволяет варьировать в широких пределах следующие характеристики лазерного излучения: частоту (от 1 Гц до 1 МГц), размер пятна засветки, энергию сигнала

с помощью аттенуатора, амплитуды и длительности импульса тока. Таким образом, лазерный стенд имитирует прохождение ионизирующих частиц через полупроводниковый детектор с широкими возможностями по настройке сигнала.

Стенд оптимизирован для проведения тестирования трековых модулей кремниевой трековой системы VM@N. Продемонстрирована возможность идентификации неработающих каналов, а также проведения калибровки считывающей электроники детектора при помощи лазерных импульсов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований: 18-02-40119, 18-02-40113 и 19-32-90001.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам НМО КТС ЛФВЭ ОИЯИ А.Д. Шереметьеву, Н.В. Сухову, Т.В. Андреевой и Т.В. Семчуковой за работу по

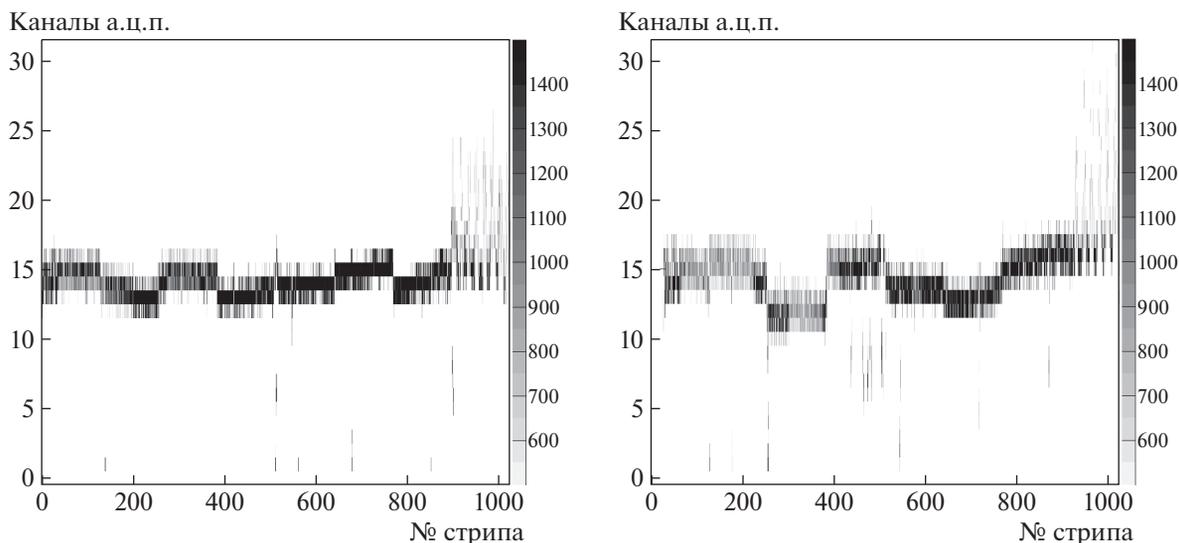


Рис. 6. Амплитуды сигналов (суммарная амплитуда кластера) на обеих сторонах сенсора в зависимости от номера стрипов (центр кластера).

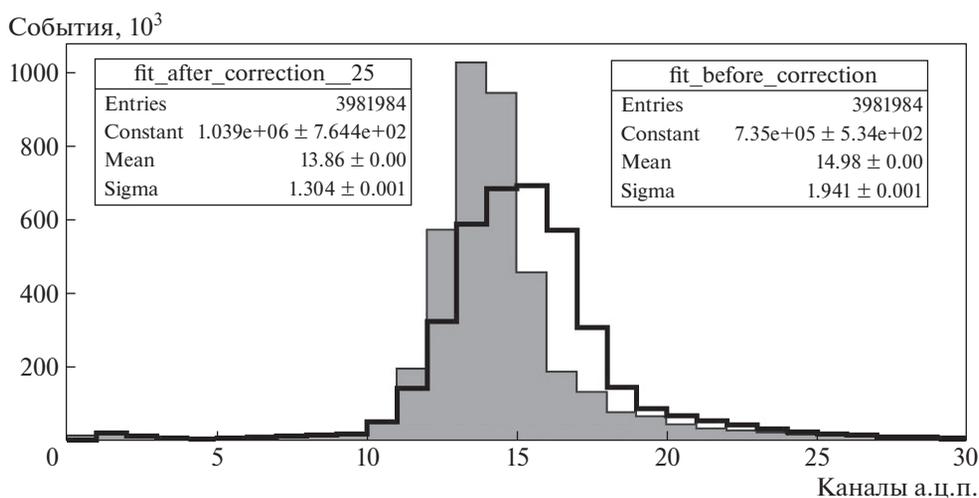


Рис. 7. Распределение амплитуд сигналов в кластерах p -стороны: серая гистограмма – после корректировки; гистограмма черной линией – до корректировки.

сборке модулей к.т.с. BM@N, которые тестировались на лазерном стенде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abelev B. et al. and The ALICE Collaboration // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 2014. V. 41. № 8. 087002. <http://iopscience.iop.org/0954-3899/41/8/087002>
2. *Abyazimov T., Abuhoza A., Adak R.P., Adamczyk M., Agarwal K., Aggarwal M.M., Ahammed Z., Ahmad F., Ahmad N., Ahmad S. et al. // Eur. Phys. J.* 2017. V. 53. P. 60. <https://doi.org/10.1140/epja/i2017-12248-y>
3. *Senger P., Dementev D., Heuser J., Kapishin M., Lavrik E., Murin Y., Maksymchuk A., Schmidt H.R., Schmidt C.,*

Senger A., Zinchenko A. // Particles. 2019. V. 2. P. 481. <https://doi.org/10.3390/particles2040029>

4. 3rd RD48 Status Report. CERN LHCC 2000-009. LEB Status Report/RD48. 31 December 1999. <https://rd48.web.cern.ch/status-reports/RD48-3rd-status-report.pdf>
5. *Lutz G. Semiconductor Radiation Detectors.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-71679-2>
6. The BM@N STS group, Technical Design Report for the Silicon Tracking System as part of the hybrid tracker of the BM@N experiment. Dubna: JINR, 2020. ISBN 978-5-9530-0541-8. <http://publications.jinr.ru/record/154087>

7. *Sheremetev A., Dementev D., Murin Yu., Sanchez C.* Status of the BM@N STS assembly // LXX International conference “NUCLEUS – 2020. Nuclear physics and elementary particles physics. Nuclear physics technologies”. Saint Petersburg, Oct 13, 2020. Oral report. <https://indi.to/zNK2T>
8. *Kasinski K., Rodriguez-Rodriguez A., Lehnert J., Zubrzycka W., Szczygiel R., Ofinowski P., Kleczek R., Schmidt C.J.* // Nucl. Instrum. and Methods. A. 2018. V. 908. P. 225. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.08.076>
9. *Kharlamov P., Shitenkov M.* // Phys. Part. Nuclei. 2021. V. 52. P. 761. <https://doi.org/10.1134/S1063779621040316>
10. *Dementev D., Guminski M., Kovalev I., Kruszewski M., Kudryashov I., Kurganov A., Miedzik P., Murin Yu., Pozniak K., Schmidt C.J., Shitenkov M., Voronin A.G., Zabolotny W.M.* // Phys. Part. Nuclei. 2021. V. 52. P. 830. <https://doi.org/10.1134/S1063779621040213>
11. *Shitenkov M., Dementev D., Voronin A., Kovalev I., Kudryashov I., Kurganov A., Murin Yu.* // Phys. Part. Nuclei. 2021. V. 52. P. 826. <https://doi.org/10.1134/S1063779621040559>
12. *Dolezal Z., Escobar C., Gadomski S., García C., González S., Kodys P., Kubik P.K., Lacasta C., Marti S., Mitsou V.A., Moorhead G.F., Phillips P.W., Reznicek P., Slavík R.* // Nucl. Instrum. and Methods. A. 2007. V. 573. P. 2. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.10.319>

РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ УСТРОЙСТВА ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ МОЩНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

© 2022 г. М. В. Каменский^{a,*}, М. А. Кошелев^a, А. А. Орловский^{a,b},
А. С. Седов^a, С. А. Скороходов^c, А. И. Цветков^{a,b}

^aИнститут прикладной физики РАН

Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

^bВолжский государственный университет водного транспорта

Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

^cИнститут прикладной физики РАН, Научное объединение “Школа юного исследователя”

Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

*e-mail: mkamenskiy@ipfran.ru

Поступила в редакцию 10.12.2021 г.

После доработки 22.12.2021 г.

Принята к публикации 24.12.2021 г.

Приведены результаты разработки и экспериментальной реализации устройства для управления параметрами мощного микроволнового излучения, принцип действия которого основан на управляемом повороте поляризационной пластины в плоскости, перпендикулярной оси распространения линейно поляризованного микроволнового пучка. Экспериментально продемонстрирована стабилизация мощности субтерагерцового гиротрона на уровне нескольких процентов в широком диапазоне перестройки управляющих параметров. Разработанное устройство может быть успешно применено для решения целого ряда задач, направленных на исследование взаимодействия мощного микроволнового излучения с веществом.

DOI: 10.31857/S0032816222030089

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время электромагнитное излучение терагерцового диапазона все более широко применяется в различных физических, технологических, химических и биологических задачах, в том числе для диагностики и исследований взаимодействия с различными средами [1–3]. Современные гиротроны способны обеспечить очень высокий (сотни ватт на частотах до 1 ТГц) уровень выходной мощности, что делает их весьма привлекательными приборами в данном диапазоне частот [4–6]. При этом часть из упомянутых выше задач предъявляет дополнительные требования к режимам работы гиротронных комплексов. В частности, для успешного и точного проведения исследований по микроволновой спектроскопии высокого разрешения [7] необходимо обеспечить стабилизацию выходной мощности при перестройке управляющих параметров (тока и ускоряющего напряжения электронного пучка, магнитного поля основного соленоида и катушной температуры охлаждающей резонатор жидкости и т.д.) [8]. Основная проблема состоит в том, что при перестройке данных пара-

метров одновременно меняются как выходная частота, так и мощность гиротрона [9]. Стабилизацию мощности при этом возможно обеспечить, в том числе, используя систему обратной связи и соответствующие устройства. В данной работе описан созданный на данном принципе автоматизированный прибор для стабилизации мощности микроволнового излучения на основе поляризатора и приводятся результаты экспериментов.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В качестве источника излучения использовался автоматизированный гиротронный комплекс, разработанный и изготовленный в Институте прикладной физики РАН (Нижний Новгород, Россия) совместно с ЗАО НПП ГИКОМ (Нижний Новгород, Россия). На данном комплексе в настоящее время проводятся испытания и исследование ряда непрерывных и импульсных гиротронов. Описываемый прибор был апробирован на двух из них: на гиротроне, работающем на основной циклотронной гармонике с частотой 0.26

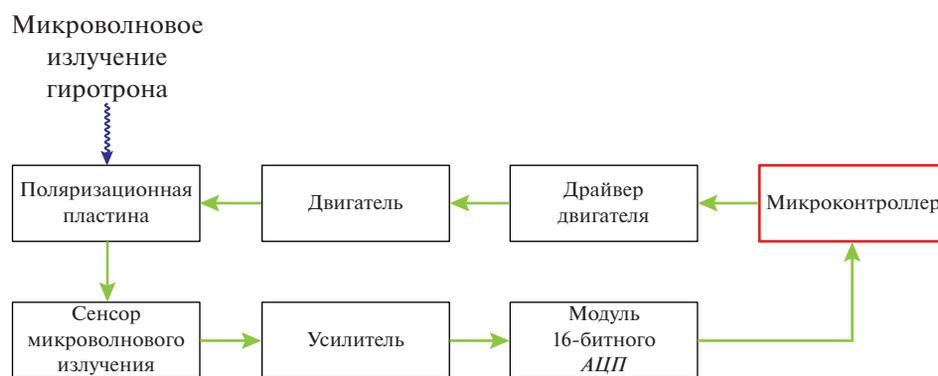


Рис. 1. Функциональная схема устройства.

ТГц и максимальной выходной мощностью 1 кВт (рабочая мода TE_{53}) [10], и на гиротроне, работающем на второй циклотронной гармонике с частотой 0.53 ТГц с максимальной выходной мощностью 240 Вт (рабочая мода TE_{65}) [11]. Каждый из гиротронов имеет свой собственный встроенный высокоэффективный квазиоптический преобразователь рабочей моды в узкий выходной волновой пучок гауссова типа. В такой конструкции гиротрона отраженное излучение рассеивается при проходе квазиоптического преобразователя в обратном направлении, что, в числе прочего, предотвращает влияние отраженного от поляризатора сигнала на режим работы гиротрона.

КОНСТРУКЦИЯ АТТЕНЮАТОРА

Поскольку выходное излучение гиротрона, формируемое квазиоптическим преобразователем [12], является линейно поляризованным, прибор для управления и стабилизации мощности (аттенюатор) может быть реализован на основе поляризатора. Конструкция поляризатора представляет собой натянутые на равном расстоянии, параллельные, тонкие по сравнению с используемыми длинами волн, металлические проволоочки, выполненные из вольфрама, являющегося тугоплавким материалом.

Часть экспериментов проводилась при мощности падающей на поляризатор волны порядка нескольких сотен ватт с шириной пучка 1.5–2 см в непрерывном режиме. При таком уровне мощности не наблюдалось разрушения или деформации элементов поляризатора или существенного увеличения его температуры. Также в предварительных экспериментах была измерена проходящая через поляризатор мощность излучения в зависимости от угла поворота поляризатора. Минимальное значение данной мощности находилось в пределах погрешности калориметра, что свидетельствовало о правильной работе поляризатора.

Максимальное же значение прошедшей мощности отличалось от исходного также на величину порядка погрешности измерений, что позволило в дальнейших оценках пренебречь поглощенным в поляризаторе излучением. Поворотом пластины в плоскости, перпендикулярной оси распространения пучка, можно плавно регулировать проходящую через поляризатор мощность излучения.

Используемый в данной работе аттенюатор для управления мощностью излучения состоит из нескольких основных конструктивных и программных элементов: корпуса с поворотным механизмом и поляризатором, датчика сверхвысокочастотного (с.в.ч.) излучения и запрограммированного микропроцессорного блока. Функциональная схема устройства представлена на рис. 1.

Корпус устройства (рис. 2а) представляет собой прямоугольный параллелепипед размером $130 \times 165 \times 140$ мм, состоящий из трех пластиковых панелей с большими центральными отверстиями, четырех металлических винтовых шпилек, вала (металлической трубки) и двух пластиковых шестерней, закрепленных между пластиковыми панелями корпуса. Габариты корпуса в первую очередь определяются размерами поляризатора и устойчивостью конструкции. Шаговый двигатель закреплен на одной из панелей устройства.

Работа устройства заключается в следующем. Вращение вала шагового двигателя приводит в движение основной вал устройства, который вращает малую шестерню. Поворот последней приводит в движение большую шестерню, внутри которой находится поляризатор. В результате меняется угол наклона поляризатора, что позволяет регулировать проходящую через него линейно поляризованную мощность излучения гиротрона. Пластиковые элементы устройства (пластины и шестерни) смоделированы и изготовлены с помощью аддитивных технологий с учетом габаритов поляризатора.

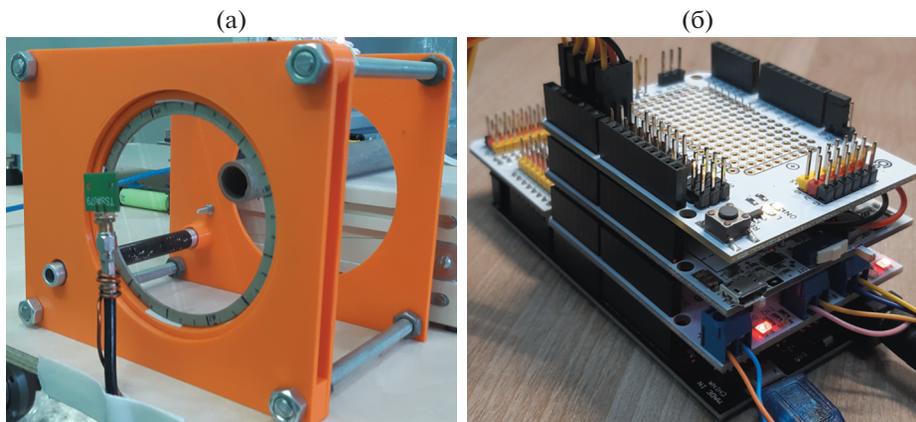


Рис. 2. Фотографии корпуса устройства (а) и блока управления (б).

Управление устройством и его настройка, как и связь с компьютером, осуществлялись с помощью блока управления (рис. 2б), который содержит плату с микропроцессором, плату с драйвером шагового двигателя и плату расширения для удобного подключения светодиодной индикации и другой периферии. Электропитание устройства осуществлялось с помощью блока питания 12 В постоянного напряжения.

Ядром блока управления являлась платформа Arduino Mega 2560 R3, построенная на основе восьмибитного микроконтроллера семейства AVR — ATmega2560, работающего на частоте 16 МГц и имеющего 8 Кбайт оперативной памяти.

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОЙ ЧАСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЯРИЗАТОРОМ

Разработанная для данного прибора программа позволяла измерять уровень сигнала с датчика с.в.ч.-излучения, обрабатывать поступающие данные на основе алгоритма пропорционально-интегрально-дифференцирующего (п.и.д.) регулятора [13] и выдавать управляющий сигнал на драйвер шагового двигателя для поворота поляризатора в определенном направлении. Также устройство обеспечивало управление скоростью и направлением вращения поляризатора в ручном режиме с помощью пульта дистанционного управления. Код программы давал возможность в любой момент перезаписать значение уровня сигнала, относительно которого будет осуществляться стабилизация, и включить или выключить режим автоматической работы устройства. Все функции устройства можно было активировать с помощью пульта дистанционного управления и видеть статус их работы с помощью светодиодной индикации.

Микроволновое излучение, попавшее на датчик с.в.ч.-излучения, усиливалось и попадало на

вход 16-битного аналого-цифрового преобразователя, где оно обрабатывалось и по протоколу I2C отправлялось на микропроцессорный блок. Полученные данные с помощью программы сглаживались фильтром “скользящее среднее”, после чего обрабатывались с использованием алгоритма п.и.д.-регулятора с обратной связью. В ходе этого процесса вычислялись сигнал рассогласования или ошибка ($e(t)$) и его дифференциальная и интегральная составляющие. Затем эти компоненты умножались на экспериментально подобранные коэффициенты (K_p , K_i , K_d) и суммировались. Полученная сумма и являлась значением управляющего сигнала ($u(t)$):

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt}. \quad (1)$$

Диапазон значений управляющего сигнала ограничивался программно.

Общее время одного цикла измерений, вычислений и обработки данных занимало около 10 мс.

Далее управляющий сигнал поступал на драйвер шагового двигателя, который производил необходимое количество шагов в нужную сторону. Это непосредственно влияло на положение поляризатора, т.е. на его угол наклона относительно плоскости поляризации. Поворот поляризатора, в свою очередь, позволял стабилизировать мощность излучения, попадающего на датчик и калориметр. Один шаг двигателя осуществлялся за 50 мкс. Стоит отметить, что целесообразно перед началом измерений установить поляризатор в промежуточное положение с углом наклона 45° относительно плоскости поляризации. Такое положение позволяет как увеличивать, так и уменьшать проходящую мощность при повороте поляризатора

Выведение поляризатора в исходное положение и ограничение угла поворота (на основе счет-

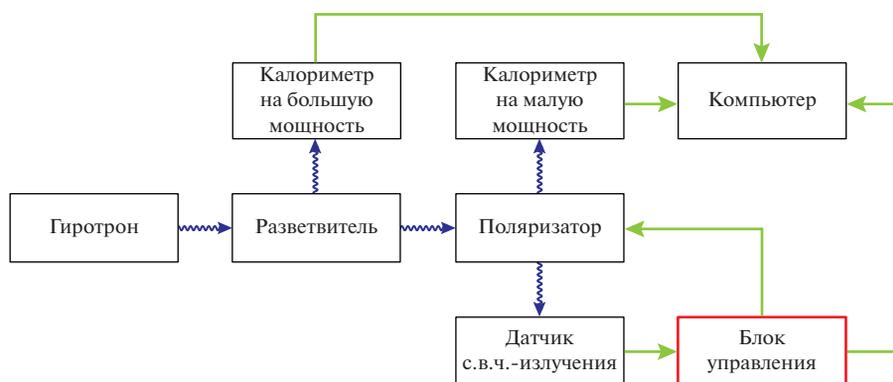


Рис. 3. Схема эксперимента.

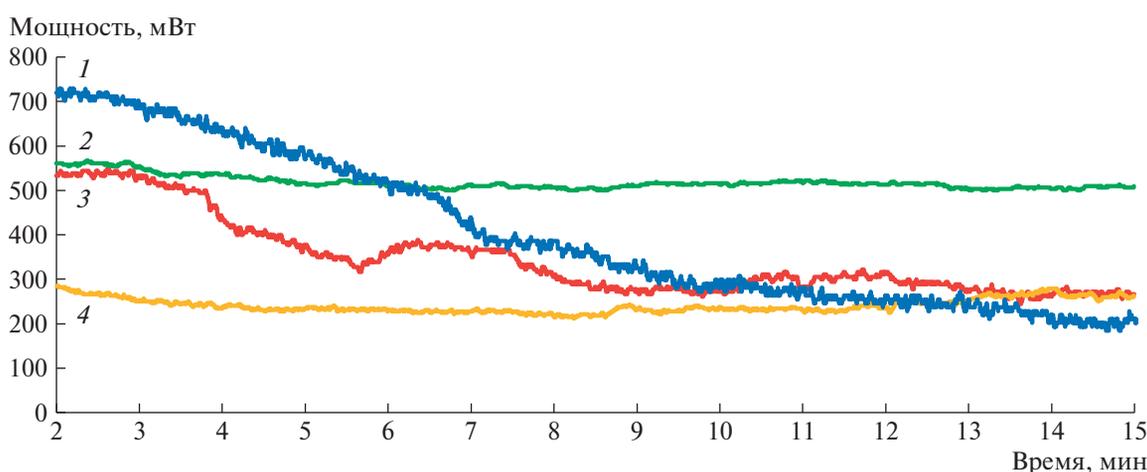


Рис. 4. График измерения мощности калориметром: 1 – без поляризатора; 2–4 – с поляризатором и включенной системой регулировки.

чика количество шагов), не допускающее превышение заданного, были реализованы программно. Программа также позволяла в любой момент перезаписать значение заданного уровня мощности, относительно которого будет осуществляться регулировка.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Общая схема эксперимента приведена на рис. 3. Выходное излучение гиротрона попадало на разветвитель, и основная его часть (порядка 90%) транспортировалась в калориметр, при этом рассчитанный уровень мощности составлял порядка нескольких сотен ватт. Это позволяло обеспечить безопасность оборудования и персонала при проведении экспериментов, поскольку используемая в данных демонстрационных экспериментах конструкция прибора не была оснащена экранировкой либо каким-то защитным кожухом.

Остальное излучение (порядка 10%) проходило через поляризатор, и часть его попадала в ка-

лориметр, рассчитанный на малую мощность [14], а часть – на расположенный рядом датчик с.в.ч.-излучения. Использованный здесь калориметр разработан в ИПФ РАН на основе двух высокоточных датчиков температуры, расходомера, рассчитанного на крайне малый проток жидкости, и микропроцессорного блока. Датчики температуры интегрированы в пластиковый корпус специальной формы, изготовленный с использованием технологий фотополимерной 3D-печати. Архитектура корпуса калориметра способствует максимальному поглощению излучения гиротрона, что в совокупности с рядом других преимуществ позволяет достичь высокой чувствительности и точности измерений малых мощностей излучения.

Данные с обоих калориметров передавались на компьютер. Излучение, поступившее на датчик, расположенный за поляризатором и включенный в петлю обратной связи, преобразовывалось в цифровой сигнал (прямые зеленые линии), который передавался на блок управления положением

поляризатора. Данные блока управления также поступали в компьютер.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 4 приведены графики измерения мощности калориметром. Средняя мощность излучения в экспериментах составляла несколько сотен милливольт. Кривой 1 показаны результаты контрольного измерения без поляризатора. Видно достаточно плавное изменение мощности со временем, что связано с плавным изменением температуры охлаждающей жидкости и, как следствие, с изменением поперечных размеров резонатора, приводящим к изменению частоты. Кривыми 2–4 показаны графики измерения мощности калориметром с поляризатором и включенной системой п.и.д.-регулирующей при различных значениях коэффициента п.и.д.-регулятора и небольшом изменении положения калориметра относительно траектории пролета волнового пучка. Наилучший уровень стабилизации соответствует кривой 2, в данном режиме мощность излучения была стабилизирована на уровне порядка 9%, что удовлетворяет требованиям многих возможных приложений

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанное устройство стабилизации мощности микроволнового излучения на основе поляризатора было протестировано с помощью субтерагерцового гиротронного стенда. Демонстрировано, что выходное излучение гиротрона стабилизировано с приемлемой для спектроскопических задач точностью. Описанное устройство может быть эффективно использовано и в других задачах, которые требуют управления параметрами мощного микроволнового излучения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-19-01602.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Handbook of Terahertz Technologies: Devices and Applications / Eds. Song Ho-Jin, Tadao Nagatsuma. Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., 2015.
2. Booske J.H., Dobbs R.J., Joye C.D., Kory C.L., Neil G.R., Park G.-S., Park J., Temkin R.J. // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2011. V. 1. Issue 1. P. 54. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2011.2151610>
3. Blank M., Rosay M., Engelke F.J. // Magn. Reson. 2016. V. 264. P. 88. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2015.12.026>
4. Litvak A.G., Denisov G.G., Glyavin M.Yu. // IEEE Journal of Microwaves. 2021. V. 1. Issue 1. P. 260. <https://doi.org/10.1109/JMW.2020.3030917>
5. Idehara T., Sabchevski S., Glyavin M., Mitsudo S. // Appl. Sci. 2020. V. 10. Issue 3. P. 980. <https://doi.org/10.3390/app10030980>
6. Sabchevski S., Glyavin M., Mitsudo S., Tatematsu Y., Idehara T. // J. Infrared Milli Terahz Waves. 2021. V. 42. Issue 7. P. 715. <https://doi.org/10.1007/s10762-021-00804-8>
7. Golubiatnikov G.Y., Koshelev M.A., Tsvetkov A.I., Fokin A.P., Glyavin M.Y., Tretyakov M.Y. // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2020. V. 10. Issue 5. P. 502. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2020.2984459>
8. Fokin A.P., Tsvetkov A.I., Manuilov V.N., Sedov A.S., Bozhkov V.G., Genneberg V.A., Movshevich B.Z., Glyavin M.Yu. // Rev. of Scientific Instrum. 2019. V. 90. Issue 12. P. 124705. <https://doi.org/10.1063/1.5132831>
9. Bogdashov A.A., Denisov G.G., Fokin A.P., Glyavin M.Yu., Novozhilova Yu.V., Sedov A.S., Tsvetkov A.I. // EPJ Web Conf. 10th International Workshop 2017 “Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications”. Nizhny Novgorod, Russia, July 17–22. 2017. V. 149.
10. Glyavin M.Yu., Chirkov A.V., Denisov G.G., Fokin A.P., Kholoptsev V.V., Kuftin A.N., Luchinin A.G., Golubyatnikov G.Yu., Malygin V.I., Morozkin M.V., Manuilov V.N., Proyavin M.D., Sedov A.S., Sokolov E.V., Tai E.M., Tsvetkov A.I., Zapevalov V.E. // Rev. Sci. Instrum. 2015. V. 86. Issue 5. P. 054705. <https://doi.org/10.1063/1.4921322>
11. Glyavin M.Yu., Kuftin A.N., Morozkin M.V., Proyavin M.D., Fokin A.P., Chirkov A.V., Manuilov V.N., Sedov A.S., Soluyanov E.A., Sobolev D.I., Tai E.M., Tsvetkov A.I., Luchinin A.G., Kornishin S.Yu., Denisov G.G. // IEEE Electron Device Lett. 2021. V. 42. № 11. P. 1666. <https://doi.org/10.1109/LED.2021.3113022>
12. Bogdashov A.A., Chirkov A.V., Denisov G.G., Vinogradov D.V., Kuftin A.N., Malygin V.I., Zapevalov V.E. // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 1995. V. 16. Issue 4. P. 735. <https://doi.org/10.1007/BF02066633>
13. Astrom K., Hagglund T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning, 2nd Edition, Instrument Society of America. NC, USA, Research Triangle Park, 1995.
14. Denisov G.G., Glyavin M.Yu., Kuftin A.N., Proyavin M.D., Morozkin M.V., Sobolev D.I., Fokin A.P., Tai E.M., Rodin Yu.V., Luchinin A.G., Manuilov V.N. // The twenty-second International Vacuum Electronics Conference IVEC 2021. 27–30 April 2021, Virtual Event.

МОЩНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
РЕВЕРСИВНО ВКЛЮЧАЕМЫХ ДИНИСТОРОВ© 2022 г. С. В. Коротков^{а,*}, Ю. В. Аристов^а, А. Л. Жмодиков^а^аФизико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

*e-mail: korotkov@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 21.12.2021 г.

После доработки 10.01.2022 г.

Принята к публикации 11.01.2022 г.

Рассмотрены два мощных импульсных устройства, предназначенные для исследования реверсивно включаемых динисторов (р.в.д.) с диаметром структур до 80 мм в сильноточных импульсных режимах. Исследование р.в.д. осуществлялось путем измерения падения напряжения при разных амплитудах и длительностях импульсов силового тока и тока управления. Одно из устройств позволяет исследовать р.в.д. при протекании импульсов силового тока с амплитудой до 20 кА и очень высокой скоростью нарастания (до 20 кА/мкс). Другое устройство предназначено для исследования р.в.д. в режиме коммутации импульсов силового тока с очень большой амплитудой (до 200 кА) и длительностью до 90 мкс. Описаны блоки запуска р.в.д., позволяющие формировать импульсы тока управления с фронтом 1.5 мкс и амплитудой до 1.5 кА.

DOI: 10.31857/S0032816222030090

Реверсивно включаемые динисторы (р.в.д.) были разработаны в ФТИ им. А.Ф. Иоффе специально для использования в мощных силовых цепях с очень высокими скоростями нарастания тока [1, 2]. Основным достоинством р.в.д. является то, что они включаются однородно по всей рабочей площади, что обеспечивает очень малые коммутационные потери энергии. Такое включение достигается благодаря оригинальным конструкциям р.в.д. и способу их включения.

В отличие от тиристорных, в р.в.д. нет электрода управления. Другой отличительной особенностью р.в.д. является то, что их структуры содержат плотную систему узких каналов обратной проводимости, которые распределены равномерно по всей рабочей площади. Включение р.в.д. осуществляется путем реверса блокируемого напряжения и пропускания через каналы обратной проводимости короткого (<2 мкс) и достаточно мощного (>20 А/см²) тока управления. В результате в структурах р.в.д. практически однородно накапливается заряд запускающих носителей. При достаточной величине накопленного заряда включение р.в.д. происходит одновременно по всей рабочей площади и без задержки относительно момента окончания тока управления.

Однородное включение р.в.д. обеспечивает возможность эффективной коммутации мощных, быстро нарастающих импульсов тока [3–7].

Отсутствие задержки включения позволяет синхронно включать большое количество р.в.д. общим импульсом тока управления.

Основным недостатком р.в.д. является то, что на процесс формирования тока управления I_y существенно влияет силовая цепь. Поскольку ток I_y представляет собой разность между током блока запуска $I_{\beta 3}$ и силовым током I_0 , в традиционных силовых цепях он создается только тогда, когда скорость нарастания тока $I_{\beta 3}$ больше скорости нарастания тока I_0 . Радикальное уменьшение $dI_{\beta 3}/dt$ достигается путем введения в силовую цепь дросселя с насыщающимся сердечником, который препятствует резкому нарастанию силового тока в процессе управляющего воздействия.

В настоящее время в Научно-инженерном центре силовых полупроводниковых приборов (НИЦ СПП) ПАО “Электровыпрямитель” (г. Саранск) освоен выпуск опытных партий р.в.д. с диаметром структур от 16 до 80 мм и предельно допустимым напряжением более 2 кВ. На рис. 1 показаны структура р.в.д. с диаметром 76 мм и металлокерамический корпус с этой структурой.

Основной проблемой при наладке серийного производства р.в.д. является отсутствие оборудования, обеспечивающего проведение выходных испытаний динисторов. Это обусловлено, во-первых, оригинальным способом включения р.в.д., который радикально отличается от спосо-

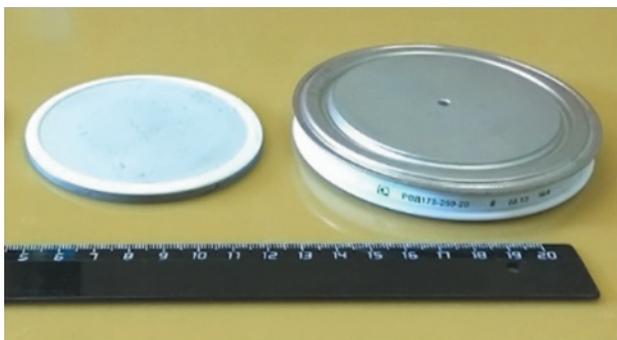


Рис. 1. Структура реверсивно включаемого динистора с диаметром 76 мм (слева) и защитный корпус с этой структурой (справа).

бов включения традиционных силовых полупроводниковых приборов, а во-вторых, очень высокими рабочими характеристиками р.в.д. (очень большими амплитудой и скоростью нарастания силового тока), которые должны быть обеспечены при тестировании.

В связи с этим в ФТИ были разработаны мощные импульсные устройства, позволяющие исследовать р.в.д. после их изготовления.

Для исследования в режиме коммутации мощных импульсов тока с очень высокими скоростью нарастания (до 20 кА/мкс) и амплитудой (до 200 кА) были разработаны импульсные устройства ИУ₁ и ИУ₂. Их основные технические характеристики приведены в табл. 1.

На рис. 2 показана блок-схема разработанных импульсных устройств. В схеме конденсатор *C* блока запуска *БЗ* и конденсатор *C*₀ силовой цепи *СЦ* исходно заряжены до напряжений *U*_с, *U*₀ в указанной на рисунке полярности. Реверсивно включаемый динистор шунтирован резистором *R* (несколько килоом), поэтому исходное напряжение на нем невелико (много меньше *U*_с, *U*₀). В этом случае при измерении небольшого падения напряжения на р.в.д. после его переключения

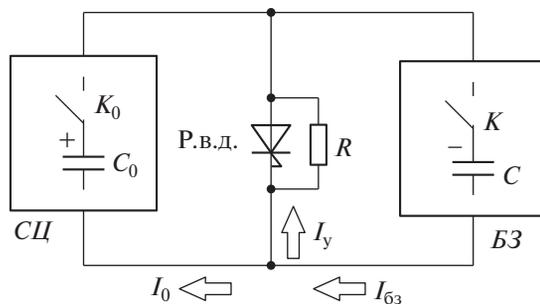


Рис. 2. Упрощенная схема импульсных устройств для исследования р.в.д. *СЦ* – силовая цепь; *БЗ* – блок запуска.

не надо ограничивать сигнал на входе осциллографа. После включения ключа *K* в цепи *БЗ* формируется ток *I*₆₃. В результате через р.в.д. в обратном направлении будет протекать ток управления *I*_у, который равен току *I*₆₃. После включения ключа *K*₀ в цепи *СЦ* формируется мощный быстро нарастающий импульс тока *I*₀. Поскольку *I*₀ ≫ *I*₆₃, полярность тока через р.в.д. изменяется. В результате р.в.д. без задержки включается и коммутирует импульс силового тока.

Электрическая схема устройства ИУ₁ показана на рис. 3. В этой схеме переключение исследуемого р.в.д. осуществляется блоком запуска *БЗ*, содержащим конденсатор *C*, индуктивность *L* и ключ *T*, в качестве которого использован тиристор ТБ133-250-24. Силовая цепь состоит из последовательно соединенных конденсатора *C*₀, индуктивности *L*₀ и малогабаритного вакуумного разрядника *P*. В качестве разрядника *P* используется РВУ-73С, способный эффективно включаться при изменении силового напряжения от 100 В до 16 кВ. Принципиальной особенностью РВУ-73С является то, что его анодные и катодные электроды выполнены в виде параллельных близкорасположенных стержней. В результате достигается эффективное использование всего рабочего объема и обеспечивается возможность быстрой коммутации больших импульсных токов.

Принцип действия ИУ₁ заключается в следующем. После включения тиристора *T* через р.в.д. в обратном направлении протекает ток управления. Его амплитуда и скорость нарастания определяются параметрами элементов блока запуска *БЗ*, а также напряжением зарядки конденсатора *C* (до 2300 В). После включения разрядника *P* через р.в.д. в прямом направлении протекает силовой ток, амплитуда и скорость нарастания которого определяются напряжением зарядки *C*₀ (до 10 кВ), а также величинами емкости *C*₀ и индуктивности монтажных проводов *L*₀. Блоки последовательно соединенных диодов *D*₀, *D* препятствуют переза-

Таблица 1. Основные технические характеристики импульсных устройств для исследования р.в.д.

Технические характеристики	Импульсное устройство	
	ИУ ₁	ИУ ₂
Силовой ток через р.в.д., кА	до 20	до 200
Длительность фронта силового тока, мкс	≤2	≤30
Амплитуда тока управления р.в.д., кА	до 1.5	до 1.5
Длительность фронта тока управления, мкс	≤1.5	≤1.5

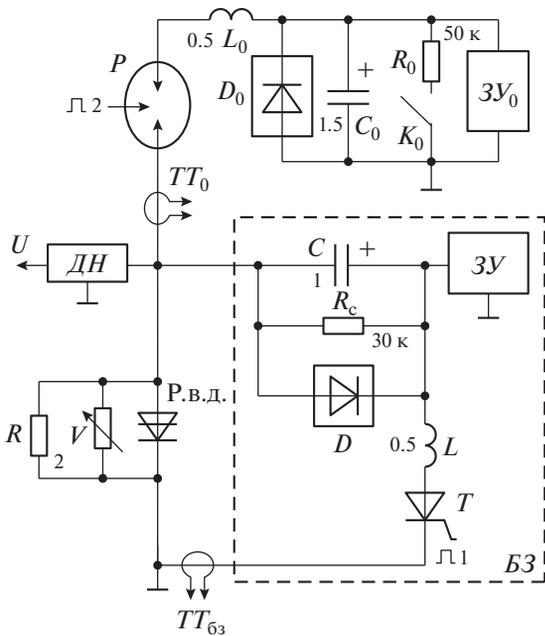


Рис. 3. Электрическая схема ИУ₁. БЗ – блок запуска; ЗУ – зарядные устройства; ТТ – трансформаторы тока; ДН – датчик напряжения; V – СН2-2А-560 (8 параллельно); D – 80ЕРF12 (2 последовательно); D₀ – ДЛ123-320-18 (6 последовательно); P – РВУ-73С; T – ТБ133-250-24; K₀ – А1317-Л2800.65.11.100.

рядке конденсаторов C_0 , C . Длительность тока управления р.в.д. составляет примерно 2 мкс. Она определяется величиной задержки момента включения разрядника P относительно момента включения тиристора T .

Для запуска тиристора T и разрядника P используются цепи управления, которые построены на основе малогабаритных тиристоров 40TPS16 и выходных импульсных трансформаторов. Цепь управления разрядника P формирует мощные сигналы с фронтом < 300 нс, которые обеспечивают малый разброс моментов срабатывания РВУ-73С (< 150 нс). Цепь управления тиристора T формирует импульсы тока управления с амплитудой ~ 5 А и фронтом ~ 0.5 мкс, обеспечивающие малые коммутационные потери в тиристоре.

Резистор R определяет малое напряжение на р.в.д. в исходном состоянии. Варистор V защищает р.в.д. от перенапряжения при несанкционированном включении разрядника P . Если исследуемый р.в.д. не включается после пропускания тока управления (брак в изготовлении), то конденсатор C_0 разряжается через резистор R . В этом режиме варистор V ограничивает напряжение на конденсаторе C . Для нештатного (аварийного) разряда конденсатора C_0 используется механический коммутатор K_0 . После его включения конденса-

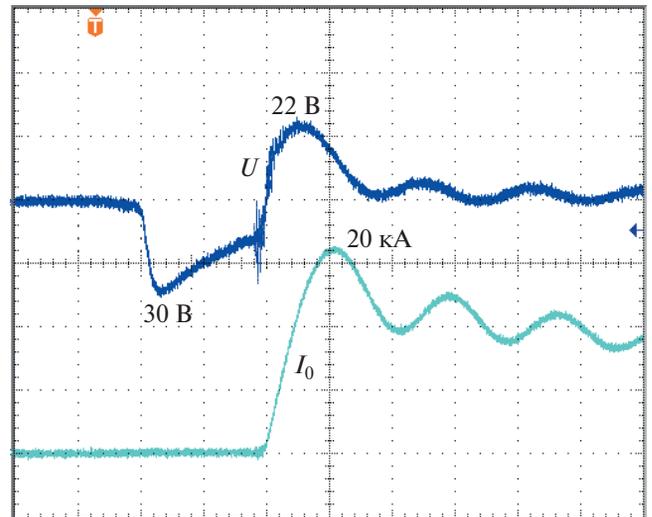


Рис. 4. Осциллограммы силового тока I_0 и напряжения U на РВД173-250-20. Масштаб по вертикали: тока – 6 кА/деление, напряжения – 20 В/деление, по горизонтали – 1 мкс/деление.

тор C_0 быстро разряжается через резистор R_0 . Разряд конденсатора C осуществляется через резистор R_c .

Измерение силового тока I_0 и тока блока запуска I_{63} осуществляется трансформаторами тока ТТ₀, ТТ₆₃ (Pearson current monitor 410). Падение напряжения на р.в.д. измеряется датчиком напряжения ДН (Tektronix Н5100А).

Зарядка конденсаторов C_0 и C осуществляется с помощью зарядных устройств ЗУ₀ и ЗУ с входным напряжением +24 В. Они разработаны по

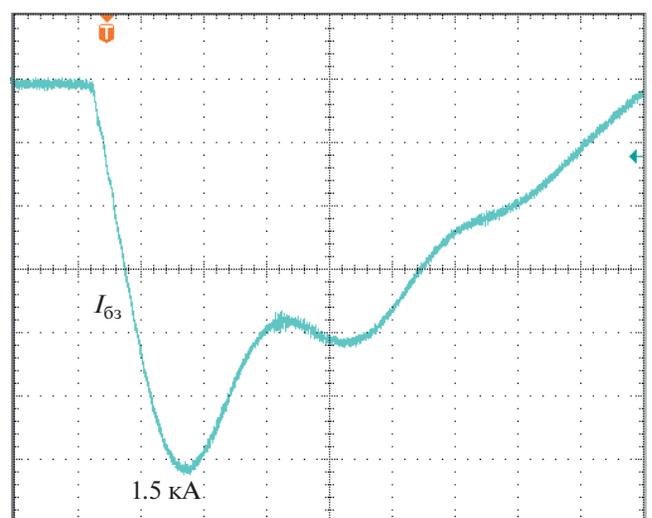


Рис. 5. Осциллограмма тока блока запуска. Масштаб: по вертикали – 250 А/деление, по горизонтали – 1 мкс/деление.

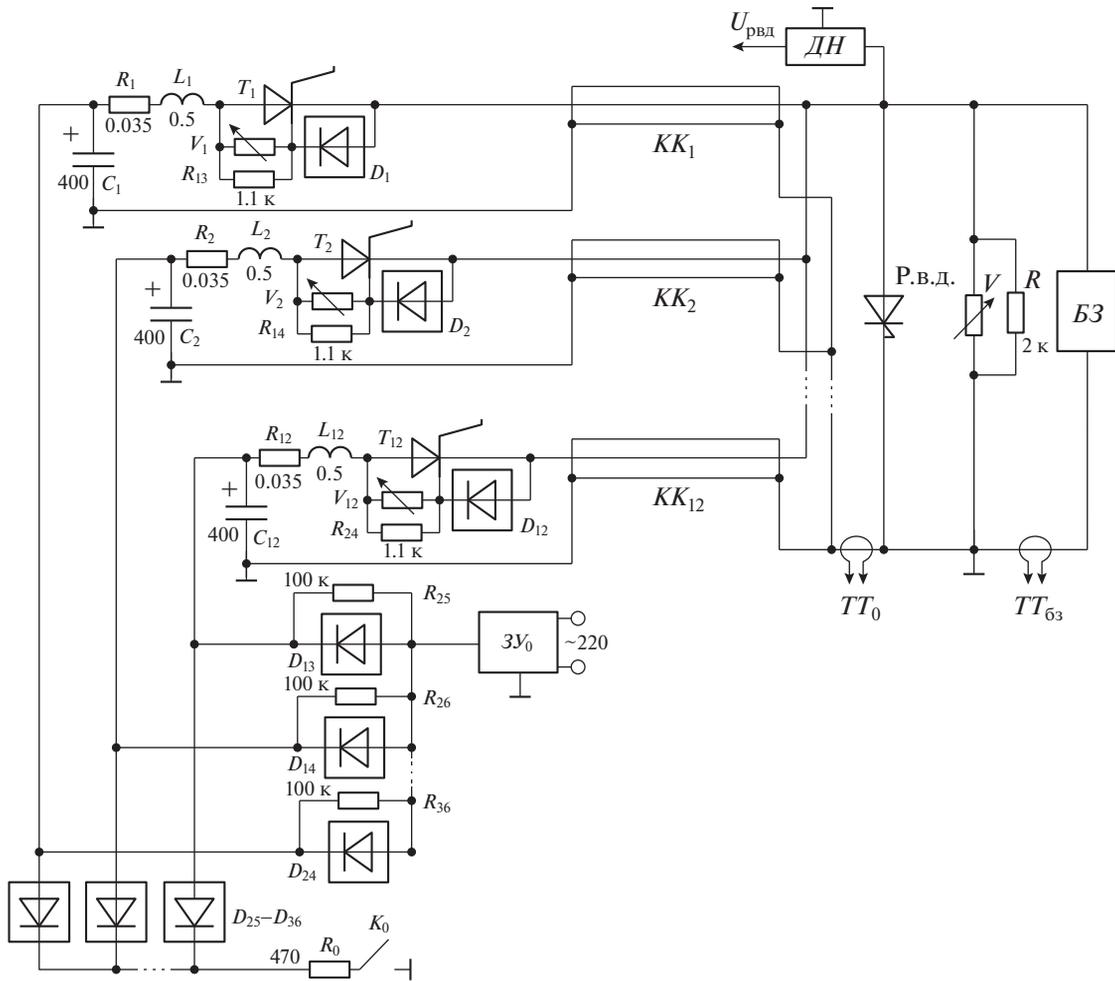


Рис. 6. Электрическая схема импульсного устройства ИУ₂. БЗ – блок запуска; ЗУ – зарядные устройства; ТТ – трансформаторы тока; ДН – датчик напряжения; КК – коаксиальные кабели; V – СН2-2А –560 (8 параллельно); V₁–V₁₂ – VSR20D561K; D₁–D₃₆ – HER 608 (3 последовательно).

схеме обратного инвертора и способны стабилизировать заданную величину выходного напряжения с точностью 5%. Формирование высокого выходного напряжения осуществляется с помощью повышающего трансформатора и низковольтной высокочастотной цепи на основе полевого транзистора С2М0160120D. Обмотки трансформатора намотаны на фторопластовые катушки, расположенные на разных ядрах П-образного ферритового сердечника. В результате электрическая прочность межобмоточной изоляции составляет >15 кВ.

Когда процессы зарядки конденсаторов C₀ и C заканчиваются, зарядные устройства ЗУ₀ и ЗУ формируют сигналы готовности. После генерации этих сигналов включается блок управления ИУ₁, который вырабатывает два, сдвинутых по времени, оптических сигнала. Эти сигналы поступают в цепи управления тиристора Т и разряд-

ника Р и обеспечивают их включение с заданной задержкой.

В качестве примера на рис. 4 приведены осциллограммы силового тока I₀ и падения напряжения U на типичном РВД173–250–20 с диаметром структуры 76 мм и рабочим напряжением 2 кВ. Осциллограммы получены при максимальных напряжениях зарядки конденсаторов C₀ и C (U₀ = 10 кВ и U_C = 2.3 кВ).

На рис. 5 показана осциллограмма выходного тока блока запуска БЗ, соответствующая U_C = 2.3 кВ, которая была получена при отключенной силовой цепи устройства ИУ₁.

Согласно осциллограммам на рис. 4, 5, при максимальном напряжении зарядки конденсаторов C₀, C силовой ток и ток блока запуска соответственно имеют амплитуды ~20 кА и ~1.5 кА. Максимальная скорость нарастания силового тока составляет ~25 кА/мкс. В этом режиме падение

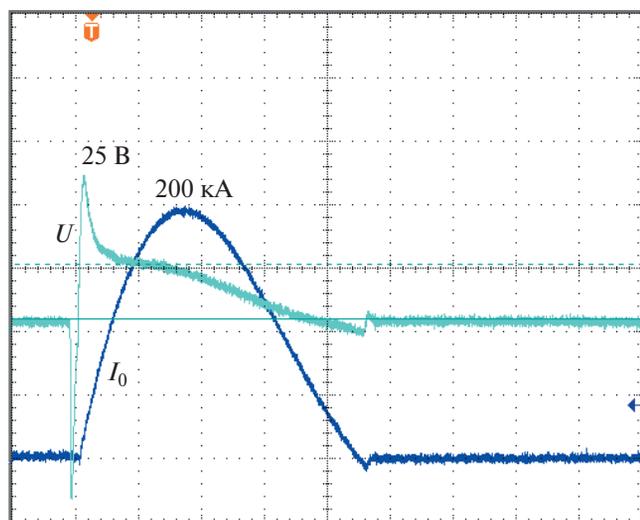


Рис. 7. Осциллограммы силового тока I_0 и падения напряжения U на р.в.д. Масштаб по вертикали: тока — 50 кА/деление, напряжения — 10 В/деление; по горизонтали — 20 мкс/деление.

напряжения на использованном динисторе мало и может быть выбрано в качестве базового при сравнительном тестировании динисторов этого типа.

На рис. 6 приведена электрическая схема импульсного устройства $ИУ_2$. Силовой ток в $ИУ_2$

формируется с помощью двенадцати ячеек на основе силовых конденсаторов C_1-C_{12} , тиристоров T_1-T_{12} , демпфирующих резисторов R_1-R_{12} и монтажных индуктивностей L_1-L_{12} . К ячейкам подключены коаксиальные кабели $КК_1-КК_{12}$ длиной 2 м. Они обеспечивают симметричное подключение ячеек к исследуемому р.в.д. Амплитуда и скорость нарастания выходных токов ячеек определяются сопротивлением демпфирующих резисторов, напряжением зарядки силовых конденсаторов (от 200 до 1800 В), емкостью этих конденсаторов, а также индуктивностями цепей их разряда, включающими в себя индуктивности кабелей и монтажные индуктивности L_1-L_{12} . Элементы ячеек выбраны так, чтобы после включения тиристоров обеспечивалось малое напряжение перезарядки силовых конденсаторов. Амплитуда и длительность протекающего через исследуемый р.в.д. силового тока могут регулироваться путем изменения числа одновременно включаемых ячеек. При синхронном включении всех ячеек и максимальном напряжении зарядки силовых конденсаторов силовой ток имеет амплитуду ~ 200 кА и длительность ~ 90 мкс.

В качестве тиристоров T_1-T_{12} используются мощные импульсные тиристоры ТБИ543-400-24. Малые коммутационные потери энергии в тиристорах достигаются путем создания импульсов тока управления с амплитудой ~ 10 А и фронтом 0.5 мкс.

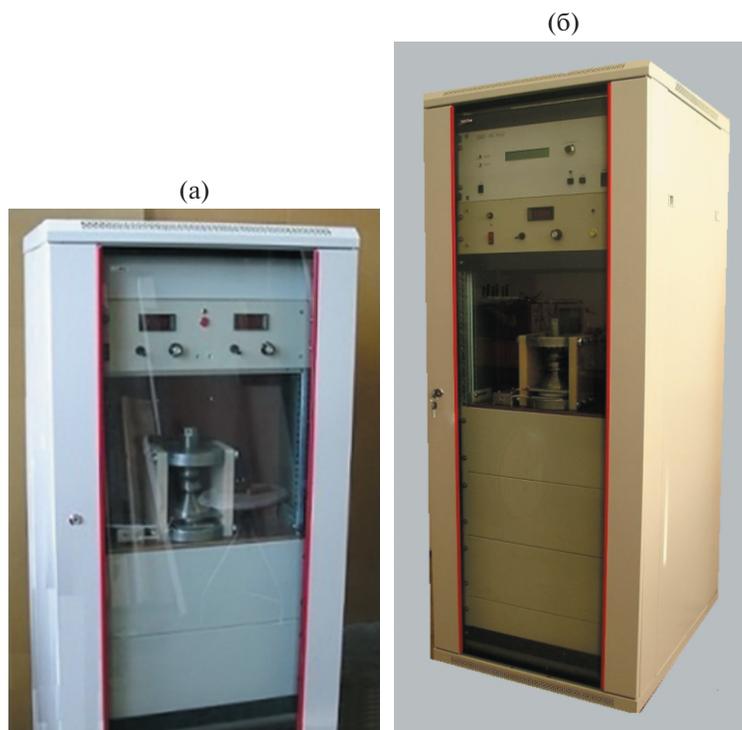


Рис. 8. Внешний вид: а — $ИУ_1$; б — $ИУ_2$.

Ток управления каждого тиристора формируется цепью запуска с выходным импульсным трансформатором. Вторичная обмотка трансформатора подключена к цепи электрода управления тиристора коаксиальным кабелем длиной 2 м. В цепи запуска используются последовательно соединенные тиристор 40TPS12, токоформирующий резистор с сопротивлением 30 Ом и конденсатор, который исходно заряжен до напряжения питания 300 В.

Сравнительно большое напряжение питания запускающих цепей обеспечивает высокую скорость нарастания токов управления силовых тиристоров. Использование в запускающих цепях токоформирующих резисторов с большим сопротивлением позволяет считать эти цепи источниками тока. В результате токи управления тиристоров практически одинаковы.

Для формирования тока управления р.в.д. используется такой же блок запуска БЗ, как в устройстве ИУ₁. Зарядка конденсаторов C₁–C₁₂ осуществляется с помощью зарядного устройства ЗУ₀ (701С-020-220-10-р).

Принцип действия ИУ₂ заключается в следующем. После включения блока запуска БЗ через р.в.д. в обратном направлении протекает ток управления I_γ. После последующего включения силовых тиристоров через р.в.д. в прямом направлении протекает силовой ток. Величина задержки между моментами включения силовых тиристоров и блока БЗ определяет длительность тока управления р.в.д.

В аварийных режимах (пробой кабеля, пробой демпфирующего резистора и т.д.) силовые конденсаторы могут перезарядиться до существенного обратного напряжения. Защитные цепи, состоящие из диодов D₁–D₁₂ и варисторов V₁–V₁₂, ограничивают обратное напряжение на тиристорах T₁–T₁₂ на безопасном уровне. В этом режиме резисторы R₁₃–R₂₄ обеспечивают полный разряд силовых конденсаторов. Резистор R создает возможность разряда конденсаторов C₁–C₁₂, если р.в.д. не включается после пропускания тока управления. В этих условиях варистор V защищает блок БЗ от перенапряжения. Если произойдет несанкционированное включение силовых тири-

сторов, то варистор V ограничивает напряжение на р.в.д. Диоды D₁₃–D₂₄ разделяют силовые конденсаторы в процессе их зарядки, а диоды D₂₅–D₃₆ обеспечивают разряд силовых конденсаторов после включения ключа K₀.

В процессе исследования р.в.д. выходной ток блока БЗ измерялся датчиком тока Pearson current monitor 410. Для измерения силового тока использовался пояс SWT 600R фирмы PEM. Падение напряжения на р.в.д. измерялось высоковольтным пробником Tektronix H5100A.

В качестве примера на рис. 7 показаны осциллограммы силового тока I₀ = 200 кА и падения напряжения U на типичном РВД173-250-20. Они соответствуют эксперименту, когда амплитуда и длительность выходного тока блока запуска были равны соответственно 1500 А и 2 мкс.

На рис. 8 приведены фотографии ИУ₁ и ИУ₂.

Таким образом, описанные мощные импульсные устройства позволяют тестировать реверсивно включаемые динисторы в условиях промышленного производства и проводить исследования, направленные на оптимизацию их конструкции. Они могут быть также использованы для практического обучения студентов и молодых специалистов, окончивших высшие учебные заведения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grekhov I.V., Gorbatyuk A.V., Kostina L.S., Korotkov S.V., Iakovtchuk N.S. // Solid-State Electronics. 1983. V. 26. № 11. P. 1132.
2. Коротков С.В. // ПТЭ. 2002. № 4. С. 5.
3. Schneider S., Podlesak T.F. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2000. V. 28. № 5. P. 1520. <https://doi.org/10.1109/27.901225>
4. Грехов И.В., Козлов А.К., Коротков С.В., Рольник И.А., Степанянец А.Л. // ПТЭ. 2002. № 5. С. 102.
5. Грехов И.В., Козлов А.К., Коротков С.В., Степанянец А.Л. // ПТЭ. 2003. № 1. С. 53.
6. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Воронков В.Б., Жмодиков А.Л., Козлов А.К., Коротков Д.А., Люблинский А.Г. // ПТЭ. 2010. № 1. С. 172.
7. Korotkov S.V., Lyublinsky A.G., Aristov Y.V., Zhmodikov A.L., Kozlov A.K. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2013. V. 41. Issue 10. Part 1. P. 2879. <https://doi.org/10.1109/TPS.2013.2267555>

УДК 621.314

**ГЕНЕРАТОР МОЩНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ
БЛОКА ДРЕЙФОВЫХ ДИОДОВ С РЕЗКИМ ВОССТАНОВЛЕНИЕМ
И БЛОКА ДИНИСТОРОВ С УДАРНОЙ ИОНИЗАЦИЕЙ**© 2022 г. С. В. Коротков^{а,*}, Ю. В. Аристов^а, А. Л. Жмодиков^а^аФизико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

*e-mail: korotkov@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 24.12.2021 г.

После доработки 11.01.2022 г.

Принята к публикации 12.01.2022 г.

Разработан малогабаритный высокоэффективный генератор наносекундных импульсов с выходной энергией ~400 мДж на основе блока дрейфовых диодов с резким восстановлением и блока динисторов с ударной ионизацией. Генератор позволяет коммутировать в нагрузку 50 Ом импульсы напряжения с амплитудой ~30 кВ и фронтом ~3 нс. Показана возможность существенного увеличения выходного напряжения и выходной энергии генератора.

DOI: 10.31857/S0032816222030107

В генераторах мощных наносекундных импульсов коммутируемая в нагрузку энергия обычно аккумулируется при зарядке емкостного накопителя энергии (н.э.), выполненного в виде конденсатора, или при пропускании тока через индуктивный н.э., выполненный в виде катушки индуктивности. В генераторах с емкостным н.э. для коммутации тока в нагрузку используется замыкающий ключ, соединенный последовательно с конденсатором. В генераторах с индуктивным н.э. ток в нагрузке формируется с помощью размыкающего ключа. Когда этот ключ выключается, протекающий через катушку индуктивности ток коммутируется в нагрузку, которая подключена параллельно. Определенным достоинством генераторов с индуктивным н.э. является то, что при таком же, как и в генераторах с емкостным н.э., быстродействии ключей они позволяют получить большую скорость нарастания тока в нагрузке, так как она не ограничивается индуктивностью конденсатора. Кроме того, в генераторах с индуктивным н.э. напряжение источника питания может быть существенно меньше амплитуды импульса напряжения на нагрузке, которая определяется произведением выходного тока на сопротивление нагрузки.

Малое время выключения современных полупроводниковых приборов позволяет их эффективно использовать в генераторах наносекундных импульсов с индуктивным н.э. Наименьшее время выключения (единицы и доли наносекунд) имеют SOS-диоды (SOS – Semiconductor Opening

Switch) [1] и дрейфовые диоды с резким восстановлением (DSRD – Drift Step Recovery Diodes) [2]. SOS-диоды имеют существенно большую допустимую плотность тока по сравнению с DSRD. Достоинством DSRD является меньшее время выключения по сравнению с SOS-диодами, имеющими такое же рабочее напряжение.

В статье приведены результаты исследования мощного генератора, содержащего блок последовательно соединенных DSRD, принцип работы которых заключается в следующем. При накачке DSRD электронно-дырочной плазмой путем пропускания принципиально короткого (<500 нс) прямого тока (тока накачки) обеспечивается резко неоднородное накопление электронов и дырок в базовых областях диодов. После окончания тока накачки при пропускании через DSRD импульса обратного тока (тока выкачки) с принципиально коротким фронтом (≤ 300 нс) накопленный заряд выносится и создаются условия для быстрого выключения DSRD. Время выключения DSRD составляет 0.5–3 нс и зависит от конструкции диодов и длительности импульсов тока накачки и выкачки. При соединении в высоковольтный блок DSRD выключаются синхронно, если токи накачки и выкачки являются общими для всех диодов. В результате достигается высокая надежность высоковольтных блоков DSRD.

В DSRD-генераторах для формирования тока выкачки к блоку DSRD подключается цепь, состоящая из последовательно соединенных индуктивности L , замыкающего ключа K и конденсато-

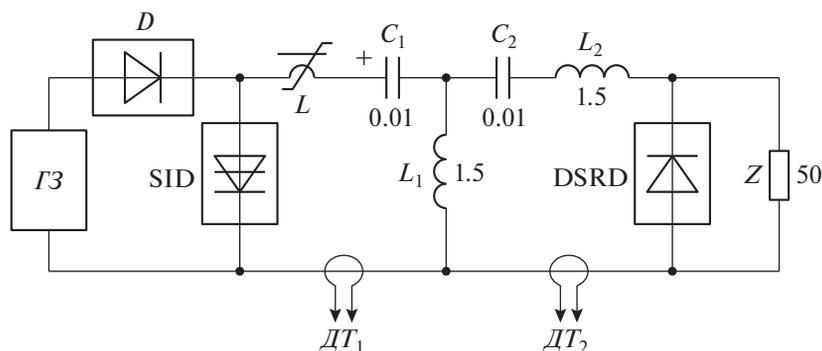


Рис. 1. Электрическая схема опытного генератора. ГЗ – генератор запуска, ДТ – датчики тока; L – сердечник, феррит N87 (EPCOS), $16 \times 9.6 \times 30$ мм, $w = 1$; D – VMI K100UF (2 последовательно).

ра C , заряженного до напряжения U_C . После включения ключа K конденсатор C разряжается через индуктивность L и блок DSRD, который предварительно накачан электронно-дырочной плазмой. В результате через блок DSRD протекает ток выкачки, и происходит передача энергии из конденсатора C в индуктивность L . При выключении блока DSRD в нагрузку коммутируется ток I_L , протекающий через индуктивность L . Величина коммутируемой в нагрузку энергии определяется энергией, накопленной в индуктивности L в момент выключения блока DSRD: $E = 0.5(LI_L^2)$. Поскольку длительность тока выкачки принципиально мала, а скорость нарастания этого тока пропорциональна отношению U_C/L , для увеличения энергии, коммутируемой в нагрузку, требуется увеличить напряжение зарядки конденсатора C . В связи с этим в DSRD-генераторах с большой выходной энергией необходимо использовать высоковольтные замыкающие ключи, способные эффективно коммутировать мощные субмикросекундные импульсы тока выкачки. Разработка таких ключей является сложной задачей.

Результаты наших недавних исследований показали возможность эффективного формирования мощных импульсов тока субмикросекундной длительности с помощью высоковольтных замыкающих ключей в виде блоков последовательно соединенных динисторов с ударной ионизацией (SID – Shock-Ionized Dynistors) [3, 4].

SID относятся к классу кремниевых четырехслойных полупроводниковых приборов [5–8], которые включаются за время < 1 нс импульсом высокого напряжения, нарастающим со скоростью > 1 кВ/нс и инициирующим процесс ударной ионизации кремния. Основным достоинством SID является то, что для их переключения требуется меньшая мощность запускающего импульса. Малое время включения SID определяет

малые потери энергии при коммутации мощных субмикросекундных импульсов тока.

Принцип работы SID позволяет включать высоковольтные блоки последовательно соединенных динисторов общим наносекундным импульсом высокого напряжения. В результате обеспечивается возможность разработки надежных блоков SID с рабочим напряжением десятки киловольт, способных коммутировать импульсы тока с амплитудой несколько килоампер и длительностью десятки наносекунд.

На рис. 1 приведена электрическая схема разработанного генератора мощных наносекундных импульсов высокого напряжения на основе высоковольтного блока DSRD с рабочим напряжением 35 кВ, состоящего из 35-ти последовательно соединенных диодов с диаметром структур 20 мм, и высоковольтного блока SID с рабочим напряжением 12 кВ, который был выполнен из шести последовательно соединенных динисторов с рабочим напряжением 2.3 кВ и диаметром структур 12 мм. Схема разработанного генератора построена на основе схемы, предложенной в работе [9].

В схеме на рис. 1 после включения блока SID конденсатор C_1 быстро перезаряжается до существенного обратного напряжения. Ток перезарядки протекает через цепь DSRD– L_2 – C_2 и индуктивность L_1 . В результате происходит зарядка конденсатора C_2 ($C_2 = C_1$), и через блок DSRD протекает короткий ток накачки. Затем конденсаторы C_1 , C_2 разряжаются через индуктивность L_2 , и через блок DSRD протекает быстро нарастающий ток выкачки. При выключении блока DSRD протекающий через индуктивность L_2 ток коммутируется в нагрузку Z .

На рис. 2 приведены осциллограммы токов и напряжений, иллюстрирующие работу генератора. Осциллограммы I_1 , I_2 получены при измерении токов, протекающих соответственно через блок SID и блок DSRD.

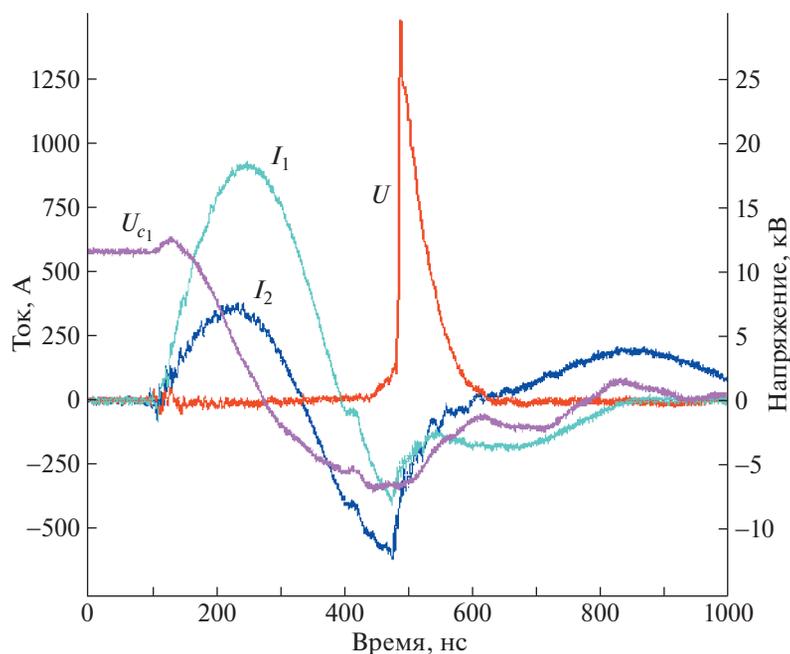


Рис. 2. Осциллограммы токов и напряжения, полученные при исследовании генератора: I_1 , I_2 — токи через блок SID и блок DSRD соответственно; U_{C_1} , U — напряжения на конденсаторе C_1 и нагрузке Z соответственно.

Осциллограммы U_{C_1} и U получены при измерении напряжения соответственно на конденсаторе C_1 и нагрузке $Z = 50$ Ом. Согласно осциллограммам, амплитуда и длительность импульса тока накачки блока DSRD составляют соответственно ~ 270 А и ~ 230 нс. Для достижения такого тока накачки через блок SID пропускается импульс тока с амплитудой ~ 900 А и длительностью ~ 300 нс.

При такой длительности блок SID способен эффективно коммутировать токи со значительно большей амплитудой (до нескольких килоампер), поэтому потери энергии в этом блоке малы. Блок DSRD выключается через ~ 150 нс после коммутации в него тока выкачки, когда этот ток достигает величины ~ 650 А.

На рис. 3 приведена осциллограмма импульса напряжения на нагрузке, представленная в другом масштабе. Амплитуда импульса составляет ~ 30 кВ, длительность фронта ≤ 3 нс. Представленные осциллограммы были получены с помощью цифрового осциллографа Tektronix TDS3052C с полосой 500 МГц. Для измерения токов I_1 , I_2 использовались датчики тока DT_1 и DT_2 производства фирмы Pearson Electronics, Inc (модель 410). Для измерения напряжения на нагрузке использовался изготовленный в ФТИ широкополосный делитель напряжения хорошо известной конструкции. Нижним плечом делителя являлся коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 50 Ом, верхним — малогабаритный резистор с сопротивлением 470 Ом, скомпенсированный мед-

ным экраном. Делитель тестировался при измерении сигналов от апробированного генератора низковольтных импульсов с временем нарастания ~ 0.3 нс. Воспроизводимый фронт составлял ~ 0.5 нс. Для измерения напряжения на конденсаторе C_1 использовался пробник Tektronix P6015A.

Нагрузка была выполнена в виде сборки параллельно соединенных малоиндуктивных резисторов, охлаждаемых потоком воздуха. Это обеспечивало возможность длительной работы генератора при частоте следования выходных импульсов ~ 1 кГц.

Вычисленная по осциллограммам на рис. 3 выходная энергия генератора равняется ~ 400 мДж, что составляет $\sim 50\%$ от величины энергии, исходно накопленной в конденсаторе C_1 . Полученный к.п.д. (50%) является высоким для мощных DSRD-генераторов. Так, например, близкий к этому значению к.п.д. был получен в DSRD-генераторе [10] при коммутации в нагрузку 50 Ом маломощных наносекундных импульсов с амплитудой 1.15 кВ и длительностью < 15 нс. При увеличении амплитуды импульсов до 2.2 кВ к.п.д. этого генератора уменьшился до 24%. В наших экспериментах [11, 12] DSRD-генераторы наносекундных импульсов с энергией 30–50 мДж, выполненные на основе повышающих трансформаторов с насыщающимися сердечниками, имели к.п.д. $\sim 40\%$.

В схеме на рис. 1 включение блока SID осуществляется с помощью генератора запуска ГЗ. Диод D исключает возможность приложения к ГЗ напряжения зарядки конденсатора C_1 . После

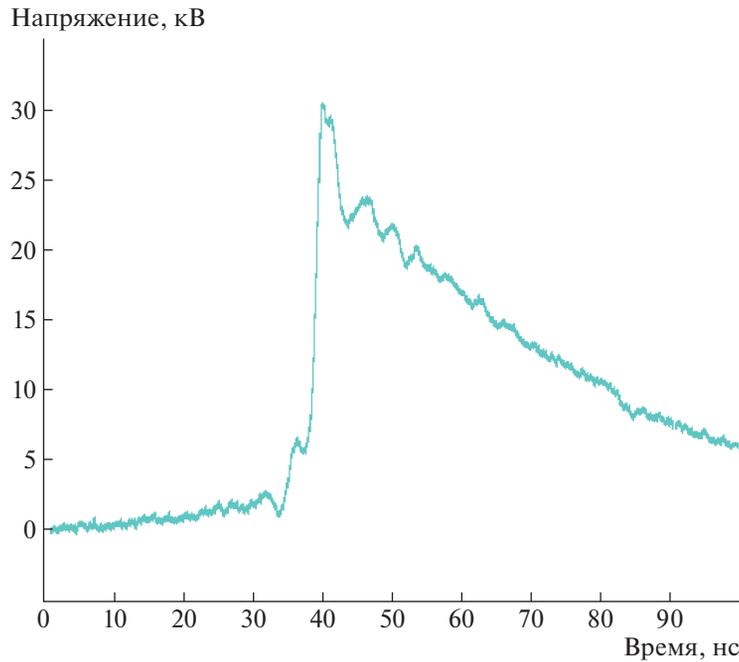


Рис. 3. Осциллограмма импульса напряжения на нагрузке Z .

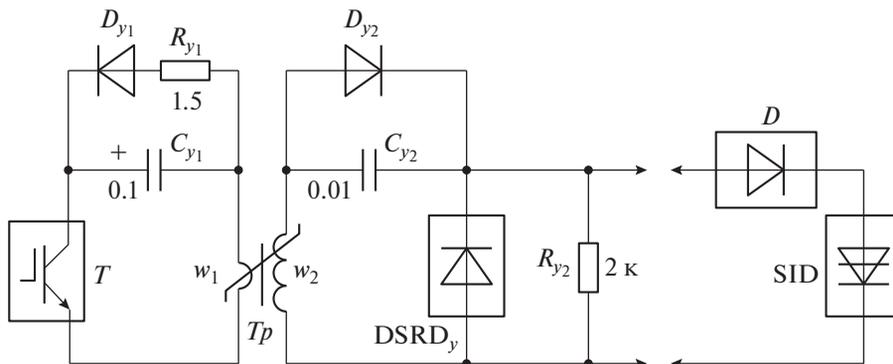


Рис. 4. Электрическая схема генератора запуска. T_p – сердечник феррит N87 (EPCOS), $25.3 \times 14.8 \times 60$ мм, $w_1 = 1$, $w_2 = 3$; T – IRGPS60B120KDP (2 параллельно); D_{y1} – HER 608, D_{y2} – HER 608 (4 последовательно).

включения ГЗ его выходное напряжение быстро нарастает до величины, превышающей величину силового напряжения, приложенного к блоку SID. В результате через цепь D –SID протекает ток управления, обеспечивающий быструю зарядку собственных емкостей диодисторов в блоке SID до напряжения, инициирующего процесс ударной ионизации в их структурах. До момента включения блока SID дроссель L имеет большую индуктивность и препятствует протеканию тока управления через конденсатор C_1 . После включения блока SID сердечник дросселя L насыщается. В результате индуктивность дросселя становится очень мала и практически не влияет на процесс разряда конденсатора C_1 .

Генератор запуска ГЗ был выполнен по схеме, представленной на рис. 4. Схема содержит мало-мощный блок $DSRD_y$ в виде 16-ти последовательно соединенных диодов диаметром 12 мм, а также трансформатор T_p и блок транзисторов T .

Исходно конденсатор C_{y1} заряжен до напряжения ~ 1 кВ. При включении транзисторного блока T осуществляются разряд C_{y1} через обмотку w_1 трансформатора T_p и зарядка конденсатора C_{y2} через обмотку w_2 . Импульс тока зарядки C_{y2} является импульсом тока накачки блока $DSRD_y$. Он имеет амплитуду ~ 100 А и длительность ~ 250 нс. В момент окончания процесса зарядки C_{y2} происходит насыщение сердечника T_p , индуктивность

обмотки w_2 резко уменьшается, конденсатор C_{y2} быстро разряжается по цепи $DSRD_y-w_2$, и через блок $DSRD_y$ протекает ток выкачки. Когда блок $DSRD_y$ выключается, в обмотке w_2 индуцируется импульс высокого напряжения, и ток, протекающий через эту обмотку, коммутируется в цепь $D-SID$. В результате обеспечиваются условия для включения блока SID .

Таким образом, разработанный генератор на основе малогабаритных ключей в виде блока SID и блока $DSRD$ позволяет формировать на нагрузке 50 Ом импульсы напряжения с амплитудой ~30 кВ, нарастающие со скоростью ~10 кВ/нс. Его основными достоинствами являются большая величина выходной энергии (~400 мДж) и достаточно высокая эффективность (~50%). Принципы построения разработанного генератора обеспечивают возможность увеличения амплитуды выходного напряжения и величины выходной энергии при возрастании выходного тока и входного напряжения. SID -ключи позволяют увеличить входное напряжение до нескольких десятков киловольт. Блоки $DSRD$ также могут иметь рабочее напряжение порядка десятков киловольт. Они надежно работают при параллельном соединении [13] и могут обеспечить коммутацию килоамперных импульсов выходного тока. Поэтому реальным представляется создание генераторов наносекундных импульсов с выходным напряжением десятки киловольт и выходной энергией несколько джоулей. Физические принципы работы SID и $DSRD$ позволяют обеспечить работу таких генераторов на частоте несколько килогерц. Это обуславливает возможность разработки генераторов наносекундных импульсов высокого напряжения с фронтом в единицы наносекунд и средней мощностью несколько киловатт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рукин С.Н. // ПТЭ. 1999. № 4. С. 5.
2. Grekhov I.V., Efanov V.M., Kardo-Sysoev A.F., Shenderoy S.V. // Solid-State Electron. 1985. V. 28. P. 597.
3. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Воронков В.Б. // ПТЭ. 2019. № 2. С. 24.
<https://doi.org/10.1134/S0032816219010130>
4. Korotkov S.V., Aristov Yu.V., Korotkov D.A., Zhmodikov A.L. // Rev. Sci. Instrum. 2020. V. 91. P. 084704.
<https://doi.org/10.1063/5.0015284>
5. Efanov V.M., Kardo-Sysoev A.F., Tchashnicov I.G., Yarin P.M. // Proc. of 1996 International Power Modulator Symposium. IEEE. Boca Raton, FL, USA, 1996. P. 22.
6. Grekhov I.V., Korotkov S.V., Stepaniants A.L., Khristyuk D.V., Voronkov V.B., Aristov Y.V. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2005. V. 33. Issue 4. P. 1240.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2005.852349>
7. Grekhov I.V., Korotkov S.V., Rodin P.B. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. V. 36. Issue 2. P. 378.
<https://doi.org/10.1109/TSP.2008.918661>
8. Gusev A.I., Lyubutin S.K., Rukin S.N., Tsyranov S.N. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2016. V. 44. Issue 10. Part 1. P. 1888.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2542343>
9. Sanders J., Kuthi A., Gundersen M.A., Moore W.H. Patent No. US 8, 115, 343 B2. 2012
10. Merensky L.M., Kardo-Sysoev A.F., Shmilovitz D., Kessar A.S. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. V. 41. Issue 11. P. 3138.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2013.2284601>
11. Lyublinsky A.G., Korotkov S.V., Aristov Yu.V., Korotkov D.A. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. V. 41. Issue 10. P. 2625.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2013.2264328>
12. Коротков Д.А., Коротков С.В., Спичкин Г.Л., Федотова Л.М. // ПТЭ. 2017. № 2. С. 126.
<https://doi.org/10.7868/S0032816217020094>
13. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Козлов А.К., Коротков Д.А., Люблинский А.Г., Спичкин Г.Л. // ПТЭ. 2012. № 5. С. 99.

ПРОГРАММИРУЕМЫЙ ФОРМИРОВАТЕЛЬ ИМПУЛЬСОВ В СТАНДАРТЕ КАМАК

© 2022 г. С. А. Горохов^{а,*}, А. А. Киряков^а, М. К. Полковников^а

^а *Институт физики высоких энергий им. А.А. Логонова Национального исследовательского центра
“Курчатовский институт”*

Россия, 142281, Протвино Московской обл., пл. Науки, 1

**e-mail: sgorokhov@mail.ihep.ru*

Поступила в редакцию 18.01.2022 г.

После доработки 25.01.2022 г.

Принята к публикации 02.02.2022 г.

Для приема и предварительной обработки информации с малоканальных детектирующих систем разработан модуль программируемого 8-канального формирователя сигналов ПФ-ЛДС-КАМАК. Модуль имеет возможность работы со входными сигналами любой полярности. Выходные сигналы модуля – сигналы уровней NIM. Модуль поддерживает до трех выходных каналов на каждый вход; выходные сигналы могут быть прямыми или инверсными. Модуль формирователя выполнен в стандарте КАМАК, имеет восемь каналов формирования импульсов и занимает 2 места в крейте КАМАК. Средний шаг квантования длительности выходного импульса 6.52 ± 0.04 нс. Максимальная длительность выходного импульса 404 ± 2 нс. Задержка сигнала формирователем составляет в среднем по всем каналам 18.85 ± 0.57 нс. Средняя длительность переднего фронта выходного импульса формирователя составляет 1.23 ± 0.20 нс. Относительное изменение длительности выходного сигнала при полной нагрузке каналов модуля не превышает 3%. Уровень порога формирователя задается в диапазоне от –540 до 540 мВ.

DOI: 10.31857/S0032816222040036

ВВЕДЕНИЕ

Для малоканальных систем разработка встроенной электроники преобразования и оцифровки аналоговых сигналов не является рентабельной. “Хорошим” решением являются универсальные модули электроники, применимость которых не лимитируется типом детектирующих элементов и полярностью аналогового сигнала.

До настоящего времени используются устаревшие формирователи импульсов 4Ф-115 и их аналоги (8Ф3-113; в стандарте КАМАК [1]), основной недостаток которых – ручная установка порога дискриминации аналогового сигнала. Данный недостаток полностью исключает их использование в автоматизации расчетов оптимального порога дискриминации аналогового сигнала, а также напряжений питания/смещения детектирующих элементов (из-за значительных временных затрат и плохой точности ручной регулировки порога).

Для приема и предварительной обработки информации с малоканальных детектирующих систем нами разработан модуль программируемого 8-канального формирователя сигналов ПФ-ЛДС-КАМАК. Возможность программного вы-

бора “рабочего” фронта аналогового сигнала (по “нарастанию”/“спаду”) обеспечивает работу с аналоговыми сигналами как отрицательной, так и положительной полярности, что в совокупности с программной установкой длительности выходного сигнала делает разработанный модуль формирователя импульсов универсальным.

МОДУЛЬ ФОРМИРОВАТЕЛЯ СИГНАЛОВ

Модуль ПФ-ЛДС-КАМАК имеет возможность работы со входными сигналами любой полярности. Выходные сигналы модуля – сигналы уровней NIM. Модуль поддерживает до трех выходных каналов на каждый вход; выходные сигналы могут быть прямыми или инверсными. Модуль формирователя реализован с использованием современной элементной базы и выполнен в стандарте КАМАК. Формирователь имеет восемь каналов формирования импульсов и занимает 2 места в крейте КАМАК. На рис. 1 показана блок-схема формирователя.

Для работы с шиной КАМАК используется преобразователь уровня сигналов (на схеме TTL/LVTTL) типа 74LVC16245. Входной сигнал (Вх. 1–8) подается на инвертирующий вход ком-

ИЛИ. Длительность сформированного импульса определяется количеством пустых ячеек ($L_{cell} 1$), включенных между выходом \bar{Q} и входом сброса R триггера $T_2 1$.

Выходной сигнал Q триггера $T_2 1$ переключает триггер $T_2 2$, который запрещает дальнейшую работу (вход EN) $T_2 1$ и разрешает работу триггера-одновибратора $T_2 4$ (вход EN). Генератор импульсов сконструирован из двух одновибраторов $T_2 3$, $T_2 4$ и линии задержки DEL (проводник на плате длиной 20 см). Одновибраторы $T_2 3$ и $T_2 4$ выполнены аналогичными одновибратору $T_2 1$. После поступления запускающего импульса одновибратор $T_2 3$ формирует импульс длительностью 3 нс, который через линию задержки поступает на тактовый вход $T_2 4$. Выходной импульс $T_2 4$ через схему *ИЛИ* подается на тактовый вход S триггера $T_2 3$ и т.д. Чтобы получить одинаковую частоту работы генераторов всех восьми каналов, макроячейки, содержащие в себе элементы генераторов ($T_2 3$, $T_2 4$, *ИЛИ*, $CTR6$, $RG6$), размещались вручную внутри функциональных блоков при помощи утилиты Chip planner. Входы и выходы микросхемы п.л.и.с. выбирались таким образом, чтобы время прохождения импульса от контактной площадки до используемой макроячейки было примерно одинаковым для всех каналов. Генератор работает до переполнения счетчика $CTR6$. После этого сигнал переполнения OF счетчика $CTR6$ сбрасывает триггер $T_2 2$. Выходной сигнал \bar{Q} триггера $T_2 2$ перезаписывает счетчик и запрещает прохождение импульсов в $T_2 4$. Из п.л.и.с. сформированный импульс *Вых.ТТЛ1* подается в преобразователь уровня TTL/ECL и, далее, в преобразователь уровня ECL/NIM. Всего в п.л.и.с. собрано 8 генераторов (по одному на каждый канал).

Для записи кодов в DAC в п.л.и.с. использованы следующие библиотечные элементы: сдвиговый регистр и цифровой мультиплексор. Для ра-

боты с шиной КАМАК собран дешифратор команд.

Проект формирователя занял в п.л.и.с. 45% от объема. Из них один канал формирования сигнала занимает 4%, сдвиговый регистр и цифровой мультиплексор для управления микросхемами DAC – 6%, дешифратор команд КАМАК – 7%.

Команды блока: $F(17)A(0)$ – выбор “рабочего” фронта входных сигналов (0 – по “спаду”, 1 – по “нарастанию”; каждый разряд соответствует своему входу); $F(16)A(0)–F(16)A(7)$ – установка длительности выходного импульса ($A(0)$ – 1 канал, $A(1)$ – 2-й канал и т.д.); $F(16)A(8)–F(16)A(15)$ – установка величины порога дискриминации аналогового сигнала в канале, номер которого задается номером субадреса ($A(8)$ – 1-й канал, $A(9)$ – 2-й канал и т.д.).

Благодаря ручному размещению элементов генераторов внутри функциональных блоков характеристики каналов практически одинаковы. Средний шаг квантования длительности выходного импульса 6.52 ± 0.04 нс. Максимальная длительность выходного импульса 404 ± 2 нс. Относительное изменение длительности выходного сигнала при полной нагрузке каналов модуля не превышает 3%. Средняя длительность переднего фронта выходного импульса формирователя составляет 1.23 ± 0.20 нс. Уровень порога формирователя задается в диапазоне от -540 до 540 мВ с шагом 1.064 ± 0.004 мВ/код. Изменение устанавливаемого порога при полной нагрузке модуля не превышает 0.25 мВ. Задержка сигнала формирователем составляет в среднем по всем каналам 18.85 ± 0.57 нс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 27080-93. Межгосударственный стандарт КАМАК. М.: Изд-во стандартов, 1995.
2. MAX II Device Handbook.

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК 533+53.07

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ
ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ****© 2022 г. И. А. Маслобоев^{a,b,*}, В. П. Фомичев^a,
А. Б. Шевченко^a, М. А. Ядренкин^a**^a *Новосибирский государственный технический университет
Россия, 630073, Новосибирск, просп. Карла Маркса, 20*^b *Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1***e-mail hawkeye90@yandex.ru*

Поступила в редакцию 20.10.2021 г.

После доработки 22.11.2021 г.

Принята к публикации 27.11.2021 г.

Описан магнитогидродинамический (м.г.д.) стенд, созданный на основе ударной трубы. Отличительной особенностью данной установки является наличие системы генерации магнитного поля с индукцией до 2.5 Тл и устройств ионизации потока (электронная пушка, генераторы тока), что позволяет решать широкий круг задач магнитоплазменной аэродинамики. Особенности конструкции м.г.д.-стенда позволяют моделировать м.г.д.-воздействие на структуру потока при обтекании исследуемых тел в условиях высокоскоростного полета в атмосфере Земли при числах Маха потока $M = 6-12$. Рассмотрены основные используемые на стенде экспериментальные методики. Представлены примеры результатов исследования м.г.д.-эффектов, полученных на данной установке.

DOI: 10.31857/S003281622202015X

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время не потеряли своей актуальности исследования, направленные на изучение новых методов и способов управления высокоскоростными газовыми течениями путем локализованного подвода энергии в набегающий поток или с помощью магнитогидродинамического (м.г.д.) воздействия на ионизованные потоки газа в присутствии электрических и магнитных полей. Для проведения аэрофизического эксперимента с применением систем генерации сильных магнитных полей и внешней ионизации потока газа требуется адаптированная по размерам и параметрам аэродинамическая установка. Одним из наиболее простых путей создания экспериментального комплекса для такого рода исследований является использование техники ударных труб [1]. В ударной трубе происходят сжатие и нагрев рабочего газа за фронтом ударной волны. Постоянство параметров рабочего газа за отраженной ударной волной в форкамере сверхзвукового сопла позволяет получать стабильный режим истечения газа в рабочей камере установки для проведения различных газодинамических исследований [2]. Несомненным преимуществом техники ударных труб является возможность использования любых газов и газовых смесей для моделирования высокоско-

ростных потоков в широком диапазоне параметров. Однако ввиду кратковременности рабочего процесса данный подход предъявляет высокие требования к работе скоростных и высокоточных систем регистрации и измерения параметров течения. При длине ударной трубы несколько метров характерный масштаб времени квазистационарного течения газа на срезе сопла составляет порядка 1 мс. Использование современного быстродействующего оборудования и экспериментальных методов регистрации параметров высокоскоростного потока позволяет решить указанные выше проблемы.

В литературных источниках имеются примеры экспериментальных м.г.д.-стендов на основе ударных труб, предназначенных для решения фундаментальных и прикладных задач магнитоплазменной аэродинамики. Отличительной особенностью таких устройств является наличие системы генерации магнитного поля в исследуемой области течения. Например, в работе [3] представлены результаты исследований м.г.д.-взаимодействия на установке, способной моделировать сверхзвуковые ($M = 3-4$) потоки неравновесной плазмы в магнитном поле с величиной индукции до 2 Тл. Ионизация потока осуществлялась с помощью высоковольтного короткоим-

пульсного высокочастотного плазменного генератора.

В работе [4] исследование м.г.д.-взаимодействия проводилось на ударной трубе с числом Маха потока $M = 1.5$ в рабочей камере. В качестве рабочего газа использовался гелий с добавлением цезия. Магнитное поле с индукцией 2.3 Тл создавалось с помощью электромагнита. Для создания ионизованной области потока использовалась разрядная секция, которая представляла собой 19 пар электродов круглого сечения диаметром 5 мм, вмонтированных заподлицо в стенку рабочей камеры. Расстояние между парами электродов увеличивалось с 45 мм для первой пары до 48.5 мм для последней. В качестве источников энергии для электродов использовались 19 отдельных конденсаторов.

В работе [5] описаны эксперименты, которые проводились на установке, созданной также на основе ударной трубы, рабочая камера установки представляла собой сверхзвуковое прямоугольное сопло. В верхние и нижние стенки сопла был вмонтирован набор латунных электродов для генерации газовых разрядов. Установка дополнительно включала в себя систему генерации газового разряда на основе каскада длинных линий, рассчитанных на организацию токовых импульсов в потоке длительностью до 600 мкс, а также систему организации импульсного однородного поперечного магнитного поля во всей области течения с магнитной индукцией до 1.5 Тл и длительностью квазистационарной области воздействия около 600 мкс. В качестве рабочего газа для исследований использовался инертный газ ксенон. Для исследований был выбран режим работы ударной трубы, характеризующийся наличием сшитой контактной поверхности потока. Давление толкающего газа – водорода – 2.1 МПа, давление водорода в камере низкого давления 3.0 кПа, число Маха ударной волны в ударной трубе $M_s = 8$.

Представленные установки были спроектированы, как правило, для решения узкого круга задач, имели малые размеры сечения рабочей части (не более 55×80 мм²) и исследуемых моделей (≤ 40 мм). В указанных работах было установлено, что можно изменять положение ударной волны, образующейся при обтекании моделей, как в сторону удаления от модели, так и в сторону приближения волны к телу, меняя направление газоразрядного тока и параметр м.г.д.-воздействия.

В данной статье рассмотрена работа м.г.д.-стенда, созданного на основе ударной трубы в ИТПМ СО РАН и предназначенного для моделирования ионизованных высокоскоростных газовых течений в присутствии электрических и магнитных полей, а также представлены примеры

проведения различных исследований на данной установке.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

Экспериментальный м.г.д.-стенд ИТПМ СО РАН был создан для решения широкого круга задач магнитоплазменной аэродинамики в высокоскоростных газовых потоках. Установка позволяет реализовать условия полета в атмосфере Земли на высоте 30–60 км над уровнем моря с числом Маха $M = 6–12$.

Экспериментальный стенд состоит из следующих частей:

- 1) импульсной аэродинамической установки на основе ударной трубы,
- 2) магнитной системы,
- 3) системы ионизации газовых потоков,
- 4) диагностического комплекса (оптической ширен-системы, высокоскоростных средств регистрации параметров потока и плазмы, устройств синхронизации управляющих импульсов).

Особенности работы импульсной аэродинамической установки на основе ударной трубы

Схема м.г.д.-стенда и общий вид установки представлены на рис. 1. Отличительной особенностью импульсной аэродинамической установки на основе ударной трубы является принцип реализации параметров в форкамере сверхзвукового сопла, основанный на сжатии рабочего газа за отраженной ударной волной. Используемая ударная труба состоит из канала низкого давления (к.н.д.) и камеры высокого давления (к.в.д.), разделенных стальной диафрагмой. Длина к.н.д. составляет 7 м, внутренний диаметр канала – 76 мм, соответственно объем канала ~ 30 л. Камера высокого давления представляет собой баллон диаметром 180 мм с объемом 20 л, по оси симметрии которого расположен электрод для электродугового подогрева толкающего газа. В аэродинамических исследованиях в к.н.д. использовался воздух, а в к.в.д. – гелий.

Повышение давления и температуры толкающего газа в к.в.д. осуществляется подводом энергии в форме импульсного электродугового разряда между стенкой к.в.д. и изолированным от нее центральным электродом. Последний соединен с конденсаторной батареей общей емкостью 36 мФ и напряжением до 3 кВ. Электродуговой разряд инициируется инжекцией плазмы в область минимального зазора между электродом и корпусом к.в.д. с помощью инжектора, который встроен в электрод и имеет отдельный источник питания. Измерения тока и напряжения на разрядном промежутке показали, что энергия электрического разряда составляет обычно $W = 40–60$ кДж при

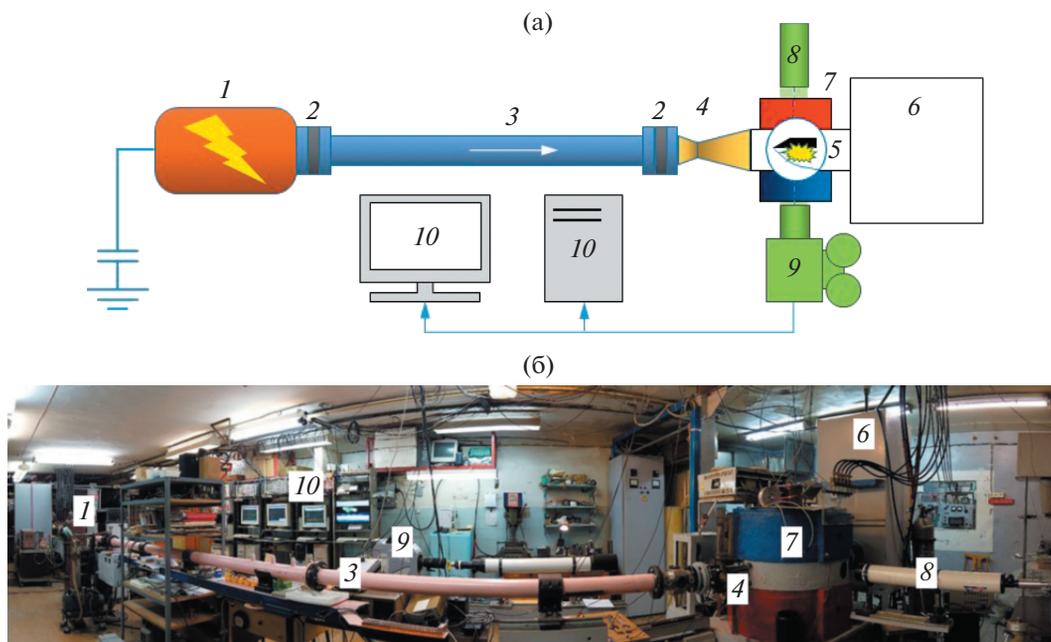


Рис. 1. Принципиальная схема (а) и общий вид (б) м.г.д.-стенда: 1 – камера высокого давления, 2 – диафрагма, 3 – канал низкого давления, 4 – сверхзвуковое профилированное сопло, 5 – рабочая камера, 6 – ресивер (вакуумный объем), 7 – магнитная система, 8 – оптическая система, 9 – высокоскоростная камера, 10 – диагностическая секция.

напряжении на батарее около 3 кВ и силе тока 400–430 кА. Длительность импульса тока равна 0.8–1 мс.

В результате повышения давления в к.в.д. происходит разрыв стальной диафрагмы, что приводит к формированию ударной волны, распространяющейся в к.н.д. На противоположном от диафрагмы конце к.н.д. расположена форкамера сверхзвукового сопла. Между соплом и форкамерой установлена еще одна диафрагма из меди, которая позволяет реализовать дальнейшее истечение газа в заранее вакуумированный объем рабочей камеры, обеспечивая запуск сопла и режим недорасширения потока.

Раскрытие диафрагмы на входе в сопло происходит в результате скачка давления газа за отраженной ударной волной в к.н.д. При этом, в соответствии с одномерной теорией развития газодинамических процессов в ударной трубе, за отраженной ударной волной поддерживаются квазистационарные параметры воздуха. Измерения скорости ударной волны в к.н.д. и давления в форкамере сопла осуществляются с помощью высокочастотных пьезоэлектрических датчиков, сигнал с которых также используется для синхронизации устройств ионизации и регистрирующей аппаратуры диагностического комплекса. Эти параметры позволяют рассчитать режим работы сверхзвукового сопла, используя известные газодинамические функции. Рабочий газ ускоряется в сопле до скорости порядка 2000 м/с, формируя газовую струю, истекаю-

щую в рабочую часть установки, которая через фланец соединена с ресивером объемом 0.7 м³. Начальное давление в ресивере составляет порядка 10⁻³ Торр. Геометрия прямоугольной рабочей части и диаметры наблюдаемых окон позволяют исследовать газодинамические процессы моделей с характерным размером по маршевой координате 30–100 мм.

Сверхзвуковое сопло Лавалья выполнено из двух частей: профилированного диффузора и сменного конфузора. Выходное сечение диффузора имеет диаметр 105 мм. Сменная часть сопла позволяет менять число Маха потока в рабочей камере путем уменьшения площади критического сечения. При отношении диаметра критического сечения к диаметру к.н.д. около 1/10 истечение газа из области за отраженной ударной волной слабо влияет на параметры торможения газа на входе в сопло. Таким образом, расчетные числа Маха потока на срезе сопла ограничены в меньшую сторону величиной $M = 6$. Максимальная же величина чисел Маха потока $M = 12$ определяется возможностями использования современных оптических методов регистрации структуры потока. При сильном уменьшении плотности потока возникают трудности использования многих оптических методов исследования течений при обтекании различных тестовых моделей. Всего в арсенале установки имеются четыре варианта сменных конфузоров для моделирования чисел Маха потока 6, 8, 10 и 12.

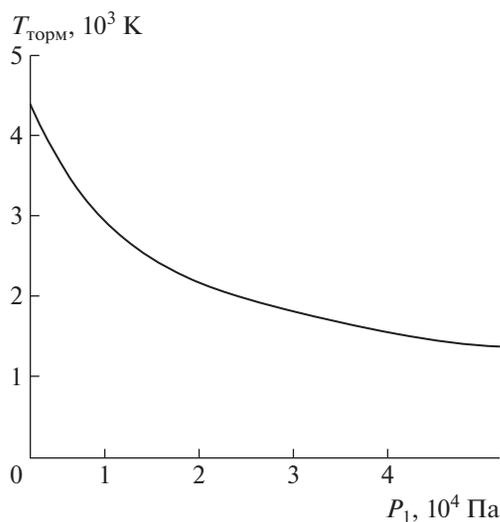


Рис. 2. Зависимость температуры торможения рабочего газа от начального давления в к.н.д.

Явными преимуществами использования техники ударной трубы являются простота и хорошая точность расчета параметров рабочего газа за проходящей и отраженной ударными волнами, а также на срезе сверхзвукового сопла. Величины параметров торможения потока для выбранных величин чисел Маха определяются расчетными значениями давления для отраженной от торца форкамеры ударной волны. Параметры газа за отраженной ударной волной могут быть достаточно точно определены по величине начального давления рабочего газа и скорости распространения фронта ударной волны в к.н.д.

Магнитная система

Используемый электромагнит, в центре которого расположена рабочая камера, способен генерировать постоянное и однородное магнитное поле с индукцией до 2.5 Тл в течение всего времени работы установки. Магнит состоит из набора обмоток, находящихся в железном ярме. В верхней части магнита также имеется канал для установки электронной пушки, используемой для ионизации течения. В нижней части магнита установлен стальной сердечник, что, в совокупности с размещением в стенках корпуса магнита оптических окон, приводит к незначительной неоднородности магнитного поля по объему в рабочей части установки (не более 10%). С увеличением магнитного поля происходит уменьшение степени его неоднородности по пространству. Это связано с насыщением стальных элементов корпуса электромагнита, окружающего рабочую камеру. В результате насыщения влияние этих элементов на распределение магнитного поля сни-

жается. Приемлемая однородность магнитного поля достигается при величине его индукции свыше 0.15 Тл. При меньших значениях индукции магнитного поля стоит учитывать его неоднородность в зависимости от условий задачи.

Устройства для ионизации газовых потоков

Для решения задач магнитоплазменной аэродинамики необходимо наличие ионизованного газа, подверженного воздействию электрических и магнитных полей. Согласно рис. 2, температура торможения потока в зависимости от начального давления рабочего газа в к.н.д. практически не может достигать значений, обеспечивающих термическую ионизацию газа без применения дополнительных устройств. Для объемной ионизации высокоскоростного потока в работе экспериментального стенда могут применяться электронные пучки, вводимые в поток вдоль магнитного поля [6], а также электрические разряды электродов, установленных на поверхности модели или в потоке, с помощью различных генераторов тока. Импульсный высоковольтный однополярный разряд может быть создан с помощью длинной линии конденсаторов [7–10]. Для инициирования высокочастотных разрядов постоянного и переменного тока с частотой до 1 МГц используются соответствующие генераторы тока [11]. Таким образом, возможно создать условия локальной ионизации газа для решения различных схем взаимодействия в зависимости от поставленной задачи.

Диагностический комплекс

Кратковременность реализуемого квазистационарного режима истечения из сопла и ионизации газа с помощью импульсных разрядов требует использования соответствующего оборудования и методик. Для измерения газодинамических параметров используются высокочастотные пьезоэлектрические датчики давления, а для измерения параметров разряда – высокочастотные трансформаторы тока и осциллографы. Для синхронизации работы всех исполнительных и измерительных устройств используются высокоточные генераторы задержки импульсов.

Оптическая регистрация структуры течения осуществляется с помощью высокоскоростной шпирен-видеосъемки. В качестве оптического ножа используется адаптивный визуализирующий транспарант [12], позволяющий одновременно исследовать газодинамические процессы низкой плотности и наблюдать за излучением плазменных образований. Для обеспечения малых времен экспозиции (1 мкс) и высокой частоты съемки (до 480 кГц) в оптической системе применяется CMOS (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor)-камера Photron Fastcam SA-Z.

Газодинамические параметры рабочих режимов установки

Представленный м.г.д.-стенд позволяет моделировать параметры потока, характерные для условий высокоскоростного полета в атмосфере Земли на высоте 30–60 км над уровнем моря. На рис. 3 представлены диапазоны моделируемых чисел Рейнольдса и основных параметров потока воздуха в зависимости от числа Маха потока. Диапазоны ограничены кривыми минимальных и максимальных значений, обусловленных выбором начальных параметров газов в ударной трубе и энергии электродугового подогрева толкающего газа в к.в.д. Стоит отметить, что установка позволяет моделировать высокоскоростное движение тел в атмосферах других планет при использовании газовых смесей, отличных от воздуха.

Теория ударной трубы обстоятельно изложена в работах [13, 14], основные положения которых были использованы для расчета параметров торможения в форкамере сопла. Расчет параметров потока на срезе сверхзвукового сопла осуществляется с использованием известных газодинамических функций [15]. В расчете используются начальные параметры рабочего и толкающего газов, а также энергетические характеристики электродугового подогрева толкающего газа в к.в.д. Более точный расчет параметров в форкамере сопла осуществляется с использованием скорости проходящей ударной волны, которая измеряется по времени ее прохождения между высокочастотными датчиками давления, установленными в стенку к.н.д. Для верификации расчета используются величины давления за проходящей и отраженной ударными волнами в к.н.д, а также величина давления торможения в потоке на срезе сопла.

Как можно видеть из графиков, моделирование условий высотного полета на м.г.д.-стенде происходит главным образом по величине давления и плотности воздуха. Использование ударной трубы позволяет реализовать расчетный режим в широком диапазоне параметров и решать специфические задачи магнитоплазменной аэродинамики.

ПРИМЕРЫ РЕЗУЛЬТАТОВ М.Г.Д.-ИССЛЕДОВАНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ СТЕНДЕ

На м.г.д.-стенде ИТПМ СО РАН были проведены эксперименты, направленные на исследование м.г.д.-воздействия на ударно-волновую структуру течения при сверхзвуковом обтекании тел различной геометрии, таких как пластина, клин, затупленное тело и др.

Результаты экспериментальных исследований показали, что для ионизации высокоскоростных течений при моделировании м.г.д.-взаимодей-

ствия вблизи обтекаемого тела могут быть использованы как электронные пучки [6], так и электрические разряды различных типов [7–11]. Исследования м.г.д.-взаимодействия при высоких значениях магнитной индукции продемонстрировали возможность значительного изменения ударно-волновой структуры потока и местного числа Маха потока в условиях высокоскоростного полета. На рис. 4 представлены фотографии волновой структуры обтекания пластины и свечения плазмы импульсного электрического разряда, иллюстрирующие м.г.д.-взаимодействие в потоке около модели – пластины.

По результатам экспериментов были определены характерные величины параметра гидромагнитного взаимодействия, при которых наблюдаются изменения угла наклона (рис. 4а) и формы присоединенного скачка уплотнения (рис. 4б), а также формирование отошедшего скачка в области локального м.г.д.-взаимодействия (рис. 4в). В этих экспериментах при величинах магнитного поля более 0.8 Тл реализовалось сильное м.г.д.-взаимодействие и наблюдались нестационарные процессы колебания области м.г.д.-взаимодействия и головной ударной волны вдоль поверхности модели [7]. Однако существуют и квазистационарные условия обтекания модели при м.г.д.-воздействии на структуру потока. Было показано, что увеличение давления в зоне м.г.д.-взаимодействия у поверхности обтекаемой модели может привести к генерации висячих скачков уплотнения [11], что может быть использовано для создания управляющих моментов в качестве эквивалента действия аэродинамического щитка. В рассмотренной работе данный эффект можно охарактеризовать термином “м.г.д.-элэрон”.

При обтекании затупленного тела (модели спускаемого аппарата) локализация области м.г.д.-взаимодействия перед моделью может привести к отходу головного скачка уплотнения и к уменьшению теплового потока к поверхности [9, 10]. Область локального ускорения потока вблизи тел с помощью м.г.д.-взаимодействия может значительно повлиять на величину лобового сопротивления модели. На рис. 5 представлены снимки процесса м.г.д.-взаимодействия в воздушном потоке с числом Маха $M = 6$ при различных величинах магнитного поля. Видно, что при малых значениях магнитного поля, $B = 0.3$ Тл, электромагнитная сила, действующая на разряд, не может преодолеть силу скоростного напора набегающего потока, дуга разряда горит за пределами донной части модели. При величине поля $B = 1$ Тл разряд концентрируется вблизи границ шарообразной головной части модели. А при величине магнитного поля $B > 1.5$ Тл происходит движение плазмы навстречу потоку, что приводит к отходу головного

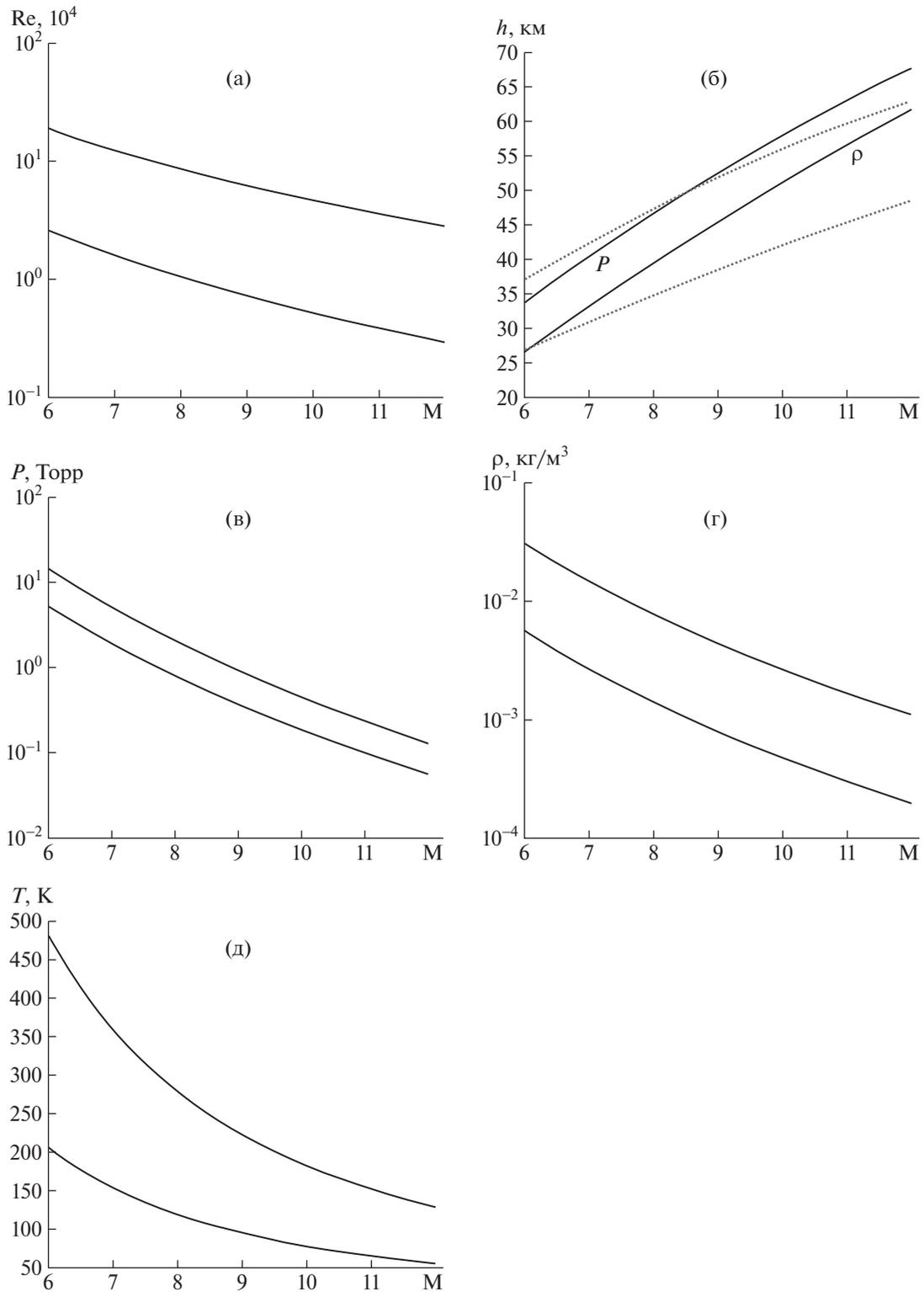


Рис. 3. Газодинамические параметры рабочих режимов экспериментального стенда: **а** – диапазон реализуемых чисел Рейнольдса; **б** – диапазоны давления P и плотности ρ газа, моделирующих полет летательного аппарата на соответствующей высоте; **в** – диапазон давления рабочего газа за ударной волной; **г** – диапазон плотности рабочего газа за ударной волной; **д** – диапазон температуры рабочего газа за ударной волной.

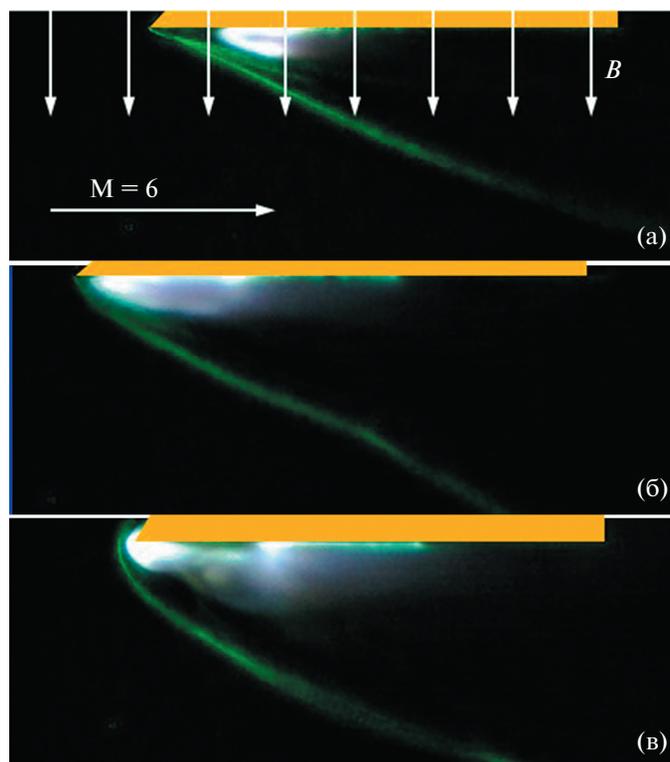


Рис. 4. Магнитогидродинамическое взаимодействие при сверхзвуковом обтекании поверхности пластины при разных величинах магнитной индукции B : а – 0.1, б – 0.3, в – 0.7 Тл.

скачка уплотнения и изменению эффективной формы головной части.

Выполненные эксперименты показали, что, выбрав оптимальную схему м.г.д.-взаимодействия вблизи поверхности модели, можно существенным образом изменить аэродинамические характеристики обтекания объекта и создать на поверхности тела дополнительные силы и моменты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование техники ударной трубы при создании м.г.д.-стенда в ИТПМ СО РАН позволяет проводить различные эксперименты в высокоскоростных потоках воздуха. Наличие мощной электромагнитной системы и устройств ионизации потока обеспечивает возможность использования установки для проведения магнитоплаз-

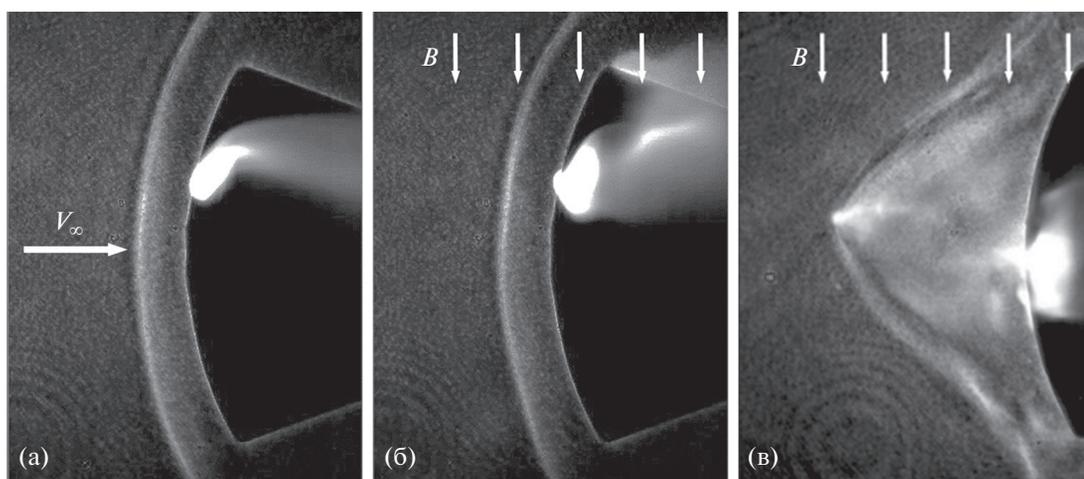


Рис. 5. Магнитогидродинамическое взаимодействие при сверхзвуковом обтекании затупленного тела при разных величинах магнитной индукции B : а – 0.3, б – 1, в – 1.6 Тл. V_∞ – скорость набегающего потока.

менных исследований в широком диапазоне параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Henshall B.D.* On Some Aspects of the Use of Shock Tubes in Aerodynamic Research. ARC Reports and Memoranda. № 3044. (ARC Tech. Rep. 17407) London, 1957. <https://reports.aerade.cranfield.ac.uk/handle/1826.2/3613>
2. *Nagamatsu H.N., Geiger R.E., Sheer R.E.* // ARS Journal. 1959. V. 29. № 5. P. 332.
3. *Nishihara M., Jiang N., Rich J.W., Lempert W.R., Adamovich I.V., Gogineni S.* // Physics of Fluids. 2005. V. 17. № 10. P. 106102. <https://doi.org/10.1063/1.2084227>
4. *Shinya Saito, Keisuke Udagawa, Kenji Kawaguchi, Sadatake Tomioka, Hiroyuki Yamasaki* // 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada, 7–10 January 2008. <https://doi.org/10.2514/6.2008-1091>
5. *Лапушкина Т.А., Ерофеев А.В., Поняев С.А.* // ЖТФ. 2011. Т. 81. № 5. С. 28.
6. *Коротаева Т.А., Фомичев В.П., Шашкин А.П., Ядренкин М.А.* // ЖТФ. 2011. Т. 81. № 3. С. 10.
7. *Фомичев В.П., Ядренкин М.А.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. № 1. С. 28.
8. *Фомичев В.П., Ядренкин М.А.* // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. № 23. С. 31. <https://doi.org/10.21883/PJTf.2017.23.45273.16648>
9. *Коротаева Т.А., Фомичев В.П., Ядренкин М.А.* // Прикладная механика и техническая физика. 2020. № 2. С. 8. <https://doi.org/10.15372/PMTF20200202>
10. *Фомичев В.П., Коротаева Т.А., Ядренкин М.А.* // Прикладная механика и техническая физика. 2020. Т. 1. № 5. С. 52. <https://doi.org/10.15372/PMTF20200506>
11. *Фомичев В.П., Ядренкин М.А.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. № 1. С. 33.
12. *Павлов А.А., Павлов Ал.А.* // Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине. Доклады V Всероссийской конференции (Новосибирск, 26–29 марта 2013) Т. 2. Новосибирск: Параллель, 2013. С. 125.
13. *Glass I.I., Patterson G.N.* // J. Aero. Sci. 1953. V. 22. № 2. P. 73.
14. *Bleakney W., Taub A.H.* // Rev. Mod. Phys. 1949. V. 21. № 4. P. 584.
15. *Абрамович Г.Н.* Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976.

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК 533.9.082

**СТЕНД ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ
ЛОКАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ХИМИЧЕСКИ АКТИВНОЙ ПЛАЗМЫ
ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА****© 2022 г. С. В. Синцов^{a,b,*}, Е. И. Преображенский^{a,b}, Р. А. Корнев^c,
А. В. Водопьянов^{a,b}, Д. А. Мансфельд^a**^a *Институт прикладной физики РАН**Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46*^b *Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского*
Россия, 603022, Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23^c *Институт химии высокочистых веществ РАН**Россия, 603951, Нижний Новгород, ул. Тропинина, 49***e-mail: sins@ipfran.ru*

Поступила в редакцию 16.11.2021 г.

После доработки 07.12.2021 г.

Принята к публикации 08.12.2021 г.

Описан экспериментальный стенд для исследования локальных параметров химически активной плазмы индукционного разряда, поддерживаемой при низком давлении. С учетом ограничений, обусловленных особенностями работы с химически агрессивными средами, предложен способ изменения пространственно локализованных плазменных параметров разряда с помощью “быстрых” электрических зондов. Рассмотрены способы повышения точности зондовых методов и сглаживания экспериментальных вольт-амперных характеристик.

DOI: 10.31857/S0032816222030053

ВВЕДЕНИЕ

Изучение параметров и свойств химически активной низкотемпературной плазмы является важной прикладной задачей. Среди широкого спектра летучих соединений, обладающих сильными окислительно-восстановительными свойствами, особый интерес представляют соединения фтора и хлора, которые активно используются при получении высокочистых веществ методами плазменного разложения [1–3]. Соединения фтора нашли применение в задачах изотопного обогащения, что обусловлено его природной моноизотопностью [4–9]. При разложении летучих галогенидов в низкотемпературной плазме возможно высокоэффективное выделение целевого продукта в твердой фазе в виде порошка или пленок [7, 8].

Контактные и бесконтактные диагностические методы позволяют получить информацию о температурных характеристиках и концентрациях компонент плазмы [10–17], а также о функции распределения электронов по энергиям (ф.р.э.э.) [10]. Эти данные могут быть использованы при моделировании неравновесных плазмохимических процессов в многокомпонентной среде с целью изучения протекающих реакций и способов влияния на них [18, 19]. Обеспечение селективно-

го энергетического вклада в каналы реакций, приводящих к выделению целевого продукта, позволит повысить эффективность и конверсию проводимых процессов разложения галогенидов.

Применение большинства стандартных диагностических методов определения плазменных параметров ограничено ввиду ряда особенностей химически активных сред. В первую очередь речь идет о контактных методах исследования с помощью электрических зондов [20–22]. Осаждение твердой фазы в ходе разложения летучих галогенидов приводит к загрязнению поверхности электрических зондов, что непосредственно оказывает влияние на получаемые значения параметров плазмы. Сильные окислительно-восстановительные свойства галогенов могут привести к эрозии контактирующих с плазмой зондов. Применение бесконтактных методов диагностики параметров химически активной плазмы также имеет ряд ограничений. Например, регистрация эмиссионных спектров газового разряда может быть затруднена или ее результаты искажены вследствие загрязнения поверхности наблюдательных окон продуктами разложения галогенидов. Диагностика параметров плазмы путем микроволнового зондирования с целью определения

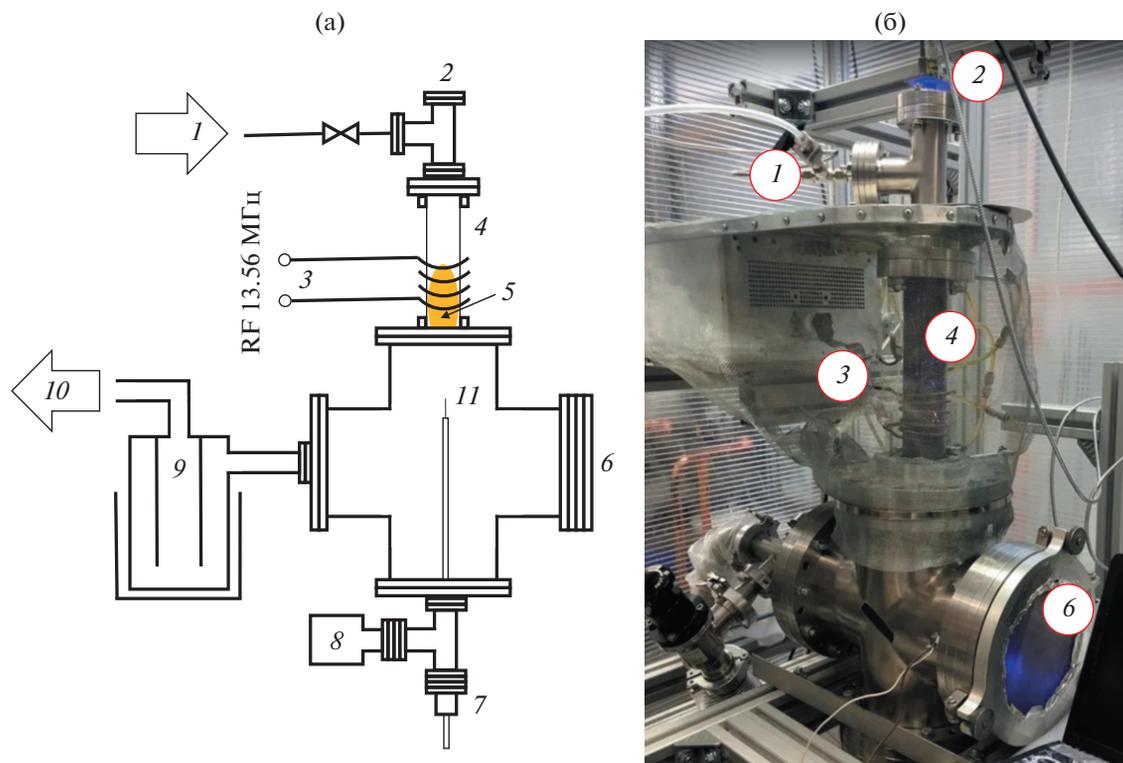


Рис. 1. Схема (а) и фотография (б) экспериментальной установки. 1 – ввод плазмообразующего газа; 2 – кварцевое окно; 3 – высокочастотный генератор с индуктивной связью с нагрузкой; 4 – кварцевая трубка; 5 – плазма индукционного разряда; 6 – окно быстрого доступа в вакуумную камеру; 7 – подвижный вакуумный ввод; 8 – датчик давления в газоразрядной камере; 9 – азотная ловушка; 10 – форвакуумная откачка газа; 11 – электрический зонд.

набега фазы, приобретаемого излучением при прохождении области газового разряда, является одним из основных методов измерения электронной плотности в таких разрядах [9, 23]. Однако такой способ позволяет определить лишь среднее значение электронной плотности вдоль хода луча, тогда как при построении теоретической модели требуется знание пространственного распределения плазменных параметров, которое можно получить, например, методами электрических зондов [19]. Также метод сверхвысокочастотной интерферометрии применим для исследования свойств плазмы, поддерживаемой при низком давлении, когда вследствие низкой частоты электрон-нейтральных столкновений можно пренебречь поглощением зондирующего излучения [23].

В данной работе описана экспериментальная лабораторная установка для исследования свойств химически активной плазмы индукционного разряда, обсуждаются особенности построения отдельных функциональных узлов, обусловленные работой с химически агрессивной газовой средой при высокой температуре. Описаны диагностические методики, используемые для измерения плазменных параметров химически активной плазмы, в том числе метод “быстрого” электрического зонда [24–26].

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

На рис. 1 представлены схема и фотография экспериментальной установки. Стенд построен на четырехпроходном кресте со стандартными вакуумными входами CF 160. На верхнем фланце креста расположена кварцевая трубка 4 диаметром 50 мм, герметично состыкованная со специальным фланцем стандарта CF 160. Для создания плазмы индукционного разряда внутри этой кварцевой трубки использован коммерческий генератор Cesar RF Power (3), работающий с частотой 13.56 МГц.

Максимальная выходная мощность генератора составляла 600 Вт с возможностью регулировки с шагом 1 Вт. С помощью подстройки емкости в высокочастотном контуре обеспечивалось согласование с нулевой отраженной мощностью. Индуктор, представляющий собой водоохлаждаемую медную катушку, был намотан на кварцевую трубку.

Верхняя часть кварцевой трубки герметично состыкована с тройником со стандартными вакуумными входами CF 40. Через один вход этого тройника осуществлялась подача плазмообразующего газа 1, а на другом – установлено кварце-

вое окно 2 для регистрации оптических эмиссионных спектров. Такое удаленное размещение наблюдательного окна от области поддержания разряда позволило существенно снизить скорость его загрязнения продуктами плазмохимического синтеза.

В качестве плазмообразующего газа на данном стенде могут быть использованы смеси Ar , H_2 , CH_4 с летучими соединениями фторидов (BF_3 , SiF_4 , GeF_4 , MoF_6 и др.) в различных стехиометрических соотношениях. Для регулировки потоков компонент плазмообразующей смеси используются электронные регуляторы массового расхода газа РРГ-10 фирмы “Элтотприбор” с максимальным потоком до $150 \text{ см}^3/\text{мин}$, откалиброванным по N_2 . Минимальный поток удавалось задавать на уровне $10 \text{ см}^3/\text{мин}$. Процесс разложения летучих фторидов проводился в плазме индукционного разряда, поддерживаемой при низком давлении.

Все соединения функциональных компонент стенда были выполнены по стандартам CF и KF с натеканием не более 10^{-6} Торр · л/с. Откачка газа осуществлялась с помощью масляного форвакуумного насоса Value VRD 65 (10) с максимальной производительностью до $65 \text{ м}^3/\text{ч}$ (при атмосферном давлении). В ходе экспериментов давление в газоразрядной камере с помощью регулировки скорости откачки насоса изменялось в диапазоне от 10^{-2} до 3 Торр. Давление измерялось с помощью специализированного широкодиапазонного датчика Micro-Ion ATM (8), расположенного в нижней части камеры. Для защиты форвакуумного насоса от эрозийного воздействия химически агрессивной среды в канал откачки была установлена проточная азотная ловушка 9 – герметичный резервуар, погруженный в жидкий азот. При температурах, близких к точке кипения жидкого азота, большинство летучих галогенидов конденсируется, а некоторые кристаллизуются. В результате содержание химически активных соединений фтора в откачиваемом отработавшем плазмообразующем газе снижается в несколько раз.

К нижней части креста через тройник со стандартными фланцевыми входами CF 40 присоединен вакуумный подвижный ввод 7, который можно перемещать в камере и вдоль оси кварцевой трубки 4. На конце подвижного ввода закреплен электрический зонд 11, измерительная часть которого вводится в область поддержания разряда. Установка и юстировка положения зонда осуществляются через окно быстрого доступа 6. Подключение электрического зонда выполнено на вакуумном фланцевом разъеме стандарта DV 9. С помощью реализованных систем ввода и крепления зонда его можно перемещать как в продольном, так и в радиальном направлении, что позволяет исследовать пространственное распределение плазменных параметров разряда.

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ХИМИЧЕСКИ АКТИВНОЙ ПЛАЗМЫ

Основным преимуществом зондовых методов измерения плазменных параметров является локальность проводимых измерений [19, 20, 24–26]. Во многих технологических приложениях газового разряда распределение плазменных параметров не является пространственно однородным, что обусловлено как неоднородностью распределения внешнего электромагнитного поля, поддерживающего разряд, так и наличием границы плазмы. При моделировании процессов, протекающих в газовых разрядах, значения концентрации и температуры электронов играют определяющую роль [18, 19]. В неравновесной плазме знание пространственно локализованной ф.р.э.э. позволяет повысить точность решения балансных уравнений с целью определения доминирующих каналов плазмохимических реакций, что является ключевой задачей [19].

С учетом ограничений, обусловленных особенностями работы с химически активной плазмой, в реализованном экспериментальном стенде была апробирована “быстрая” зондовая диагностика плазменных параметров [24–26]. Техника “быстрых” электрических зондов нашла применение в импульсных газовых разрядах, где время существования плазмы ограничено временем ее распада и по порядку величины составляет сотни микросекунд [26]. На электрический зонд подается сигнал, период которого меньше характерного времени изменения плазменных параметров, а величина амплитуды напряжения достаточна для обеспечения насыщения получаемой вольт-амперной характеристики (в.а.х.). В данной работе использование метода “быстрых” электрических зондов связано с минимизацией времени снятия в.а.х.: чем меньше времени зонд находится в активной зоне разряда, тем меньше он загрязняется продуктами плазмохимического синтеза.

В данной работе в качестве опорного сигнала, подаваемого на зонд, была использована бытовая электросеть с напряжением 220 В и частотой 50 Гц. Для измерений электрический зонд вводился в плазму на время порядка 1 с, достаточное, чтобы получить несколько десятков периодов сигнала. После этого зонд сразу выводился из активной зоны. Экспериментально было показано, что в таком режиме измерений примерно за 50 итераций электрический зонд загрязнялся, что приводило к искажению получаемых по в.а.х. значений плазменных параметров на величину, превышающую ошибку измерений. Каждые 30 итераций поверхность зонда механически очищалась (рис. 2). Также на зонд подавалось напряжение, в несколько раз превышающее характерное значение

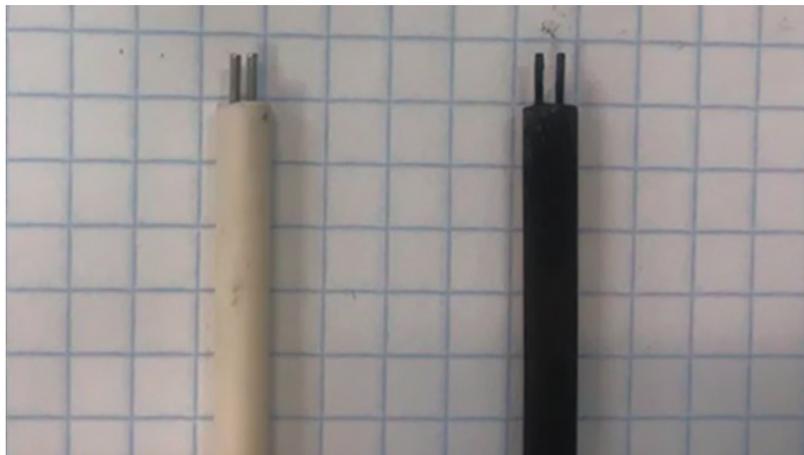


Рис. 2. Фотография двойного электрического зонда Ленгмюра: слева — новый зонд, справа — после серии измерений, поверхность зонда загрязнена продуктами плазмохимического синтеза.

насыщения в.а.х., что приводило к разогреву области контакта металлических частей с плазмой и снижало скорость загрязнения поверхности зонда.

В данной работе были апробированы измерения с помощью двойного и одиночного электрических зондов Ленгмюра. Вольт-амперная характеристика двойного зонда позволяет оценить температуру и плотность электронов в разряде. Одиночный зонд был использован для верификации значений температур и плотностей зарядов, а также для определения формы пространственно локализованной ф.р.э.э. [25]. Электрический зонд представляет собой молибденовую проволоку (толщиной 0.3 мм), часть длины которой изолирована керамической оболочкой (см. рис. 2). Оголенная часть проволоки, контактирующая с плазмой, принимает на себя электронный и ионный токи, определяющие форму в.а.х.

На рис. 3а представлена схема подключения двойного электрического зонда Ленгмюра. С помощью автотрансформатора, запитываемого от бытовой электросети, можно регулировать амплитуду напряжения сигнала, подаваемого на зонд. Далее подключается трансформатор, обеспечивающий гальваническую развязку в цепи. Зная напряжение во всей цепи и величину падения напряжения на известной нагрузке, можно вычислить зависимость напряжения на зонде от тока.

Схема подключения одиночного зонда, представленная на рис. 3б, не изолирована от корпуса установки, в отличие от схемы подключения двойного зонда. Катушка индуктора в этих экспериментах была сдвинута максимально вниз вдоль кварцевой трубки для обеспечения контакта плазмы с заземленным нижним металлическим фланцем, что позволяло замкнуть ток с одиночного зонда через разряд. Также в данной схеме была выполнена гальваническая развязка от бы-

товой электросети для исключения попадания фазы на корпус установки при неправильном подключении. Измеряя разность потенциалов между зондом и “землей”, а также падение напряжения на известной нагрузке, можно восстановить в.а.х.

Для измерения напряжений в описанных схемах был использован цифровой запоминающий осциллограф АКИП 75444В с полосой пропускания до 200 МГц и максимальной частотой дискретизации до 1 ГГц. Зондовая диагностика проводилась в присутствии сильного внешнего электромагнитного поля с частотой 13.56 МГц, что приводило к сильным шумовым наводкам на элементы цепи. Для выделения полезного сигнала был использован стандартный цифровой высокочастотный фильтр.

Для каждого режима поддержания разряда, определяемого величиной вводимой высокочастотной мощности от генератора, соотношением компонент плазмообразующей смеси и давлением в газоразрядной камере, из обработки полученных в.а.х. двойного и одиночного зондов определялись концентрация и температура электронов, а также ф.р.э.э. [10]. Благодаря “быстрому” зондированию для каждого режима было получено несколько десятков осциллограмм, что позволяло провести надежное интегральное усреднение в.а.х., а следовательно, повысить точность определяемых плазменных параметров (рис. 4). В итоге погрешность определения электронной температуры не превысила 10% от измеренных значений, а электронной концентрации — 30%. Температура электронов в зависимости от режима поддержания разряда изменялась в диапазоне 3–14 эВ, а электронная плотность — в диапазоне $6 \cdot 10^{10}$ – $4 \cdot 10^{12}$ см⁻³.

Отдельной задачей было усреднение в.а.х. одиночного зонда, поскольку восстановление из ее

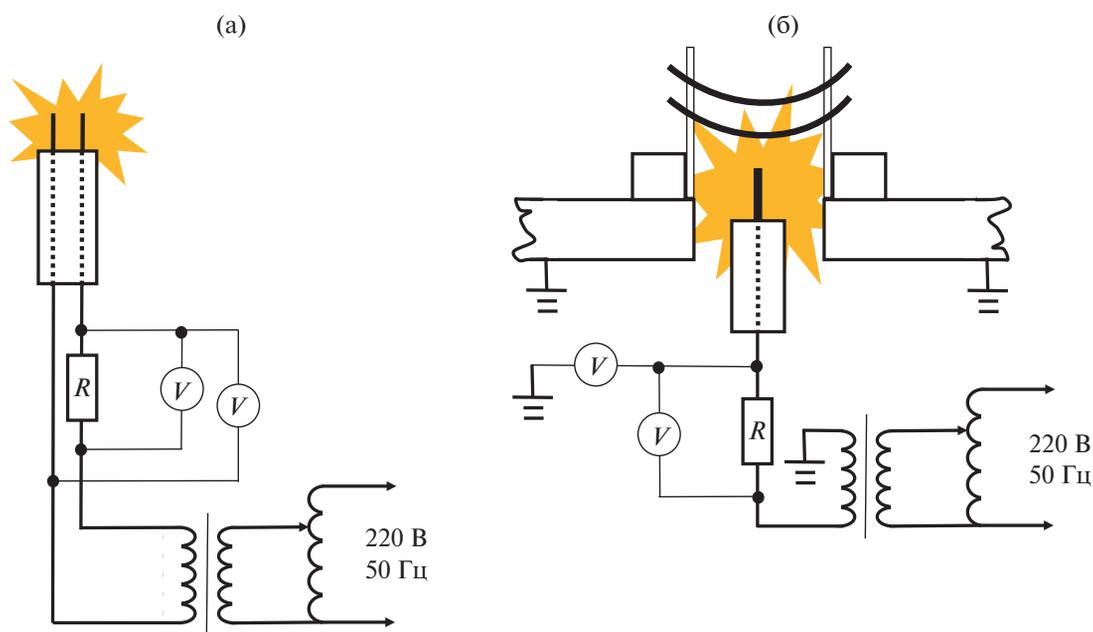


Рис. 3. Схемы подключения двойного (а) и одиночного (б) электрических зондов Ленгмюра.

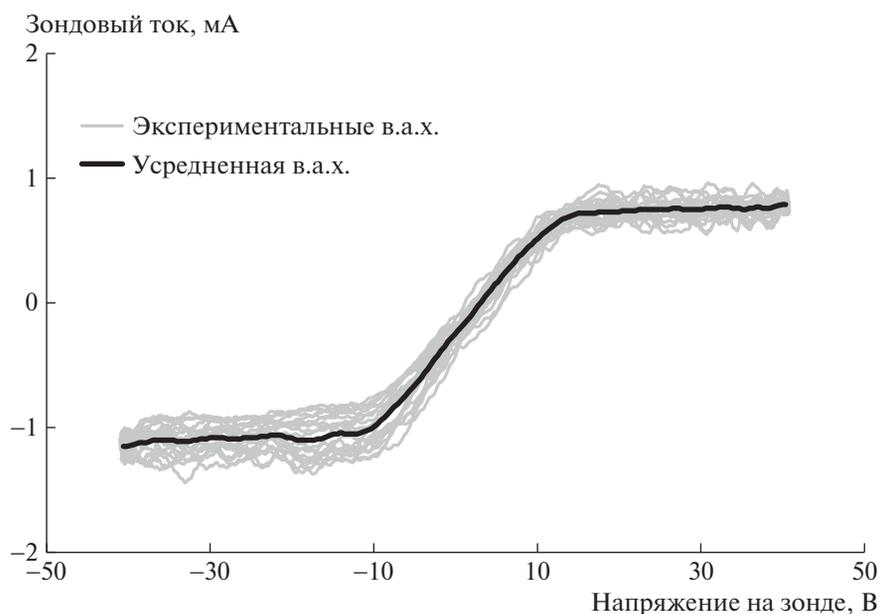


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики двойного электрического зонда Ленгмюра. Мощность, введенная в плазму, равна 500 Вт, поток газовой смеси $\text{H}_2:\text{Ar}:\text{BF}_3 = 6:2:1$, давление в камере 1 Торр. Серым цветом показаны 34 экспериментальные в.а.х.; черным — усредненная в.а.х.

формы ф.р.э.э. подразумевает вычисление второй производной из функции зависимости напряжения от тока. Усреднение нескольких десятков наложенных друг на друга в.а.х. приводит к появлению небольших флуктуаций (см. рис. 4), двойное дифференцирование которых обуславливает появление ложных пиков на ф.р.э.э. (рис. 5).

Усредненные в.а.х. одиночного зонда дополнительно сглаживались фильтром Савицкого–Голея для удаления шумов [27]. Действие такого фильтра заключается в построении аппроксимирующего полинома методом наименьших квадратов для точек в пределах заранее заданной щели. Такая фильтрация не изменяет величину

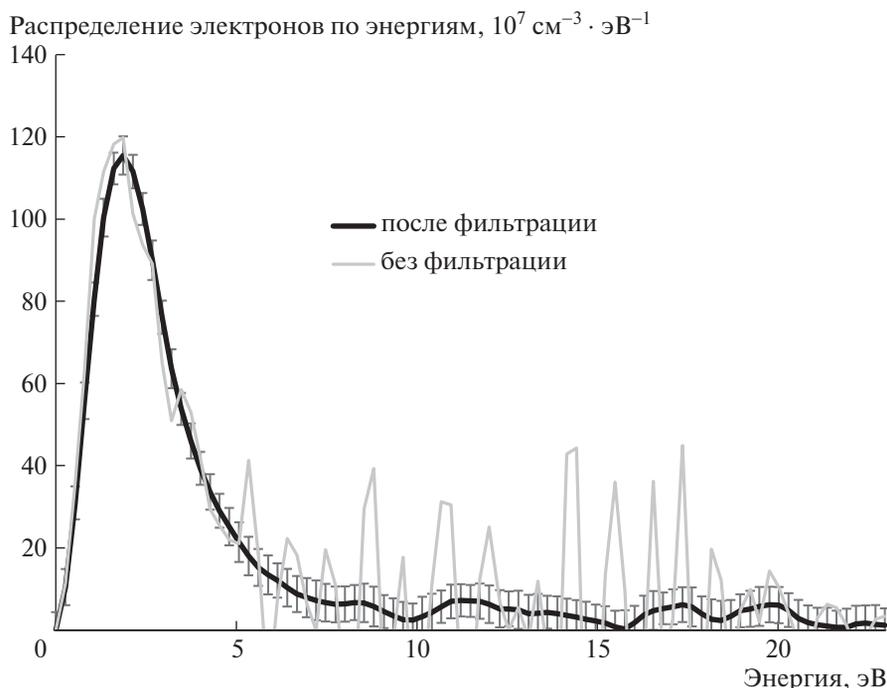


Рис. 5. Функция распределения электронов по энергиям. Мощность, введенная в плазму, равна 500 Вт, поток газовой смеси $\text{H}_2:\text{Ar}:\text{BF}_3 = 6:2:1$, давление в камере 1 Торр.

площади, форму и высоты “нормальных” пиков, однако вносит значительные искажения при обработке участков с резкими перепадами амплитуды сигнала. Это дает преимущество перед усредняющими методами, которые лучше подавляют шумы, но хуже сохраняют свойства сигнала. Далее сглаженная в.а.х. дважды дифференцировалась численными методами. При этом первая производная также повторно сглаживалась методом Савицкого–Голея для уменьшения погрешности дифференцирования. Такое количество сглаживаний обеспечивало наилучшее удаление случайных шумов, явно проявляемых при взятии второй производной. На каждом этапе численного дифференцирования стандартным способом высчитывался доверительный интервал [27], что позволило в итоге определить его и для формы ф.р.э.э.

На рис. 5 представлены ф.р.э.э., рассчитанные по типичной в.а.х. одиночного зонда без сглаживания и с примененным фильтром. Можно видеть, что экспериментальная ф.р.э.э., дающая при двойном дифференцировании множество ложных пиков, хорошо усредняется примененным способом фильтрации. Для обработанных в.а.х. было показано, что максимум ф.р.э.э. хорошо согласуется с величиной электронной температуры, а площадь под кривой — с концентрацией электронов, полученной с помощью двойного зонда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описаны основные функциональные элементы экспериментальной установки, построенной для исследования параметров плазмы индукционного разряда, поддерживаемой при низком давлении в присутствии химически агрессивных летучих соединений. На стенде реализована контактная зондовая диагностика, позволяющая надежно определять пространственное распределение в разряде температуры и плотности электронов, а также функции распределения электронов по энергиям.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-13-00035).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полак Л.С., Овсянников А.А., Словецкий Д.И., Вурзель Ф.Б. Теоретическая и прикладная плазмохимия. М.: Наука, 1975.
2. Словецкий Д.И. // Химия плазмы. Сб. статей. Вып. 1 / Под ред. Б.М. Смирнова. М.: Атомиздат, 1974. С. 114.
3. Русанов В.Д., Фридман А.А., Шолин Г.В. // Химия плазмы. Сб. статей. Вып. 5 / Под ред. Б.М. Смирнова. М.: Атомиздат, 1978. С. 64.
4. McDonald H.O., Stephenson J.B. // Chemical Vapor Deposition of Group IVB, VB, and VIB Elements: A Literature Review US Department of Interior. Wash-

- ington: Dept. of the Interior, Bureau of Mines, 1979. P. 5.
<https://archive.org/details/chemicalvaporde00mc-do/page/n7/mode/2up>
5. *Shabarova L.V., Sennikov P.G., Kornev R.A., Plekhovich A.D., Kutysin A.M.* // High Energy Chemistry. 2019. V. 53. № 6. P. 482.
<https://doi.org/10.1134/S0018143919060146>
 6. *Vodopyanov A.V., Golubev S.V., Mansfeld D.A., Sennikov P.G., Drozdov Y.N.* // Rev. Sci. Instrum. 2011. V. 82. P. 063503.
<https://doi.org/10.1063/1.3599618>
 7. *Sennikov P.G., Kornev R.A., Shishkin A.I.* // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2017. V. 37. № 4. P. 997.
<https://doi.org/10.1007/s11090-017-9821-y>
 8. *Kornev R.A., Sennikov P.G., Shabarova L.V., Shishkin A.I., Drozdova T.A., Sintsov S.V.* // High Energy Chemistry. 2019. V. 53. № 3. P. 246.
<https://doi.org/10.1134/S001814391903010X>
 9. *Kornev R.A., Sennikov P.G., Sintsov S.V., Vodopyanov A.V.* // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2017. V. 37. № 6. P. 1655.
<https://doi.org/10.1007/s11090-017-9846-2>
 10. *Godyak V.A., Demidov V.I.* // Journal of Physics D: Applied Physics. 2011. V. 44. Issue 26. P. 233001.
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/23/233001>
 11. *Akatsuka H.* // Advances in Phys. X. 2019. V. 4. P. 1592707.
<https://doi.org/10.1080/23746149.2019.1592707>
 12. *Isola L.M., Gómez B.J., Guerra V.* // Journal of Physics D: Applied Physics. 2010 V. 43(1). P. 015202.
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/1/015202>
 13. *Очкин В.Н.* Спектроскопия низкотемпературной плазмы. М.: Изд-во Физматлит, 2006.
 14. *Sintsov S., Vodopyanov A., Mansfeld D.* // AIP Advances. 2019. V. 9. Issue 10. P. 1.
<https://doi.org/10.1063/1.5115326>
 15. *Sintsov S., Tabata K., Mansfeld D., Vodopyanov A., Komurasaki K.* // Journal of Physics D: Applied Physics. 2020. V. 53. Issue 30. P. 1.
<https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab8999>
 16. *Mansfeld D., Sintsov S., Chekmarev N., Vodopyanov A.* // Journal of CO₂ Utilization. 2020. V. 40. Paper 101197.
<https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101197>
 17. *Sintsov S.V., Vodopyanov A.V., Viktorov M.E., Morozkin M.V., Glyavin M.Yu.* // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2020. V. 41. Issue 6. P. 711.
<https://doi.org/10.1007/s10762-020-00694-2>
 18. *Bogaerts A., De Bie C., Eckert M., Georgieva V., Martens T., Neyts E., Tinck S.* // Pure and Applied Chemistry. 2010. V. 82. Issue 6. P. 1283.
<https://doi.org/10.1351/PAC-CON-09-09-20>
 19. *Kruger C.H., Owano T., Gordon M., Laux C.* // Pure and Applied Chemistry. 1992. V. 64. Issue 5. P. 607.
<https://doi.org/10.1007/BF01023912>
 20. *Xu K.G., Doyle S.J.* // J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film. 2016. V. 34. № 5. P. 513.
<https://doi.org/10.1116/1.4959565>
 21. *Евдокимов К.Е., Кошицев М.Е., Чжилэй С., Пичугин В.Ф.* // ПТЭ. 2016. № 6. С. 44.
<https://doi.org/10.7868/S0032816216050062>
 22. *Khattak H.K., Buanucci P.B., Slepков A.D.* // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2019. V. 116(10). P. 201818350.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1818350116>
 23. *Vodopyanov A., Mansfeld D., Sintsov S., Viktorov M.* // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1400. P. 077022.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1400/7/077022>
 24. *Lobbia R.B., Gallimore A.D.* // Review of Scientific Instruments. 2010. V. 81. Issue 7. P. 073503.
<https://doi.org/10.1063/1.3455201>
 25. *Solomatin R.Y., Grashin S.A.* // Problems of Atomic Science and Technology. Series Thermonuclear Fusion. 2017. V. 40. Issue 2. P. 55.
<https://doi.org/10.21517/0202-3822-2017-40-2-55-60>
 26. *Andruczyk D., Tarrant R.N., James B.W., Bilek M.M.M., Warr G.B.* // Plasma Sources Science and Technology. 2006. V. 15. Issue 3. P. 533.
<https://doi.org/10.1088/0963-0252/15/3/032>
 27. *Hargittai S.* // Computers in Cardiology. 2005. V. 32. P. 763.
<https://doi.org/10.1109/CIC.2005.1588216>

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК 533.9.072

**ИНИЦИАЛИЗАЦИЯ РАЗРЯДА В СИСТЕМЕ ОЧИСТКИ ВХОДНОГО
ЗЕРКАЛА ДИАГНОСТИКИ “АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ” РЕАКТОРА
ИТЭР ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕРМОЭМИССИОННОГО КАТОДА**© 2022 г. А. В. Рогов^{a,b,*}, Ю. В. Капустин^{a,b}^a Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”
Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1^b Частное учреждение “ИТЭР-Центр”
Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1, стр. 3

*e-mail: alex-rogov@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.01.2022 г.

После доработки 20.01.2022 г.

Принята к публикации 21.01.2022 г.

Представлены результаты исследования предельных эксплуатационных режимов по давлению газа при использовании D_2 , He, Ne и Ar в системе плазменной очистки входного зеркала диагностики “Активная спектроскопия” реактора ИТЭР. Эксперименты проводились на полноразмерном функциональном макете системы очистки, основанной на разряде с сетчатым полым катодом, при заземлении всех катодных элементов разрядной ячейки, включая полноразмерный макет входного зеркала. Выявлено, что при использовании в качестве рабочих газов D_2 , He и Ne давление поджига при напряжении 750 В составляет примерно 60, 100 и 20 Па соответственно и значительно превышает максимально допустимое для ИТЭР в режиме очистки (7 Па). При этом давление гашения разряда в рассмотренных случаях ≤ 1 Па. Показано, что использование дополнительного термоэмиссионного катода, расположенного внутри разрядной ячейки, позволяет инициализировать разряд при давлениях, близких к давлению гашения. Включение термокатада с плавным нарастанием тока накала при отсутствии разрядного тока и его отключение после поджига разряда обеспечивают значительное увеличение ресурса термокатада. Применение всех доступных для использования в ИТЭР газов и радикальное снижение рабочего давления облегчает решение проблемы обезгаживания вакуумной камеры и диагностических портов термоядерных установок после проведения очистки зеркал, что позволяет снизить долю тяжелых примесей в дейтерий-третиевой смеси и, соответственно, повысить температуру плазмы во время рабочего импульса.

DOI: 10.31857/S003281622203017X

ВВЕДЕНИЕ

Одним из требований при разработке систем оптической диагностики плазмы международного термоядерного экспериментального реактора ИТЭР [1] является обеспечение периодического удаления загрязнений с отражающей поверхности входного зеркала. Для проведения этой процедуры в состав всех оптических диагностик должна входить встроенная система плазменной очистки зеркал и предусмотрен специальный режим работы установки с отключением магнитного поля и увеличением давления в вакуумной камере реактора с 10^{-4} Па в промежутках между рабочими импульсами до 0.1–7 Па в режиме плазменной очистки [2, 3]. В качестве рабочих газов допускается применение D_2 , He, Ne и Ar.

Система очистки первого зеркала разрабатываемой в России оптической диагностики “Ак-

тивная спектроскопия” (Charge exchange recombination spectroscopy – CXRS) основана на удалении токопроводящих и тонких диэлектрических загрязнений методом ионного распыления в разряде с осциллирующими электронами в сетчатом полом катоде на постоянном или среднечастотном импульсном токе (DC/PDC (direct current/pulsed direct current) система очистки). Для инициализации разряда на постоянном токе требуется давление, значительно превышающее давление гашения разряда. Как показали проведенные ранее эксперименты, применение Ar обеспечивает эффективное функционирование DC/PDC-системы очистки в заданном диапазоне давлений [4]. При этом давление зажигания примерно в двадцать раз превосходит давление, при котором происходит гашение разряда.

В диагностических портах ИТЭР, как правило, отсутствуют специальные подсистемы напуска

газа и вакуумной откачки, поэтому вся вакуумная камера установки, имеющая объем $\approx 1400 \text{ м}^3$ [1], будет заполняться газом до давления, необходимого для функционирования систем плазменной очистки зеркал. Все свободное внутреннее пространство диагностических портов заполнено блоками радиационной защиты из карбида бора с размерами $46 \times 46 \times 29.5 \text{ мм}$ [5]. Оценка площади поверхности, на которой происходит абсорбция газа, только для одного диагностического порта дает величину более 1000 м^2 [5], что уже превосходит площадь всей первой стенки (840 м^2). Большая часть этой поверхности находится в скрытых полостях между дополнительными блоками радиационной защиты. В этих условиях использование Ag при проведении очистки входных зеркал значительно усложняет процесс последующей дегазации внутривакуумных компонентов установки, необходимой для снижения поступления тяжелых примесей в дейтерий-тритиевую (DT) смесь в штатном режиме эксплуатации реактора. В связи с этим использование более легких газов (особенно D_2) в режиме очистки может оказаться предпочтительным.

Минимальное давление поджига самостоятельного газового разряда на постоянном токе зависит от потенциала ионизации используемого газа [6]. Чем он выше, тем больше давление, требуемое для поджига, при том же приложенном напряжении. Как показали проведенные ранее исследования на полноразмерном макете системы очистки диагностики “Активная спектроскопия” [4], инициализация разряда при использовании Ag происходит при давлении около 4 Па. Однако для разрядной конфигурации с заземленными элементами разрядной ячейки, использованной в этой диагностике, максимальная эффективность очистки достигается при более низком давлении. Потенциал ионизации D_2 , He и Ne значительно выше, чем у Ag, и для этих газов давление зажигания разряда значительно превосходит допустимое в ИТЭР (7 Па). Для снижения минимального давления газа, обеспечивающего повышение эффективности очистки на Ag и возможность применения He, He и D_2 , предлагается использовать вспомогательный накаливаемый катод, размещаемый внутри сетчатого полового катода.

В статье представлены результаты исследования влияния термоэлектронной эмиссии на инициализацию разряда в системе плазменной очистки входного зеркала диагностики “Активная спектроскопия” в случае использования схемы с заземленными катодными элементами разрядной ячейки (включая водоохлаждаемое входное зеркало), дополненной поджигающим устройством на основе накаливаемого катода.

ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Исследования проводились на вакуумном стенде МАВР-2, снабженном безмасляной системой откачки. Использовался изготовленный из молибдена в ЗАО “Солар” (г. Минск, Белоруссия) полноразмерный функциональный макет разрядной ячейки DC/PDC-системы очистки входного зеркала диагностики “Активная спектроскопия”. Геометрические размеры замкнутого коробчатого полового катода $150 \times 120 \times 250 \text{ мм}$. Характерный размер ячейки использованных секток – 5 мм. Съемная верхняя крышка полового катода (макет защитной поворотной шторки диагностического порта) не имеет перфорации. Диаметр дискового анода – 20 мм.

Катодные элементы разрядной ячейки были электрически соединены с заземленной вакуумной камерой. Расстояние от разрядной ячейки до стенок вакуумной камеры (на которых происходит осаждение продуктов эрозии, вышедших из разрядной ячейки через сетчатый катодный электрод) превышало 50 мм. Такая разрядная конфигурация не обеспечивает наилучшую эффективность очистки [4], но значительно упрощает конструкцию за счет возможности использования заземленного водоохлаждаемого входного зеркала. При этом не требуется применения электрической развязки в системе охлаждения и изоляторов для крепления элементов сетчатого полового катода, что повышает надежность функционирования в условиях термоядерного реактора. Общий вид разрядной ячейки (со снятой верхней крышкой) показан на рис. 1.

Принципиальная электрическая схема подключения компонентов разрядной ячейки и термоэмиссионного катода представлена на рис. 2.

Для эмиссии электронов при инициализации разряда применялся вольфрамовый термоэмиссионный катод с оксидным покрытием. Длина термокатада 50 мм, диаметр нити накала $\approx 0.1 \text{ мм}$. Сопrotивление в холодном состоянии $R = 1 \text{ Ом}$. Использовались два режима эмиссии электронов при поджиге разряда – с применением одного или двух параллельно включенных термокатодов. Применение переключателя K_1 позволило исследовать влияние эмиссии электронов с изолированного и электрически соединенного с полым катодом вспомогательного накаливаемого катода на инициализацию разряда при пониженном давлении рабочего газа, в качестве которого применялись D_2 , He, Ne и Ar.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Измерения зависимости давления зажигания от тока накала термокатада для всех рабочих газов



Рис. 1. Фотография разрядной ячейки системы очистки первого зеркала диагностики “Активная спектроскопия”. 1 – макет входного зеркала; 2 – сетчатые стенки разрядной ячейки; 3 – анод; 4 – термоэмиссионный катод.

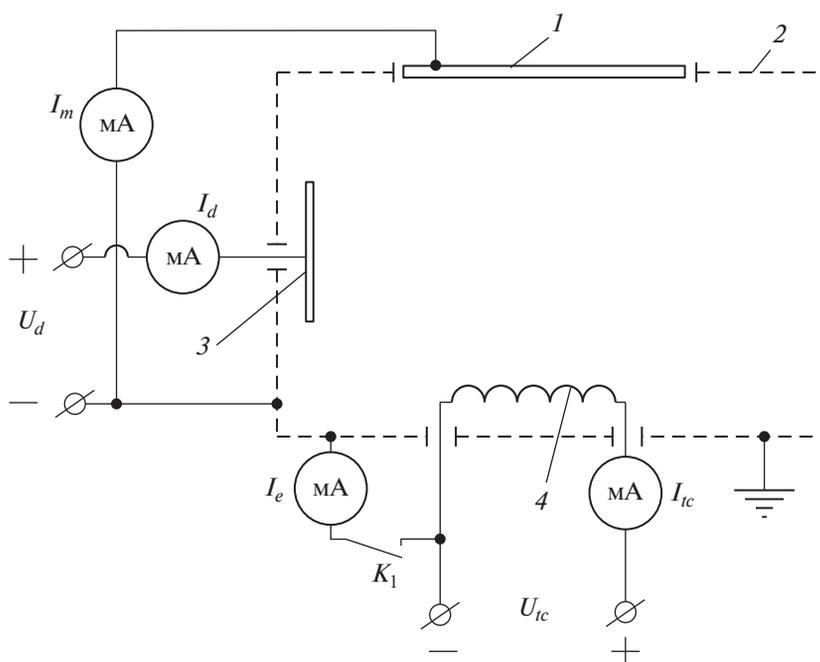


Рис. 2. Схема подключения разрядной ячейки и термоэмиссионного катода. 1 – макет входного зеркала, 2 – коробчатый сетчатый полый катод, 3 – анод, 4 – термоэмиссионный катод; K_1 – переключатель, I_m – ток распыляющих зеркало ионов, I_d – полный ток разряда, I_{tc} – ток накала термокатаода, I_e – ток эмиссии.

проводились в двух режимах – при использовании одного или двух термокатодов, включенных параллельно. Использовался режим стабилизации выходного тока источника питания разряда на уровне 200 мА. Напряжение в режиме холостого хода (без выходного тока) составляло 750 В. Ре-

зультаты измерений зависимости давления зажигания разряда от тока накала термокатаода для одного термокатаода представлены на рис. 3.

Дальнейшие исследования проводились при давлениях, близких к минимальному для используемого газа, при номинальном режиме термока-

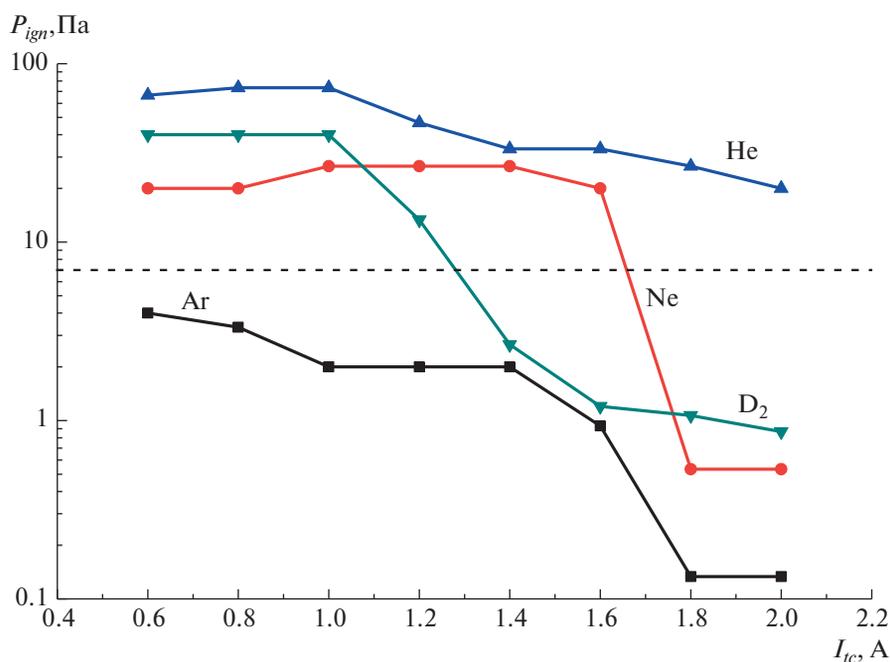


Рис. 3. Зависимости давления зажигания разряда (P_{ign}) от тока накала термокатода для D_2 , He, Ne и Ar при использовании одного термокатода.

тогда ($I_{ic} = 2$ А, $U_{ic} \approx 10$ В): $P_{D_2} = 6.7$ Па, $P_{He} = 6.7$ Па, $P_{Ne} = 2.7$ Па и $P_{Ar} = 0.5$ Па.

При подаче на термокатод напряжения $U_{ic} \geq 7$ В происходило его мгновенное перегорание. В режиме плавного нарастания тока накала до 10 В перегорания катода не наблюдалось. Это связано с различием сопротивления (в несколько раз) нити накала в холодном и нагретом состоянии.

На рис. 4 представлена зависимость напряжения при фиксированном токе разряда ($I_d = 200$ мА) от тока накала термокатода.

Отключение накала термокатода после инициализации разряда для всех исследованных газов приводило к переходу разряда в самостоятельный режим с повышением напряжения до нескольких сотен вольт.

Перераспределение ионного тока в полом катоде при наличии термоэмиссионного катода исследовалось посредством измерения зависимости тока разряда, поступающего на термокатод, от тока его накала при фиксированном значении полного тока разряда $I_d = 200$ мА. Полученная зависимость показана на рис. 5.

Влияние термоэмиссии на распыление поверхности зеркала (эффективность очистки) исследовалось посредством измерения зависимости ионного тока, поступающего на поверхность макета входного зеркала (I_m), от тока накала термокатода (I_{ic}). Результаты представлены на рис. 6.

Применение одного термокатода при использовании He не позволило снизить давление поджига до предельно допустимого в ИТЭР значения ($P_{max} = 7$ Па) [2]. Исследование зависимости давления зажигания для He от тока накала термокатода при повышенном значении максимального тока эмиссии электронов проводилось при применении двух параллельно включенных термокатодов. Зависимости давления зажигания от тока накала с использованием одного и двух параллельно включенных термокатодов показаны на рис. 7.

Как видно из полученных результатов, требуемый для инициализации газового разряда ток эмиссии электронов зависит от использованного газа и имеет наибольшее значение для He. Это связано с тем, что этот газ имеет максимальное значение потенциала ионизации. Результаты измерения давления поджига разряда на D_2 , He, Ne и Ar без термокатода и с его использованием в номинальном режиме, а также потенциалы ионизации для этих газов представлены в табл. 1.

Также был исследован режим с изолированным от полого катода термокатодом (K_1 — разомкнут, см. рис. 2). Такое включение практически не повлияло на давление зажигания и вольт-амперную характеристику разряда.

На основании полученных данных можно сделать заключение, что при включении термокатода, расположенного внутри полого катода и находящегося под его потенциалом, формируется сла-

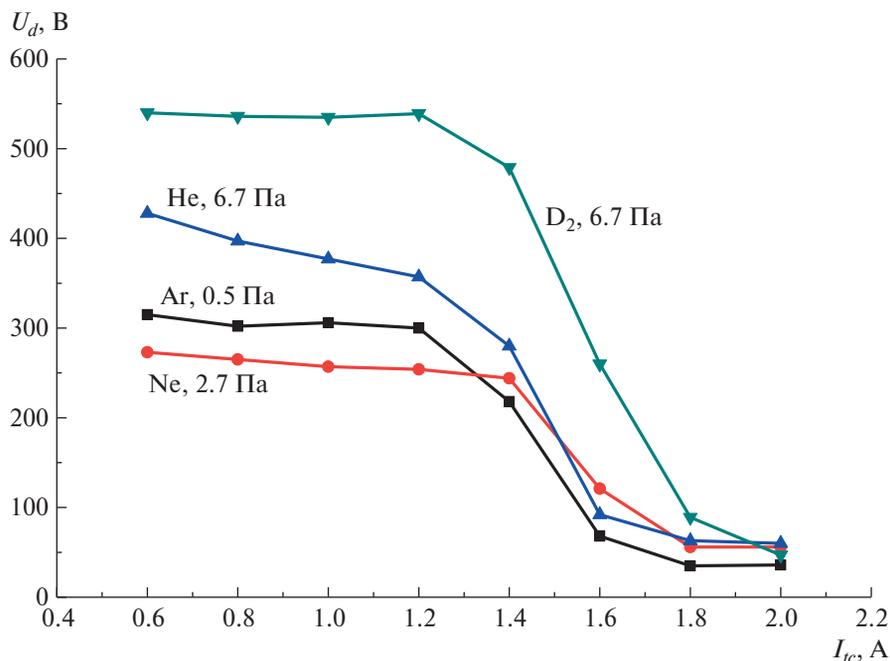


Рис. 4. Зависимости напряжения при фиксированном токе разряда $I_d = 200$ мА от тока накала термокатода при характерных для проведения очистки давлениях (цифры у кривых) D_2 , He, Ne и Ar.

боточный несамостоятельный тлеющий разряд с характерным током порядка 10 мА. Основной измеряемый ток переносится электронами непосредственно между накаливаемым термокатодом

и анодом. В пользу этого предположения свидетельствует то, что после зажигания газового разряда в режиме стабилизации тока при увеличении эмиссии электронов ток электронов (I_e), поступа-

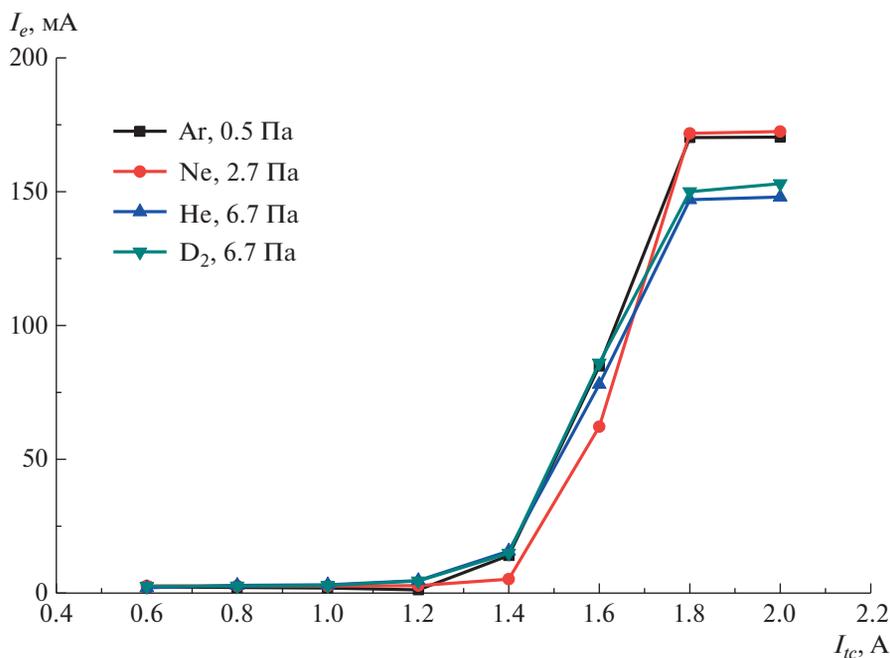


Рис. 5. Зависимости тока разряда, поступающего на термокатод, от тока его накала при фиксированном значении тока разряда $I_d = 200$ мА и характерных для проведения очистки давлениях D_2 , He, Ne и Ar.

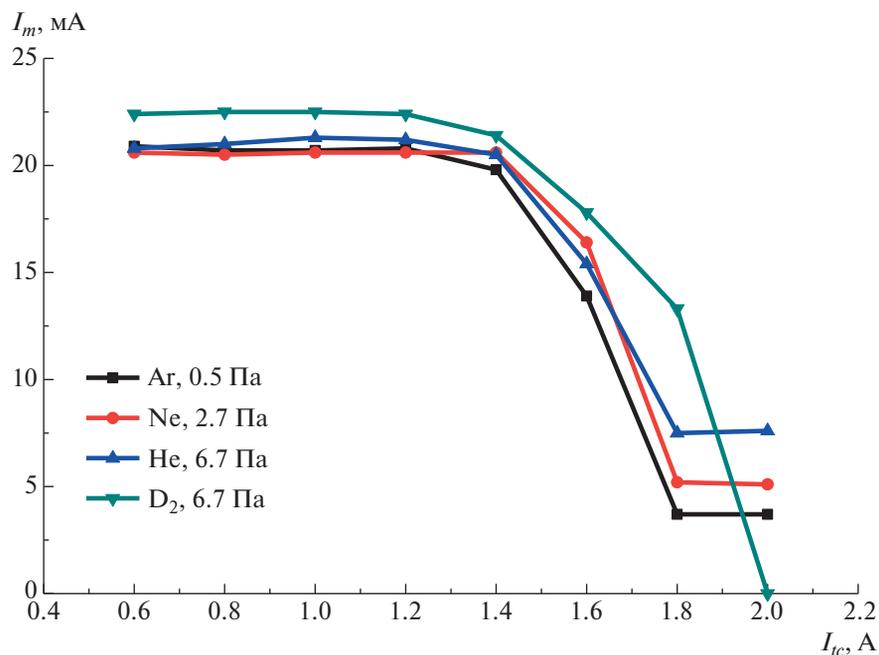


Рис. 6. Зависимости ионного тока, поступающего на поверхность макета входного зеркала, от тока накала термокатода при фиксированном значении тока разряда $I_d = 200$ мА и характерных для проведения очистки давлениях D₂, He, Ne и Ar.

ющий с термокатода, увеличивается, а ионный ток, вызывающий распыление внутренних стенок полого катода, уменьшается. При номинальном токе нагрева термокатода практически весь

ток проходит через термокатод, а напряжение разряда уменьшается с нескольких сотен до нескольких десятков вольт. При этом термокатод не перегорает, что имело бы место при большой

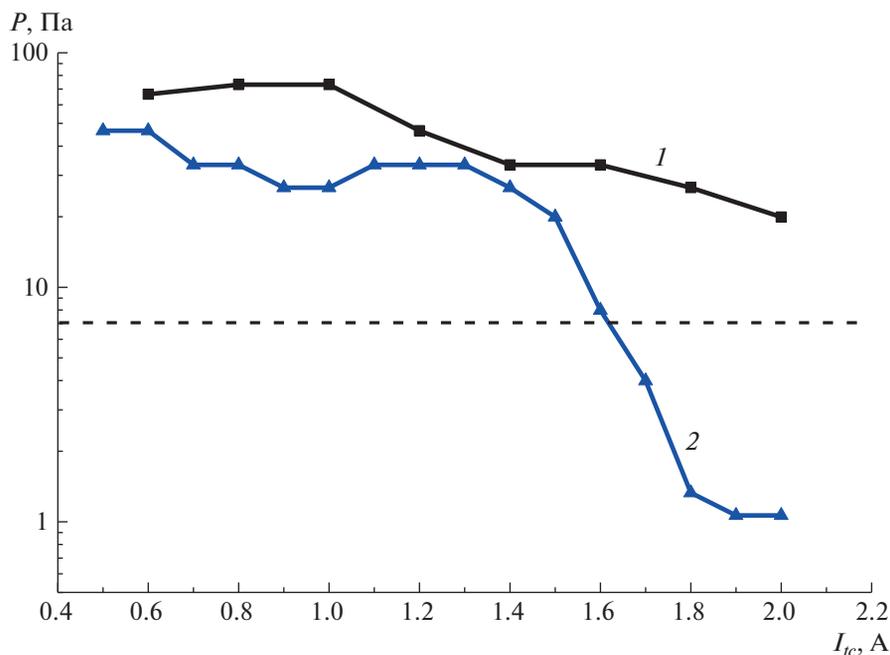


Рис. 7. Зависимости давления зажигания разряда на He от тока накала термокатода при использовании одного (1) и двух параллельно включенных (2) термокатодов.

Таблица 1. Давление зажигания и гашения чистящего разряда

Газ	Потенциал ионизации, эВ	Давление поджига разряда, Па			Давление гашения, Па
		без термокатода	с одним термокатодом ($I_{ic} = 2 \text{ А}, U_{ic} = 10 \text{ В}$)	с двумя термокатадами ($I_{ic} = 4 \text{ А}, U_{ic} = 10 \text{ В}$)	без термокатода
D ₂	13.6	40	0.9	0.8	0.7
He	24.6	67	20	1.1	0.8
Ne	21.6	20	0.6	0.5	0.4
Ar	15.8	4	0.1	0.1	0.2

ионной компоненте за счет распыления нити накала (измеренное значение толщины нити накала – 0.1 мм). Ресурс использованного в экспериментах термокатода в нагретом состоянии составил несколько десятков минут.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обеспечения работоспособности системы поджига иницирующей разряд термокатод должен быть электрически соединен с сетчатым полым катодом разрядной ячейки системы очистки и располагаться внутри него. Поскольку вакуумная камера ИТЭР имеет значительный объем (1400 м³), быстрое изменение давления для обеспечения поджига разряда в одной из систем очисток, с учетом обеспечения их одновременной работы во всех оптических диагностиках, не представляется возможным. Использование термокатода для инициализации разряда в системе очистки диагностики ИТЭР “Активная спектроскопия” позволяет понизить давление поджига разряда до значений, близких к давлению гашения самостоятельного аномального тлеющего разряда. Это обеспечивает возможность применения в плазменной системе очистки диагностики “Активная спектроскопия” всех разрешенных газов – Ar, Ne, He и D₂. При использовании Ar уменьшение рабочего давления обеспечивает режим максимальной скорости удаления загрязнений (для земной конфигурации разрядной ячейки системы очистки). Применение D₂ и He может обеспечить уменьшение доли тяжелых примесей в рабочей ДТ-смеси реактора ИТЭР. Ресурс поджигающего устройства можно значительно увеличить за счет применения термокатодов увели-

ченного диаметра, используя режим плавного нарастания тока накала на этапе инициализации и обеспечивая автоматическое его отключение сразу после поджига разряда.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке НИЦ “Курчатовский институт” (Приказ № 3026 от 25.11.2021 г.).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. URL: <https://www.iter.org/>
2. *Shigin P.* // 55.NM justification memo – vacuum conditions for mirror cleaning. Report. 2019. IDM UID: Y5QRZ2.
3. *Shigin P., Babinov N., De Temmerman G., Danisi A., Dmitriev A., Larsen J., Madsen R., Marot L., Moser L., Mukhin E., Kochergin M., Ortiz R., Razdobarin A., Reichle R., Pitts R., Samsonov D., Tsalas M., Udintsev V., Vayakis G., Walsh M.* // Fusion Engineering and Design. 2021. V. 164. 112162. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.112162>
4. *Рогов А.В., Капустин Ю.В.* // ПТЭ. 2021. № 3. С. 60. <https://doi.org/10.31857/S0032816221030332>
5. *Shoshin A., Burdakov A., Ivantsivskiy M., Polosatkin S., Klimenko M., Semenov A., Taskaev S., Kasatov D., Shehudlo I., Makarov A., Davydov N.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 2000. V. 48. Is. 6. P. 1474. <https://doi.org/10.1109/TPS.2019.2937605>
6. *Лисовский В.А., Яковин С.Д.* // ЖТФ. 2000. Т. 70. В. 6. С. 58.

СУБНАНОСЕКУНДНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ,
СОСТОЯЩИЙ ИЗ ТРЕХ СЕКЦИЙ© 2022 г. В. Ф. Тарасенко^{a,*}, С. Б. Алексеев^a, Е. Х. Бакшт^a^a Институт сильноточной электроники СО РАН
Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3

*e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 20.01.2022 г.

После доработки 03.02.2022 г.

Принята к публикации 04.02.2022 г.

Описана конструкция и приведены результаты испытаний субнаносекундного ускорителя, состоящего из трех секций (двойной формирующей линии, ферритовой линии и линии с переменным волновым сопротивлением), а также газонаполненного диода. За анодной фольгой зарегистрирована амплитуда тока пучка ≈ 2.7 кА при длительности импульса на полувысоте ≈ 370 пс. Созданный ускоритель позволил с помощью стандартного спектрометра исследовать в образцах из кварцевого стекла КУ-1, полиметилметакрилата и КВг излучение Вавилова–Черенкова, а также импульсную катодолюминесценцию.

DOI: 10.31857/S0032816222040073

ВВЕДЕНИЕ

Ускорители электронов с короткой длительностью импульса тока и напряжением генераторов 10^2 – 10^3 кВ широко используются в различных областях науки и техники и постоянно совершенствуются, см., например, [1–11]. Пучки электронов обычно формируются в вакуумном диоде, на который подаются импульсы напряжения короткой длительности, а для вывода тока пучка в воздух и другие газы применяют аноды из тонкой фольги [1–7]. В последние годы возрос интерес к исследованиям излучения Вавилова–Черенкова (В.–Ч.) под воздействием пучков с энергией электронов в сотни килоэлектронвольт при наносекундной и субнаносекундной длительности импульса тока пучка [12].

В недавних работах [9, 10] сообщалось о создании ускорителя, в котором использовались высоковольтный блок ускорителя АРСА, собранный по схеме Маркса, газонаполненный формирователь и ступенчатая линия, нагруженная на отпаянную ускорительную трубку. Модернизированный ускоритель [10] позволил получить длительность импульса тока пучка на полувысоте 0.27 нс при его амплитуде 1.5 кА и максимальной энергии электронов 0.95 МэВ. Однако данный ускоритель весьма сложен в изготовлении и настройке. Только газонаполненный формирователь для получения короткой длительности импульса напряжения имеет три разрядных промежутка, заполненные азотом до давления 0.4 МПа.

Другой подход к формированию субнаносекундных и пикосекундных импульсов высокого напряжения состоит в применении ферритовых линий, обычно не менее двух, которые помещаются в продольное магнитное поле соленоидов [13, 14]. В таких установках импульс напряжения от первичного генератора со сравнительно большой длительностью импульса напряжения и его фронта подается на линии с ферритовыми кольцами со ступенчато уменьшающимися диаметрами. Такая схема ускорителя позволила получить на согласованной нагрузке импульс напряжения амплитудой 1.12 МВ при длительности на полувысоте 0.65 пс и скорости нарастания мощности в нагрузке 110 ГВт/нс [15].

Нами был создан ускоритель электронов ГИН-500 с отпаянным разрядником Р-49 с напряжением холостого хода до 500 кВ, который состоял из двух секций и газонаполненного диода [11]. Путем изменения давления воздуха в диоде обеспечивалось управление длительностью импульса и плотностью тока пучка, а также варьирование амплитуды напряжения на промежутке. При длительности импульса тока пучка на полувысоте 1.3 нс и напряжении на диоде ≈ 350 кВ амплитуда тока пучка за фольгой составила 700 А, а плотность тока ≈ 250 А/см². Также было продемонстрировано, что дополнительная линия простой конструкции с переменным волновым сопротивлением позволяет увеличить напряжение

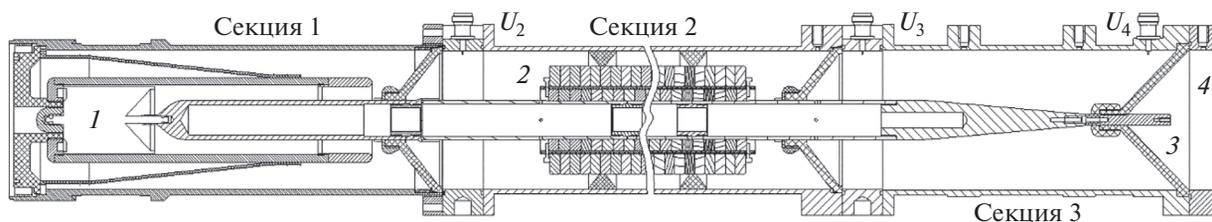


Рис. 1. Схема ускорителя ГИН-1000, показаны три высоковольтные секции при их оптимальном расположении. 1 – газовый разрядник Р-49; 2 – линия с ферритовыми кольцами; 3 – газонаполненный диод, который закрывается анодной фольгой 4.

на промежутке и, соответственно, энергию электронов.

Генератор с отпаянным разрядником РО-49, который работал при давлении водорода 1.2 МПа, описан в недавней работе [16]. Он был использован в компактном рентгеновском аппарате с напряжением 100–400 кВ.

Применение электронного пучка ускорителя ГИН-500 для возбуждения свечения кварцевого стекла КУ-1, сапфира и синтетического алмаза позволило зарегистрировать с помощью стандартного спектрометра HR2000+ES излучение В.–Ч. [11, 12]. Однако при уменьшении длительности импульса тока пучка, что достигалось за счет увеличения давления воздуха в газовом диоде, амплитуда тока пучка существенно уменьшалась. Кроме того, из-за сравнительно большой длительности фронта импульса напряжения (≈ 2 нс на уровне 0.1–0.9) преимущества второй секции были использованы не полностью. Для разделения вкладов излучения В.–Ч. и импульсной катодoluminesценции (и.к.л.) в спектры излучения различных образцов желательно уменьшать длительность импульса тока пучка и увеличивать его плотность. Как известно, см., например, [12], импульс излучения В.–Ч. повторяет по своей форме импульс тока электронного пучка.

В ряде работ, например [13–15], как отмечено выше, было показано, что для сокращения длительности импульса напряжения и увеличения его амплитуды перспективно использовать коаксиальные линии с ферритовыми кольцами (ферритовые линии), которые помещаются в магнитное поле соленоида.

Цель настоящей работы – за счет применения в генераторе ускорителя электронов ГИН-500 третьей секции на основе ферритовой линии с соленоидом сократить длительность импульса тока пучка, повысить напряжение на газовом диоде и увеличить амплитуду и плотность тока пучка. Кроме того, ставилась задача тестирования созданного ускорителя с субнаносекундной длительностью импульса тока пучка в экспериментах по изучению излучения В.–Ч. и и.к.л. при энергии электронов в сотни килоэлектронвольт.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИК ИЗМЕРЕНИЙ

Конструкция высоковольтного блока ускорителя с газонаполненным диодом показана на рис. 1. В генератор ускорителя ГИН-500 [11] была добавлена третья секция на основе ферритовой линии. В газовом диоде использовался воздух, который откачивался форвакуумным насосом. В первой секции ускорителя использовалась двойная формирующая линия с промышленным двухэлектродным разрядником Р-49 высокого давления, который соединялся с внутренним высоковольтным электродом. Волновые сопротивления каждой из двух формирующих линий первой секции составляли ≈ 20 Ом. Волновое сопротивление передающей линии, соединенной со второй секцией, равно 50 Ом. Вторая секция с ферритовыми кольцами имела длину 49 см и была помещена в соленоид (на рисунке не показан). Одновременно применялись выполненные из феррита марки 55ВНП-1 кольца двух диаметров; их расположение в линии показано на рис. 1. Для колец большего размера внешний и внутренний диаметры составляли соответственно 80 и 50 мм, а для колец меньшего размера – 45 и 28 мм. Толщина одного кольца равнялась 7.5 мм. Третья секция состояла из неоднородной коаксиальной линии длиной 18 см, волновое сопротивление которой плавно изменялось от 50 до 100 Ом. Положение второй и третьей секций можно было изменять. Все три секции ускорителя заливались трансформаторным маслом.

На выходе генератора устанавливался диод, который откачивался форвакуумным насосом. Волновое сопротивление диода плавно увеличивалось на длине 4.5 см и в области трубчатого катода составляло ≈ 150 Ом. Трубчатый катод с внутренним диаметром 8 мм был изготовлен из фольги толщиной 100 мкм из нержавеющей стали. Для регистрации тока пучка использовался конусный коллектор с диаметром приемной части 20 мм, который имел временное разрешение не хуже 100 пс [17]. Внутренний объем корпуса коллектора откачивался форвакуумным насосом. Работа ускорителя была исследована при межэлектродных зазо-

рах: 4, 11,5, 15 и 18 мм. Вывод тока пучка осуществлялся через AlMg-фольгу толщиной 40 мкм. Для его ослабления применялись сетки из латуни. Измерения импульсов напряжения на выходе из первой, второй и третьей секций ускорителя проводились с помощью емкостных делителей U_2 , U_3 и U_4 . Отметим, что применение неоднородной линии позволило увеличить зазор между ее электродами у газового диода, что снизило напряженность электрического поля в проходном изоляторе.

Зарядка двойной формирующей линии осуществлялась от вторичной обмотки импульсного трансформатора, разработанного для генератора РАДАН-220 [3], который был расположен между двумя coaxialными алюминиевыми цилиндрами со встроенными магнитными сердечниками. При срабатывании разрядника в первичном контуре трансформатора (на рисунке не показаны) происходила зарядка двойной формирующей линии. При напряжении, близком к максимальному, срабатывал разрядник высокого давления Р-49. В первой секции формировался наносекундный импульс напряжения с амплитудой в передающей линии ≈ 190 кВ, который подавался на вторую секцию, где его амплитуда увеличивалась в ≈ 1.3 раза. Далее по линии с переменным волновым сопротивлением импульс напряжения подавался на трубчатый катод газового диода. Это позволило получить импульсы напряжения длительностью не более 0.5 нс и с максимальной амплитудой при холостом ходе до ~ 1000 кВ. Давление воздуха в диоде могло изменяться от 0.05 до 760 Торр. Изменение давления воздуха позволяло регулировать длительность импульса тока пучка [18].

Сигналы с емкостных делителей и коллектора подавались на цифровой осциллограф Keysight DSO-X6004A (6 ГГц, 20 выборок/нс) через высокочастотные кабели 5D-FB PEEG (Radiolab) длиной 1.2 м. Для ослабления сигналов использовались ослабители 142-NM (Barth Electronics, 30 ГГц). Энергия тока пучка за один импульс измерялась с помощью калориметра ТПИ-2М.1, который ранее применялся для измерения энергии как электронных пучков, так и излучения импульсных лазеров [19].

Для облучения пучком электронов использовались образцы в виде плоскопараллельных пластинок, которые устанавливались за анодной фольгой перпендикулярно потоку электронов. Спектры излучения и поглощения образцов регистрировались с помощью спектрометра HR2000+ES (Ocean Optics Inc.) с известной спектральной чувствительностью в диапазоне длин волн от 190 до 1100 нм (разрешение 0.9 нм). По сравнению с работой [12], мы провели дополнительную калибровку спектрометра вместе со световодом и уточнили спектральную чувствительность в области 450–

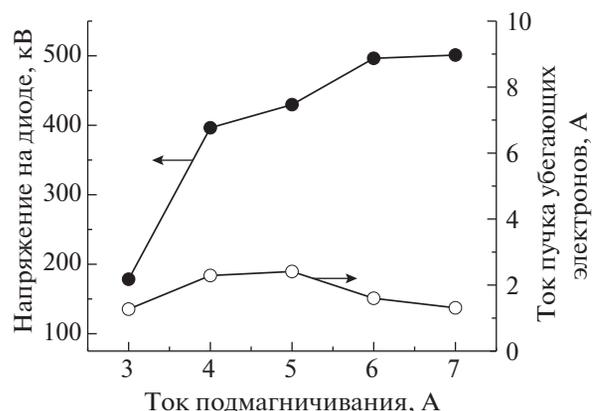


Рис. 2. Зависимости амплитуды импульса напряжения на диоде, а также амплитуды тока пучка убегающих электронов за фольгой от величины тока подмагничивания через соленоид ферритовой линии. Давление воздуха в диоде 760 Торр. Межэлектродный зазор $d = 18$ мм.

500 нм. В этой области при регистрации спектров излучения В.–Ч. в образцах из кварцевого стекла, алмаза и сапфира при их возбуждении пучком электронов наблюдалась слабая полоса [20]. В работе [20] было высказано предположение, что слабая полоса с максимумом излучения на длине волны 490 нм возникает из-за влияния рентгеновского излучения на спектрометр и световод. Однако проверка показала, что эта полоса связана с неточностью кривой чувствительности спектрометра. Поэтому была проведена дополнительная калибровка спектрометра и световода.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Вначале были определены условия получения максимальных напряжений на газовом диоде, которые зависели от местоположения ферритовой и неоднородной линий, величины тока через соленоид ферритовой линии, давления воздуха в газонаполненном диоде и межэлектродного зазора. Ферритовая линия давала наибольшее увеличение напряжения на диоде при ее установке после двойной формирующей линии (секции 1). Это достигалось за счет более эффективной работы неоднородной линии при уменьшении длительности импульса напряжения. В связи с этим подробные исследования ускорителя были проведены при расположении секций, показанном на рис. 1. На рис. 2 приведена зависимость напряжения на промежутке от величины тока подмагничивания в соленоиде при давлении воздуха в диоде 1 атм.

Наибольшие напряжения на промежутке при всех использованных в исследованиях давлениях воздуха в диоде достигались при токе подмагничивания 6–7 А. Поэтому в экспериментах по при-

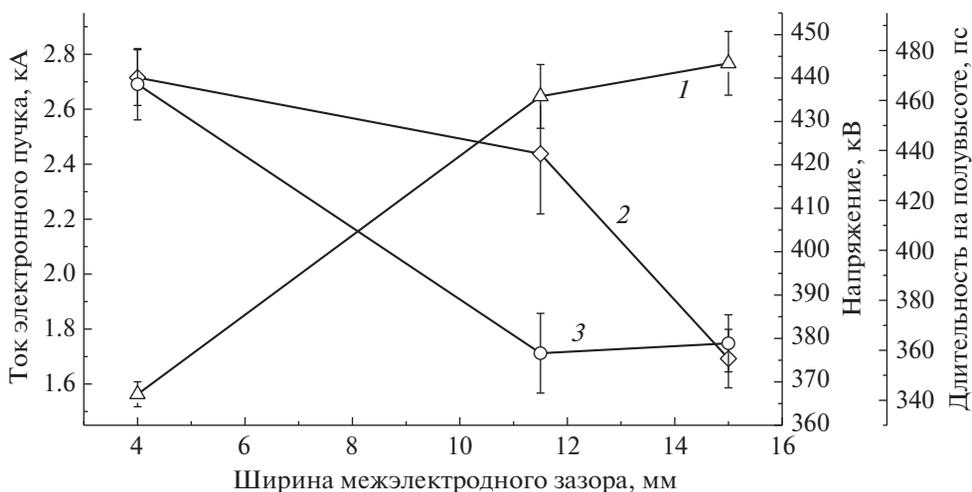


Рис. 3. Зависимости амплитуды импульса напряжения на диоде (1), а также амплитуды (2) и длительности (3) тока пучка за фольгой от межэлектродного зазора d в диоде при давлении воздуха ≈ 0.057 Торр.

менению ускорителя для получения излучения В.—Ч. использовались эти значения токов подмагничивания. Наибольшая амплитуда тока пучка убегающих электронов при атмосферном давлении воздуха была получена при токе подмагничивания 5 А и напряжении на газовом диоде меньше максимального. Сравнительно малая величина тока пучка убегающих электронов в этих условиях была обусловлена относительно медленным нарастанием напряжения во время начальной части импульса тока пучка (≈ 1.5 нс до уровня 0.2) и неоптимальной конструкцией катода для получения максимальной амплитуды тока убегающих электронов при атмосферном давлении воздуха. Однако при малых давлениях воздуха в газовом диоде с тем же катодом ток пучка увеличивался на несколько порядков.

Рис. 3 демонстрирует влияние длины межэлектродного зазора на амплитуды импульса напряжения и тока пучка, а также на длительность импульса тока пучка. Как и следовало ожидать в этих условиях, см., например, [18], с увеличением межэлектродного зазора ток пучка уменьшается, а напряжение на промежутке растет. По сравнению с ускорителем ГИН-500 применение третьей секции существенно увеличило амплитуду тока пучка и сократило его длительность до ≈ 370 пс.

Влияние давления на параметры ускорителя в оптимальном режиме, который примерно соответствует согласованию волновых сопротивлений генератора и диода, иллюстрирует рис. 4. Применение в ускорителе трех секций вместо двух существенно расширило диапазон давлений в газовом диоде, при которых амплитуды импульса напряжения и тока пучка, а также длительности импульса тока пучка существенно не меняются. На основе проведенных исследований для

воздействия на образцы были выбраны два режима, в которых давление в газовом диоде составило ≈ 0.057 Торр. В первом режиме, с межэлектродным зазором 15 мм, напряжение на диоде составило ≈ 450 кВ, а ток пучка за фольгой и диафрагмой диаметром 2 см был равен ~ 1.7 кА. Во втором режиме, с межэлектродным зазором 4 мм, напряжение на диоде составило ≈ 370 кВ, но ток пучка за фольгой и диафрагмой увеличился до 2.7 кА.

На рис. 5 приведены осциллограммы тока пучка и импульса напряжения, а также автограф пучка. Минимальная длительность импульса тока на полувысоте в этих условиях составила ≈ 370 пс. На автографе наблюдается более сильное потемнение в центральной части пучка и видны темные точки, обусловленные пробоями в винипрозе из-за накопления заряда электронов. Плотность тока пучка в центре автографа на диаметре 3 мм превышала 1000 А/см².

Для дополнительной проверки полученных параметров тока пучка было проведено измерение суммарной энергии электронов пучка с помощью калориметра ТПИ-2М.1. При межэлектродном зазоре 15 мм измеренная энергия пучка электронов составила ≈ 0.45 Дж.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСА НАПРЯЖЕНИЯ

Результаты экспериментов по увеличению амплитуды импульса напряжения с помощью коаксиальной линии с переменным волновым сопротивлением (секция 3) сравнивались с данными численного эксперимента, полученными с использованием осесимметричной версии кода KARAT [21]. Моделирование было проведено для импульсов напряжения падающей волны с плоской

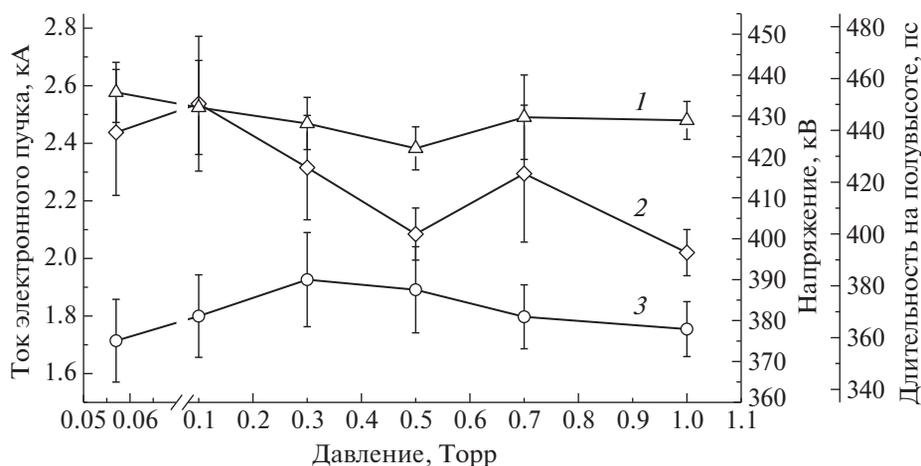


Рис. 4. Зависимости амплитуды импульса напряжения на диоде (1), а также амплитуды (2) и длительности (3) тока пучка за фольгой от давления воздуха в диоде. Межеlectродный зазор $d = 11.5$ мм.

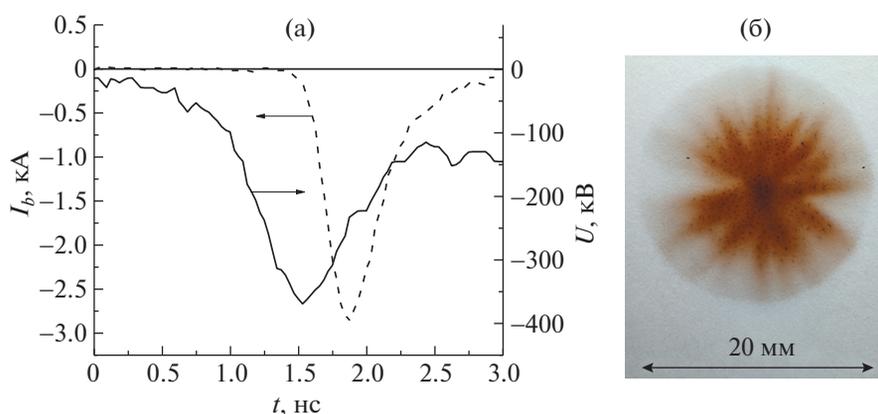


Рис. 5. Осциллограммы импульсов напряжения на диоде и тока пучка за фольгой (а), а также автограф пучка электронов в винилпрозе за 10 импульсов при межэлектродном зазоре $d = 4$ мм и давлении воздуха в диоде 0.057 Торр (б).

вершиной и различной длительностью фронта импульса при его линейном росте. Расчет был выполнен для длительностей фронта 0.1, 0.3, 0.6 и 2 нс. Соответственно этому увеличение амплитуды импульса напряжения на газовом диоде при холостом ходе составило 3.9, 3.7, 3 и 2.6 раза. Применение коаксиальной линии дает оптимальный выигрыш при фронте импульса 0.3 нс. Увеличение в 3.7 раза было получено и при моделировании с экспериментальным импульсом напряжения после ферритовой линии. Таким образом, проведенный расчет подтвердил эффективную работу коаксиальной линии с переменным волновым сопротивлением при предварительном сокращении фронта импульса напряжения с помощью ферритовой линии.

При дальнейшем сокращении фронта импульса (до 0.1 нс) амплитуда импульса напряжения на катоде газового диода повышалась незначительно ($\approx 5\%$). Так как для дальнейшего сокращения

фронта импульса использование одной ферритовой линии в ускорителе данной конструкции уже недостаточно, требуется установка второй ферритовой линии. Это существенно усложняет конструкцию ускорителя и увеличивает его размеры.

РЕГИСТРАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ВАВИЛОВА–ЧЕРЕНКОВА И ИМПУЛЬСНОЙ КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

На рис. 6 приведены спектры излучения образцов из кварцевого стекла КУ-1 и КВг при возбуждении пучком электронов созданного ускорителя. В излучении образца из КУ-1 доминирует излучение В.–Ч., интенсивность которого растет с уменьшением длины волны. В излучении образца из КВг присутствует как излучение В.–Ч., так и полоса импульсной катодолюминесценции в области 370–500 нм. Полоса излучения В.–Ч. хо-

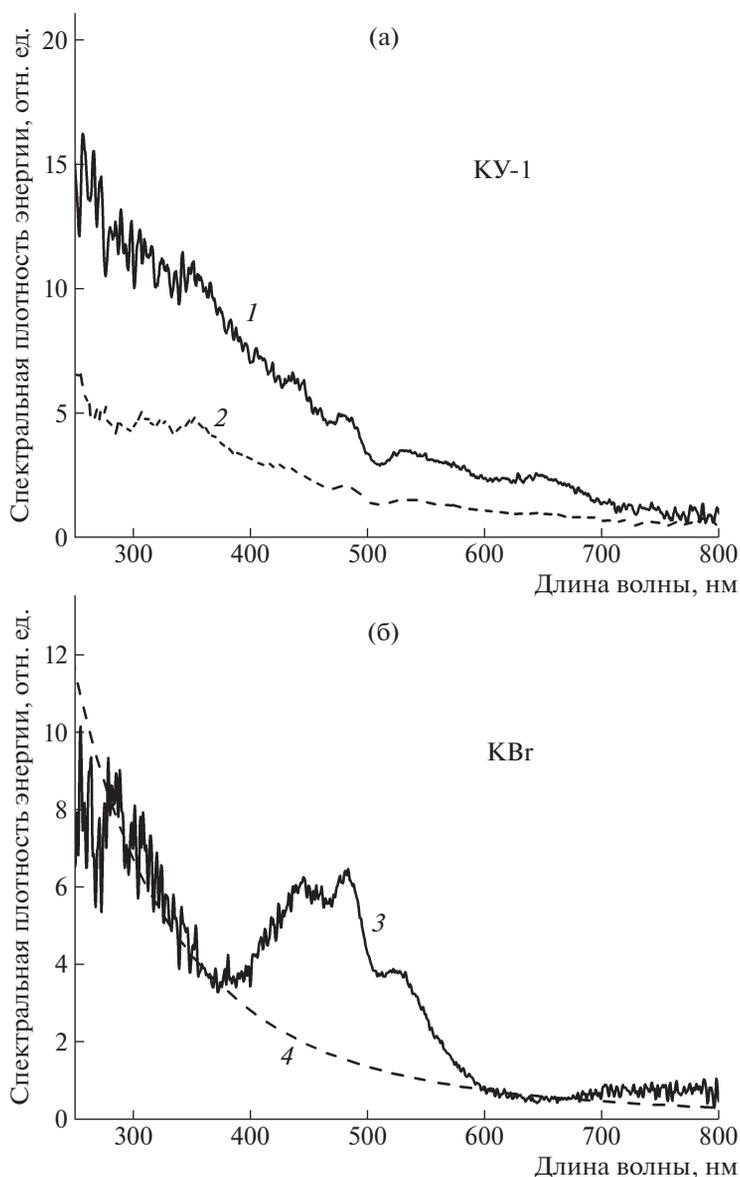


Рис. 6. Спектры излучения кварцевого стекла КУ-1 (а) при межэлектродном расстоянии в диоде 4 (1) и 15 мм (2) и образца КВг (б) при межэлектродном расстоянии 15 мм (3), а также расчетная зависимость (4) спектральной плотности энергии излучения В.–Ч. в образце КВг, нормированная на длину волны 350 нм на экспериментальную зависимость.

рошо совпадает с расчетной, которая была определена по известной формуле [12, 22].

При облучении образца из полиметилметакрилата наблюдались и.к.л. и излучение В.–Ч., но энергия в регистрируемой полосе и.к.л. была больше, чем в излучении В.–Ч., см. подробное описание в [23].

ВЫВОДЫ

Создан и испытан ускоритель электронов ГИН-1000, состоящий из трех секций различной конструкции и газонаполненного диода. Данный ускоритель позволяет формировать импульсы на-

пряжения на газонаполненном диоде с амплитудой до 500 кВ и имеет сравнительно простую конструкцию. Энергия пучка при субнаносекундной длительности импульса (370 пс на полувысоте) достигала ≈ 0.45 Дж, а плотность тока пучка в центре автографа превышала 1000 А/см^2 . С помощью данного ускорителя в кварцевом стекле КУ-1, полиметилметакрилате и кристалле КВг было зарегистрировано излучение Вавилова–Черенкова.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят И.В. Романченко за полезные обсуждения и помощь при создании секции ускорителя с

ферритовой линией и В.И. Пегеля за проведение численного эксперимента с использованием кода KARAT.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Ускоритель был разработан в рамках проекта Российского научного фонда № 18-19-00184, а статья подготовлена для печати в рамках государственного задания ИСЭ СО РАН, проект № FWRM-2021-0014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белкин Н.В., Комяк Н.И., Пеликс Е.А., Цукерман В.А.* // ПТЭ. 1972. № 2. С. 194.
2. *Martin T.H.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1973. V. 20. № 3. P. 289.
<https://doi.org/10.1109/TNS.1973.4327103>
3. *Загулов Ф.Я., Котов А.С., Шпак В.Г., Юрике Я.Я., Яландин М.И.* // ПТЭ. 1989. № 2. С. 146.
4. *Желтов К.А.* Пикосекундные сильноточные электронные ускорители. М.: Энергоатомиздат, 1991.
5. *Mehnert R.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B. 1996. V. 113. № 1–4. P. 81.
[https://doi.org/10.1016/0168-583X\(95\)01344-X](https://doi.org/10.1016/0168-583X(95)01344-X)
6. *Месяц Г.А.* Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004.
7. *Шпак В.Г., Яландин М.И.* // ПТЭ. 2001. № 3. С. 5.
<https://doi.org/10.1023/A:1017535304915>
8. *Tarassenko V.F., Kostyrya I.D., Baksht E.K., Rybka D.V.* // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2011. V. 18. № 4. P. 1250.
<https://doi.org/10.1109/TDEI.2011.5976123>
9. *Юрьев А.Л., Эльяш С.Л., Лойко Т.В., Пухов С.П., Николаев Д.П., Селезнев А.А.* // ПТЭ. 2017. № 6. С. 78.
<https://doi.org/10.7868/S0032816217050147>
10. *Эльяш С.Л., Лойко Т.В., Юрьев А.Л., Селезнев А.А.* // ПТЭ. 2019. № 4. С. 79.
<https://doi.org/10.1134/S0032816219030169>
11. *Тарасенко В.Ф., Алексеев С.Б., Бакут Е.Х., Бураченко А.Г., Ломаев М.И.* // ПТЭ. 2020. № 3. С. 78.
<https://doi.org/10.31857/S0032816220040096>
12. *Тарасенко В.Ф., Бакут Е.Х., Ерофеев М.В., Бураченко А.Г.* // Оптика и спектроскопия. 2021. Т. 129. № 5. С. 569.
13. *Romanchenko I.V., Rostov V.V., Gunin A.V., Konev V.Y.* // Rev. Sci. Instrum. 2017. V. 88. № 2. P. 024703.
<https://doi.org/10.1063/1.4975182>
14. *Gusev A.I., Pedos M.S., Rukin S.N., Timoshenkov S.P.* // Rev. Sci. Instrum. 2017. V. 88. № 7. P. 074703.
<https://doi.org/10.1063/1.4993732>
15. *Rukin S.N.* // Rev. Sci. Instrum. 2020. V. 91. № 1. P. 011501.
<https://doi.org/10.1063/1.5128297>
16. *Kozlov B.A., Makhanko D.S.* // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 2064. № 1. P. 012126.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2064/1/012126>
17. *Балзовский Е.В., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф.* // ПТЭ. 2015. № 5. С. 62.
<https://doi.org/10.7868/S003281621505002X>
18. *Алексеев С.Б., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф.* // ПТЭ. 2013. № 5. С. 85.
<https://doi.org/10.7868/S0032816213040162>
19. *Бузаев С.П., Абдуллин Э.Н., Зорин В.Б., Ковальчук Б.М., Логинов С.В., Месяц Г.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Толкачев В.С., Щанин П.М.* // Квантовая электроника. 2004. Т. 34. № 9. С. 801.
20. *Tarassenko V.F., Oleshko V.I., Erofeev M.V., Lipatov E.I., Beloplotov D.V., Lomaev M.I., Burachenko A.G., Baksht E.Kh.* // J. Appl. Phys. 2019. V. 125. № 24. P. 244501.
<https://doi.org/10.1063/1.5094956>
21. *Tarakanov V.P.* User's Manual for Code KARAT. Berkeley, VA: Springfield, 1992.
22. *Landau L.D., Bell J.S., Kearsley M.J., Pitaevskii L.P., Lifshitz E.M., Sykes J.B.* Electrodynamics of Continuous Media. Oxford: Pergamon Press, 1984.
23. *Тарасенко В.Ф., Бакут Е.Х., Ерофеев М.В.* // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47. № 6. С. 7.
<https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.06.50749.18601>

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК 621.3.049.76

**ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ С ПОМОЩЬЮ КРЕМНИЕВЫХ
МИКРОИНТЕРФЕРОМЕТРОВ ФАБРИ–ПЕРО МЕТОДОМ
СПЕКТРАЛЬНОЙ НИЗКОКОГЕРЕНТНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ**© 2022 г. В. Т. Потапов^{а,*}, Н. М. Жамалетдинов^а^аФрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
Россия, 141190, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

*e-mail: v_potapov38@mail.ru

Поступила в редакцию 24.11.2021 г.

После доработки 13.12.2021 г.

Принята к публикации 18.12.2021 г.

Описан волоконно-оптический датчик температуры с чувствительным элементом на основе кремниевой плоскопараллельной пластины толщиной 36 мкм, представляющей собой интерферометр Фабри–Перо, база которого изменяется вследствие изменения коэффициента преломления кремния с температурой и измеряется методом волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии. Полученная экспериментально чувствительность составила ~1.5 К в диапазоне температур 77–300 К.

DOI: 10.31857/S0032816222030120

Интерферометрические методы, основанные на измерении базы (длины оптического пути) интерферометров Фабри–Перо, широко используются при создании датчиков физических величин различных типов [1–4]. В последние годы значительный интерес представляют разработки датчиков на основе микроинтерферометров Фабри–Перо (и.Ф.П.), согласуемых с оптическими волокнами, – волоконно-оптических датчиков [3, 4]. В качестве чувствительных элементов (сенсоров) в таких датчиках могут использоваться и.Ф.П. из различных материалов, база которых (длина пути интерферирующих лучей) зависит от внешних условий (температуры, давления, типа материала и т.д.) и может измеряться различными способами. В работе [3] в качестве чувствительного элемента волоконно-оптического датчика использовалась пленка поликристаллического кремния толщиной 675 нм, сформированная на торце волокна и представляющая собой и.Ф.П., база которого (оптическая толщина пленки, нанесенной на торец волокна) изменялась в зависимости от коэффициента преломления кремния, зависящего, в свою очередь, от температуры, что приводило к изменению коэффициента отражения от пленки. При этом коэффициент отражения измерялся амплитудным методом, т.е. по изменениям интенсивности отраженного света на определенной длине волны. Полученная таким образом чувствительность составила ~3 К в диа-

пазоне температур от 303 до 673 К и ограничивалась флуктуациями мощности излучения.

В настоящей работе приведены результаты измерения температуры с помощью низкоконтрастного и.Ф.П., представляющего собой пластину из кристаллического кремния толщиной ~36 мкм, зависимость оптической толщины которой от температуры измеряется методом спектральной низкокогерентной волоконно-оптической интерферометрии. Пластина была вырезана из слитка монокристаллического кремния, отшлифована и стравлена методом плазмохимического травления до требуемой толщины.

Методы волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии с успехом применяются для дистанционных измерений с высокой степенью точности оптической толщины прозрачных плоскопараллельных образцов и малых расстояний [4, 5]. Эти методы основаны на корреляционных свойствах излучения с продольной длиной когерентности, много меньшей длин оптических путей интерферирующих лучей, а именно на измерении автокорреляционной функции зондирующего излучения после его взаимодействия с образцом. Как правило, в качестве источников излучения в методах волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии применяются суперлюминесцентные светодиоды с длиной когерентности, не превышающей 20–30 мкм. Главным достоинством этих методов является возможность измерений абсолютных значений длин оп-

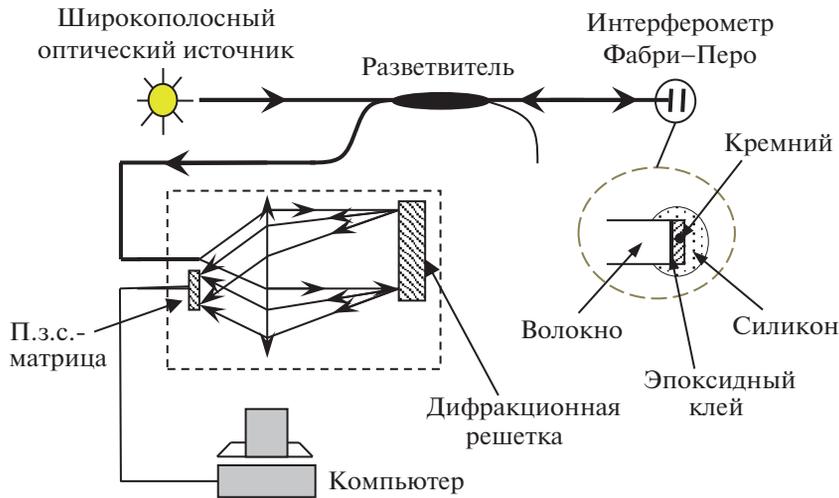


Рис. 1. Схема измерения температуры кремниевого интерферометра Фабри-Перо.

тических путей в образцах при достаточной точности измерений, которая практически не зависит от флуктуаций оптической мощности в линии и нестабильностей частоты излучений источника.

Автокорреляционная функция может быть измерена либо с помощью опорного интерферометра с модулируемой разностью плеч (например, интерферометра Маха-Цандера) [4, 5], либо спектральным методом [2, 5]. Спектральный метод заключается в измерении спектра мощности зондирующего излучения на выходе образца с последующей математической обработкой результатов. Он является более простым и доступным в реализации и, несмотря на меньшую точность измерений по сравнению с методом опорного интерферометра, вполне может быть применен для создания целого ряда датчиков физических величин. Чувствительность и.Ф.П. к температуре определяется изменением оптического пути света в и.Ф.П., в частности в кремниевой пластине, в зависимости от температуры.

Оптический путь или база и.Ф.П. могут быть измерены несколькими методами, в частности методом, описанным в работе [6], который заключается в сравнении экспериментально полученных спектров с расчетными спектральными кривыми и нахождении базы и.Ф.П. по результатам этого сравнения. Оптический путь или база и.Ф.П. определяется как произведение коэффициента преломления n среды и.Ф.П. на толщину пластины l . Произведение nl является в нашем случае экспериментально измеряемой величиной и определяет фазу Φ отраженных от и.Ф.П. световых волн и ее зависимость от температуры $d\Phi/dT$ в соответствии с известным соотношением:

$$\frac{d\Phi}{dT} = \frac{4\pi nl}{\lambda} \left(\frac{1}{n} \frac{dn}{dT} + \frac{1}{l} \frac{dl}{dT} \right) = \Phi_0 \left(\frac{1}{n} \frac{dn}{dT} + \frac{1}{l} \frac{dl}{dT} \right), \quad (1)$$

где l – толщина пластины Si, n – коэффициент преломления кремния, λ – длина волны света, T – температура.

Для кристаллического кремния в рамках простой зонной модели основной вклад в изменения фазы (оптического пути света) в и.Ф.П. дает изменение коэффициента преломления кремния в зависимости от температуры $\frac{1}{n} \frac{dn}{dT}$, которое более чем на порядок превышает изменения базы за счет температурного расширения образца кремния $\frac{1}{l} \frac{dl}{dT}$. Согласно данным работы [7], для кремния температурный коэффициент преломления составляет примерно $4.3 \cdot 10^{-5}$, а коэффициент температурного расширения – $2.6 \cdot 10^{-6}$. Поэтому можно считать, что в кремнии при температурах ≤ 400 К основное влияние на фазу будет оказывать зависимость коэффициента преломления от температуры.

На рис. 1 приведена схема на основе кремниевого и.Ф.П. для измерения температуры. Схема аналогична описанной ранее в работе [6] и примененной для измерения расстояний. Отраженный от и.Ф.П. сигнал передается по оптическому волокну на вход миниспектрометра, который выполнен по автоколлимационной схеме, т.е. свет, отраженный от и.Ф.П., проходит через объектив дважды. Отраженный от дифракционной решетки (эшелетта) свет регистрируется п.з.с. (прибор с зарядовой связью) матрицей. В качестве этого регистратора используется простой фотоаппарат (фотокамера) с цифровым выходом.

В качестве источника излучения в схеме используется суперлюминесцентный диод SLD (superluminescent diode) с центральной длиной вол-

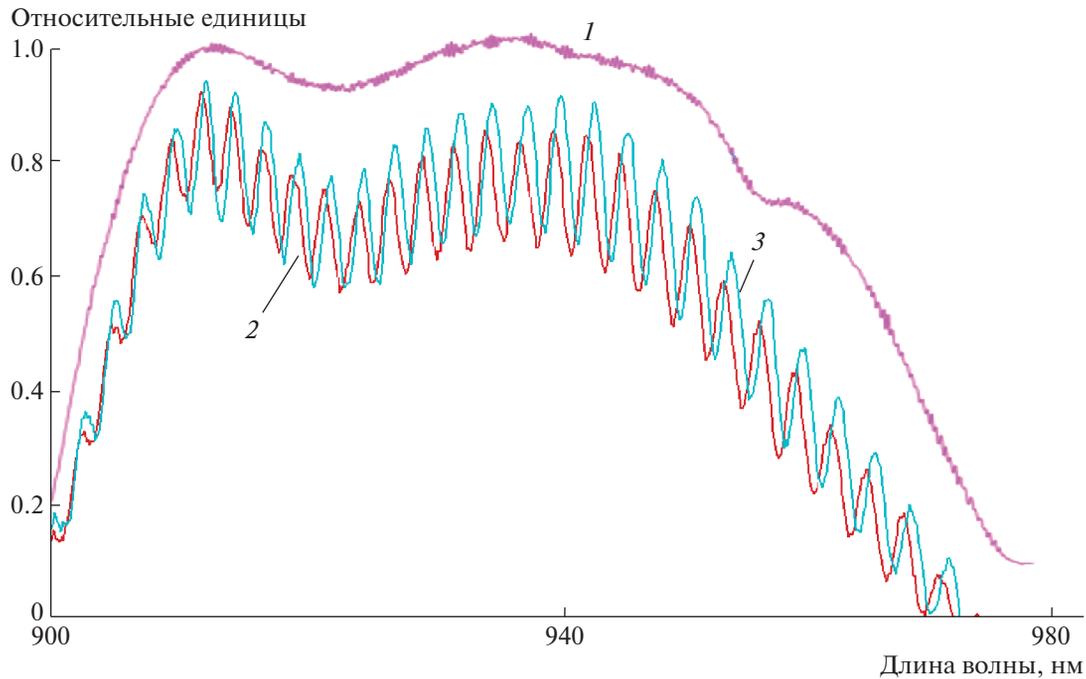


Рис. 2. Спектры отражения SLD-471 (1) и кремниевой пластины (2, 3), полученные при температурах 293 К (2) и 246 К (3).

ны $\lambda_0 = 940$ нм, спектр излучения которого, как известно, имеет гауссово распределение. Тогда интенсивность отраженного от и.Ф.П. сигнала будет описываться произведением гауссовой функции источника на функцию спектра отражения и.Ф.П. и может быть представлена в виде

$$I(\lambda) \sim I_0 \exp[-(\lambda - \lambda_0)^2 / (2\Delta\lambda^2)] (1 - V \cos(4\pi n l / \lambda)), \quad (2)$$

где I_0 – мощность излучения на входе волоконного тракта; V – константа, характеризующая видность интерференции и зависящая от величины потерь излучения и эффективности связи между и.Ф.П. и оптическим волокном; λ_0 и $\Delta\lambda$ – центральная длина волны и ширина спектра излучения SLD соответственно; n – коэффициент преломления среды.

На рис. 2 показаны спектр излучения SLD (кривая 1) и спектры сигналов, отраженных от и.Ф.П. (кремниевой пластины толщиной $l \approx 36$ мкм), полученные при температурах 293 К (кривая 2) и 246 К (кривая 3). Как видно из рис. 2, кривые 2 и 3 представляют собой спектр излучения SLD, промодулированный интерференционной картиной, образующейся в и.Ф.П., и описываются выражением (2). Очевидно, что информация о базе и.Ф.П. и ее зависимости от температуры заключается именно в интерференционной части спектра, которая, как следует из приведенного выше, в основном определяется зависимостью коэффициента преломления n кремния от температуры. Таким образом, основная проблема при измерениях

температуры заключается в выделении интерференционной части сигнала и его корректной обработке.

В нашей предыдущей работе [6] описан порядок и алгоритм нахождения спектра отражения и.Ф.П. и определения автокорреляционной функции и приведены факторы, влияющие на точность и пределы измерений базы и.Ф.П. Суть этой процедуры заключалась в измерении спектра отражения и.Ф.П. с помощью миниспектрометра (схема на рис. 1), выделении из него интерференционной части $I(\lambda)$, преобразовании масштаба оси с целью

получения периодической функции $I(\nu) \equiv I(\lambda^{-1})$, где $\nu = 1/\lambda$ – волновое число. Преобразованный таким образом сигнал умножался на весовую функцию, а затем, путем прямого и обратного дискретных преобразований Фурье, находился спектр сигнала, отраженного от и.Ф.П. Далее для определения базы и.Ф.П. рассчитывался набор спектров отражения и.Ф.П. с шагом $\Delta(nl)$, не превышающим минимального значения предельного разрешения миниспектрометра. В нашем случае эта величина составила $\Delta(nl) \approx 10$ нм. Из полученного набора спектров путем сравнения был выбран наиболее близкий к экспериментально зарегистрированному спектр и определялись значения базы и.Ф.П. и соответствующие этой базе значения n .

На рис. 3 представлены зависимости базы $L = ln$ и.Ф.П. и коэффициента преломления n

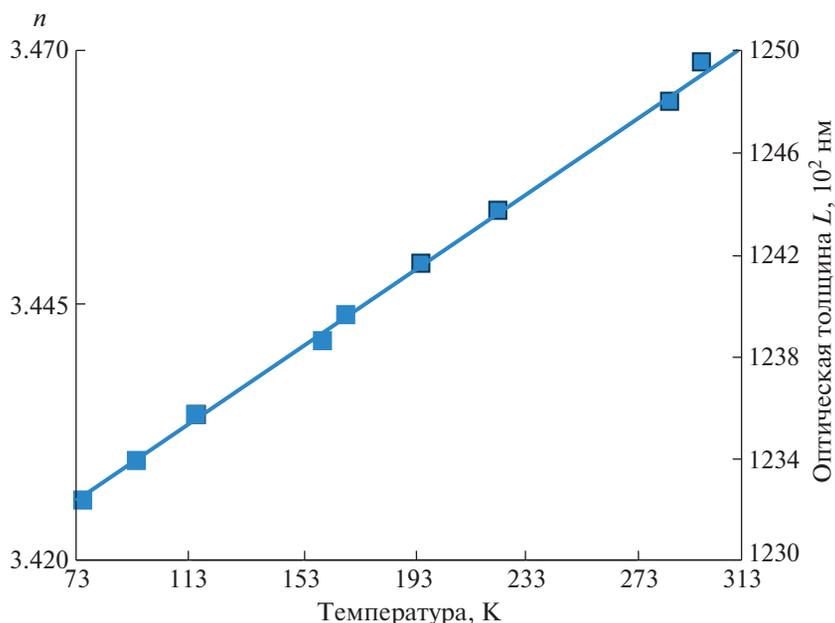


Рис. 3. Зависимости коэффициента преломления кремния и базы и.Ф.П. от температуры.

кремния от температуры. В этом эксперименте температура измерялась с помощью платинового термометра сопротивления типа С420 фирмы Heraeus, точность измерений которого в диапазоне температур 77–423 К составляла ± 0.5 К. Согласно рис. 3, в диапазоне температур ~ 73 –293 К коэффициент преломления n кремния растет с ростом температуры с градиентом $dn/dT \approx 2.5 \cdot 10^{-4}$. Отсюда получаем относительное значение температурного коэффициента преломления, равное $\frac{1}{n} \frac{dn}{dT} \approx 7 \cdot 10^{-5}$. Эта величина примерно на 40%

превышает значения $\frac{1}{n} \frac{dn}{dT}$, приведенные в работе [7]. На наш взгляд, это связано с учетом влияния температурного расширения кремния, которое, по оценкам, может составить примерно 10%, а также с погрешностями измерений температуры и физической толщины пластины кремния.

Тем не менее, полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности создания достаточно простых волоконно-оптических датчиков температуры на основе описанного метода для диапазона низких температур. Полученная экспериментально чувствительность метода составила примерно 1.5 К в диапазоне температур 73–293 К при времени регистрации 1 с. Чувстви-

тельность метода может быть повышена в несколько раз за счет увеличения базы и.Ф.П. (толщины пластины Si) и сужения полосы частот (снижения быстродействия).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bing Yu, Dae Woong Kim, Jiangdong Deng, HaiXiao, Anbo Wang // Applied Optics. 2003. V. 42. № 16. P. 3241. <http://doi.org/>
<https://doi.org/10.1088/0957-0233/7/01>
2. Beheim G. // Electron. Lett. 1986. V. 22. P. 238.
3. Shulteis L., Amstutz H., Kaufman M. // Optic Letters. 1988. V. 13. № 9. P. 782.
4. Choi Han-Sun, Taylor H.F., Lee Ch.I. // Optic Letters. 1997. V. 22. № 23. P. 1814.
5. Rao Yun-Jiang, Jackson D.A. // Meas. Sci Technol. 1996. V. 7. P. 981.
6. Потопов В.Т., Жамалетдинов Н.М. // ПТЭ. 2021. № 4. С. 47. <https://doi.org/10.31857/S003281622104008X>
7. Yu P.Y., Cardona M. // Phys. Rev. B. 1970. V. 2. № 8. P. 3193.

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК 549.74:548.75(075.8)

**ПРИСТАВКА К ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРУ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ
ИНФРАКРАСНЫХ СПЕКТРОВ ЖИДКОСТЕЙ В ПАРОВОЙ ФАЗЕ**© 2022 г. Д. С. Нехорошева^{a,b,*}, Х. Б. о. Таги-заде^b, Л. С. Клименко^b^a Ханты-Мансийская государственная медицинская академия
Россия, 628010, Ханты-Мансийский автономный округ-Югра, Ханты-Мансийск, ул. Мира, 40^b Югорский государственный университет
Россия, 628012, Ханты-Мансийский автономный округ-Югра, Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16

*e-mail: serg-nehor@rambler.ru

Поступила в редакцию 09.11.2021 г.

После доработки 03.12.2021 г.

Принята к публикации 07.12.2021 г.

Разработана приставка к инфракрасным (и.к.) спектрометрам, предназначенная для регистрации и.к.-спектров жидкостей в паровой фазе. Приставка представляет собой обогреваемую газовую кювету, на корпусе которой размещен шприцевой инжектор жидких проб, а также два газовых крана для очистки приставки после регистрации спектра путем продувки инертным газом. Приставка предназначена для количественных исследований методом и.к.-спектроскопии. На примере измерения концентрации метанола в водных растворах показано, что за счет устранения “эффекта растворителя” улучшаются метрологические характеристики количественного химического анализа жидкостей методом и.к.-спектроскопии. По сравнению с методом нарушенного полного внутреннего отражения авторам удалось расширить диапазон измеряемых концентраций метанола с 1–30% (масс.) до 0.03–100% (масс.), не применяя процедуру подготовки проб.

DOI: 10.31857/S003281622203003X

Абсорбционная спектроскопия в средней инфракрасной (и.к.) области электромагнитного излучения (и.к.-спектроскопия) как самостоятельный метод изучения строения вещества активно развивается уже более 100 лет. Развитие и.к.-спектроскопии прочно связано с развитием приборной базы метода, чему во многом способствует стремительное развитие электроники и информационных технологий, а также достижения в области создания новых оптических материалов. Внедрение в экспериментальную и.к.-спектроскопию оптики из селенида цинка позволило значительно расширить область применения этого метода и способствовало появлению нового направления в аналитическом приборостроении, связанного с разработкой и производством приставок (измерительных ячеек, кювет) для и.к.-спектрометров, т.е. вспомогательных устройств, позволяющих регистрировать спектры веществ, находящихся в определенном агрегатном состоянии и обладающих специфическими физико-химическими свойствами [1, 2].

Для регистрации спектров жидкостей в и.к.-спектроскопии традиционно применяются жидкостные кюветы, в которых оптические элементы (торцевые окна) изготовлены из плоских моно-

кристаллов галогенидов щелочных или щелочно-земельных и некоторых других металлов (NaCl, KBr, LiF₂ и др.). Основным недостатком соляной оптики является низкая водостойкость, создающая существенные трудности при работе с водой и ее смесями. Малорастворимая в воде соляная оптика (CaF₂, KRS-5) не находит массового применения из-за токсичности и мягкости материала. В связи с этим в последнее время стал активно применяться селенид цинка — более твердый нетоксичный и нерастворимый в воде материал, обладающий хорошими оптическими характеристиками [3]. При этом наиболее эффективным оказалось применение для регистрации и.к.-спектров оптических элементов из селенида цинка в сочетании с использованием метода нарушенного полного внутреннего отражения (н.п.в.о.). По сравнению с регистрацией и.к.-спектров жидких проб в “классических” жидкостных кюветах, отличающихся сложностью обслуживания, метод н.п.в.о. позволил значительно сократить время на подготовку образца, предшествующую регистрации любого и.к.-спектра. Однако массовое внедрение метода н.п.в.о. не устранило “эффект растворителя”. Этот эффект в различной степени присутствует в и.к.-спектрах большинства рас-

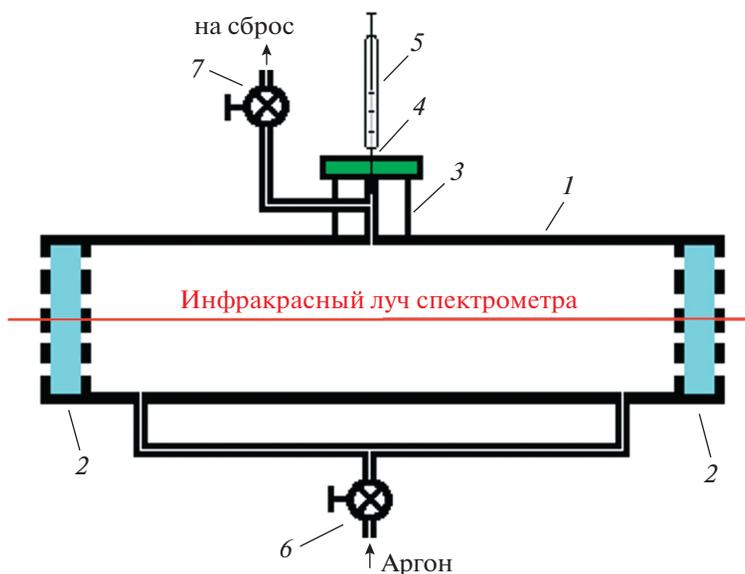


Рис. 1. Принципиальная схема приставки к и.к.-фурье-спектрометру для регистрации и.к.-спектров жидкостей в паровой фазе. 1 – корпус; 2 – окно; 3 – шприцевой инжектор; 4 – мембрана; 5 – шприц; 6 – кран подачи инертного газа; 7 – кран выпускной.

творов органических веществ и вносит свой вклад в суммарную ошибку измерения аналитического сигнала при выполнении количественного химического анализа (относительная ошибка определения обычно составляет 5–10%), а также затрудняет процесс автоматизации обработки спектральной информации [4].

По сравнению с жидкостями в газовом агрегатном состоянии вещества межмолекулярные взаимодействия значительно ослаблены и существуют только в трех формах спектрального проявления: столкновительное уширение спектральных линий; индуцированные давлением полосы; возможное проявление спектров димеров [5]. В связи с этим можно предположить, что и.к.-спектры паров органических веществ должны отличаться от и.к.-спектров этих же веществ в жидком состоянии более стабильным положением полос поглощения и высокой линейностью их зависимости от количественного состава. Для проверки этого предположения была разработана приставка к и.к.-фурье-спектрометру для регистрации и.к.-спектров жидкостей в паровой фазе [6]. На рис. 1 представлена принципиальная схема разработанной приставки.

Приставка к и.к.-фурье-спектрометру представляет собой газовую кювету, в которой торцы корпуса 1 закрыты окнами 2 из кристаллов селенида цинка, через которые при помощи и.к.-спектрометра регистрируется спектр вещества, находящегося во внутреннем пространстве кюветы. На корпусе 1 размещен шприцевой инжектор 3, оснащенный силиконовой мембраной 4. Ввод

жидкой пробы в кювету осуществляется лабораторным хроматографическим шприцем 5 при прокалывании иглой шприца мембраны 4. Жидкая проба испаряется во внутреннем пространстве кюветы, после чего регистрируется и.к.-спектр. Для ускорения процесса испарения жидких проб и предотвращения конденсации паров на внутренних поверхностях приставки ее корпус оснащен нагревательным элементом, теплоизоляцией и устройством термостатирования. Это позволяет регистрировать и.к.-спектры паров жидкостей в диапазоне температур от комнатной до 220°C. После регистрации и.к.-спектра внутренний объем приставки очищается путем продувки инертным газом (аргоном) через краны 6 и 7. Перед вводом в приставку новой пробы эти краны закрываются, и внутренний объем приставки становится замкнутым.

В опытном образце приставки оптический путь составлял 15 см, диаметр торцевых окон – 20 мм и объем внутреннего пространства – 50 см³. Объем жидких проб, которые вводили в приставку при помощи хроматографических шприцов, составлял от 1 до 10 мм³. В связи с тем, что в и.к.-спектрах газов могут проявляться вращательные колебания молекул, приводящие к расщеплению полос поглощения на несколько более мелких, и.к.-спектры паров жидкостей регистрировали в более высоком разрешении, чем принято для образцов, находящихся в конденсированном состоянии.

Регистрацию и.к.-спектров проводили с помощью фурье-спектрометра FT-801 (НПФ “Симекс”, Россия) в режиме пропускания. Для

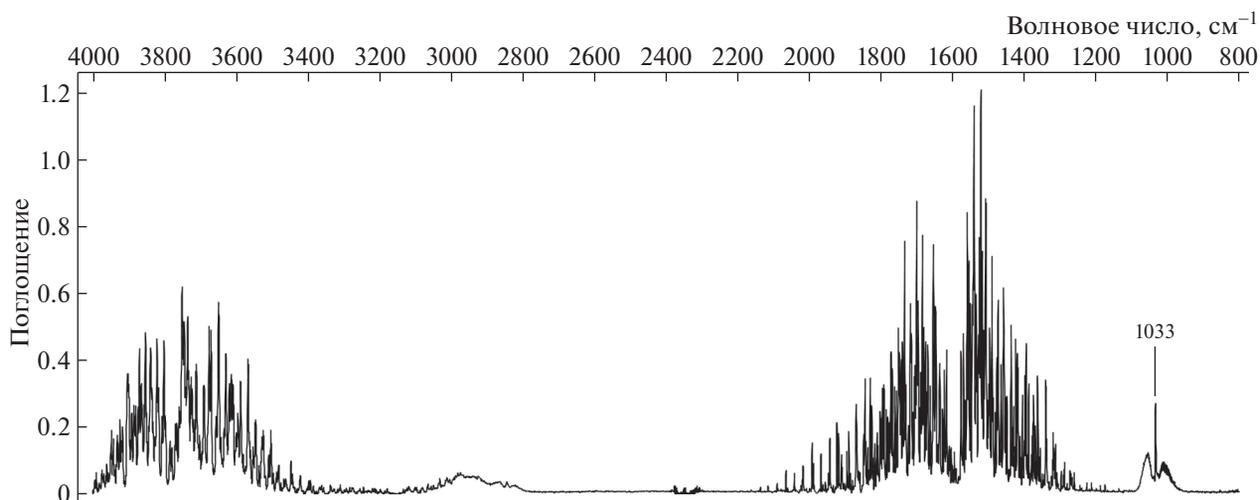


Рис. 2. Инфракрасный спектр паров водного раствора метанола с концентрацией 2.0% (масс.) при температуре 150°C (объем пробы 10 мкл).

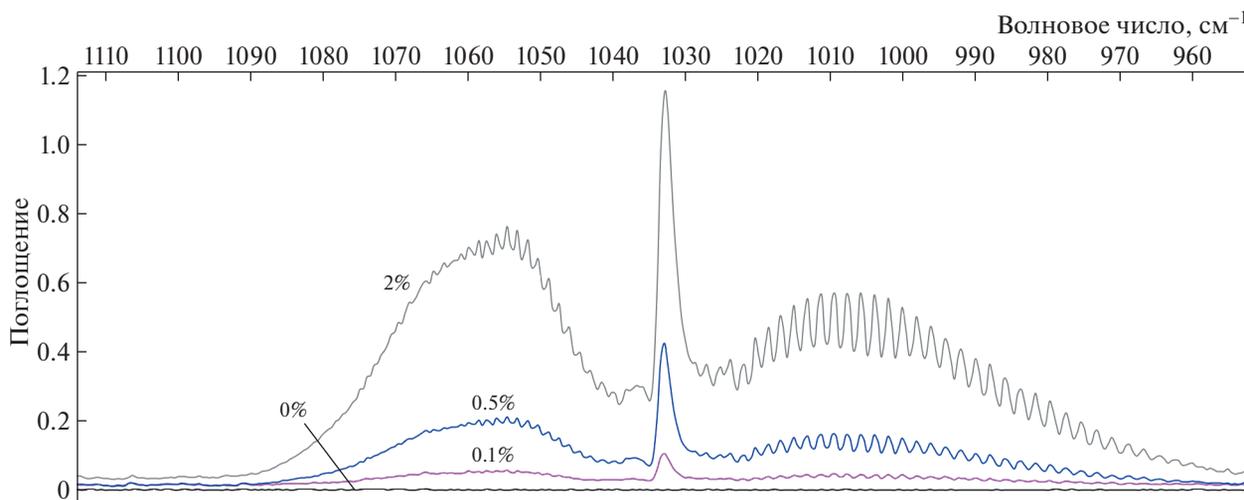


Рис. 3. Полоса поглощения с волновым числом 1033 см⁻¹ на и.к.-спектрах паров воды и водных растворов метанола с концентрацией 0.1, 0.5 и 2.0% (масс.) при температуре 150°C (объем пробы 10 мкл).

управления спектрометром и обработки и.к.-спектров использовали программное обеспечение ZaIR 3.5. Условия регистрации и.к.-спектров были следующими:

- спектральный диапазон волновых чисел 4000–650 см⁻¹;
- разрешение 0.5 см⁻¹;
- скорость сканирования 1;
- число сканирований 4.

Для оценки метрологических характеристик разработанной приставки с ее помощью регистрировали и.к.-спектры модельных водных растворов метилового спирта. С учетом температуры кипения воды и метанола температура приставки

при регистрации и.к.-спектров составляла 150°C. Эксперимент проводили в условиях доверительной вероятности 0.95 по результатам десяти параллельных измерений для каждого модельного раствора с определенной концентрацией. В качестве аналитического сигнала использовали оптическую плотность A в точке максимума полосы поглощения с волновым числом 1033 см⁻¹, соответствующей валентным колебаниям связи С–О. Инфракрасный спектр паров водного раствора метанола с концентрацией 2.0% (масс.) приведен на рис. 2, а на рис. 3 показана форма полосы поглощения с волновым числом 1033 см⁻¹ в и.к.-спектрах паров водных растворов метанола различной концентрации.

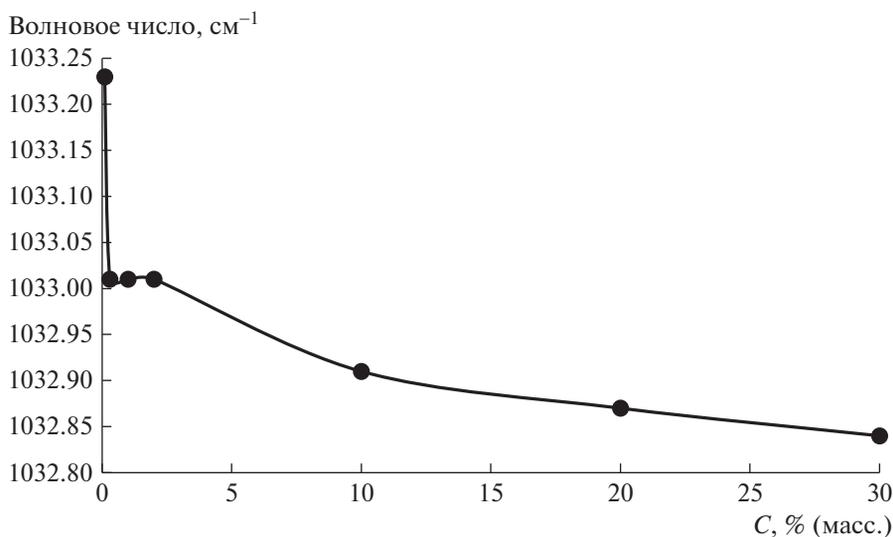


Рис. 4. Зависимость положения максимума полосы поглощения 1033 см^{-1} в и.к.-спектре паров водных растворов метанола от концентрации C (объем пробы 10 мкл).

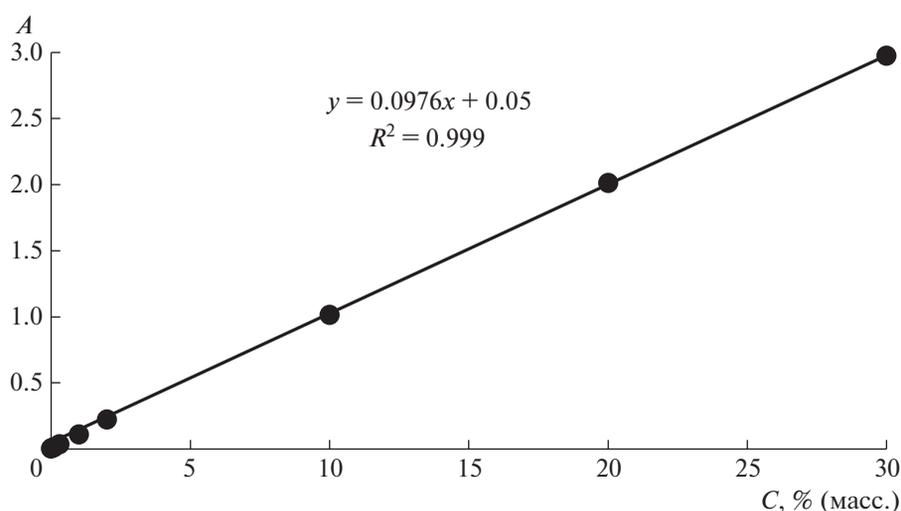


Рис. 5. Зависимость оптической плотности A полосы поглощения 1033 см^{-1} в и.к.-спектрах паров водных растворов метанола (объем пробы 10 мкл) от концентрации C .

Проведенные эксперименты показали, что положение максимума полосы поглощения 1033 см^{-1} в и.к.-спектре паровой фазы водных растворов метанола при изменении его концентрации от 30 до 0% (масс.) может варьироваться в пределах от 1032.84 до 1033.23 см^{-1} (рис. 4), что не ухудшает технических характеристик современных и.к.-фурье-спектрометров. Зависимость оптической плотности полосы поглощения 1033 см^{-1} в и.к.-спектре паров водных растворов метанола от его концентрации имеет линейный характер с высоким коэффициентом корреляции и может использоваться в качестве градуировочного графика

для измерения концентрации метанола в водных растворах (рис. 5).

Относительная ошибка измерения оптической плотности полосы поглощения 1033 см^{-1} в и.к.-спектре паров водных растворов метанола резко снижается с 6 до 1.1% в диапазоне концентраций метанола 0.01–2%, после чего плавно повышается до уровня 1.3% при концентрации метанола 30% (рис. 6).

В 2020 г. применительно к приставке к и.к.-фурье-спектрометру для регистрации и.к.-спектров жидкостей в паровой фазе была разработана «Методика (метод) измерений массовой доли ме-

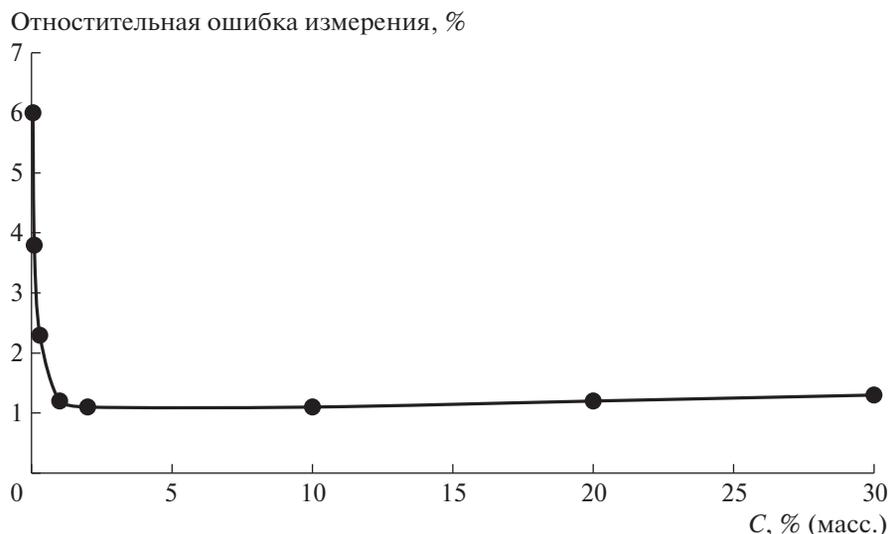


Рис. 6. Зависимость относительной ошибки измерения оптической плотности полосы поглощения 1033 см^{-1} в и.к.-спектре паров водных растворов метанола от его концентрации (число параллельных измерений 10, доверительная вероятность 0.95).

Таблица 1. Метрологические характеристики методов определения метанола в водных растворах

Характеристики	Инфракрасная спектроскопия в паровой фазе [7]	Метод нарушенного полного внутреннего отражения [8]
Диапазон измерений, % (масс.)	0.03–100	1–30
Относительное среднее квадратичное отклонение повторяемости, %	3	3
Относительное среднее квадратичное отклонение воспроизводимости, %	5	6
Границы относительной погрешности при доверительной вероятности 0.95	10	13

тилового спирта в пробах спиртосодержащих водных растворов методом инфракрасной спектроскопии в паровой фазе” [7]. В результате процедуры метрологической аттестации оказалось, что границы относительной погрешности данной методики сузились по сравнению с аналогичным показателем для разработанной в 2014 г. “Методики (метод) измерений массовой доли изопропанола, метанола и этанола в пробах спиртосодержащих водных растворов методом инфракрасной спектроскопии” [8], в которой предусмотрено использование приставки н.п.в.о. (табл. 1). При этом удалось расширить диапазон измеряемых концентраций с 1–30% (масс.) до 0.03–100% (масс.).

Таким образом, было установлено, что разработанная приставка к и.к.-фурье-спектрометру для регистрации и.к.-спектров жидкостей в паровой фазе устраняет “эффект растворителя”, благодаря чему улучшаются метрологические характеристики количественного химического анализа

жидких проб методом и.к.-спектроскопии без применения процедуры подготовки проб.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-43-860005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ежевская Т.Б., Бубликов А.В.* // Аналитика. 2012. № 1. С. 38.
2. *Ежевская Т.Б., Бубликов А.В., Пальянов Ю.Н., Хохряков А.Ф.* // Аналитика. 2015. № 2. С. 118.
3. *Смит А.* Прикладная ИК-спектроскопия / Пер. с англ. М.: Мир, 1982. С. 125–128.
4. *Нехорошева Д.С., Нехорошев С.В., Клименко Л.С., Тагизаде Х.Б.* // Экологические системы и приборы. 2020. № 8. С. 3.
5. Спектральные проявления межмолекулярных взаимодействий в газах. Сб. статей / Под ред.

- Ю.С. Макушкина Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1982.
6. *Нехорошева Д.С., Нехорошев С.В., Нехорошева А.В.* Патент на полезную модель № 202 134 РФ. МПК G01N 21/05 // Бюл. № 4. Оpubл. 03.02.2021.
7. *Нехорошева Д.С., Таги-заде Х.Б., Слепченко Г.Б., Нехорошев С.В., Клименко Л.С.* Методика (метод) измерений массовой доли метилового спирта в пробах спиртосодержащих водных растворов методом инфракрасной спектроскопии в паровой фазе. Методические указания. МУ 08-47/469. Томск: Томский политехнич. ун-т, 2020.
8. *Нехорошев С.В., Шавырин А.А., Таги-заде Х.Б., Максимчук И.О., Слепченко Г.Б., Лимарева А.В.* Методика (метод) измерений массовой доли изопропанола, метанола и этанола в пробах спиртосодержащих водных растворов методом инфракрасной спектроскопии. Методические указания. МУ 08-47/359. Ханты-Мансийск: Югорский гос. ун-т, 2015.

**ДВУХСТУПЕНЧАТЫЙ ХОЛЛОВСКИЙ МАГНИТОМЕТР С
УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ, ОБЕСПЕЧИВАЕМЫМИ
СЕНСОРОМ ИЗ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА**© 2022 г. Х. Р. Ростами^{a,*}^a Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
Россия, 141190, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

*e-mail: rostami@ms.ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 05.11.2021 г.

После доработки 15.01.2022 г.

Принята к публикации 19.01.2022 г.

Продемонстрирована возможность повышения чувствительности стандартного холловского магнитометра от $\sim 2.5 \cdot 10^{-3}$ до $\sim 8 \cdot 10^{-7}$ Гс/Гц^{1/2}. Повышение чувствительности достигнуто за счет использования резкого скачка магнитного отклика эпитаксиальной пленки высокотемпературного сверхпроводника $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO), расположенной на поверхности преобразователя Холла, при первом термодинамическом критическом магнитном поле двойников H_{ic1} . Для повышения чувствительности, линейности и помехоустойчивости магнитометра начало его рабочей точки смещено до значений H_{ic1} двойников путем приложения постоянного опорного магнитного поля, а также использовано осциллирующее затухающее локальное поле подмагничивания. Этим суммарным полем, направленным перпендикулярно к поверхности пленки, также обеспечивалось повышение пространственного разрешения магнитометра, определяемого линейными размерами двойников YBCO-пленки, значение которого достигало ~ 300 нм (с уменьшением до 20 нм при соответствующих минимальных размерах двойников). Предложенная конструкция магнитометра позволяет в диапазоне магнитных полей 10^{-7} – 10^{-3} Э при частоте до 1 кГц с высокой скоростью измерять не только постоянное, но и переменное магнитное поле, сохраняя все другие высокие характеристики магнитометра. В случае использования высокочастотных преобразователей магнитного поля магнитометр может работать в частотном диапазоне до 100 кГц и регистрировать как переменные, так и импульсные магнитные поля.

DOI: 10.31857/S0032816222030181

В работах [1–3] на примере холловского магнитометра была продемонстрирована возможность достижения его высоких параметров в случае применения двухступенчатого механизма усиления сигнала, при котором предельная чувствительность магнитометра во второй ступени повышается более чем на два порядка по сравнению с первой ступенью. Благодаря использованию механизма двухступенчатой работы магнитометра удалось добиться одновременного достижения высоких точности, линейности и пространственного разрешения. Согласно [1–3], от базового магнитометра первой ступени требовалась только высокая чувствительность, на второй ступени осуществлялось дальнейшее повышение его чувствительности, а также точности, линейности, быстродействия и пространственного разрешения. Поскольку одновременно обеспечить повышение данных параметров при предельной чувствительности традиционными методиками очень трудно, раз-

работка способов дальнейшего улучшения характеристик магнитометров представляет большой практический и коммерческий интерес.

В данной работе описан двухступенчатый магнитометр на основе преобразователя Холла (п.Х.) с расширенными функциональными возможностями, позволяющими обеспечить более высокие чувствительность и быстродействие магнитометра по сравнению с [1–3].

Как известно [4–6], высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) имеют сложную кристаллическую структуру, состоящую из двойников (монокломены, кристаллиты – зерна, суб- и нанокристаллиты), соединенных между собой слабыми джозефсоновскими связями. В работах [5, 6] показано, что с ростом внешнего магнитного поля подавляются критические токи слабых джозефсоновских контактов между двойниками, и при термодинамическом первом критическом магнитном поле H_{ic1} двойников образец ВТСП

скачкообразно “распадается” на группы двойников с квантованными пространственными масштабами. При этом образованные в процессе такого “деления” образца группы двойников сортируются по близким размагничивающим факторам. Обнаружено, что линейные размеры двойников в процессе “деления” образца, поэтапно уменьшаясь, становятся намного меньше, чем глубина проникновения λ магнитного поля в образец и в его двойники. Для более доступного с технологической точки зрения высокотемпературного сверхпроводника $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) также установлено, что даже самые совершенные монокристаллы высокотемпературного сверхпроводника YBCO содержат в себе большое количество регулярно расположенных границ двойникования с плоскостью двойникования (110). В зависимости от способа приготовления материала границы двойникования могут иметь ширину $\Delta d \sim 30\text{--}50 \text{ \AA}$, а расстояние d между ними может составлять $\sim 200\text{--}2000 \text{ \AA}$ [7, 8]. Границы двойникования хорошо обнаруживаются не только в монокристаллических YBCO и в зернах поликристаллических YBCO ВТСП, но и в эпитаксиальных пленках YBCO, а также в пниктидах железа. При приложении к находящейся в сверхпроводящем состоянии эпитаксиальной пленке YBCO осциллирующего затухающего локального магнитного поля $H_1(t)$, меняющегося по закону

$$H_1(t) = H_{01} \exp(-\beta t) \cos \Omega t \quad (1)$$

и направленного перпендикулярно к поверхности, пленка скачкообразно распадается на группы двойников с близкими размагничивающими факторами, когда амплитуда поля достигает значений полей H_{ic1} двойников. Это в свою очередь приводит к скачкообразному проникновению магнитного потока в пленку через границы двойникования, вызывая эффект скачка на магнитопольевой зависимости плотности затухающего магнитного поля $B_H(H_0)$ в ВТСП-пленках [5, 6].

Кроме того, регулирование при помощи следящей системы в предложенном магнитометре величины ступеней амплитуды $H_{01} \exp(-\beta(t=0))$ прилагаемого к пленке осциллирующего затухающего локального магнитного поля H_{01} позволяло контролировать процесс многократного реверсивного захвата и аннулирования плотности затухающего магнитного поля.

Описанные выше свойства пленки позволяют одновременно использовать ее в качестве как чувствительного элемента, так и важной составной части следящей системы. Именно использование этих свойств пленки и применение процедуры разделения диапазона измеряемых полей на широкую область опорного поля смещения H_m (сдвига нулевой точки п.Х.) и узкую область слабого поля подмагничивания легли в основу тех-

нико-технологических и конструктивных решений, используемых при разработке предлагаемого магнитометра.

Следует также отметить, что благодаря ступенчатому изменению амплитуды $H_{01} \exp(-\beta t)$ осциллирующего затухающего локального магнитного поля создается возможность плавного перехода от больших пространственных масштабов к малым. Это достигается путем постепенного уменьшения высоты ступенек амплитуды поля $H_{01} \exp(-\beta t)$ от $\Delta H_0 \approx 4.66 \text{ Э}$ до минимальной $\Delta H_0 = 0.1 \text{ Э}$. При этом после каждого цикла измерений пленку с помощью нагревателя подложки нагревали до температуры выше критической температуры перехода пленки в сверхпроводящее состояние T_c , после чего охлаждали до температуры $T = 77.4 \text{ К}$.

Основной целью данной работы являлась демонстрация возможности использования фундаментального свойства, а именно скачкообразного квантового распада образца на двойники в двойниковых купратных и железосодержащих пниктидных ВТСП, для создания двухступенчатых магнитометров с повышенными характеристиками.

Для расширения функциональных возможностей, а также достижения более высокой чувствительности и быстродействия нами была проведена модернизация конструкции магнитометра [1–3] — один соленоид в камере датчика был заменен на два соосных.

На рис. 1 приведена схема конструкции камеры датчика магнитного поля. С помощью большого соленоида *12* с индуктивностью $L_1 \approx 0.52 \text{ Гн}$ создавалось опорное поле смещения H_m , величину которого можно было изменять в диапазоне до 150 Э . Второй соленоид *11* поля подмагничивания с низкой индуктивностью, $L_2 \approx 0.049 \text{ Гн}$, позволял создавать слабое осциллирующее затухающее локальное магнитное поле с частотой более 500 кГц и амплитудой до 3 Э , меняющееся по закону (1) [5, 6] со следующими параметрами: коэффициент затухания $\beta = r_2/(2L_2)$, где r_2 — остаточное сопротивление соленоида L_2 для случаев намотки катушки из несверхпроводящего провода; собственная частота колебательного контура $\Omega = (\omega^2 - \beta^2)^{1/2}$, где $\omega^2 = 1/(L_2 C)$.

Таким образом, перпендикулярно к поверхности эпитаксиальной пленки YBCO, находящейся в сверхпроводящем состоянии, прилагается суммарное поле, созданное двумя соосно расположенными соленоидами:

$$\sum H(t) = H_m + H_1(t) = H_m + H_{01} \exp(-\beta t) \quad (2)$$

На рис. 2 приведена блок-схема двухступенчатого магнитометра, реализующая предложенный способ. Как было показано в [9], высокотемпературные сверхпроводники YBCO являются управ-

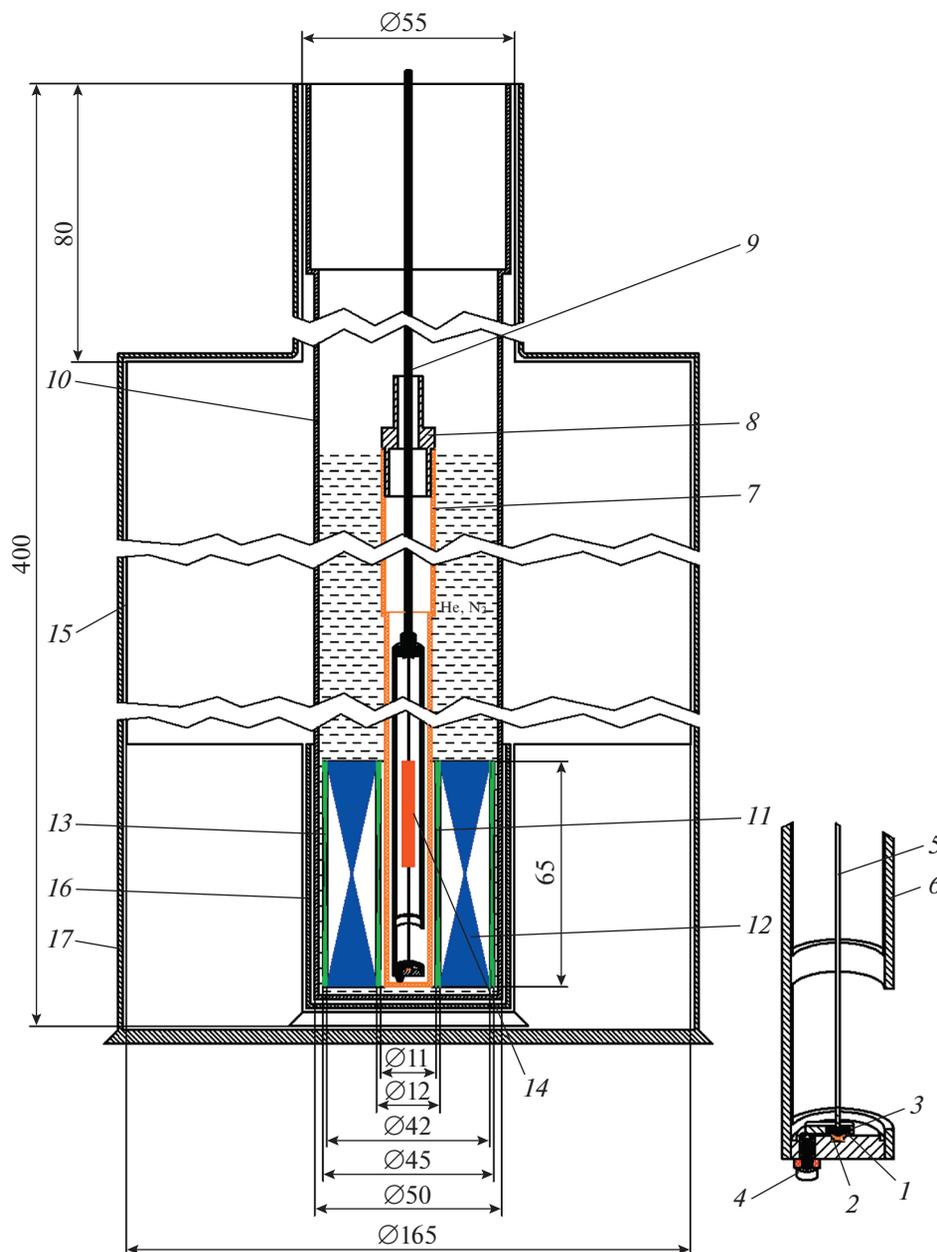


Рис. 1. Схема конструкции камеры датчика магнитного поля. 1 – эпитаксиальная пленка ВТСП; 2 – преобразователь Холла; 3 – образец; 4 – латунный контактный винт; 5 – медный стержень; 6 – медный направляющий цилиндр; 7 – эбонитовый колпак (ампула); 8 – латунная направляющая; 9 – стержень из нержавеющей стали; 10 – нижняя суженная часть криостата; 11 – соленоид поля подмагничивания; 12 – соленоид опорного магнитного поля смещения; 13 – соленоид поля компенсации; 14 – нагреватель; 15 – основная часть криостата; 16 – сверхпроводящий экран; 17 – наружный магнитный экран.

ляемыми реверсивными запоминающими средами. В качестве такой среды и выступала эпитаксиальная пленка YBCO с резким скачком магнитного отклика при H_{ic1} двойников. Суммарное поле, т.е. опорное магнитное поле смещения и осциллирующее затухающее локальное магнитное поле с амплитудой $H_{o1} \exp(-\beta t)$, позволяло управлять процессом многократной записи и стирания плотно-

сти затухающего магнитного поля в пленке. Попадая в эту среду, слабые магнитные поля суммируются с сильным пороговым опорным полем смещения и слабым полем подмагничивания. В результате создается линейная высокоточная усиливающая среда для слабых магнитных полей. Далее усиленный сигнал, преодолев порог чув-

монокристаллического образца (№ 2) (см. ниже рис. ба), можно создать широкодиапазонный магнитометр. Кроме того, выполнение следующих неравенств:

$$\Delta H_{01}/\Delta H_0 \ll 1; \quad \Delta H_0/H_m \ll 1, \quad (5)$$

т.е. использование избирательного сужения области измерения, позволяет существенно увеличить линейность, точность и помехоустойчивость магнитометра.

Функционирование двухступенчатого холловского магнитометра (д.х.м.), действующего по принципу следящей системы, заключается в следующем. По команде компьютера 11 (см. рис. 2) или от блока ручного управления 10 регулируемый источник постоянного тока 3 подключается к соленоиду опорного магнитного поля смещения L_1 , и в нем создается поле H_m . Далее, возникший в пленке сигнал отклика регистрируется с помощью базового холловского магнитометра 1, выходной сигнал которого подается на один из входов компаратора 4, выход которого в свою очередь подключен ко входу триггера 5. Выходы триггера 5 подключены ко входам схем логического умножения 7, 8, выдающих разрешение на поочередное подключение к счетным входам двоично-десятичных реверсивных счетчиков плеч положительной 9' и отрицательной 9'' полярности тока разрядных генераторов 2 прямоугольных импульсов. Выходы плеч положительной и отрицательной полярности тока биполярного источника через дроссели подключены ко входам токовых ключей и через резисторы R_1, R_2 – ко второму входу компаратора 4. Токовые ключи по команде компаратора 4 поочередно через емкость C и резистор R подключают выходы разрядных генераторов к соленоиду поля подмагничивания. Таким образом, поле подмагничивания осциллирующего затухающего локального магнитного поля в камере преобразователя магнитного поля суммируется с опорным магнитным полем смещения.

Поле подмагничивания создается соленоидом L_2 . При поступлении от компаратора 4 импульсов в плечо тока положительной полярности токовые ключи соединяют слаботочный регулируемый биполярный источник тока 2 с соленоидом L_2 , в результате в нем происходит накопление магнитной энергии. При смене полярностей импульсов, поступающих от компаратора 4 в токовые ключи, с помощью схемы логического умножения 7 происходит переключение плеча тока положительной полярности слаботочного биполярного источника тока 2 соленоидом поля подмагничивания на резистор R и включение в цепь соленоидом L_2 емкости C . Это приводит к зарядке конденсатора C и к преобразованию магнитной энергии в электрическую. В результате последовательных преобразований магнитной энергии в электриче-

скую и наоборот в L_2C -контуре возникает поле положительной полярности, описываемое уравнением (1).

При получении от компаратора 4 импульса, дающего разрешение на смену полярности выходного напряжения биполярного источника 2, к токовым ключам с помощью схемы логического умножения 8 подсоединяется плечо тока отрицательной полярности и через соленоид L_2 начинает протекать ток обратного направления. В этом случае накопление магнитной энергии в L_2 , а также зарядка и разрядка емкости C происходят аналогично описанному выше способу. В результате в соленоиде L_2 создается высокостабильное однородное осциллирующее затухающее локальное магнитное поле отрицательной полярности с амплитудой $-H_{01}\exp(-\beta t)$.

Таким образом, путем переключений выходных напряжений источника 2 в соленоиде L_2 создается высокостабильное биполярное однородное осциллирующее затухающее локальное магнитное поле:

$$H_1(t) = \sum_{i,j=0}^N (H_{01i} - H_{01j}) \exp(-\beta t) \cos \Omega t. \quad (6)$$

Здесь H_{01i}, H_{01j} – заданные напряженности магнитных полей подмагничивания; t – время; $i, j = 0, 1, 2, \dots, N$, где N число ступеней, заданных амплитудой $H_{01}\exp(-\beta t)$ осциллирующего затухающего локального магнитного поля.

На рис. 3 приведена блок-схема плеча тока положительной полярности биполярного источника питания соленоидом поля подмагничивания. Схема работает следующим образом. Сигналы генератора прямоугольных импульсов подаются на схему логического умножения, с выхода которой поступают на счетный вход двоично-десятичного реверсивного счетчика младшего разряда $ДДРС_1$. Последний после заполнения последовательно передает импульсы на счетные входы счетчиков старших разрядов $ДДРС_2$ – $ДДРС_N$. Сигналы на выходах $ДДРС$ предварительно, в соответствии с токами соленоидом опорного магнитного поля смещения, устанавливаются с помощью кодовых переключателей $КП$, соединенных с задающими входами $ДДРС$, или с помощью компьютера. При поступлении выходных сигналов $ДДРС$ токовые ключи $ТК$ соединяют выходы разрядных генераторов биполярных источников тока $БИТ$ с соленоидом поля подмагничивания.

Работа плеча тока отрицательной полярности биполярного источника питания соленоидом поля подмагничивания происходит аналогичным образом. В соответствии с выходным сигналом компаратора на счетный вход $ДДРС_1$ поступают сигналы от генератора прямоугольных импульсов, которые изменяют содержащуюся в $ДДРС$ информацию, ре-

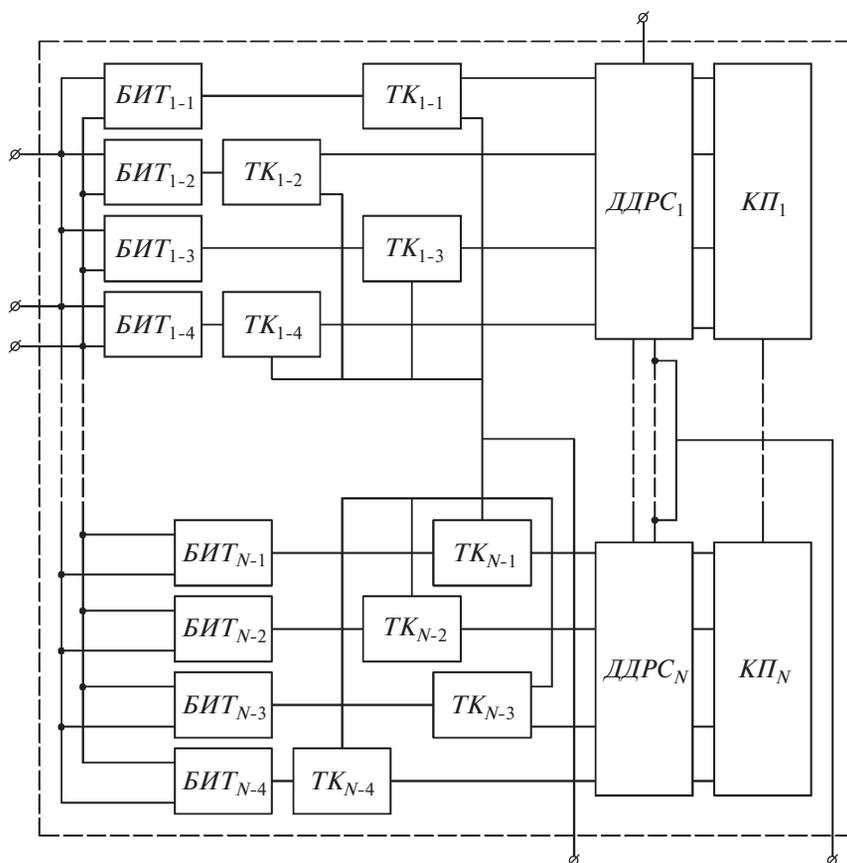


Рис. 3. Блок-схема плеча тока положительной полярности биполярного источника питания соленоидов поля подмагничивания. ДДРС – двоично-десятичные реверсивные счетчики; КП – кодовые переключатели; ТК – токовые ключи; БИТ – биполярные источники тока.

гулирующую число ступеней $H_{01} \exp(-\beta t)$ осциллирующего затухающего локального магнитного поля, и это продолжается до тех пор, пока измеряемое поле $|H_p|$ не будет обнаружено.

На рис. 4 приведена блок-схема базового холловского магнитометра первой ступени. Магнитометр работает следующим образом. Синусоидальный сигнал от задающего генератора ГСН поступает на регулируемый источник тока РИТ, питающий п.Х. Сигналы с контактов п.Х. через повторители напряжения ПН_{1,2} поступают на входы масштабного дифференциального усилителя МДУ, коэффициент усиления которого в зависимости от уровня измеряемого сигнала устанавливается вручную (на схеме не показано) или при помощи компьютера. Далее, сигнал с выхода МДУ подается на один из входов дифференциального усилителя ДУ₁, на другой вход которого через фазовращатель Φ поступает сигнал с компенсирующего сопротивления R_k . Выход ДУ₁ подключен на вход синхронного детектора СД, на опорный вход которого подается сигнал от ГСН. Далее, остаточный выходной сигнал СД вычитается ДУ₂, а полезный сигнал усиливается и посту-

пает в компьютер. Так как сигналы с холловских контактов и от R_k равны по амплитуде, то всякое неконтролируемое изменение амплитуды тока через п.Х. и уход его фазы дополнительно компенсируются ДУ₁.

Настраивают магнитометр резисторами R_1-R_4 , добиваясь наименьшего показания СД при отсутствии внешнего магнитного поля. Затем остаточный выходной сигнал СД компенсируется и усиливается ДУ₂. Благодаря применению процедуры “первоначального вычитания–усиления–повторного двукратного вычитания” повышается точность компенсации остаточного напряжения (уровень э.д.с. Холла намного повышается по сравнению с уровнем собственных шумов операционных усилителей). С ростом рабочей частоты в традиционных схемах увеличивается разность фаз между током через п.Х. и э.д.с. Холла. Это приводит к искажению магнитополевой зависимости э.д.с. Холла в случае регистрации слабых магнитных полей. Исключение искажения в предложенном магнитометре осуществляется путем подгонки к нулю фазы между током через п.Х. и э.д.с. Холла и прецизионным регулированием с

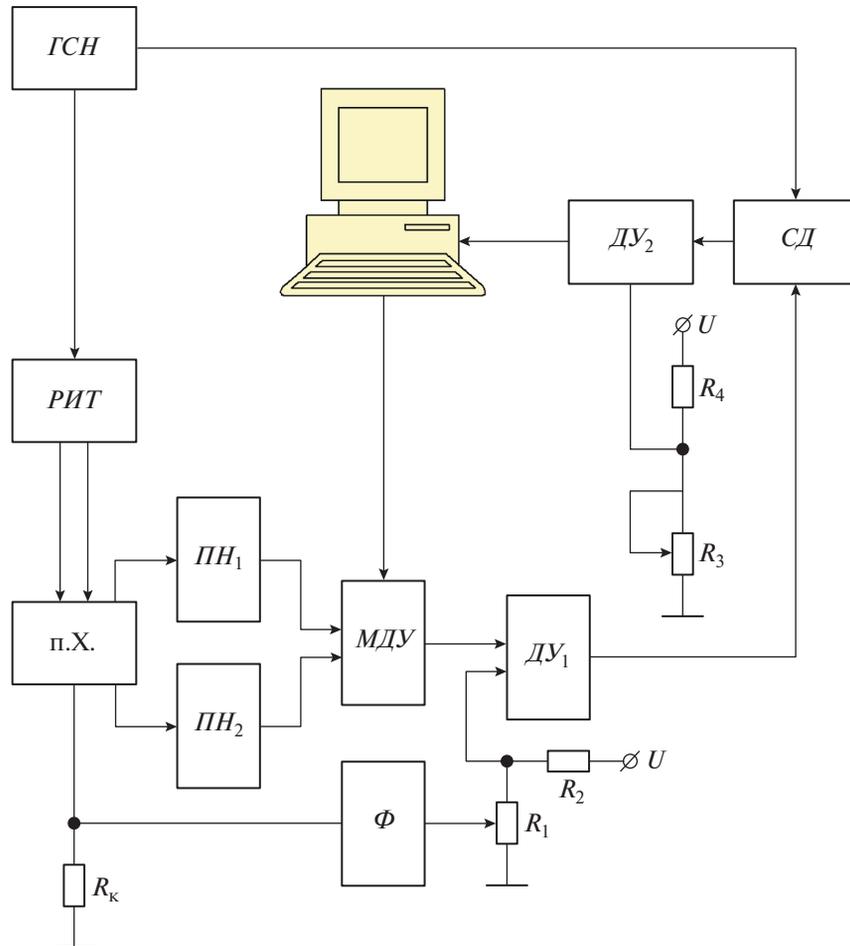


Рис. 4. Блок-схема магнитометра для измерения плотности затухающего магнитного поля $B_{tr}(H_0)$ с помощью преобразователя Холла. ГСН – генератор синусоидального напряжения; РИТ – регулируемый источник тока; п.Х. – преобразователь Холла; ПН – повторители напряжения; МДУ – масштабный дифференциальный усилитель; Ф – фазовращатель; ДУ₁, ДУ₂ – дифференциальные усилители; СД – синхронный детектор.

помощью R_k напряжения на входе Φ . Такую высокоточную процедуру удастся осуществить за счет высоколинейного, прецизионного фазовращателя, работающего в широком частотном диапазоне.

При гелиевых температурах магнитное поле образца, находящегося вблизи поверхности пленки с п.Х., измерялось работающим в замкнутом режиме магнитометром, причем измерительная часть камеры датчика помещалась внутри сверхпроводящего экрана, а вся система – внутри цилиндрического магнитного экрана, изготовленного из алюминия и пермаллоя. В случае азотных температур, когда сверхпроводящий экран переходит в нормальное состояние, магнитное поле Земли и все возможные наводки экранировались внешним большим экраном. При использовании магнитометра в качестве открытой системы внутренний и наружный магнитные экраны не использовались, а магнитное поле Земли компенси-

ровалось с помощью соленоида третьей наружной секции соосных соленоидов с индуктивностью $L_3 \approx 0.049$ Гн. Эта компенсация осуществлялась путем пропускания через соленоид L_3 постоянного тока регулируемого источника I_3 (см. рис. 2), управляемого с помощью схемы логического умножения I_2 и компьютера I_1 . Для регистрации в пространстве слабых постоянных и переменных магнитных полей магнитометр для такой открытой системы работал в качестве “антенны”.

На рис. 5 приведены зависимости $B_{tr}(H_0)$ эпитаксиальных пленок YBCO, полученные в разных технологических циклах (см. ниже). Измерения проведены с помощью предложенного д.х.м. для большого шага ΔH_0 (рис. 5а) и для малого шага изменения значения ΔH_{01} в районе скачков (рис. 5б). Согласно рис. 5, скачки на зависимостях $B_{tr}(H_0)$ для разных эпитаксиальных пленок YBCO происходят примерно при одинаковых значениях H_0 . Для работы магнитометра выбиралась пленка

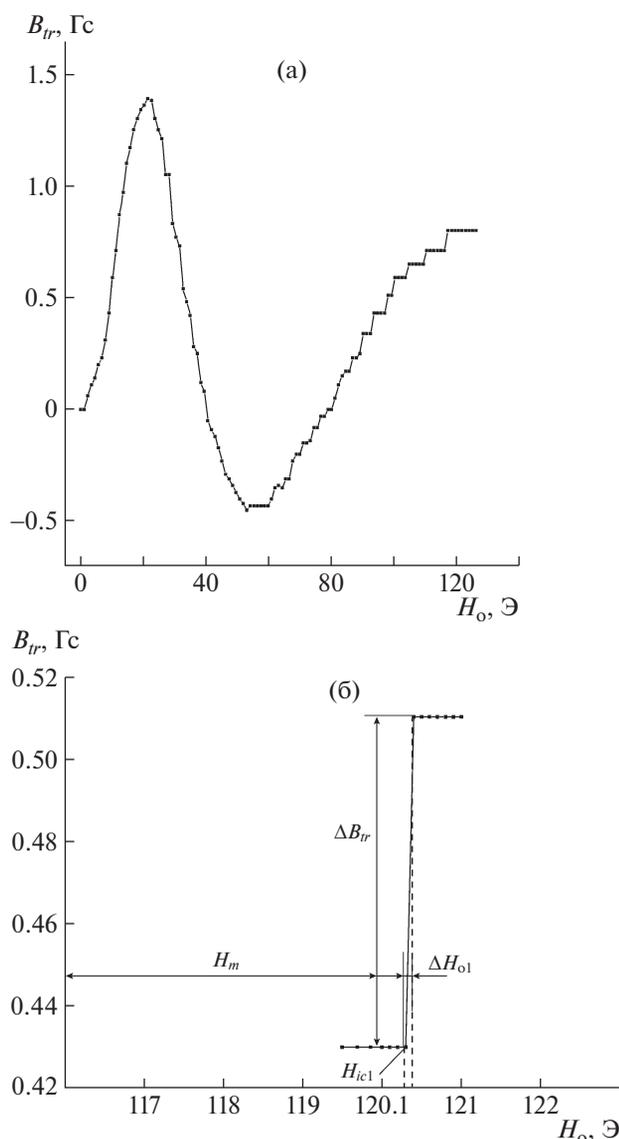


Рис. 5. Магнитолевая зависимость плотности затухающего магнитного поля $B_r(H_0)$ для эпитаксиальной пленки № 1 диаметром ~ 8 мм и толщиной $h \approx 0.4$ мкм: **а** – для большого шага ΔH_0 (измерения проведены с помощью предложенного д.х.м. при температуре 77.4 К); **б** – для малого шага изменения значения ΔH_{01} в районе скачков.

№ 1, имеющая наиболее резкий переход в области скачка при более высоком значении H_{ic1} (параметры пленки № 1 см. ниже).

На рис. 6а приведена зависимость $B_r(H_0)$ для массивного образца YBCO № 2. Согласно зависимости, приведенной на вставке к рис. 6а, в монокристаллах текстурованных квазиоднокристаллических образцах также происходит резкое проникновение магнитного потока при распаде монокристаллов на более мелкие суб- и нанокристаллиты.

На рис. 6б приведена зависимость линейных размеров a_{gi} кристаллитов и субкристаллитов от характерных значений H_{ic1} для массивного образца № 2. Согласно рис. 6б, с ростом поля линейные размеры a_{gi} субкристаллитов, участвующих в процессе захвата магнитного потока, уменьшаются от 0.36 до 0.081 мкм (принцип расчета a_g см. [5]). Погрешность определения a_{gi} обусловлена разбросом размеров субкристаллитов в силу нестройной параллельности границ двойникования и непостоянства их периода. Диапазон изменения a_g аналогичен и для YBCO-пленок, что задает пределы изменения пространственного разрешения д.х.м.

На рис. 7 приведена диаграмма работы д.х.м. Алгоритм работы заключался в следующем. Сначала пленка при выключенных с помощью компьютера I_1 (см. рис. 2) источнике питания нагревателя 15 и схеме логического умножения 14 переводилась в сверхпроводящее состояние в нулевом магнитном поле, затем ступенчато подавалось опорное магнитное поле смещения $H_0 = H_m$. После снятия поля с помощью п.Х. измерялась плотность B_{r1} затухающего магнитного поля пленки и устанавливался сигнал P_1 на выходе компаратора 4. Таким способом измерялся коэффициент усиления K_1 магнитометра до возникновения скачка магнитного отклика YBCO-пленки на магнитное поле. Полученные данные вводились в компьютер 11. Далее на опорное поле смещения H_m накладывалось поле подмагничивания – осциллирующее затухающее локальное магнитное поле:

$$H_0 \leq H_m + H_{01} \exp(-\beta t) \leq H_{ic1} \quad (7)$$

и одновременно обеспечивался доступ измеряемого магнитного поля H_p к пленке.

В случае

$$H_0 = H_m + H_{01} \exp(-\beta t) + |H_p| > H_{ic1} \quad (8)$$

менялся заранее установленный сигнал на выходе компаратора 4, переключалась полярность источника питания соленоида поля подмагничивания, и работа установки возвращалась в исходное состояние. После этого ступенчато подавалось магнитное поле с амплитудой $H_{01} \exp(-\beta t)$ меньшего уровня, так что

$$H_m + H_{01} \exp(-\beta t) + |H_p| \leq H_{ic1}, \quad (9)$$

и процедура поиска продолжалась до тех пор, пока не будет реализовано условие (4) и на выходе компаратора 4 не появится скачок сигнала из состояния P_1 к состоянию P_2 .

Измеренное обновленное значение параметра B_{r2} также вводилось в компьютер 11 и определялся коэффициент усиления магнитометра с резкими скачками магнитного отклика пленки на

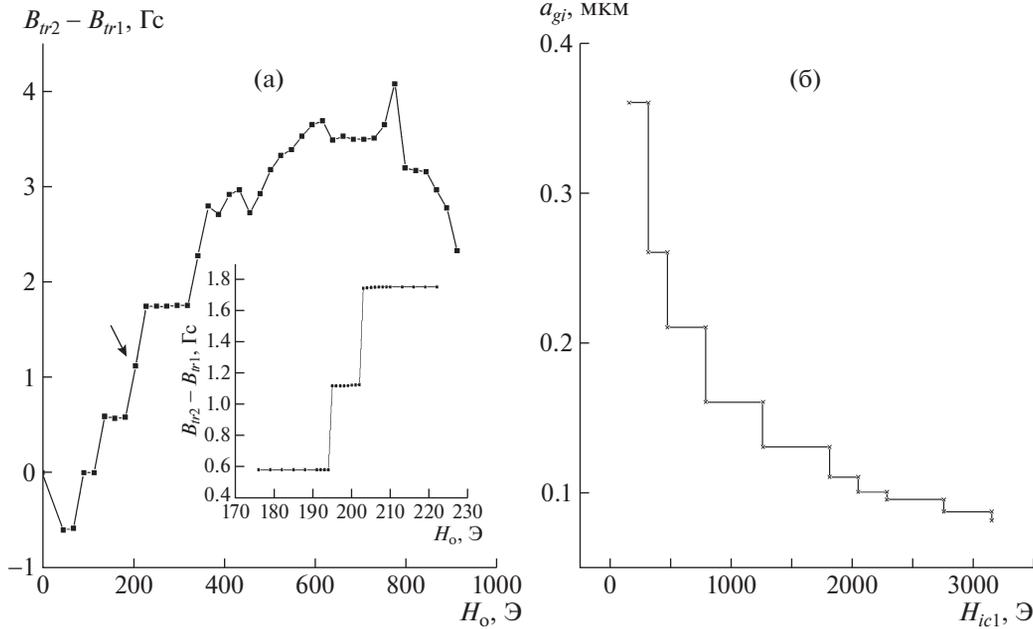


Рис. 6. Зависимости для массивного образца № 2: **а** – разности плотностей захваченных магнитных потоков $B_{tr2} - B_{tr1}$ от поля H_0 , стрелкой показана точка, вокруг которой более мелкими шагами разворачивается внешнее магнитное поле; на вставке – прецизионная картина области скачка; **б** – линейных размеров a_{gi} кристаллитов и субкристаллитов от характерных значений H_{ic1} . Температура 77.4 К.

опорное магнитное поле смещения и поле подмагничивания.

Результирующий коэффициент усиления разработанного д.х.м. определялся из формулы:

$$K = K_1 \left(\frac{H_m}{\Delta H_0} \right) \left(\frac{\Delta H_0}{H_{ic1} - H_{ol}} \right) = K_1 \frac{H_m}{(q - p)H_{ol}}. \quad (10)$$

Так как магнитный отклик пленки пропорционален пиковому значению измеряемого поля H_p , то величина H_p определялась как разность между измеренными значениями:

$$\begin{aligned} |H_p| &= \frac{\Delta B_{tr}}{K} = \frac{B_{tr2} - B_{tr1}}{K_1 \frac{H_m}{(q - p)H_{ol}}} = \\ &= \frac{(B_{tr2} - B_{tr1})(q - p)H_{ol}}{K_1 H_m}. \end{aligned} \quad (11)$$

Эпитаксиальные пленки YBCO цилиндрической формы диаметром 8 мм и толщиной h до 1 мкм с ориентацией оси \vec{c} перпендикулярно плоскости подложки получены лазерным распылением на подложке NdGaO₃ (110) стехиометрической YBCO-мишени высокой плотности. Измеренная индуктивным методом критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние составила $T_c \sim 92$ К, а ширина сверхпроводящего перехода $\Delta T_c \approx 0.6$ К (образец № 1). Для создающего опорное магнитное поле смещения

большого соленоида L_1 , намотанного медным проводом марки ПЭТВ-943 диаметром 0.25 мм, активное сопротивление составляло $r_1 \approx 20$ Ом при температуре 77.4 К. Активные сопротивления соленоидов L_2 и L_3 , намотанных медным проводом марки ПЭТВ-943 диаметром 0.17 мм, составляли $r_2 = r_3 \approx 2.2$ Ом при температуре 77.4 К. Емкость конденсатора, включенного параллельно к индуктивности L_2 , составляла $C \approx 0.1$ мкФ. Коэффициент затухания колебаний $\beta \approx 22$ с⁻¹, собственная частота колебательного контура $f \approx 500$ кГц. Параллельно большому соленоиду L_1 включен конденсатор емкостью $C \approx 0.3$ мкФ. В этом случае коэффициент затухания колебаний $\beta \approx 20$ с⁻¹, а собственная частота колебательного L_1C -контура – $f \approx 10$ кГц. Частота синхронного переключения полей H_m и $H_{ol} \exp(-\beta t) \cos \Omega t$ составляла $f \approx 1$ кГц.

Для обеспечения работы магнитометра на более высоких частотах и в импульсном режиме необходимо вместо стандартного п.Х. использовать высокочастотные датчики. Путем изменения емкости, параллельно подключенной к соленоиду подмагничивания L_2 , в диапазоне 0.01–0.1 мкФ, а емкости, подключенной к соленоиду L_1 , в диапазоне 0.03–0.5 мкФ удалось обеспечить работу следящей системы на частотах выше 100 кГц и повысить быстродействие магнитометра. Так как в работах [1–3] индуктивность соленоида L_1 на

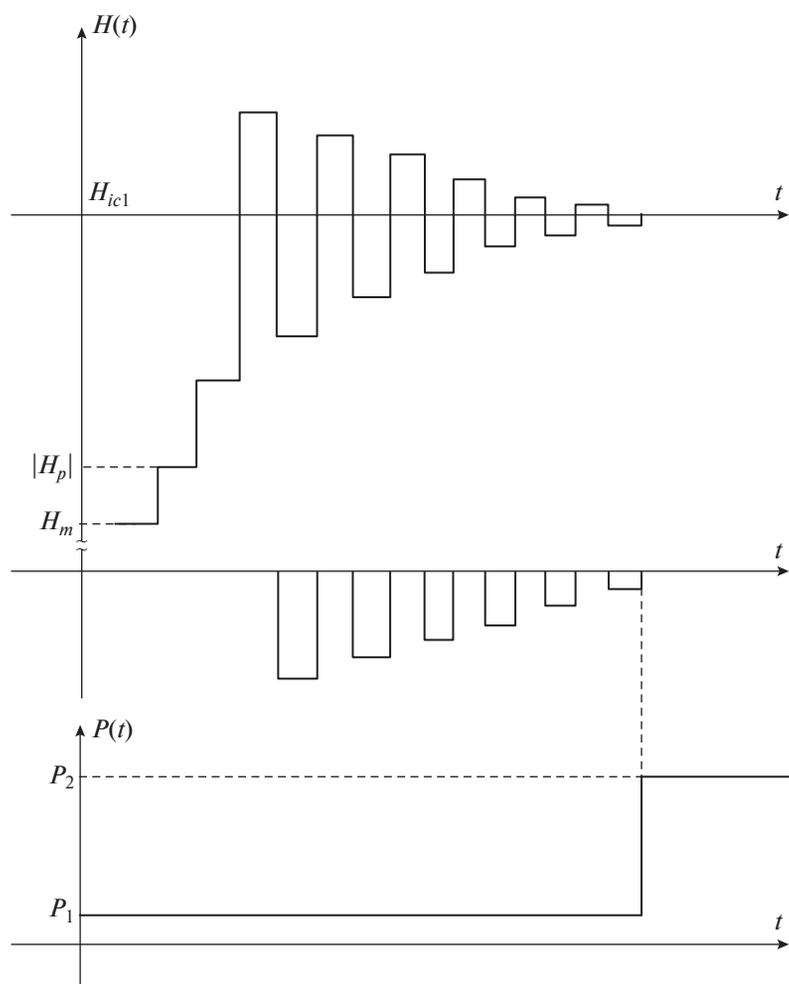


Рис. 7. Диаграмма работы д.х.м. Диаграмма заимствована из [1] с добавлением поля H_m .

порядок больше индуктивности L_2 , быстродействие магнитометра [1–3] на порядок ниже предложенного в данной работе магнитометра. Быстродействие магнитометра ограничено скоростью процесса релаксации измеряемой плотности затухающего магнитного поля в пленке. В связи с тем, что после снятия ступенчато приложенного к пленке осциллирующего затухающего локального магнитного поля положительные и отрицательные полупериоды хвостовой части затухающего магнитного поля взаимокompенсируются, рожденные этими полупериодами вихри и антивихри сверхпроводника быстро аннигилируют, препятствуя выходу вихрей из пленки и тем самым останавливая процесс магнитной релаксации в ней. Переключение с помощью следящей системы полярностей амплитуды $H_{o1} \exp(-\beta t)$ ступеней осциллирующего затухающего локального магнитного поля также приводило к жесткой временной фиксации плотности затухающего магнитного поля.

Согласно рис. 5а, значения B_{lr} между ступенями осциллирующего затухающего локального магнитного поля не меняются и при этом остаются постоянными в течение до 5 мин после снятия ступени. Согласно данным, приведенным на рис. 5, использованная в магнитометре эпитаксиальная пленка № 1 толщиной $h \approx 0.5$ мкм имела следующие параметры: $H_{ic1} \approx 120.252$ Э, $\Delta B_{lr} \approx 0.082$ Гс, $\Delta H_o \approx 4.66$ Э, $H_{o1} \approx 0.1$ Э. Соответствующая этим параметрам амплитуда опорного магнитного поля смещения выбиралась равной $H_m \approx 120.251$ Э. Такие характеристики обеспечивали чувствительность к суммарному полю в камере датчика $K \approx 8 \cdot 10^{-7}$ Гс/Гц^{1/2}, что более чем на порядок превышает чувствительность магнитометров [1–3]. При этом чувствительность K_1 разработанного базового магнитометра составляла $\approx 2.5 \cdot 10^{-3}$ Гс/Гц^{1/2} [10].

Пространственное разрешение магнитометра определяется линейными размерами двойников, которые при поле $H_{ic1} \approx 120.252$ Э составляли $a_g =$

$= (\Phi_0/H_{ic1})^{1/2} \approx 300$ нм. Здесь $\Phi_0 \approx 2.07 \cdot 10^{-7}$ Гс · см² – квант магнитного потока. Смещение рабочей точки холловского магнитометра с помощью опорного поля смещения H_m аналогично смещению напряжения прецизионных усилителей и позволяет не только повысить точность и линейность, но и расширить диапазон измерения магнитометра путем регулирования H_m в диапазоне 0–150 Э. Ступенчатое изменение величины $(q-p)H_{ic1}$ в узком диапазоне измерения ΔH_0 (см. уравнение (4)) позволило существенно сдвинуть диапазон измерения предложенного магнитометра в область слабых полей от значений $8 \cdot 10^{-7}$ – $2.5 \cdot 10^{-3}$ Э.

Для оценки чувствительности магнитометра сначала на сравнительно большом токе с помощью откалиброванного п.Х. устанавливалась постоянная (ток–поле) катушки L_1 , а затем при известном токе определялась величина поля и вычислялась магнитная чувствительность магнитометра. Далее, после установления чувствительности базового магнитометра для тока на три порядка меньше тока через соленоид L_1 , устанавливалась постоянная (ток–поле) катушек L_2 и L_3 , после чего при известном токе определялась величина поля и вычислялась магнитная чувствительность магнитометра от суммарных полей соленоидов L_1 и L_2 . Входной сигнал, соответствующий полю H_p , создавался с помощью соленоида L_3 .

На рис. 8а приведен выходной сигнал компаратора, на один из входов которого с помощью резисторов через усилитель подавался опорный сигнал, пропорциональный току через L_3 , а на второй вход – выходной сигнал магнитометра. При выравнивании сигналов происходил скачок выходного сигнала компаратора из состояния U_1 в состояние U_2 . Установленное значение порогового сигнала соответствовало значению поля $\approx 8 \cdot 10^{-7}$ Гс/Гц^{1/2}. Для определения неизвестного измеряемого поля H_p , направленного под произвольным углом к поверхности пленки, его компоненты измерялись непосредственно на поверхности и вокруг образца. Для этого располагали три одинаковых по техническим характеристикам п.Х. на трех строго взаимно перпендикулярных гранях куба малого размера, который закреплялся на медной подложке. Таким образом измеряли три компоненты поля $H_{p_x}, H_{p_y}, H_{p_z}$, после чего определяли величину поля $H_p = (H_{p_x}^2 + H_{p_y}^2 + H_{p_z}^2)^{1/2}$ произвольного направления. Если H_p направлено перпендикулярно к поверхности пленки с п.Х., то величина поля максимальна и легко измеряется.

Разработанный в [11] трехмерный сканирующий холловский микроскоп позволяет в однородном поле картографировать распределение слабых полей с разрешением 1 мкм, однако при

приложении осциллирующего затухающего локального магнитного поля к исследуемому объекту можно добиться еще более высокого разрешения, ≈ 0.081 мкм [5, 6]. Именно этим способом нами были измерены все тензоры магнитного поля – основные элементы матрицы градиентов магнитного поля H_p :

$$H_{p_{x,y,z}} = \begin{vmatrix} \frac{\partial H_{p_x}}{\partial x} & \frac{\partial H_{p_x}}{\partial y} & \frac{\partial H_{p_x}}{\partial z} \\ \frac{\partial H_{p_y}}{\partial x} & \frac{\partial H_{p_y}}{\partial y} & \frac{\partial H_{p_y}}{\partial z} \\ \frac{\partial H_{p_z}}{\partial x} & \frac{\partial H_{p_z}}{\partial y} & \frac{\partial H_{p_z}}{\partial z} \end{vmatrix}.$$

При усовершенствовании сканирующего механизма микроскопа [11] путем установки пьезопреобразователя можно обнаружить двойники меньшего размера и измерить H_{ic1} нанокристаллитов, что позволит достичь еще более высокого пространственного разрешения предлагаемого в данной работе магнитометра. В таких случаях размеры рабочей поверхности чувствительного элемента могут сравняться с размерами суб- и нанокристаллитов (10–300 нм) [5, 6]. Такое высокое пространственное разрешение превосходит данный параметр для преобразователей на основе гетеропереходов с двумерным электронным газом, имеющих размеры рабочей поверхности $\sim 0.3 \times 0.3$ мкм. Кроме того, как показано в [5, 6], в этом случае каждый нанокристаллит может захватывать по одному кванту магнитного потока, и скачки на магнитолевой зависимости плотности затухающего магнитного поля при поле H_{ic1} (см. рис. 5) станут более резкими. Чувствительность магнитометра в этом случае повысится более чем на порядок и может достигнуть $K \approx 10^{-8}$ Гс/Гц^{1/2}. Это превосходит чувствительность феррозондовых магнитометров при лучших (на порядки) значениях линейности и пространственного разрешения.

Благодаря трем факторам, а именно: смещению начала рабочей точки п.Х. (в данном случае до $H_{ic1} \approx 120.252$ Э), сужению диапазона его работы в районе $\Delta H_0 \approx 4.66$ Э (см. рис. 5) и реализации зависимости (3), коэффициент нелинейности оказался меньше 0.01% (в основном обусловлен нелинейностью п.Х.) и не зависел от достигнутой высокой чувствительности и точности магнитометра во всем диапазоне измерений магнитометра. Для определения коэффициента нелинейности магнитометра через соленоид L_3 пропускали строго линейно нарастающий во времени ток и измеряли величину поля.

На рис. 8б приведены временные зависимости выходного сигнала магнитометра и поданного на второй вход дифференциального усилителя вы-

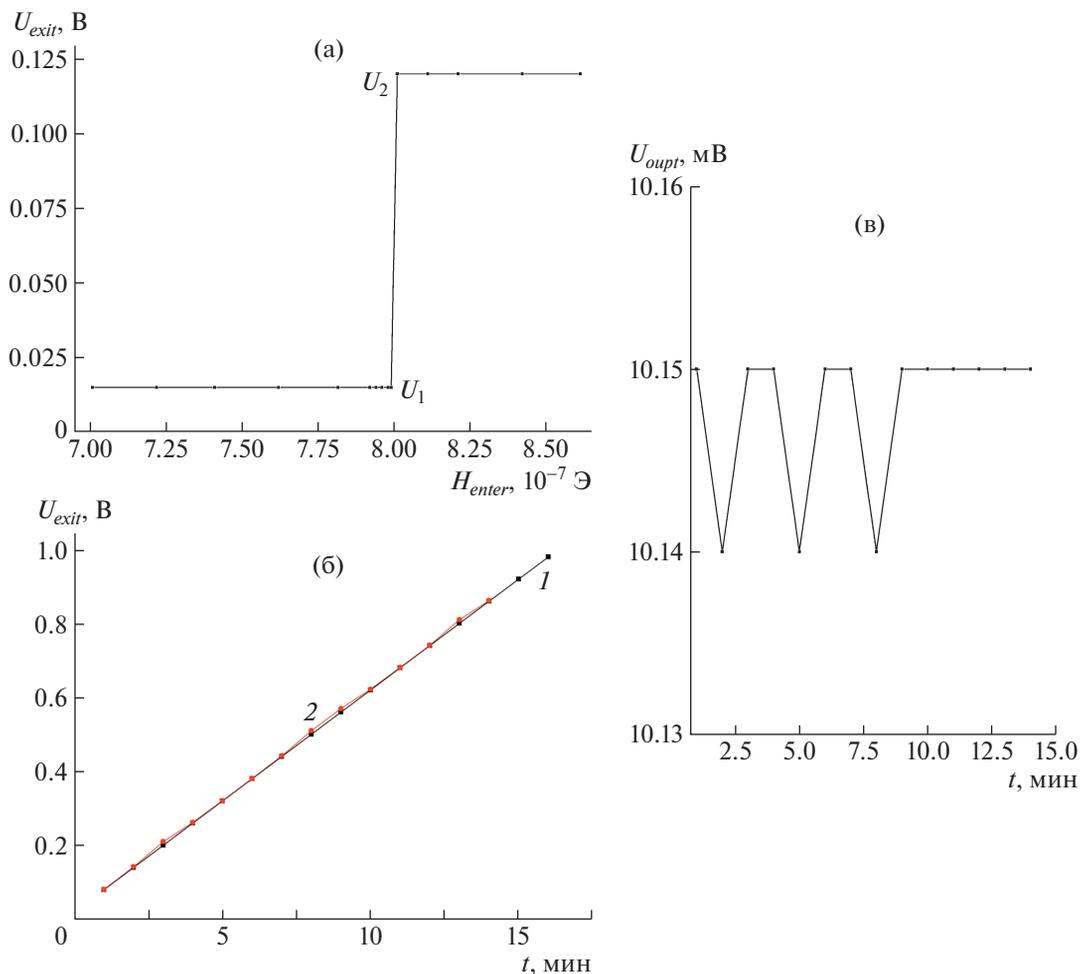


Рис. 8. а – выходной сигнал компаратора, на один из входов которого подавался опорный сигнал, пропорциональный току через L_3 , а на второй вход – выходной сигнал магнитометра; б – временные зависимости выходного сигнала магнитометра (2) и выходного напряжения усилителя (1) (на схеме не показан); в – временная зависимость выходного сигнала дифференциального усилителя (на схеме не показан), соответствующего разностному сигналу между сигналами на выходах магнитометра и усилителя.

ходного напряжения усилителя, которое пропорционально току через соленоид L_3 . На рис. 8в приведена временная зависимость выходного сигнала дифференциального усилителя, соответствующая разностному сигналу на выходах магнитометра и усилителя. По степени отклонения от линейности зависимостей тока и поля, а также по уровню нулевого сигнала на выходе дифференциального усилителя было установлено, что коэффициенты нелинейности и неточности усиливающей среды при выполнении магнитометром условия (3) в области слабых полей, $<0.01\%$, уменьшались с ростом уровня сигнала.

Таким образом, можно сделать вывод, что создана линейная высокоточная усиливающая среда для слабых магнитных полей. Преимуществом предложенного способа магнитометрии является то, что измеряемая величина устанавливалась с

помощью следящей поисковой системы, позволяющей менять амплитуду ступени поля $H_1(t)$, согласно формуле (9), и путем подгонки опорного поля осуществлять реализацию формулы (4) с высокой точностью. Вследствие того что амплитуда ступенек $H_{01}\exp(-\beta t)$ осциллирующего затухающего локального магнитного поля задавалась с помощью высокостабильных разрядных генераторов [12], стабильность и точность магнитометра существенно повышались, так как разряды, соответствующие измеряемому полю, фиксировались с высокой точностью.

Несмотря на то что разработанные нами методики и технологии находятся в стадии развития, полученные результаты уже сейчас позволяют сделать достаточно оптимистические прогнозы для оценки предельных значений таких параметров магнитометра, как чувствительность, линей-

ность, точность, быстродействие и пространственное разрешение. Такие прогнозы базируются на следующих факторах:

а) минимальные размеры двойников могут достигать $d \approx 20$ нм [7, 8] (и меньше);

б) с учетом размагничивающего фактора пленки значения H_{ic1} двойников могут достигать 10^4 Э при температуре ~ 77.4 К и до $(5-10) \cdot 10^4$ Э при 4.2 К;

в) чувствительность базового холловского магнитометра может составлять $\approx 10^{-4}$ Гс/Гц^{1/2} (см. [13] и приведенную там литературу);

г) эффективная площадь рабочей поверхности п.Х. меньше, чем заданный размер его рабочей поверхности (чувствительная зона п.Х. расположена в основном в узкой полосе вблизи холловских контактов [14]);

$$д) H_m/\Delta H_o \approx 10^2-10^4, (q-p)(\Delta H_o/\Delta H_{o1}) \approx 10^3.$$

Перечисленные выше факторы позволяют сделать вывод, что чувствительность д.х.м. может достигать $\geq 10^{-9}-10^{-11}$ Гс/Гц^{1/2} при пространственном разрешении $\approx 10-20$ нм, при этом д.х.м. имеет высокую степень линейности, точности и быстродействия. Магнитометры с такими значениями чувствительности приближаются по чувствительности к СКВИД-магнитометрам, но превосходят их по остальным параметрам.

Исходя из полученных результатов, можно сделать следующие предположения и оценки. Так как значение результирующего коэффициента усиления двухступенчатого магнитометра напрямую зависит от коэффициента преобразования преобразователя магнитного поля и магнитометра первой ступени (см. формулу (11)), то если на первом этапе использовать магнитометр на основе СКВИД, обеспечивающий чувствительность $\approx 10^{-8}-10^{-11}$ Гс/Гц^{1/2} [15, 16], на втором этапе чувствительность может еще возрастать на $\approx 10^{-2}-10^{-4}$ Гс/Гц^{1/2}. Кроме этого, как показано в [17], размеры СКВИД можно уменьшить до 100 нм. Такие предельные чувствительности магнитометра являются очень важными для высокоточного локального и селективного исследования квантово-механических процессов в веществах в условиях магнитного вакуума и низких температур при пространственном разрешении магнитометра ≈ 20 нм.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания по теме 0030-2019-0014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ростами Х.Р.* // XXVII Международная конференция “Электромагнитное поле и материалы” (фундаментальные физические исследования). М.: Изд-во МЭИ, 2019. С. 536.
2. *Rostami Kh.R., Nikitin I.P.* // Measurement. 2020. Т. 153. Р. 107423. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107423>
3. *Ростами Х.Р., Никитин И.П., Лузанов В.А.* // Радиотехника и электроника. 2021. Т. 66. № 10. С. 1029. <https://doi.org/10.31857/S0033849421100132>
4. *Eisterer M.* // Phys. Rev. B. 2019. V. 99. P. 094501. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.094501>
5. *Rostami Kh.R.* // Int. J. Mod. Phys. B. 2018. V. 32 (31). P. 1850346. <https://doi.org/10.1142/S0217979218503460>
6. *Ростами Х.Р.* // Письма в ЖЭТФ. 2018. Т. 108. С. 755. <https://doi.org/10.1134/S0370274X18230030>
7. *Nakahara S., Boone T., Yan M.F., Fisanick G.J., Johnson D.W.* // J. Appl. Phys. 1988. V. 63. P. 451. <https://doi.org/10.1063/1.341149>
8. *Абрикосов А.А., Буздин А.И., Кулич М.Л., Купцов Д.А.* // ЖЭТФ. 1989. Т. 95. № 1. С. 371.
9. *Ozmanyany Kh.R., Sandomirskii V.B., Sukhanov A.A.* // Superconductor Science and Technology. 1990. V. 3. P. 255. <https://doi.org/10.1063/1.341149>
10. *Ростами Х.Р.* // ПТЭ. 2016. № 2. С. 112. <https://doi.org/10.7868/S0032816216010110>
11. *Ростами Х.Р.* // ЖТФ. 2020. Т. 90. № 12. С. 2066. <https://doi.org/10.21883/JTF.2020.12.50123.291-18>
12. *Ростами Х.Р.* Патент на изобретение № 2007862 РФ. // БИ. 1994. № 3. С. 1.
13. *Игнатъев В.К., Орлов А.А., Перченко С.В., Станкевич Д.А.* // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. № 15. С. 3. <https://doi.org/10.21883/pjtf.2017.15.44864.16434>
14. *Манторов В.В.* // Изм. техника. 1994. № 4. С. 41.
15. Слабая сверхпроводимость: Квантовые интерферометры и их применения / Под ред. Б.Б. Шварца и С. Фонера. М.: Мир, 1980.
16. *Limes M.E., Foley E.L., Kornack T.W., Caliga S., McBride S., Braun A., Lee W., Lucivero V.G., Romalis M.V.* // Phys. Rev. Applied. 2020. V. 14. P. 011002. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.14.011002>
17. *Morosh V., Linek J., Müller B., Martínez-Pérez M.J., Wolter S., Weimann T., Beyer J., Schurig T., Kieler O., Zorin A.B., Kleiner R., Koelle D.* // Phys. Rev. Applied. 2020. V. 14. P. 054072. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.14.054072>

УДК 621.384.665+621.387.332

УДАРНЫЙ МАГНИТ ДЛЯ ВЫВОДА ПУЧКА ИЗ БУСТЕРА В КАНАЛ “БУСТЕР–НУКЛОТРОН” КОМПЛЕКСА NICA

© 2022 г. О. В. Анчугов^а, Д. А. Шведов^{а,*}, В. А. Киселев^а, А. Н. Журавлев^а,
С. В. Синяткин^а, Д. И. Бажутов^а, А. В. Тузиков^б, А. А. Фатеев^б, А. С. Петухов^б

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

^б Объединенный институт ядерных исследований
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

*e-mail: D.A.Shvedov@inp.nsk.su, shvedda@mail.ru

Поступила в редакцию 29.12.2021 г.

После доработки 02.02.2022 г.

Принята к публикации 03.02.2022 г.

Для ускорительного комплекса NICA в ОИЯИ (Дубна) разработан ударный магнит для выпуска ионов в канал, соединяющий синхротроны Бустер и Нуклотрон. Для получения необходимого значения магнитного поля 0.17–0.18 Тл в области выводимого пучка была применена несимметричная конструкция магнита без использования ферромагнитного сердечника. Предложена схема питания ударного магнита с помощью двух генераторов разной полярности, подключенных с противоположных концов. Данный ударный магнит позволил успешно вывести ионы He и Fe из Бустера NICA в соответствии с заданными параметрами.

DOI: 10.31857/S0032816222040024

1. “БЕЗЖЕЛЕЗНЫЕ” УДАРНЫЕ МАГНИТЫ

1.1. Симметричная схема формирования поля

В ударных магнитах без ферромагнитных сердечников, в отличие от часто используемых си-

стем – ферритовых кикеров с керамической вакуумной камерой [1], отклоняющее магнитное поле формируется посредством токонесящих проводников и проводящих экранов [2]. Один из наиболее простых вариантов такого магнита показан на

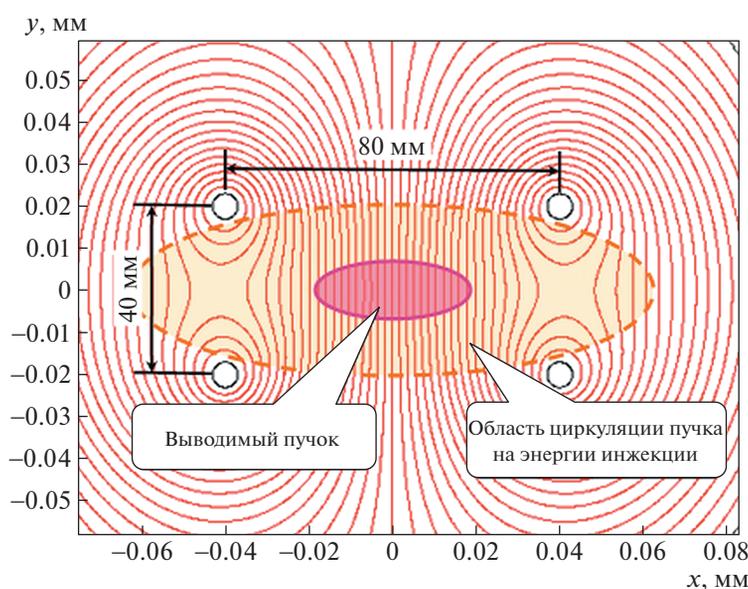


Рис. 1. Схема формирования магнитного поля токонесящими проводниками.

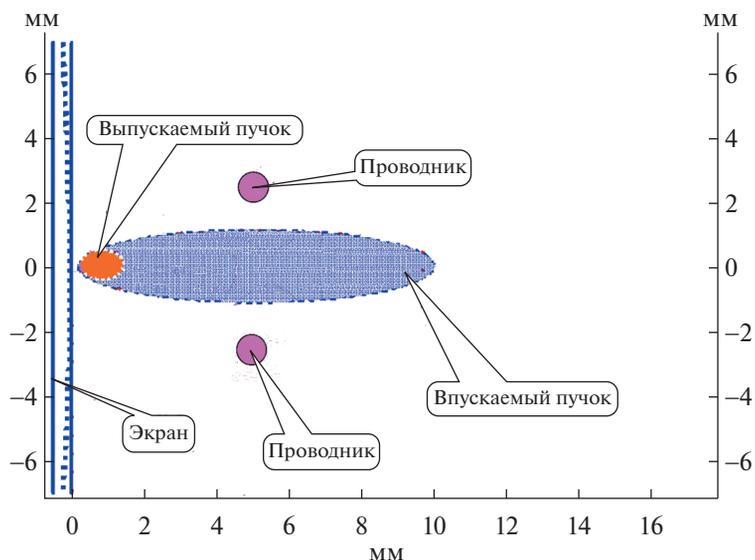


Рис. 2. Схема расположения пучков относительно элементов ударного магнита.

рис. 1, где наглядно иллюстрируется характерная ситуация для ионного бустера, когда инжектируемый пучок заполняет весь акцептанс. Далее, в процессе ускорения пучок адиабатически затухает и к моменту выпуска имеет существенно меньший размер. И именно в таких условиях энергетическая эффективность “безжелезного” варианта магнита может быть сравнима или даже превышать эффективность традиционных вариантов. При этом может быть достигнута достаточно высокая однородность магнитного поля в рабочей области.

1.2. Несимметричный кикер-магнит

При выводе пучков с размерами, значительно меньшими размеров камеры, в зоне вывода обычно используют предварительное адиабатическое смещение пучка в сторону вывода – так называемый “бамп”. Это позволяет существенно снизить требования к величине интеграла поля ударного магнита. Для таких вариантов вывода пучков может быть использована “несимметричная” конструкция ударного магнита без ферромагнитного сердечника как менее энергозатратная для создания поля в нужной области апертуры ускорителя.

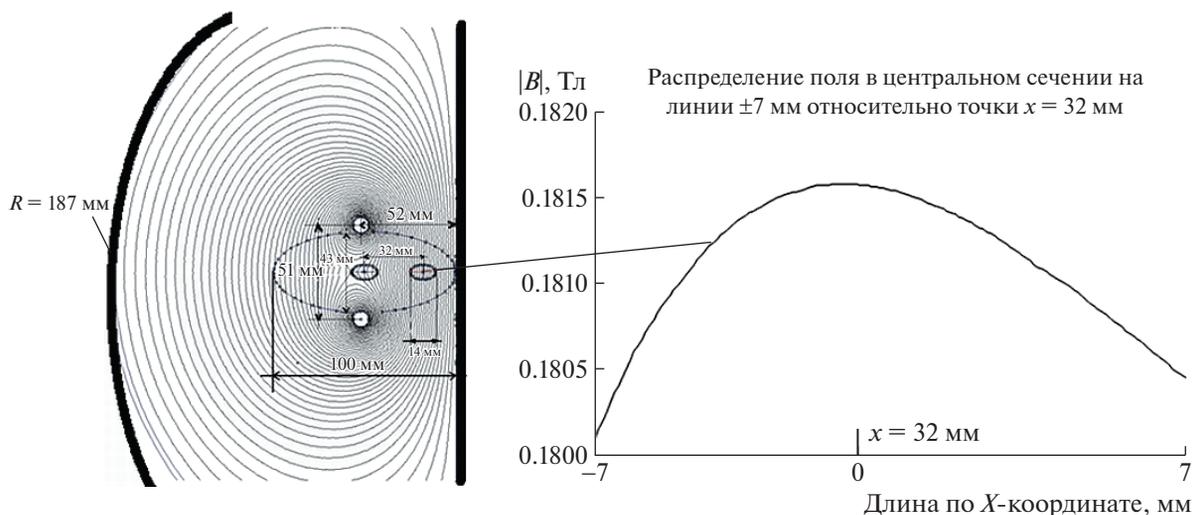


Рис. 3. 2D-картина поля ударного магнита в поперечном сечении и однородность поля в области пучка.

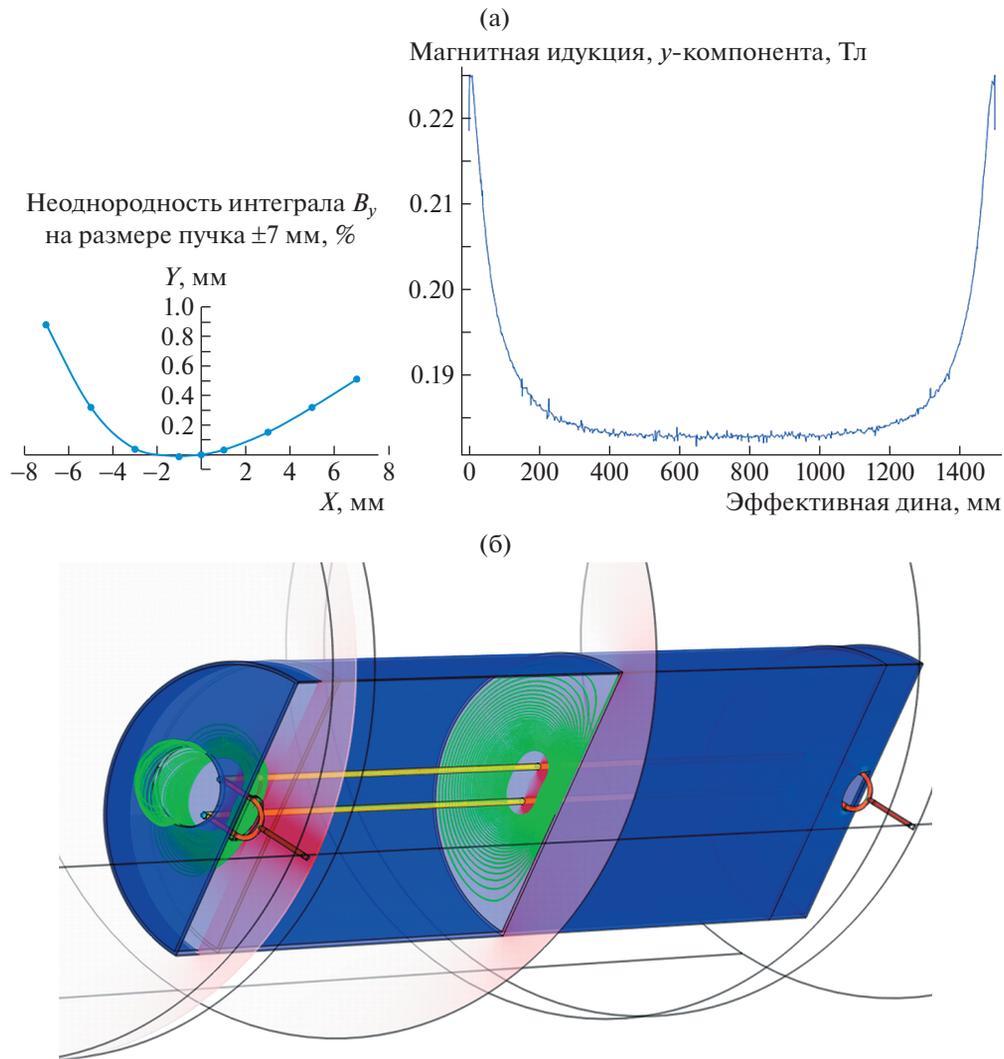


Рис. 4. а – компьютерное 3D-моделирование поля ударного магнита: неоднородность поперечного интеграла поля и распределение у-компоненты поля на эффективной длине магнита; б – структура силовых линий в двух поперечных сечениях – в центре и на входе в магнит.

Принципиальная конструкция такого ударного магнита представлена на рис. 2.

Магнитное поле в области выводимого пучка формируется парой токнесущих проводников и проводящим экраном. В простейшем случае экран плоский.

2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УДАРНОГО МАГНИТА ВЫВОДА ПУЧКА ИЗ БУСТЕРА КОМПЛЕКСА NICA

Для ускорительного комплекса NICA (ОИЯИ, г. Дубна) [3] был разработан ударный магнит для выпуска ионов в канал, соединяющий синхротроны Бустер и Нуклотрон [4]. Конструкция ударного магнита не имеет ферромагнитного сер-

дечника и состоит из одной пары проводников, соединенных параллельно, и стального экрана с полукруглым сечением, имеющим плоскую стенку в районе выводимого пучка [5]. Стенка заменяет вторую пару проводников с противоположным направлением тока, симметричную относительно центра пучка. Индуктивность данной конструкции составляет 650 нГн. Взаимная геометрия электродов и экрана формирует на орбите пучка необходимую конфигурацию магнитного поля с однородностью порядка 1.6% (рис. 3). Основные параметры ударного магнита приведены ниже:

- Эффективная длина магнита, м 1.6
- Максимальная жесткость выводимых частиц, Тл м 25
- Максимальное магнитное поле, Тл 0.18

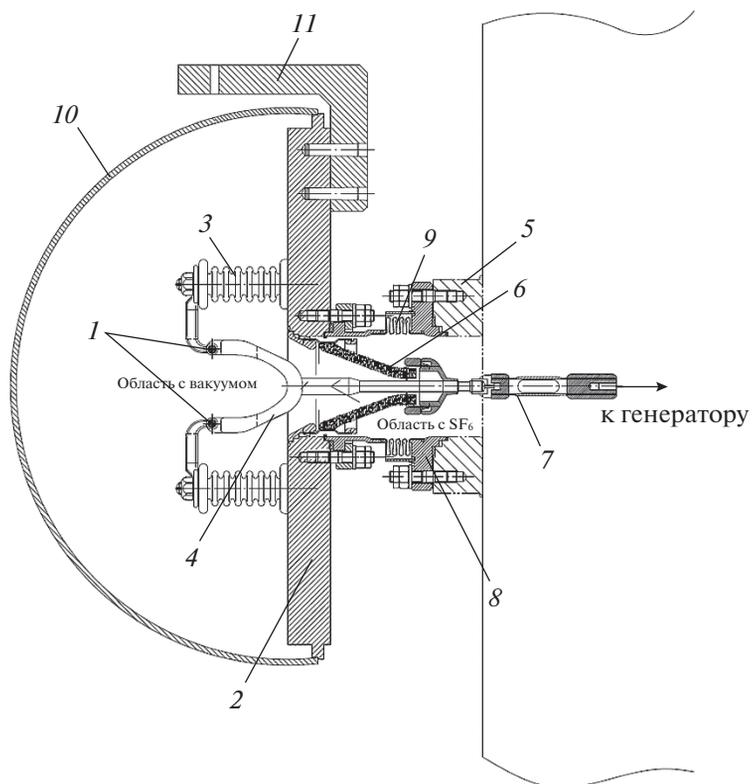


Рис. 5. Поперечное сечение ударного магнита в месте высоковольтного ввода генератора. 1 – рабочие электроды; 2 – экранирующая опорная стенка (плита); 3 – опорные изоляторы; 4 – держатель электродов; 5 – фланец корпуса генератора; 6 – проходной высоковольтный изолятор; 7 – гибкая проводящая часть токоввода; 8 – корпус токоввода; 9 – сильфонная развязка; 10 – экран; 11 – геодезический кронштейн.

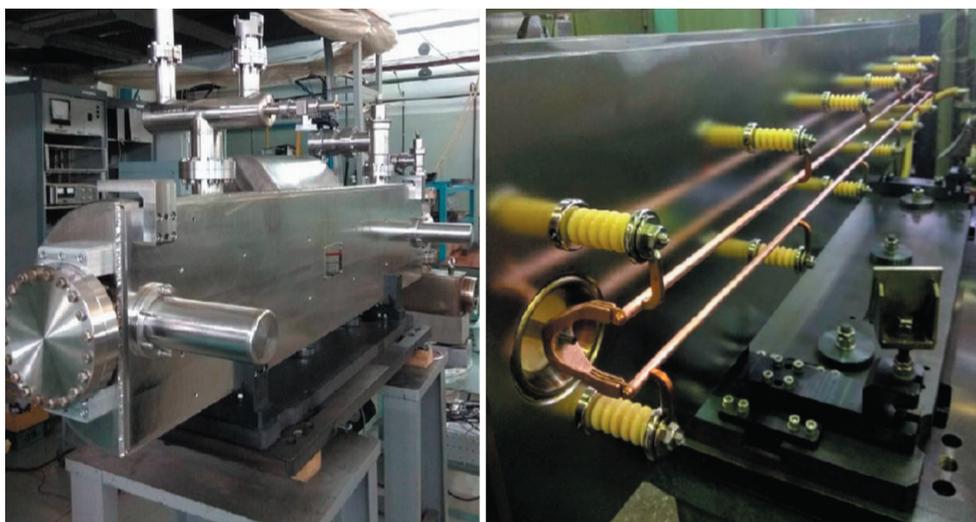


Рис. 6. Ударный магнит в процессе производства: слева – общий вид готового магнита с заглушками, защищающими высоковольтные токовводы; справа – внутренняя вакуумная часть магнита с рабочими электродами.



Рис. 7. Генераторная часть токоввода с гибким контактом.

– Максимальный ток в электродах, кА	32
– Длительность “плато импульса”, нс	500
– Длительность переднего фронта импульса, нс	500
– Диаметр рабочих электродов, мм	8

Для оптимизации схемы питания ударного магнита были промоделированы различные режимы. В результате выбрана схема питания пары электродов с индуктивностью 650 нГн с помощью двух генераторов, подключенных с противоположных концов с разной полярностью токов выходных импульсов. Такая схема питания позволила уменьшить эффективную индуктивность ударного магнита в 2 раза и в результате получить необходимую скорость нарастания фронта импульса и длительность “плато” при приемлемых параметрах генератора.

На рис. 4 показаны результаты моделирования поля ударного магнита в 3D-модели с помощью пакета COMSOL.

3. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ УДАРНОГО МАГНИТА

На рис. 5 показано поперечное сечение магнита в месте токоввода и отмечены основные узлы.

Быстрый вывод ионов из Бустера осуществляется в 2 этапа. На первом этапе циркулирующий пучок подводится к плите (2 на рис. 5). На втором

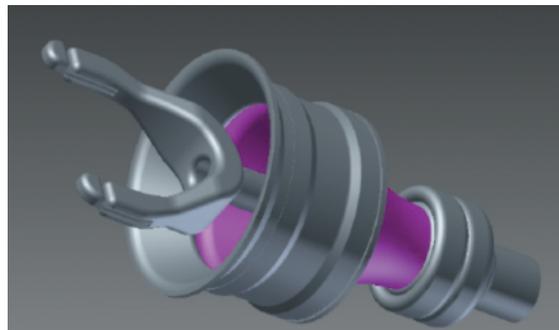


Рис. 8. Электродная часть токоввода.

этапе ударный магнит воздействует на пучок, и осуществляется собственно вывод ионов из Бустера.

На рис. 6 показаны фотографии общего вида готового магнита с заглушками, защищающими высоковольтные токовводы, и внутренней вакуумной части магнита с рабочими электродами.

Высоковольтные вводы (см. рис. 5) представляют собой коаксиальную конструкцию, состоящую из герметичного корпуса из нержавеющей стали, медного гибкого токоввода 7 со стороны входа в корпус генератора, проходного высоковольтного изолятора 6 из вакуумно-плотной керамики с содержанием Al_2O_3 99.7% и держателя электродов 4. Вводы имеют рабочую среду элегаза (SF_6) под давлением до 0.5 избыточной атмосферы и рассчитаны на прохождение на электроды кикера импульсов амплитудой до 60 кВ. Держатель электродов 4 позволяет компенсировать возможные тепловые деформации конструкции при вакуумном прогреве магнита и при воздействии на электроды механических колебаний при прохождении по ним высоковольтного импульса. Сами электроды с держателем определенной формы выставлены с необходимым зазором по вертикали и горизонтали, согласно размерам апертуры циркулирующего пучка, и не препятствуют его прохождению по вакуумной камере. Электроды крепятся к экранирующей плите с помощью опорных керамических изоляторов 3. Количество изоляторов оптимизировано на основании расчетов механических нагрузок при прохождении рабочих импульсов.

На рис. 7 показана часть токоввода со стороны входа в корпус генератора. Гибкий проводник (см. рис. 5) состоит из медной оплетки с внутренней непроводящей шпонкой для поддержания объемной формы проводника. Такая конструкция позволяет проводить точное сочленение маг-

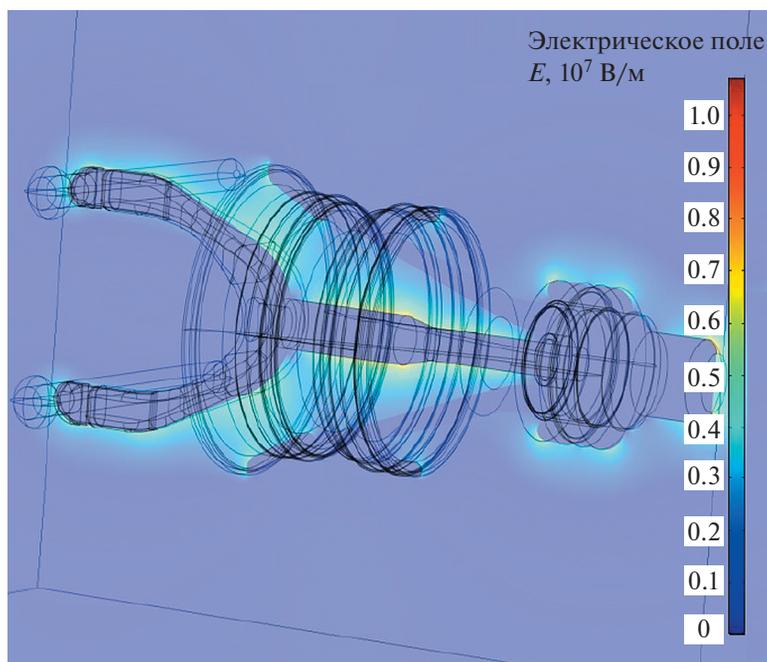


Рис. 9. Результаты моделирования напряженности электрического поля.

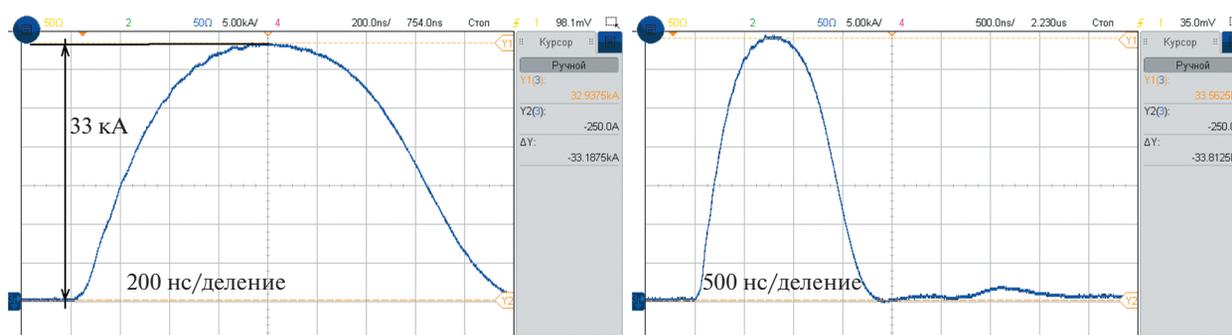


Рис. 10. Результаты испытаний генераторов ударного магнита на эквивалентную нагрузку. Сигнал с пояса Роговского при зарядном напряжении 47 кВ. Амплитуда тока 33 кА.

нита с генераторами, исключить возможные механические нагрузки на изолятор и обеспечить надежные электрические контакты. Сам ударный магнит размещен на специальной подставке и выставляется на ускорителе по геодезическим знакам, расположенным на кронштейнах *II* (см. рис. 5), с помощью специальных регулировочных элементов.

Для электродной части токоввода (рис. 8) было проведено компьютерное моделирование в электростатическом режиме для выявления особо напряженных мест, что было учтено при оптимизации конструкции корпуса ввода. Полученные в

рабочем варианте конструкции максимальные напряженности поля до 90 кВ/см как в сверхвысоком вакууме, так и в атмосфере SF₆ являются вполне допустимыми (рис. 9).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ УДАРНОГО МАГНИТА

После сборки магнита были проведены вакуумные испытания, в ходе которых достигнут вакуум до 10⁻¹⁰ Торр. Также были проведены электрические испытания при постоянном напряжении до 50 кВ. Пробоев в вакууме и во вводах не

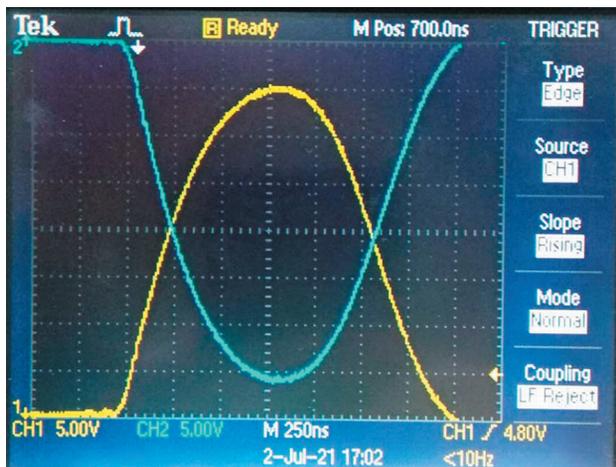


Рис. 11. Импульсы с поясов Роговского генераторов “плюс” и “минус” при прогоне ударного магнита в канале Бустер–Нуклотрон. Напряжение 45 кВ и амплитуда тока 32 кА.

наблюдалось. Далее были проведены импульсные испытания магнита от генераторов с подачей SF_6 в токовводы.

На рис. 10 показаны осциллограммы выходных импульсов генераторов, снятых с поясов Роговского, расположенных в генераторной части токоввода.

На рис. 11 показаны результаты испытаний магнита на комплексе NICA на его рабочем месте.

В настоящее время на комплексе NICA был осуществлен успешный выпуск ионов He^{1+} и

Fe^{14+} в канал Бустер–Нуклотрон с расчетными рабочими параметрами данного ударного магнита. В режиме неполной рабочей энергии Бустера до 240 МэВ/нуклон получен выпуск ионов железа при напряжении ударного магнита не более 17 кВ и соответственно токе 12 кА (рис. 12), что соответствует максимальному полю в магнитах канала для транспортировки неободранных ионов с $Z/A = 4$.

Для полной рабочей энергии Бустера 600 МэВ/нуклон (для ионов с $Z/A = 6$) понадобятся максимальный ток 32 кА и напряжение 45 кВ. В ходе сеанса работы Бустера были осуществлены успеш-

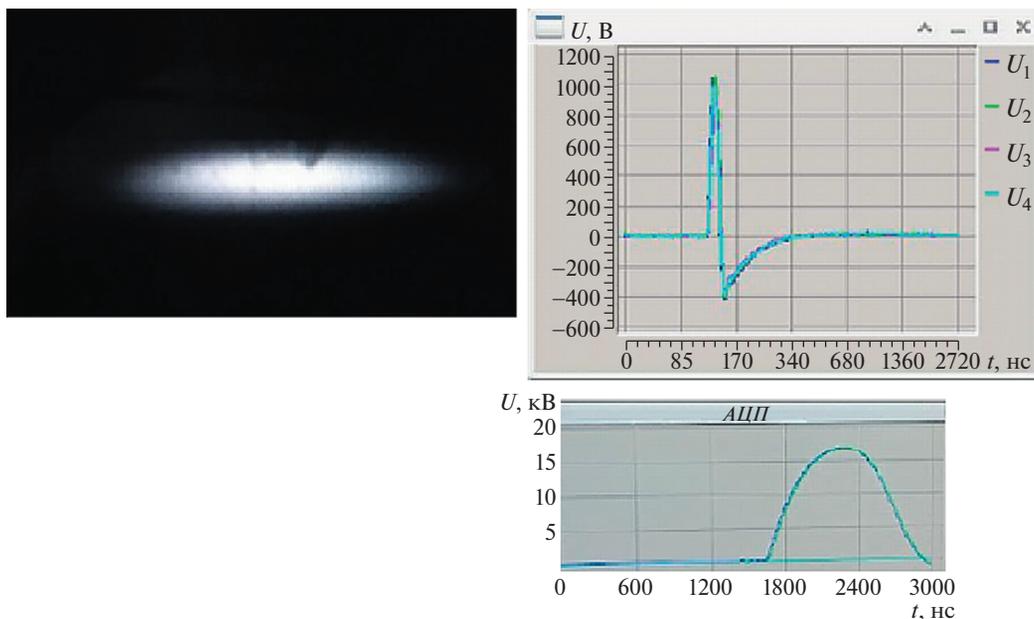


Рис. 12. Скриншот с пульта управления: слева — выпущенный из Бустера NICA пучок на люминофоре; справа: сверху — сигналы с электродов пикапа при выпущенном пучке из Бустера, внизу — импульсы кикера.

ная тренировка и прогон ударного магнита на этих параметрах в течение нескольких часов без непосредственного вывода пучка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анчуглов О.В., Шведов Д.А., Киселев В.А., Корепанов А.А., Синяткин С.В. // ПТЭ. 2015. № 3. С. 16.
<https://doi.org/10.7868/S0032816215030118>
2. Alexandrov V.S., Gorbachev E.V., Tuzikov A.V., Fateev A.A. // Phys. of Particles and Nuclei Letters. 2012. V. 9. № 4–5. P. 425.
<https://doi.org/10.1134/S1547477112040073>
3. Trubnikov G., Agarov N., Brovko O., Butenko A., Donets E., Eliseev A., Fimushkin V., Gorbachev E., Govorov A., Ivanov E., Karpinsky V., Kekelidze V., Khodzhbagiyani H., Kovalenko A., Kozlov O. et al. // Proc. of 4th International Particle Accelerator Conference IPAC'13. Shanghai, China, 2013. P. 1343.
4. Tuzikov A., Butenko A., Donets D., Govorov A., Levterov K., Meshkov I., Smirnov A., Syresin E., Volkov V., Zhuravlev A., Kiselev V., Okunev I., Sinyatkin S., Tasset-Maye O. // Proc. of XXVI Russian particle accelerator conference (RuPAC–2018). NRC KI–IHEP. Protvino, 01–05 октября 2018. P. 52.
<https://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2018-TUCDMH01>
5. Aleksandrov V., Fateev A.A., Tuzikov A. // Proc. of XXV Russian Particle Accelerator Conf. RuPAC-2016 (St. Petersburg, Russia, 2016) 2017. P. 566.
<https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2016-THP-SC013>

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

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВ МИНЕРАЛЬНЫХ
УДОБРЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГАММА- И РЕНТГЕНОВСКОЙ
ФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ**© 2022 г. Canel Eke^{a,*}^a Department of Mathematics and Science Education, Faculty of Education,
Akdeniz University, 07058, Antalya, Turkey

*e-mail: caneleke@hotmail.com, ceke@akdeniz.edu.tr

Поступила в редакцию 19.12.2021 г.

После доработки 09.01.2022 г.

Принята к публикации 11.01.2022 г.

Представлены результаты исследования минеральных удобрений с использованием гамма- и рентгеновской флуоресцентной спектроскопии (Energy Dispersive X-ray Fluorescence – EDXRF). Исследовано восемь типов минеральных удобрений. Измерения проводились спектрометром с германиевым детектором высокой чистоты (HPGe), длительность измерения – один день. Анализ спектров проводился компьютерными программами. В результате получены значения удельной активности радионуклидов, активности в радиовом эквиваленте, индексов опасности внутреннего и внешнего облучений и индекс гамма-облучения. Проведено сравнение с данными в научной литературе. Содержание основных макро- и микроэлементов определялось с использованием EDXRF. Размеры и форма (гранул) изучались с помощью сканирующего электронного микроскопа. ²²⁶Ra был обнаружен только в одном образце, а ⁴⁰K – во всех. ²³²Th и ¹³⁷Cs не обнаружены ни в одном из образцов. Во всех образцах, за исключением образцов № 2 и № 3, концентрация ⁴⁰K и дозы выше, чем предельные значения, указанные в соответствующей литературе.

DOI: 10.31857/S0032816222030144

ВВЕДЕНИЕ

Минеральные удобрения используются в сельском хозяйстве для повышения содержания питательных веществ [1]. Удобрения обычно содержат три основных и множество второстепенных химических компонентов. Основными компонентами являются азот (N), пентоксид фосфора (P₂O₅) и оксид калия (K₂O), макрокомпонентами – натрий (Na), кальций (Ca), сера (S), магний (Mg), следовыми компонентами – например, железо (Fe), сера (S), марганец (Mn), цинк (Zn), молибден (Mo) и медь (Cu) [2–4].

Азот используется в форме солей аммония, нитратов и органических соединений азота. Эти компоненты влияют на вегетативный рост растений через азотсодержащие белки и хлорофилл. При недостатке азота окраска листьев растений становится желтой, избыток азота препятствует достижению спелости [4, 5].

Основным материалом фосфорных удобрений является фосфоритная руда (фторапатит). Химическая формула – 3Ca₃(PO₄)₂ · CaF₂ (фторфосфат кальция). Если отделить фосфоритную руду с помощью серной кислоты, получается суперфос-

фат, содержащий 18–20% пятиоксида фосфора (P₂O₅). Если фосфоритная руда разлагается фосфорной кислотой, получается тройной суперфосфат, который содержит 48% пятиоксида фосфора (P₂O₅). Фосфаты стимулируют рост растений, обеспечивают устойчивость к болезням, дают более сильные всходы и ускоряют созревание сельскохозяйственных культур [4, 5]. Однако фосфорные удобрения являются значительными источниками газообразного радона, который является продуктом распада ²³⁸U [6].

Калий входит в состав многих смешанных удобрений. Он участвует во всех метаболических процессах, поэтому является важным элементом для всех растущих растений. Если некоторые культуры содержат нежелательно высокие концентрации хлоридов, сульфат калия или нитрат калия является эффективным средством. Когда сельскохозяйственные угодья лежат под паром, минералы калия медленно диссоциируют и из года в год выделяют растениям значительное количество поташа. Часть поташа, поглощаемого растениями, остается в вегетационных зонах [4, 5].

Концентрация естественных радионуклидов в почве меняется от одной области к другой из-за

крупномасштабного использования минеральных удобрений. Именно они являются основным источником радиоактивности в почве [7, 8]. При высокой концентрации радионуклидов в почвах растет риск попадания их в организм человека через подземные воды, питьевую воду и пищевую цепь [9, 10]. Если радиоактивность, выделяемая минеральными удобрениями (плюс естественная радиация из окружающей среды), превышает допустимый уровень, это может вызвать рак и другие проблемы со здоровьем. Поэтому отслеживание удельной активности естественных радионуклидов актуально с точки зрения радиационной защиты [11].

Во многих работах естественные радионуклиды (в первую очередь ^{40}K , а также цепочки распада ^{238}U , ^{232}Th) в минеральных удобрениях определяли с помощью гамма-спектрометрии [6, 7, 11–15]. Для определения основных, макро-, микро- и токсичных элементов использовали также и другие атомные и ядерные методы. Например, в двух разных лабораториях наличие 35-ти элементов в шести различных импортных удобрениях, содержащих азот/фосфор/калий (NPK), азот/фосфор (NP) и калий (K), было определено с помощью оптической эмиссионной спектрометрии (ICP-OES – Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry), а в работе [1] – с помощью инструментального нейтронно-активационного анализа (INAA – Instrumental Neutron Activation Analysis). Фосфаты удобрений природного и промышленного происхождения, включая три стандартных образца (NBS-SRM 120b, BCR-SRM № 32 и № 33), были исследованы с помощью INAA [3]. Концентрация основных компонентов удобрений (Al_2O_3 , SiO_2 , P_2O_5 , SO_3 , Cl , K_2O , Fe_2O_3) определялась с помощью рентгеновской флуоресценции (XRF – X-ray Fluorescence), а также методом дифракции рентгеновских лучей (XRD – X-ray Diffraction) [14, 16]. Калийсиликатные удобрения изучались методами порошковой рентгеновской дифракции и рентгенофлуоресцентной спектроскопии (EDXRF – Energy Dispersive X-ray Fluorescence) [17]. Химический состав удобрения из диаммонийфосфата (DAP) был проведен с помощью лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии (LIBS – Laser-Induced Breakdown Spectroscopy), были обнаружены элементы Mg, Al, P, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Mo, Pb и следы U [18]. Для многоэлементного анализа образцов использовался метод LIBS с последующей обработкой результатов методом частичных наименьших квадратов (PLS) [19]. Калийные удобрения изучали с помощью LIBS [20], фосфор в коммерческих удобрениях определяли с помощью атомно-абсорбционной спектроскопии (AAS – Atomic Absorption Spectroscopy) [21]. И последнее, но не ме-

нее важное: концентрации K, Na и Zn в качестве основных элементов, Ni и Co в качестве второстепенных элементов и Pb, Cd, Cr и Cu в качестве загрязнителей окружающей среды или токсичных элементов определялись методом AAS в 14-ти коммерческих фосфатных удобрениях, поставляемых на рынок Ирака [22].

Целью данного исследования являлось: 1) определение удельной активности природных радионуклидов; 2) получение информации о значениях радиационной опасности; 3) проведение элементного анализа химических удобрений с использованием рентгеновской флуоресцентной спектроскопии (EDXRF). Для этого были рассчитаны показатели естественной радиоактивности ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K в широко используемых в Анталии химических удобрениях, а также активности в радиовом эквиваленте (R_{eq}), индексы внутренней и внешней опасности (H_{in} и H_{ex}). Полученные значения были сопоставлены со значениями, указанными в литературе. Ниже приведены описания материалов и методологии, а также представлены результаты этого исследования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Минеральные удобрения восьми различных типов, выбранные на рынке удобрений в Анталии (Турция), были изучены с помощью гамма- и EDXRF-спектроскопии. Для измерения концентрации естественных радионуклидов образцы были помещены в пластиковые стаканчики объемом 100 мл, промаркированы и запечатаны. Масса образцов определялась взвешиванием. Диаметр и высота чашек составляли 61 и 53 мм соответственно. Масса образцов варьировалась от 104 до 148 г. Для расчета удельной активности естественных радионуклидов (^{238}U и ^{232}Th) образцы выдерживались 5 недель для достижения равновесия радия и радона. Удельную активность ^{40}K определяли без выдержки, потому что этот нуклид не производит цепочку распада, подобную ^{238}U и ^{232}Th .

Измерение концентрации естественных радионуклидов в каждом образце проводилось в течение 86400 с (1 день) с использованием германиевого детектора высокой чистоты (HPGe, относительная эффективность 40%, *p*-тип, электрическое охлаждение; разрешение: 1.85 кэВ при 1332 кэВ, 768 эВ при 122 кэВ). Детектор HPGe расположен на факультете физики Akdeniz University. Калибровка по энергии проверялась с помощью точечных γ -источников.

Перед измерением активности образцов в течение 86400 с измеряли фоновое излучение, чтобы вычесть фон из спектров удобрений. Спектры каждого образца набирали с помощью компью-

терного программного обеспечения Maestro-32 [23]. Собранные спектры удобрений и фоновый спектр анализировались автоматически с помощью компьютерной программы Gamma-W [24].

Минимально детектируемую активность (MDA) вычисляли, согласно Currie [25, 26], по соотношению

$$MDA = \frac{2.71 + 4.66\sigma}{t\epsilon I_{\gamma} m}, \quad (1)$$

где σ – стандартное отклонение числа отсчетов фонового спектра; t – время измерения; ϵ – эффективность детектора; I_{γ} – вероятность γ -излучения; m – масса образца. Были рассчитаны MDA радионуклидов ^{214}Pb (351.93 кэВ), ^{214}Bi (609.32 кэВ), ^{228}Ac (911.20 кэВ), ^{40}K (1460.82 кэВ) и ^{37}Cs (661.66 кэВ) в образце массой 1 кг и для времени измерения 50398 с с учетом фонового спектра. MDA ^{226}Ra была определена с использованием среднего значения ^{214}Pb и ^{214}Bi .

Удельную активность природных радионуклидов A , Бк/кг, в минеральных удобрениях вычисляли по хорошо известному соотношению [27]:

$$A = \frac{N}{m t \epsilon I_{\gamma}}, \quad (2)$$

где N – общий счет в пике после вычитания фона; m , кг – масса образца; t , с – время счета образца; ϵ – эффективность детектора, I_{γ} – вероятность γ -излучения по литературным данным.

Мертвое время нашей экспериментальной установки не учитывалось, так как оно меньше 5% [27]. Кроме того, для расчета удельной активности радионуклидов учитывалось самопоглощение в образцах. Поправочный коэффициент самопоглощения (SACF) минеральных удобрений был рассчитан с использованием метода пропускания Cutshall [28]. Подробности можно найти в [29].

Неопределенность удельной активности естественных радионуклидов рассчитывалась по следующему уравнению [30]:

$$\Delta A = A \sqrt{\left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_{\gamma}}{I_{\gamma}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2}, \quad (3)$$

где ΔN , Δt , $\Delta \epsilon$, ΔI_{γ} , Δm и Δf представляют собой соответственно неопределенности счета, времени измерения, эффективности γ -детектора, вероятности γ -излучения, массы образца и коэффициента самопоглощения.

Значения концентрации природных радионуклидов использовались также для оценки индексов радиологической опасности, таких как активность в радиевом эквиваленте, дополнительный риск рака в течение жизни от наружной радиации, внутренний и внешний индексы опасности минеральных удобрений.

Активность в радиевом эквиваленте Ra_{eq} , Бк/кг, определяет внешнее облучение γ -квантами от ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K . Эквивалент рассчитывался с использованием следующего уравнения [31]:

$$Ra_{\text{eq}} = A_{\text{Ra}} + 1.43A_{\text{Th}} + 0.077A_{\text{K}}, \quad (6)$$

где A_{Ra} , A_{Th} и A_{K} – концентрации ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K соответственно.

Индексы опасности внешнего (H_{ex}) и внутреннего (H_{in}) облучения от естественного γ -излучения, испускаемого ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K , рассчитывались с использованием следующих уравнений [31, 32]:

$$H_{\text{ex}} = \frac{A_{\text{Ra}}}{370} + \frac{A_{\text{Th}}}{259} + \frac{A_{\text{K}}}{4810}; \quad (7)$$

$$H_{\text{in}} = \frac{A_{\text{Ra}}}{185} + \frac{A_{\text{Th}}}{259} + \frac{A_{\text{K}}}{4810}, \quad (8)$$

Индекс γ -излучения (I), являющийся одним из индексов опасности, рассчитывался по уравнению [33]:

$$I = \frac{A_{\text{Ra}}}{300} + \frac{A_{\text{Th}}}{200} + \frac{A_{\text{K}}}{3000}. \quad (9)$$

Таблица 1. Удельная активность радионуклидов ^{226}Ra и ^{40}K в минеральных удобрениях (^{232}Th и ^{137}Cs не детектируются)

Номер образца	^{226}Ra , Бк/кг	^{40}K , Бк/кг
№ 1	180 ± 19	9028 ± 897
№ 4	н.д.	18595 ± 1791
№ 5	н.д.	28065 ± 2705
№ 6	н.д.	25350 ± 2459
№ 7	н.д.	13010 ± 1296
№ 8	н.д.	9713 ± 970
Среднее 1	–	17294 ± 1686
№ 2	н.д.	36 ± 5
№ 3	н.д.	34 ± 8
Среднее 2	–	35 ± 7

Примечание. н.д. – не детектировано

Таблица 2. Оценки параметров облучения от химических удобрений

Номер образца	Ra _{eq} , Бк/кг	H _{in}	H _{ex}	I
№ 1	874.94	2.85	2.36	3.61
№ 4	1431.82	3.87	3.87	6.20
№ 5	2160.97	5.83	5.83	9.35
№ 6	1951.97	5.27	5.27	8.45
№ 7	1001.76	2.70	2.70	4.34
№ 8	747.94	2.02	2.02	3.24
Среднее 1	1361.57	3.76	3.68	5.88
№ 2	2.73	0.01	0.01	0.01
№ 3	2.62	0.01	0.01	0.01
Среднее 2	2.68	0.01	0.01	0.01

Содержание компонентов определяли, используя EDXRF-спектроскопию, в Basic Sciences Application and Research Center in Erzincan Binali Yildirim University.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

MDA (минимально детектируемая активность) составила 1.10 Бк/кг для ²²⁶Ra, 1.23 Бк/кг для ²¹⁴Pb, 0.97 Бк/кг для ²¹⁴Bi, 3.12 Бк/кг для ²²⁸Ac (²³²Th), 0.94 Бк/кг для ¹³⁷Cs и 8.91 Бк/кг для ⁴⁰K. Как показано в табл. 1, удельные активности ²²⁶Ra и ⁴⁰K выше, чем *MDA* этих радионуклидов. В минеральных удобрениях не были обнаружены ²²⁶Ra (за исключением образца № 1), ²³²Th, а также искусственный радионуклид ¹³⁷Cs, а ⁴⁰K был обнаружен во всех образцах. Удельная активность радия

(180 ± 19 Бк/кг) выше, чем предельное значение (33 Бк/кг) по данным UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) [34]. Удельная активность ⁴⁰K варьируется от 34 ± 8 до 28065 ± 2705 Бк/кг. Среднее значение удельной активности ⁴⁰K составило 17294 Бк/кг, что значительно выше, чем предельное значение, указанное UNSCEAR [34] (420 Бк/кг), за исключением образцов № 2 и № 3. Напротив, средняя удельная активность ⁴⁰K образцов № 2 и № 3 (35 Бк/кг) ниже предельного значения, указанного UNSCEAR, примерно на один порядок величины и, таким образом, незначительна (см. табл. 1).

Значения активности в радиовом эквиваленте (Ra_{eq}), индексов опасности внутреннего (H_{in}) и внешнего (H_{ex}) облучения и индекса γ-излучения (I) для минеральных удобрений представлены в табл. 2.

Согласно данным табл. 2:

– значения Ra_{eq} для образцов № 1, № 4–8 превышают 370 Бк/кг, что является допустимым предельным значением [31];

– значения H_{in} и H_{ex} соответственно для образцов № 1, № 4–8 больше единицы, но должны быть < 1 [31];

– значения I образцов № 1–3, № 7 и № 8 ниже 6 (что является допустимым предельным значением [33]), а значения выборок № 4, № 5 и № 6 больше 6.

Результаты анализа минеральных удобрений с использованием EDXRF приведены в табл. 3, а их EDXRF-спектры и микрофотографии, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM), показаны на рис. 1. N, P и K

Таблица 3. Результаты анализа состава минеральных удобрений с использованием EDXRF для образцов № 1–8

Элемент	Весовая концентрация, % (относительная неопределенность, %) для образцов							
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
O	57.61 (10.10)	49.36 (10.26)	54.69 (9.53)	49.64 (8.67)	40.28 (10.93)	55.50 (10.24)	47.99 (10.19)	56.11 (9.67)
Al	2.57 (8.74)	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	0.74 (8.91)
Si	2.68 (7.12)	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
Ca	35.27 (1.10)	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	7.30 (3.25)	н.д.
Fe	1.86 (6.35)	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
S	н.д.	27.15 (2.12)	н.д.	н.д.	20.33 (2.56)	н.д.	14.17 (2.57)	0.87 (3.65)
Na	н.д.	н.д.	н.д.	22.95 (8.69)	н.д.	н.д.	1.15 (13.12)	1.85 (11.02)
N	н.д.	23.49 (10.74)	16.40 (11.16)	н.д.	н.д.	н.д.	14.96 (11.79)	34.57 (7.73)
P	н.д.	н.д.	28.90 (3.09)	18.02 (4.74)	н.д.	3.57 (5.15)	н.д.	0.39 (7.68)
K	н.д.	н.д.	н.д.	9.39 (2.88)	39.39 (2.54)	40.93 (1.22)	14.43 (2.25)	5.46 (1.22)

Примечание. н.д. – не детектировано

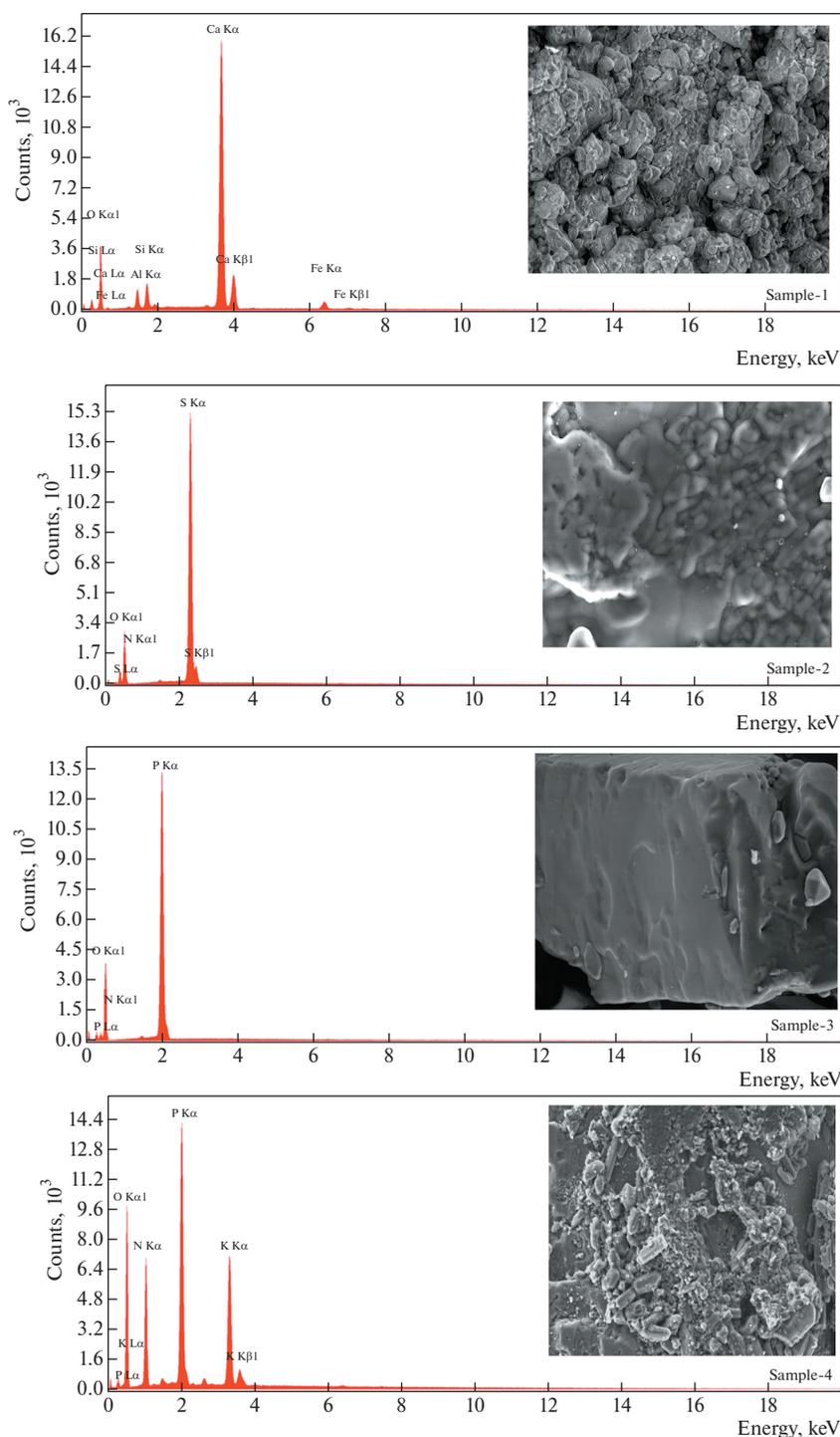


Рис. 1. Спектры EDXRF и микрофотографии SEM минеральных удобрений.

являются основными питательными веществами, Ca, Mg и S – макроэлементами, а Fe, Mn, Cu, Zn, В и Мо – микроэлементами для растений в почве. Ca и Mg играют важную роль в установлении pH почвы [1].

Минеральные удобрения подразделяются на три категории, а именно: удобрения с одним пи-

тательным веществом (N, P или K), удобрения с двумя питательными веществами (NP, NK или PK) и удобрения с несколькими питательными веществами (NPK или NPK + S) [35]. Образец № 2 представляет собой азотное удобрение, образец № 3 – удобрение NP, образцы № 4 и № 6 – PK-удобрения, образец № 5 – удобрение K, обра-

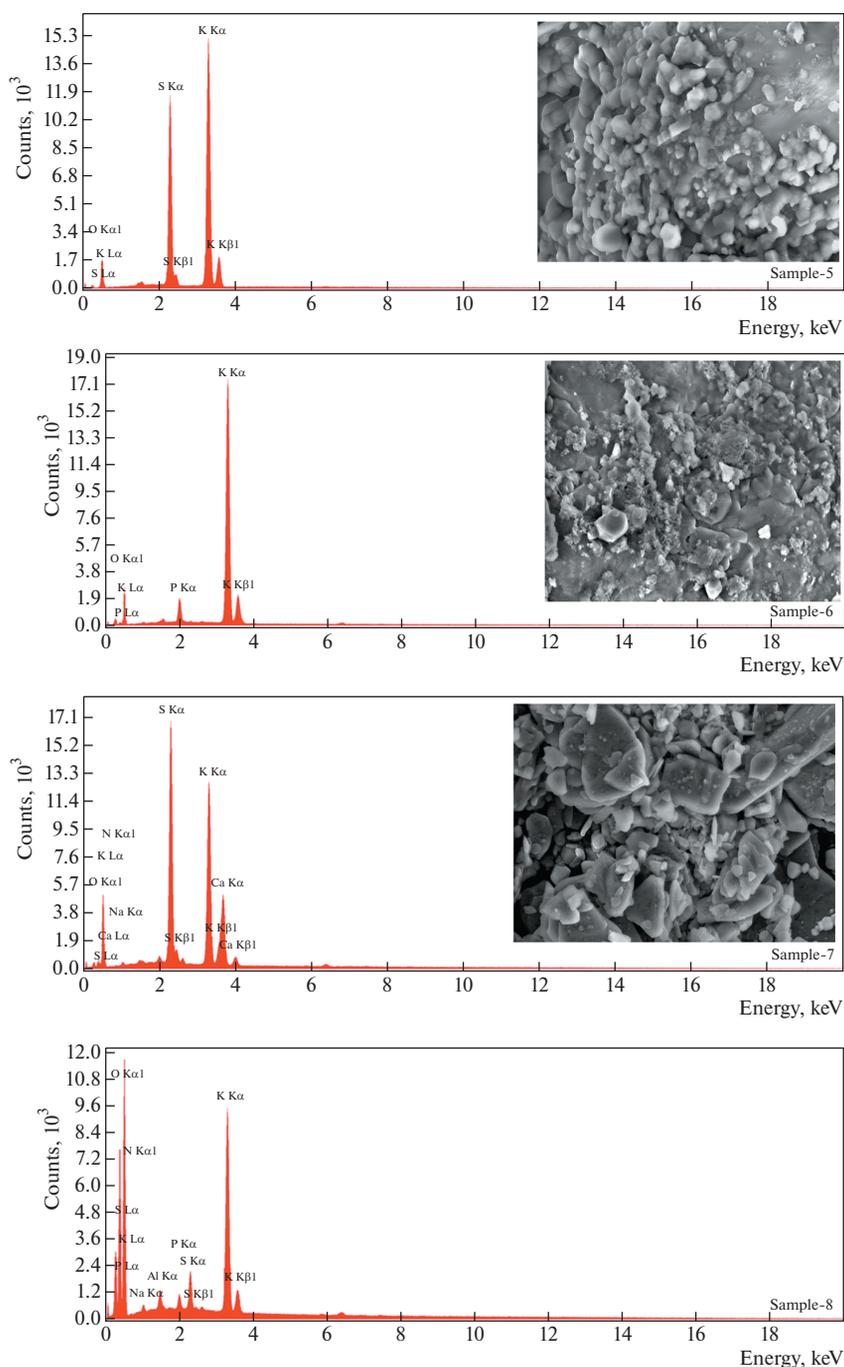


Рис. 1. Окончание

зец № 7 – удобрение НК, образец № 8 – удобрение НРК. Образцы № 1 и № 5 представляют собой удобрения с одним питательным веществом, образцы № 3, № 4, № 6 и № 7 – бинарные удобрения и только образец № 8 является мультиэлементным удобрением.

Есть 16 элементов, стимулирующих рост и выживание растений. Они входят в состав минеральных и неминеральных удобрений. Трина-

дцать питательных веществ содержатся в почве, Н и С присутствуют и в воздухе, и/или в воде, а О присутствует повсеместно. Кроме того, минеральные питательные вещества в соответствии с их потреблением растением дополнительно разделены на две категории – макроэлементы и микроэлементы, которые необходимы для роста растения. Калий и кальций – основные элементы, необходимые для роста и улучшения растений.

Образцы № 1 и № 8 содержат алюминий и железо, которые действуют как второстепенные и следовые компоненты. Оксиды этих элементов играют важную роль в почвенных агрегатах [36], поскольку они положительно влияют на физические свойства почвы, повышая однородность агрегата, проницаемость, хрупкость, пористость и гидравлическую проводимость, а также уменьшая пухлость, дезинтеграцию глины, плотность и модули разрушения [37].

Кремний (Si) был обнаружен только в образце № 1 как питательный микроэлемент. Кремний присутствует в земной коре в форме диоксида кремния и является вторым по распространенности элементом после кислорода. Кремний считается одним из важнейших питательных веществ для жизни растений [38]. Он оказывает положительное влияние на их рост и развитие, создает внешний защитный слой, состоящий из отложений кремнезема. Абсорбированный кремний имеет увеличенную реакционную способность с ионами тяжелых металлов и другими содержащимися в почве компонентами, что усиливает метаболические функции кремния [39].

Кальций (Ca) был обнаружен в образце № 1 как основной элемент и как второстепенный элемент – в образце № 7. Кальций играет важную роль в производстве высококачественных культур. Добавка кальция увеличивает прочность и толщину клеточной стенки [40].

Железо (Fe) обнаружено только в образце № 1 как микроэлемент. Железо является необходимым микроэлементом для всех живых организмов, поскольку оно играет важную роль в биологических процессах, таких как дыхание, фотосинтез, синтез дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК), фиксация и ассимиляция азота [41, 42]. Кроме того, он играет важную роль в синтезе хлорофилла и необходим для структурирования и функционирования хлоропластов. Низкое количество железа в растениях снижает качество питания растений и урожай. Таким образом, недостаток железа препятствует здоровому росту растений [42].

Сера (S) была обнаружена в образцах № 2, № 5 и № 7 как макроэлемент и в образце № 8 как микроэлемент. Сера является компонентом метионина, цистеина и цистина, трех из 20-ти аминокислот, которые являются основными строительными блоками белков. Обычно метионин и цистин содержатся в растениях [43, 44]. Кроме того, сера участвует в синтезе витаминов, ферментных реакциях и связывании металлов в растениях и необходима для образования хлорофилла. Сера абсорбируется корнями растений в форме сульфата (SO_4^{2-}) или тиосульфата ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$); листья поглощают небольшое количество SO_2 [45].

Натрий (Na) был обнаружен как макроэлемент в образце № 4 и как микроэлемент – в образцах № 7 и № 8. Натрий считается функциональным питательным веществом для растений. Однако только ограниченному количеству растений с фотосинтезом типа C_4 необходимо регулировать концентрацию углекислого газа. Функции натрия для растений: поддержка синтеза хлорофилла, замена функций калия, регулировка внутреннего осмоса, поддержка устьичных функций, обеспечение ионного баланса, активация ферментов и улучшение роста растений [46, 47]. Дефицит натрия наблюдается только у растений с фотосинтезом C_4 , поскольку натрий необходим для этих растений [46].

Азот (N) был обнаружен как макроэлемент в образцах № 2, № 3, № 7 и № 8. Азот является незаменимым элементом для целых организмов, он входит в состав белков, нуклеиновых кислот (ДНК и РНК), мембранных липидов, аденозинтрифосфата (АТФ), НАДН, НАДФН, коферментов, фотосинтетических пигментов, вторичных метаболитов и др. соединений. Неорганические соединения азота получают путем минерализации органического материала, выделения из органических отходов или химических удобрений.

Азот забирается из почвы в виде аммония (NH_4^+) и нитрата (NO_3^-), которые являются основными формами азота, но органический азот абсорбируется подобно аминокислотам [48].

Фосфор (P) был обнаружен как макроэлемент в образцах № 3 и № 4, как второстепенное питательное вещество – в образце № 6 и как микроэлемент – в образце № 8. Фосфор является важным элементом для роста и созревания растений и, наконец, необходим для всего жизненного цикла растений. Фосфор абсорбируется в виде H_2PO_4^- и HPO_4^{2-} корнями растений из почвы. Фосфор играет роль в фотосинтезе, дыхании, хранении и передаче энергии посредством АДФ (аденозиндифосфат), АТФ, DPN (дифосфопиридин) и TPN (трифосфопиридин). Он важен для сохранения и передачи генетической информации (ДНК и РНК), при делении клеток, развитии корней, зарождении цветков, развитии семян и плодов. Фосфор повышает устойчивость растений к болезням и качество сельскохозяйственных культур [49].

Калий (K) был обнаружен как макроэлемент в образцах № 5, № 6 и № 7, а как второстепенное питательное вещество – в образцах № 4 и № 8. Калий – незаменимый элемент почти для всех растений. Калий является активатором ферментов при метаболизме, помогает растениям использовать воду для устьичных регуляций, поддерживает равновесие электрических зарядов в процессе генерации АТФ при фотосинтезе, регу-

лирует транспорт сахара при фотосинтезе, обеспечивает синтез белка, крахмала и целлюлозы для стимулирования производства АТФ, развивает устойчивость к болезням растений, увеличивает размер зерен и семян, а также качество фруктов и овощей [49, 50].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Содержание природных радионуклидов (нуклидов из цепочек распада ^{226}Ra и ^{232}Th , а также ^{40}K) и искусственного радионуклида ^{137}Cs в восьми образцах различных минеральных удобрений было изучено с помощью гамма-спектрометрии и EDXRF (см. рис. 1). ^{226}Ra , за исключением образца № 1, обнаружен не был. ^{232}Th и ^{137}Cs не были обнаружены ни в одном из образцов минеральных удобрений, а ^{40}K обнаружен во всех. Радиовый эквивалент активности, индексы опасности внутреннего и внешнего облучения, а также индекс активности для минеральных удобрений были рассчитаны и сопоставлены с предельными значениями, указанными в литературе. За исключением образцов № 2 и № 3, полученные значения выше, чем указано в литературе. Размер и внешняя структура компонентов минеральных удобрений показаны на микрофотографиях, сделанных с помощью SEM (см. рис. 1). Есть различия между содержанием компонентов, определенных производителем, и результатами EDXRF. Некоторые ожидаемые следовые элементы не были обнаружены с помощью EDXRF, поэтому необходимы дальнейшие экспериментальные работы с использованием других ядерных и атомных методов, таких как нейтронно-активационный анализ (НАА), фотонный активационный анализ (ПАА), атомно-абсорбционная спектрометрия (ААС) и т.д. Тем не менее, γ -спектрометрия и EDXRF могут использоваться для определения радиоактивности окружающей среды и элементного анализа образцов соответственно. Это исследование дает предварительную информацию об ориентировочном загрязнении окружающей среды минеральными удобрениями. Из-за цепочки питания “удобрение—растение—животное—человек” это исследование особенно важно.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность доктору Christian Segebade за ценные комментарии и предложения.

REFERENCES

1. *El-Ghawi, U., Patzay, G., Vajda, N. Bodizs, D., J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 1999, vol. 243, no. 3, p. 693, <https://doi.org/10.1007/BF02347381>
2. *El-Bahi, S.M., El-Dine, N.W., El-Shershaby, A. Sroor, A., Health Phys.*, 2004, vol. 86, no. 3, p. 303, <https://doi.org/10.1097/00004032-200403000-00007>
3. *Niedergesass, R., Schnier, C. Pepelnik, R., J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 1993, vol. 168, no. 2, p. 317, <https://doi.org/10.1007/BF02040512>
4. *Shreve, R.N., The chemical process industries, Second Edition*, NY.: McGraw-Hill Book Company Inc., 1956.
5. *Alam, M.N., Chowdhury, M.I., Kamal, M., Ghose, S., Banu, H., Chakraborty, D., App. Radiat. Isot.*, 1997, vol. 48, no. 8, p. 1165. [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(97\)00019-5](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(97)00019-5)
6. *Ioannides, K.G., Mertzimekis, T.J., Papachristodoulou, C.A., Tziaila, C.E., Sci. Total Environ.*, 1997, vol. 196, p. 63. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(96\)05390-9](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(96)05390-9)
7. *Boukhenfouf, W., Boucenna, A. J. Environ. Radioact.*, 2011, vol. 102, p. 336, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2011.01.006>
8. *Abbadly, A., El-Arabi, A.M., Abbadly, A.E., and Taha, S., In International conference on radioecology and environmental radioactivity*, Norway, Bergen, 2007.
9. *Morovic, G., Sencar, J., J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 1995, vol. 200, no. 1, p. 9, <https://doi.org/10.1007/BF02164816>
10. *Righi, S., Lucialli, P., Bruzzi, L., J. Environ. Radioact.*, 2005, vol. 82, p. 167, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2004.11.007>
11. *Hassan, N.M., Chang, B.U., Tokonomi, S., J. Chem.*, 2017, vol. 2017, Article ID 9182768, <https://doi.org/10.1155/2017/9182768>
12. *Khan, K., Khan, H.M., Tufail, M., Khatibeh, A.H., Ahmad, N., J. Environ. Radioact.*, 1998, vol. 38, no. 1, p. 77, [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(97\)00018-0](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(97)00018-0)
13. *Hassan, N.M., Mansour, N.A., Fayed-Hassan, M., Sedqy, E., J. Taibah Univ. Sci.*, 2016, vol. 10, p. 296, <https://doi.org/10.1016/j.jtusci.2015.08.009>
14. *Chauhan, P., Chauhan, R.P., Gupta, M., Microchem J.* 2013, vol. 106, p. 73, <https://doi.org/10.1016/j.microc.2012.05.007>
15. *El-Zakla, T., Abdel-Ghny, H.A., Hassan, A.M., Rom. Journ. Phys.* 2007, vol. 52, no. 5, p. 731.
16. *Chauhan, P., Chauhan, R.P., J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 2013, vol. 295, p. 1097, <https://doi.org/10.1007/s10967-012-2244-6>
17. *Yao, Y., Hamada, E., Sato, K., Akiyama, T., Yoneyama, T., ISIJ International.*, 2014, vol. 54, no. 4, p. 990, <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.990>
18. *Farooq, W.A., Al-Mutairi, F.N., Khater, A.M., Al-Dwayyan, A.S., AlSalhi, M.S., Atif, M., Optics and Spectroscopy.*, 2012, vol. 112, no. 6, p. 874, <https://doi.org/10.1134/S0030400X12060082>
19. *Yao, S., Lu, J., Li, J., Chen, K., Li, J., Dong, M., J. Anal. At. Spectrom.*, 2010, vol. 25, p. 1733, <https://doi.org/10.1039/C0JA00027B>
20. *Groisman, Y., Gaft, M., Spectrochim. Acta, Part B*, 2010, vol. 65, p. 744, <https://doi.org/10.1016/j.sab.2010.03.019>

21. Hoft, D., Oxman, J., Gurira, R.C., *J. Agric. Food Chem.*, 1979, vol. 27, no. 1, p. 145.
<https://doi.org/10.1021/jf60221a047>
22. Rauof, A.M., Hammud, K.K., Ahmed, A.N., Thabit, M.K., *Archives of Applied Science Research.*, 2014, vol. 6, no. 5, p. 90,
23. Maestro-32, Multi-channel analyser software, A65-B32 model, Ortec., 2008, <https://www.ortec-online.com/-/media/ametekortec/manuals/a65-mnl.pdf>. [Accessed 20 September 2018]
24. *Gamma-W*, <http://www.westmeier.com/3gammawfeatures.htm>. [Accessed 20 September 2018]
25. Currie, L., *J. Anal. Chem.*, 1968, vol. 40, p. 586, <https://doi.org/10.1021/ac60259a007>
26. Knoll, G., *Radiation detection and measurement*, 3rd Edition, United States of America, John Wiley and Sons, 2000.
27. Lakehal, C., Ramdhane, M., Boucenna, A., *J. Environ. Radioact.*, 2010, vol. 101, p. 377, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2010.02.008>
28. Cutshall, N., Larsen, I., Olsen, C., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* 1983, vol. 206, p. 309, [https://doi.org/10.1016/0167-5087\(83\)91273-5](https://doi.org/10.1016/0167-5087(83)91273-5)
29. Eke, C., Yildirim, A., *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2020, vol. 84, p. 1012, <https://doi.org/10.3103/S1062873820080122>
30. ISO-GUM, International Organization for Standardization-Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, 2018, <https://www.bipm.org/en/publications/guides/>. [Accessed 30 September 2018]
31. Beretka, J.J., Mathew, P., *Journal of Health Physics*, 1985, vol. 48, p. 87, <https://doi.org/10.1097/00004032-198501000-00007>
32. Mohery, M., Baz, S., Kelany, A.M., Abdallah, A.M., *Radiat. Phys. Chem.*, 2014, vol. 97, p. 16, <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2013.10.007>
33. *Radiation protection 112, Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building material*. European Commission, Finland, 1999.
34. UNSCEAR, United nations scientific committee on the effect of atomic radiation. sources and effects of ionizing radiation. report to general assembly, with scientific annexes. United Nations, NY, 2000.
35. Doan, T., *Fertilizer Industry Report*. Fpt Securities, Vietnam, 2015.
36. Mbagwu, J.C., Schwertmann, U., *Int. Agrophysics.*, 2006, vol. 20, p. 23.
37. Goldberg, S., *Commun. in Soil Sci. Plant Analysis*. 1989, vol. 20, no. 11–12, p. 1181, <https://doi.org/10.1080/00103629009368144>
38. Tubana, B.S., Babu, T., Datnoff, L.E., *Soil Science*, 2016, vol. 181, no. 9-10, p. 393, <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000179>
39. Tubana, B.S., Heckman, J.R., *Silicon in Soils and Plants. In: Silicon and Plant Diseases*, F. Rodrigues, L. Datnoff (eds). Springer, Cham. 2015, p. 7, https://doi.org/10.1007/978-3-319-22930-0_2
40. Easterwood, G., *Fluid Journal*, 2002, p. 1–3.
41. Briat, J.F. *Bull. Acad. Natl. Med.*, 2005, vol. 189, no. 8, p. 1609.
42. Rout, G.R., Sahoo, S., *Reviews in Agricultural Science*. 2015, vol. 3, p. 1, <https://doi.org/10.7831/ras.3.1>
43. Hell, R., Khan, M.S., Wirtz, M., *Cellular biology of sulfur and its functions in plants, in Cell Biology of Metals and Nutrients*. R. Hell, R.R. Mendel (eds), Berlin Heidelberg, 2010, pp. 243–279, https://doi.org/10.1007/978-3-642-10613-2_11
44. Jordan, H.V., Ensminger, L.E., *Advances in Agronomy*, 1959, vol. 10, p. 407. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60071-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60071-1)
45. Lucheta, A.R., Lambais, R., *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2012, vol. 36, p. 1369, <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000500001>
46. Subbarao, G.V., Ito, O., Berry, W.L., Wheeler, R.M., *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2003, vol. 22, no. 5, p. 391, <https://doi.org/10.1080/07352680390243495>
47. Maathuis, F.J.M., *Journal of Experimental Botany*, 2014, vol. 65, no. 3, p. 849, <https://doi.org/10.1093/jxb/ert326>
48. Ohyama, T., *Nitrogen as a major essential element of plants, in Nitrogen Assimilation in Plants*, Kerela, India, Research Signpost, 2010, p. 1.
49. Uchida, R., *Essential Nutrients for Plant Growth: Nutrient Functions and Deficiency Symptoms. Plant Nutrient Management in Haeaii's Soils, Approaches for Tropical and Subtropical Agriculture*, College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii at Manoa, Hawaii, Manoa, 2000, p. 31.
50. Wang, M., Zheng, Q., Shen, Q., Guo, S., *Int. J. Mol. Sci.*, 2013, vol. 14, p. 7370, <https://doi.org/10.3390/ijms14047370>

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

УДК 621.039.34

**ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОГО
ВЫДЕЛЕНИЯ ^{186}Re БЕЗ НОСИТЕЛЯ ИЗ ОБЛУЧЕННЫХ
МИШЕНЕЙ ИЗ ВОЛЬФРАМА****© 2022 г. Е. Б. Фуркина^{a,*}, А. В. Курочкин^a, Р. А. Алиев^a, В. А. Загрядский^a,
Т. Ю. Маламут^a, В. И. Новиков^a, В. Н. Унежев^a**^a НИЦ “Курчатовский институт”

Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

*e-mail: furkina-k@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.11.2021 г.

После доработки 09.12.2021 г.

Принята к публикации 10.12.2021 г.

Разработана лабораторная установка для выделения радиоизотопов рения из облученной вольфрамовой мишени с помощью экстракционной хроматографии. Работа установки протестирована с помощью мишени из металлического вольфрама естественного изотопного состава, облученной дейтронами на циклотроне У-150 НИЦ “Курчатовский институт”. Показана возможность полного отделения рения от больших количеств (сотни миллиграмм) вольфрама. При разделении рений концентрируется в минимальном объеме (5 мл) итогового раствора, обеспечивая высокую удельную активность, необходимую для дальнейших экспериментов по созданию радиофармпрепарата.

DOI: 10.31857/S0032816222030016

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире активно ведутся разработки радиофармпрепаратов (РФП) на основе ^{186}Re [1–3]. Радионуклид ^{186}Re без носителя может быть получен на циклотроне по реакциям $^{186}\text{W}(p, n)^{186}\text{Re}$ [4, 5] и $^{186}\text{W}(d, 2n)^{186}\text{Re}$ [6, 7]. Процесс выделения рения из облученной вольфрамовой мишени можно осуществить различными способами: экстрагировать в виде ReO_4^- из раствора мишени кислородсодержащими экстрагентами, например метилэтилкетон [8], или использовать термический метод сухой отгонки [9]. Однако, в основном, для разделения применяют хроматографические методы с использованием оксида алюминия или анионообменных смол в качестве неподвижной фазы [10]. На практике для терапии онкологических заболеваний применяют РФП с активностью $^{186}\text{Re} \sim 100$ МБк. Для наработки такой активности ^{186}Re используют циклотронные мишени с массой ^{186}W несколько сотен миллиграмм. В технологическом процессе переработки высокоактивных циклотронных мишеней с целью минимизации радиологического воздействия на персонал применяют локальные средства автоматизации.

Настоящая статья посвящена разработке и тестированию лабораторной установки для хро-

мографического выделения ^{186}Re из облученных вольфрамовых мишеней. Приведена схема установки, изложен принцип и последовательность ее работы. Проведено тестирование работы установки в ходе эксперимента по масштабированию и автоматизации разработанной авторами хроматографической методики выделения рения из облученной вольфрамовой мишени. Показано, что с помощью разработанной установки можно в рамках одной технологической операции полностью извлекать рений из вольфрамовой мишени массой несколько сотен миллиграмм. Подобраны оптимальные условия элюирования и необходимые объемы растворов для данной установки. Конструкция созданной установки позволяет проводить разделение в защитном боксе с использованием дистанционного управления, что существенно снижает радиологическое воздействие на персонал.

СХЕМА УСТАНОВКИ

Принципиальная схема установки представлена на рис. 1. Установка состоит из четырех подающих 1–4 и четырех приемных 5–8 емкостей из полипропилена с химическими реагентами, хроматографической колонки *K* из полипропилена сечением 0.65 см^2 , перистальтического насоса *PP*

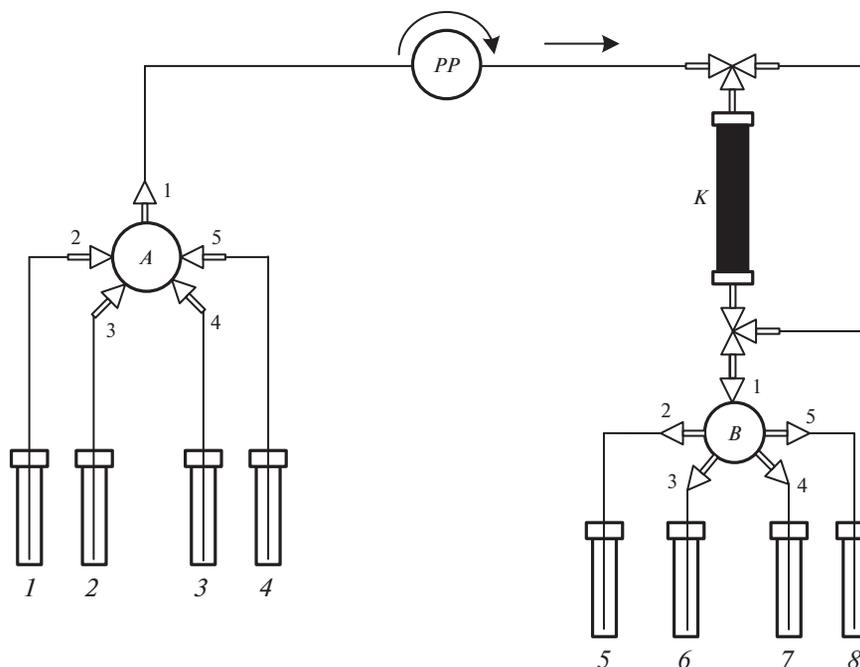


Рис. 1. Схема установки для выделения рения из раствора облученной вольфрамовой мишени. *A, B* – пятиходовые клапаны-переключатели; *K* – экстракционная колонка с трехходовыми кранами и байпасной трубкой для удаления воздуха; *PP* – перистальтический насос. *1–4* – емкости для подачи к клапану *A*: рабочего раствора после растворения *W-Re* в 3М NaOH, затем – 3М NaOH для элюирования (*1*), дистиллированной воды (*2*), 4М HNO₃ (*3*), 8М HNO₃ (*4*); *5–8* – емкости для подачи от клапана *B*: элюата нанесения с основной массой вольфрама (*5*), элюата промывки водой (*6*), фракции с рением (*7*), сброса отходов (*8*).

компании LongerPump BT100-2J с головкой YZ1515X и двух пятиходовых клапанов-переключателей *A* и *B* компании Swagelok SS-43ZFS2 с электрическим приводом Swagelok MS-142DCZE. Клапаны изготовлены из нержавеющей стали марки 316 с фторопластовыми уплотнениями. Управление клапанами осуществляется дистанционно.

Установка размещена в защитном вытяжном шкафу. Хроматографическая колонка объемом 1 мл заполнена экстракционно-хроматографической смолой TEVA Resin (TE-B25-A 100–150 мкм) компании Трискем. Смола TEVA представляет собой алифатический четвертичный амин Aliquat 336, нанесенный на полимерную смолу Amberchrom CG-71. Смолу в колонке удерживал фильтр из стекловолкна. Расчетная скорость потока растворов через насос составляла 1 мл/мин. При создании установки были рассчитаны объемы подводящих и отводящих трубок. Эти объемы учитывались при проведении разделения и при расчете требуемых объемов каждого элюента. До и после колонки установлены трехходовые краны с байпасной линией для удаления воздуха из коммуникаций перед началом работы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ РАБОТЫ УСТАНОВКИ

Для тестирования работы установки использован порошок металлического вольфрама природного изотопного состава, облученный на циклотроне У-150 НИЦ “Курчатовский институт” дейтронами с энергией 28 МэВ. Мишень облучали до достижения интегрального заряда 0.1 мкА · ч. В качестве индикаторов наличия в растворах вольфрама и рения использовали наработанные в вольфраме радиоизотопы ¹⁸⁷W ($T_{1/2} = 23.9$ ч) и ¹⁸¹Re ($T_{1/2} = 20$ ч). Активности ¹⁸⁷W и ¹⁸¹Re определяли на γ -спектрометре фирмы ORTEC с детектором из сверхчистого германия: активность ¹⁸⁷W – по γ -линии с $E_\gamma = 686$ кэВ, а активность ¹⁸¹Re – по γ -линии с $E_\gamma = 366$ кэВ. К извлеченному из облученной мишени порошку металлического вольфрама массой 153 мг осторожно, по каплям, добавляли 1200 мкл 60%-го раствора H₂O₂ при нагревании до 80°C. В связи с тем, что раствор очень сильно пенится, растворение проводили в стакане большого (100 мл) объема. После окончания реакции и растворения вольфрама к получившемуся раствору осторожно, по каплям, добавляли 1800 мкл 6 М NaOH. При добавлении щелочи раствор окрашивался в желтый цвет, затем становился прозрачным. При растворении еще больших

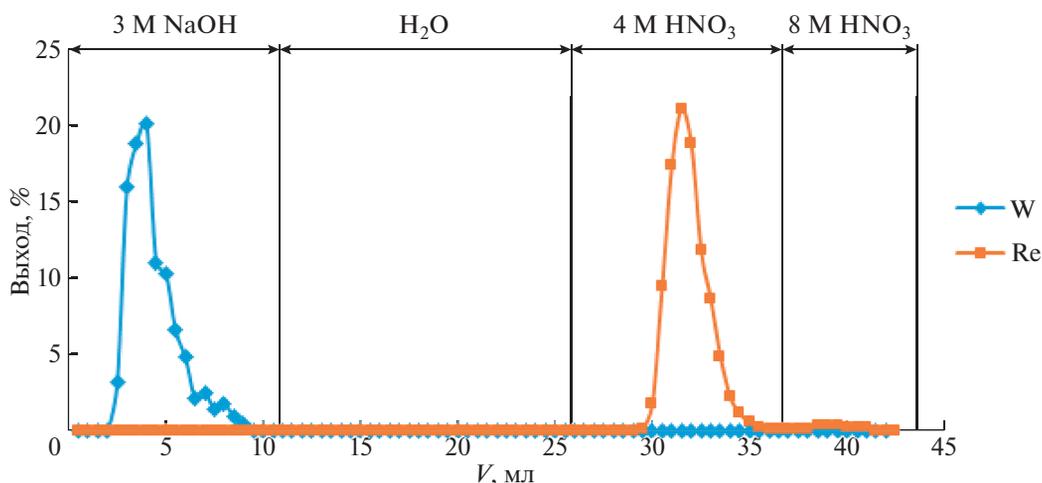


Рис. 2. Результаты элюирования вольфрама и рения в процессе автоматизированной переработки облученной вольфрамовой мишени.

количество вольфрама после добавления перекиси возможно образование белого осадка, который растворялся после добавления щелочи. Далее раствор выдерживали до полного разложения щелочи и прекращения газообразования, так как пузырьки газа при попадании в колонку замедляют процесс разделения. Выдержка занимала около 1 ч.

Полученный раствор перерабатывали на созданной установке.

Перед началом работы на установке освобождали трассы от воздуха, заполняя их раствором 3 М щелочи минуя колонку. Колонку подготавливали, промывая ее раствором 3 М щелочи (2–3 колоночных объема).

При пропуске рабочего раствора через колонку рений сорбировался на колонке, а вольфрам проходил через нее. Элюировали вольфрам раствором 3 М NaOH до полного удаления его с колонки. Содержание вольфрама в элюате контролировали с помощью γ -спектрометрии. Затем удаляли щелочь, пропуская дистиллированную воду через трассы и колонку. Контроль удаления щелочи осуществляли измерением pH раствора с помощью индикаторной бумаги. Элюировали рений раствором 4 М HNO₃. Содержание рения в элюате контролировали с помощью γ -спектрометрии. Затем для полной очистки сорбента колонку промывали сначала раствором 8 М HNO₃, после чего — дистиллированной водой и консервировали до следующего эксперимента.

Гамма-спектры от образцов элюата измеряли в одной и той же геометрии по отношению к детектору. Все γ -спектры были проанализированы на наличие характерных γ -линий вольфрама и рения. При обнаружении соответствующих γ -линий в образцах элюата были проведены расчеты активности искомых радионуклидов.

По результатам измерений построены кривые элюирования вольфрама и рения, представленные на рис. 2. По горизонтальной оси на рис. 2 указаны объемы пропущенных через экстракционную колонку растворов: 0–11 мл для раствора 3 М NaOH, 12–26 мл для дистиллированной воды при смене среды, 27–37 мл для раствора 4 М HNO₃ и 38–43 мл для раствора 8 М HNO₃. Вертикальная шкала соответствует относительному выходу радионуклида — отношению активности радионуклида в отдельной пробе к суммарной активности радионуклида в границах пика элюирования.

Согласно рис. 2, на созданной лабораторной установке удалось достичь полного разделения вольфрама и рения: γ -линий рения не обнаружено в спектре вольфрамового элюата, соответственно γ -линий вольфрама не обнаружено в спектрах рениевых образцов. Весь вольфрам выходит в первых десяти миллилитрах элюата, основная часть рения выходит в пяти миллилитрах (с 30 по 35 мл) элюата. Ширина пика выхода вольфрама зависит от исходного объема раствора, направляемого на экстракционную колонку. Чем меньше будет объем раствора, тем в меньшем объеме будет выходить вольфрам. Ширина пика выхода рения не зависит от объема исходного раствора. Она обусловлена исключительно коэффициентом удерживания рения на сорбенте в данной среде. Можно предположить, что, даже при значительно больших активностях рения (вплоть до единиц кюри), весь рений будет элюироваться в данном минимальном объеме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана, изготовлена и протестирована автоматизированная лабораторная установка для

хроматографического выделения ^{186}Re без носителя из облученных вольфрамовых мишеней.

2. Подобраны оптимальные режимы элюирования и необходимые объемы растворов для данной установки.

3. Показано, что с помощью разработанной установки можно в рамках одной технологической операции полностью извлекать рений из вольфрамовой мишени с массой несколько сотен миллиграмм.

4. Общее время переработки мишени на созданной лабораторной установке, включая время растворения и время выдержки после растворения, не превышает двух часов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке НИЦ “Курчатовский институт”, приказ № 2751 от 28.10.2021.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lam M.G., de Klerk J.M., van Rijk P.P.* // European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging. 2004. V. 31. № S1. P. S162.
<https://doi.org/10.1007/s00259-004-1539-4>
2. *Knut L.* // World Journal of Nuclear Medicine. 2015. V. 14. P. 10.
<https://doi.org/10.4103/1450-1147.150509>
3. *Kinuya S., Yokoyama K., Izumo M., Sorita T., Obata T., Mori H., Shiba K., Watanabe N., Shuke N., Michigishi T., Tonami N.* // Cancer Letters. 2005. V. 219. P. 41.
<https://doi.org/10.1016/j.canlet.2004.08.033>
4. *Khandaker M.U., Uddin M.S., Kim K., Lee M.W., Kim K.S., Lee Y.S., Kim G.N., Cho Y.S., Lee Y.O.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Research B. 2008. V. 266. P. 1021.
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2008.02.037>
5. *Bonardi M., Groppi F., Persico E., Manenti S., Abbas K., Holzwart U., Simonelli F., Alfassi Z.B.* // Radiochim. Acta. 2011. V. 99. P. 1.
<https://doi.org/10.1524/ract.2011.1789>
6. *Khandaker M.U., Nagatsu K., Minegishi K., Wakui T., Zhang Ming-Rong, Otuka N.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Research B. 2017. V. 403. P. 51.
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2017.04.087>
7. *Zagryadskii V.A., Latushkin S.T., Makoveeva K.A., Malamatui T.Yu., Novikov V.I., Ogloblin A.A., Unezhev V.N.* // At Energy. 2020. V. 128. P. 162.
<https://doi.org/10.1007/s10512-020-00668-6>
8. *Moustapha M.E., Ehrhardt G.J., Smith C.J., Szajek L.P., Eckelman W.C., Jurisson S.S.* // Nucl. Medicine and Biology. 2006. V. 33. Issue 1. P. 81.
<https://doi.org/10.1016/j.nucmedbio.2005.09.006>
9. *Загрядский В.А., Кравец Я.М., Латушкин С.Т., Маламут Т.Ю., Новиков В.И., Рыжков А.В., Удалова Т.А., Унежев В.Н., Чувиллин Д.Ю.* // ПТЭ. 2021. № 4. С. 125.
<https://doi.org/10.31857/S0032816221040297>
10. *Aliev R.A., Kormazeva E.S., Furkina E.B., Moiseeva A.N., Zagryadskii V.A.* // Nanotechnol Russia. 2020. V. 15. P. 428.
<https://doi.org/10.1134/S1995078020040023>

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

УДК 535.361

**ТЕХНИКА РЕГИСТРАЦИИ СПЕКТРОВ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ
БИОАКТИВНЫХ ПРЕПАРАТОВ И ИХ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА**© 2022 г. А. Д. Кудрявцева^{а,*}, М. Ф. Умаров^{б,**}^а*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53*^б*Вологодский государственный университет
Россия, 160001, Вологда, ул. Ленина, 15***e-mail: kudryavcevaad@lebedev.ru****e-mail: umma54@rambler.ru*

Поступила в редакцию 27.12.2021 г.

После доработки 06.01.2022 г.

Принята к публикации 09.01.2022 г.

Разработана техника регистрации спектров флуоресценции биоактивных препаратов, позволяющая проводить экспресс-анализ молекулярных структур различных классов. Предложен программный пакет для анализа и обработки получаемых спектров. Построены корреляционные функции для идентификации лекарственных препаратов различных производителей. Показано, что рассчитанные корреляционные функции позволяют с высокой точностью получить информацию о соответствии испытуемого образца эталону.

DOI: 10.31857/S0032816222030119

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день наблюдается явная тенденция исследования спектров вторичного излучения сложных молекулярных соединений. Во многих лабораториях проводятся эксперименты, целью которых является использование методов вторичного излучения для анализа веществ. В большинстве случаев исследователи рассматривают непосредственные приложения своих исследований к интересующей их отрасли, например: биомедицине, фармакологии и промышленному производству. Так, в работах [1, 2] из лаборатории Эдинбургской инженерной школы сравниваются несколько методов анализа веществ (биологических препаратов) с использованием как оптоволоконной технологии, так и пробирки и микроскопа. Отмечено, что спектроскопия комбинационного рассеяния является мощным орудием для изучения состава сложных объектов, в том числе взрывчатых веществ [3]. В работе [4] было предложено для проведения экспресс-сканирования веществ использовать зонды с различным торцевым покрытием для улучшения передачи излучения фемтосекундного лазера. В работах [5, 6] предлагается использовать схемы с оптоволоконным зондированием для получения спектров вторичного излучения и представлен расчет эффективности методики. В отличие от предложенной нами методики регистрации спек-

тров вторичного излучения, в вышеприведенных работах используются сложные экспериментальные устройства больших габаритов.

Целью данной работы являлось получение, анализ и математическая обработка спектров анализируемых и номинальных биоактивных препаратов на примере коммерческих фармацевтических препаратов от различных производителей. Поставленные задачи решались на основе использования волоконно-оптической методики [7, 8], развиваемой в лаборатории “Комбинационное рассеяние” Физического института им. П.Н. Лебедева РАН. Математическая обработка и анализ флуоресцентных спектров осуществлялись с помощью программного пакета “FSD Soft”.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве объектов исследования были выбраны типичные фармацевтические препараты: цитрамон, анальгин, аспирин и парацетамол. В структуре всех исследованных веществ присутствуют ароматические кольца, что приводит к фундаментальному электронному поглощению в среднем ультрафиолетовом диапазоне. Соответственно в этих веществах наблюдается флуоресценция в фиолетово-красном диапазоне при возбуждении коротковолновым (266 нм) электромагнитным излучением [9]. Нами был использован

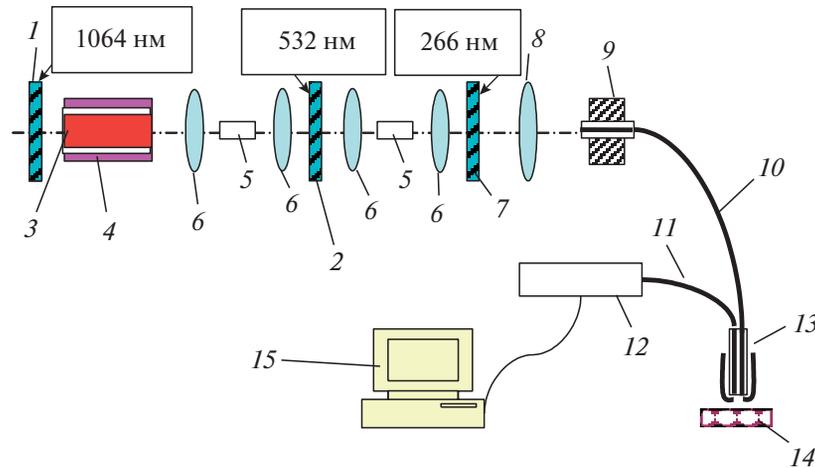


Рис. 1. Схема “на отражение” с одноканальным зондом для регистрации спектров вторичного излучения биоактивных соединений. 1, 2, 7 – зеркала; 3 – активный элемент; 4 – “накачка”; 5 – нелинейный кристалл; 6 – линза; 8 – конденсор; 9 – фиксатор световода; 10, 11 – световоды; 12 – спектрограф; 13 – зонд; 14 – анализируемый образец; 15 – компьютер.

способ регистрации флуоресцентных спектров с применением схем “на отражение” (рис. 1). В данной схеме полезный сигнал от образца собирается практически в той же точке, из которой выходит возбуждающее излучение из смежного световода. Преимуществом данного способа регистрации является сильное ослабление возбуждающего излучения, проходящего “вперед”, в то время как вторичное излучение собирается вторым световодом “назад”.

В качестве источника возбуждающего ультрафиолетового излучения использовалась четвертая гармоника (266 нм) лазера на алюмоиттриевом гранате, генерирующего импульсно-периодическое излучение с длиной волны 1064 нм. Средняя мощность возбуждающего ультрафиолетового излучения на поверхности анализируемого препарата составляла 10 мВт, что позволяло осуществлять анализ объекта без какой-либо его деструкции.

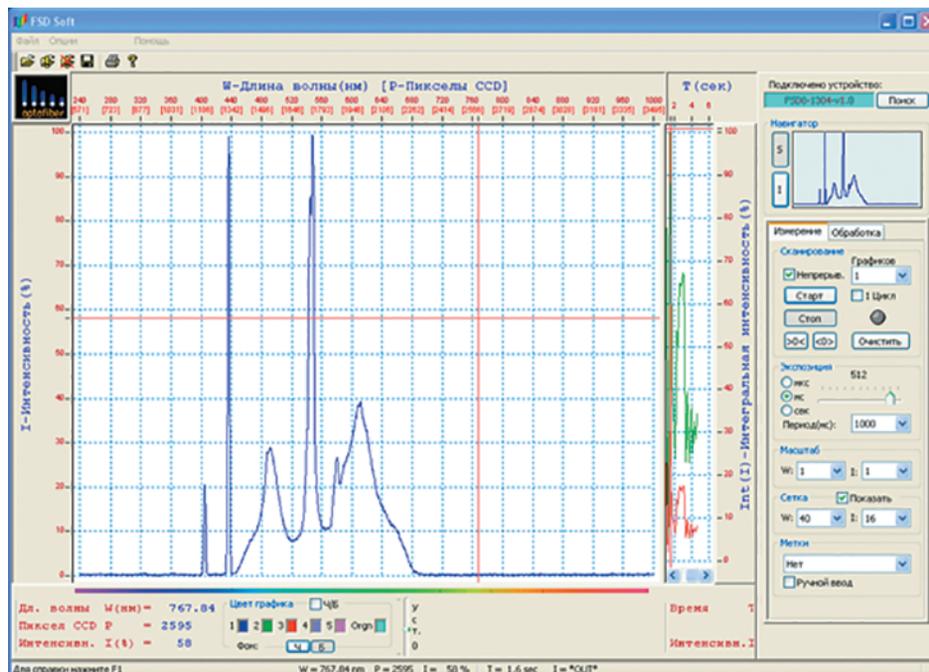


Рис. 2. Внешний вид окна программы “FSD Soft”.

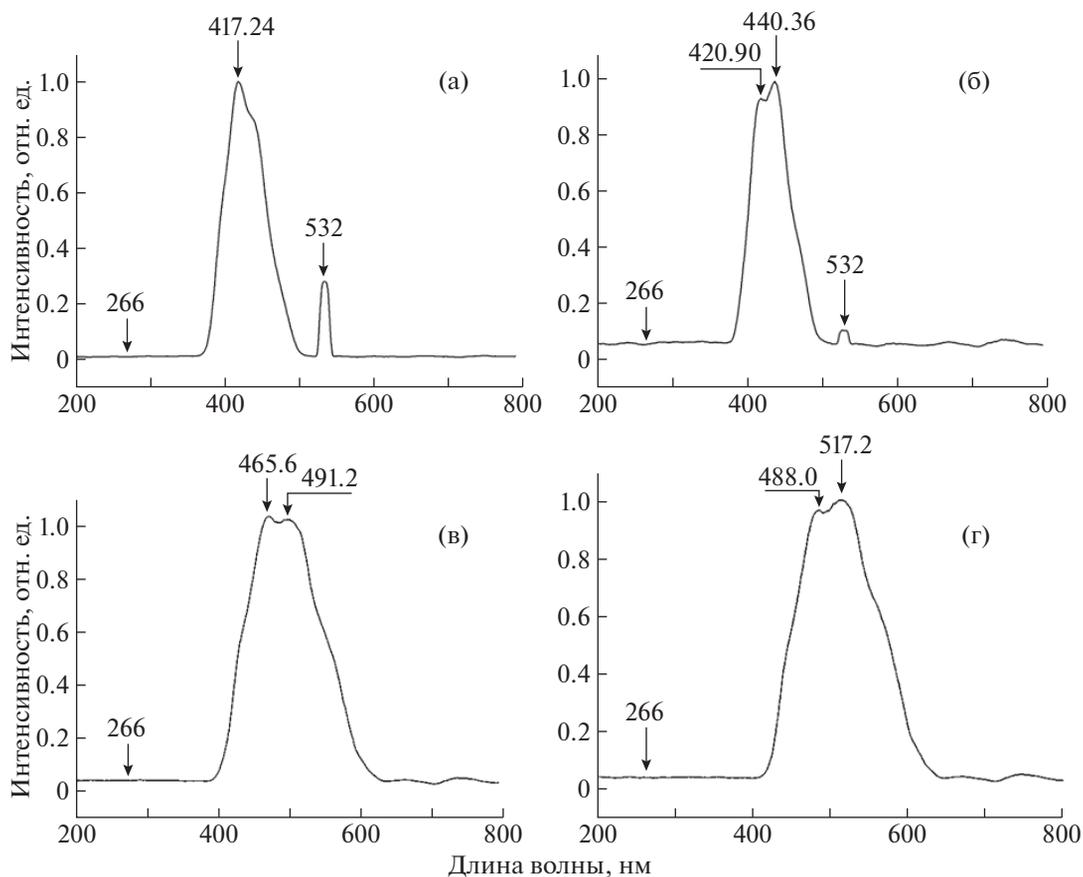


Рис. 3. Нормированные спектры вторичного излучения: аспирина (а), цитрамона (б), анальгина (в) и парацетамола (г), полученные при возбуждении ультрафиолетовым излучением четвертой гармоники (266 нм) импульсно-периодического лазера на алюмоиттриевом гранате.

Небольшое количество анализируемого вещества в виде таблетки помещалось в кювету 14 (см. рис. 1). Кварцевые световоды 10, 11 использовались соответственно для подведения ультрафиолетового излучения к веществу и для отведения возникающего в анализируемой пробе вторичного излучения к малогабаритному спектральному прибору 12. При этом пространственное разрешение на поверхности анализируемой пробы составляло 0.1 мм.

В качестве спектрального прибора использовался миниспектрометр FSD-8. Прилагаемое к нему программное обеспечение "FSD Soft" предназначено для реализации совместной работы миниспектрометра с компьютером в среде WindowsXP, Windows 2000. Данное программное обеспечение позволяет непосредственно из окна программы выбрать режим сканирования (дискретный или непрерывный); установить время засветки оптического датчика, что определяет чувствительность прибора; а также усреднить измеренный спектр в случае сильного зашумления измеряемого излучения.

Внешний вид окна программы с подключенным прибором FSD-8 показан на рис. 2. Программа имеет два рабочих окна: первое – для отображения графиков спектра, второе – для вывода графиков интегральных составляющих спектральной характеристики. В самой верхней части окна расположено меню программы, а ниже – панель инструментов, имеющая стандартные кнопки управления. Перемещение мышки по рабочей области окна указывает на соответствующие координаты внутри графической информации. Горизонтальная ось в верхней рабочей части окна отображения графиков спектра – это ось длины волны (λ), проградуированная в нанометрах; слева вертикальная ось – ось интенсивности (I) исследуемого излучения. В нижней части окна расположен монитор перемещений и оперативный контроль цветов исследуемых графиков.

В правой части окна размещена панель управления процессом измерений, имеющая несколько органов управления. В самой верхней части панели находится индикатор подключенного

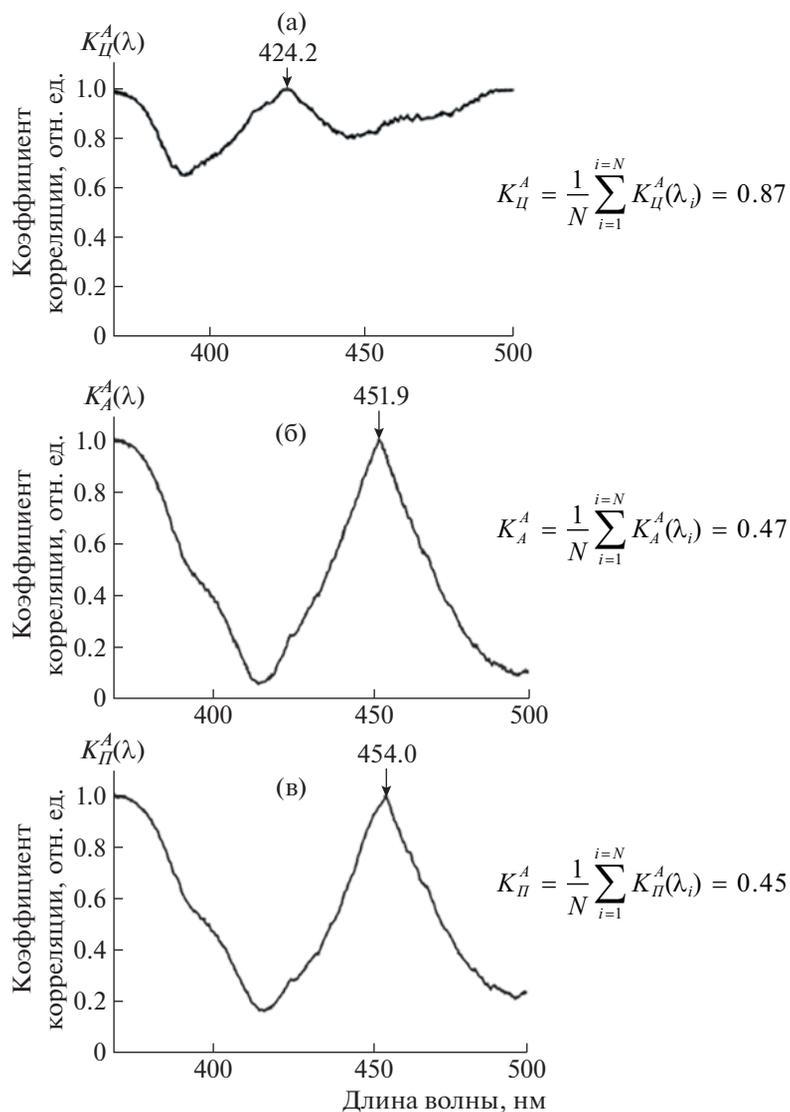


Рис. 4. Корреляционные спектры: цитрамона (а), анальгина (б) и парацетамола (в) – при их сравнении со спектром флуоресценции аспирина.

устройства. Ниже на панели расположены закладки “Измерение” и “Обработка”.

В процессе измерений есть вероятность появления сильно зашумленного сигнала. Например, это может иметь место при очень слабом сигнале и большом времени экспозиции. Для сглаживания характеристики отображаемого графика спектра исследуемого сигнала введена опция динамического осреднения измеренных значений, осреднение происходит в момент считывания информации с датчика. Следует отметить, что осреднение проводится по заданному числу точек графика. Кроме того, в программе присутствует инструмент, который работает исключительно с последним статическим графиком.

В программе также предусмотрено выполнение таких действий, как вычитание и деление между двумя графиками.

Программа обеспечивает сохранение полученных результатов в графических, текстовых и табличных форматах.

В программе “FSD Soft” все графические и математические операции предусмотрены только в формате базы данных EXCEL.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Нами были получены нормированные спектры флуоресценции четырех указанных выше фармацевтических препаратов [10]: аспирина (рис. 3а), цитрамона (рис. 3б), анальгина (рис. 3в)

и парацетамола (рис. 3г). Согласно рис. 3, у всех анализируемых фармацевтических препаратов в фиолетово-красной области спектра наблюдаются структурированные полосы флуоресценции, форма которых несущественно различается, по крайней мере, для цитрамона и аспирина, а также для анальгина и парацетамола.

Для установления количественного различия спектров, полученных для различных фармацевтических препаратов, нами были построены корреляционные функции $K_X^A(\lambda)$ (рис. 4) с использованием следующего соотношения [11]:

$$K_X^A(\lambda) = 1 - |i_X(\lambda) - i_A(\lambda)|, \quad (1)$$

где $i_X(\lambda)$, $i_A(\lambda)$ – нормированные спектры флуоресценции анализируемого препарата (X) и аспирина (A). Корреляционные спектры строились в диапазоне длин волн $\Delta\lambda = 300\text{--}500$ нм с интервалом разбиения $\Delta\lambda_i = 0.25$ нм.

Кроме того, были вычислены соответствующие коэффициенты корреляции K_X^A (см. рис. 4) анализируемых препаратов по отношению к аспирину по формуле:

$$K_X^A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} K_X^A(\lambda_i), \quad (2)$$

где N – число диапазонов разбиения.

Как видно из рис. 4, корреляционные спектры дают количественную информацию о различиях в спектрах флуоресценции, что позволяет однозначно отнести анализируемый препарат к заданному виду, а также осуществлять контроль качества коммерческих фармацевтических препаратов. Кроме того, разработанная методика хорошо апробирована для анализа спектров фотолуминесценции и комбинационного рассеяния ароматических аминокислот [12, 13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе на примере близких по структуре фармацевтических препаратов (цитрамона, аспирина, анальгина и парацетамола) показано, что для количественного неразрушающего контроля молекулярного состава и структуры биоактивных препаратов, содержащих ароматические кольца, может быть эффективно использован метод флуоресцентного анализа, дополненный построением соответствующих

корреляционных функций. Разработанный метод корреляционной флуоресцентной спектроскопии может быть использован также для количественного контроля степени соответствия эталону диэлектрических объектов, люминесцирующих при ультрафиолетовом возбуждении, спектральные характеристики которых в цифровом виде введены в базу данных. Для математической обработки и анализа флуоресцентных спектров биоактивных препаратов необходим программный пакет “FSD Soft”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Downes A., Elfick A. // Journal Sensors. 2010. V. 10. № 3. P. 1871. <https://doi.org/10.3390/s100301871>
2. Sikirzhyski V., Virkler K., Lednev I.K. // Journal Sensors. 2010. V. 10. № 4. P. 2869. <https://doi.org/10.3390/s100402869>
3. Holthoff E.L., Stratis-Cullum D.N., Hankus M.E. // Journal Sensors. 2011. V. 11. № 3. P. 2700. <https://doi.org/10.3390/s110302700>
4. Xiaodong M., Huo H., Wang W., Tian Y., Wu N., Guthy C., Shen M., Wang X. // Journal Sensors. 2010. V. 10. № 12. P. 11064. <https://doi.org/10.3390/s101211064>
5. Notingher I. // Journal Sensors. 2007. V. 7. № 8. P. 1343. <https://doi.org/10.3390/s7081343>
6. Bao X., Chen L. // Journal Sensors. 2012. V. 12. № 7. P. 8601. <https://doi.org/10.3390/s120708601>
7. Бортников К.С., Горелик В.С., Есаков А.А. // Неорганические материалы. 2007. Т. 43. № 12. С. 1458.
8. Gorelik V.S., Ivicheva S.N., Kargin Yu.F., Filatov V.V. // Inorganic Materials. 2013. V. 49. № 7. P. 685. <https://doi.org/10.1134/S0020168513060046>
9. Войнов Ю.П., Горелик В.С., Умаров М.Ф., Юрин М.Е. Патент на изобретение № 2488097 РФ // Оpubл. 20.07.2013. Бюл. № 20.
10. Voinov Y.P., Gorelik V.S., Pyatyshev A.Y., Umarov M.F. // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2012. V. 39. № 12. P. 341. <https://doi.org/10.3103/S1068335612120044>
11. Voinov Y.P., Gorelik V.S., Umarov M.F., Morozova S.V. // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2011. V. 38. № 11. P. 323. <https://doi.org/10.3103/S1068335611110029>
12. Gorelik V.S., Umarov M.F. // Opt. Spectrosc. 2018. V. 125. № 1. P. 144. <https://doi.org/10.1134/S0030400X18070111>
13. Gorelik V.S., Voinov Y.P., Umarov M.F. // Opt. Spectrosc. 2019. V. 127. № 4. P. 596. <https://doi.org/10.1134/S0030400X19100096>

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 629.7.052

РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛА КРЕНА
ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

© 2022 г. В. Л. Гулько^а, А. А. Мещеряков^{а,*}, Н. К. Блинковский^а

^а Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 40

*e-mail: msch@rts.tusur.ru

Поступила в редакцию 20.01.2022 г.

После доработки 26.01.2022 г.

Принята к публикации 04.02.2022 г.

Для определения угла крена летательного аппарата по пассивному поляризационно-анизотропному радиолокационному уголкового отражателю с горизонтальной собственной поляризацией используются поляризационно-модулированные по углу ориентации плоскости поляризации зондирующие сигналы. Оценка угла крена летательного аппарата осуществляется на выходе приемника по фазе спектральной составляющей на удвоенной частоте вращения плоскости поляризации излучаемых сигналов, содержащейся в спектре огибающей принятых сигналов. Описан макет экспериментальной установки, реализующий этот метод. Приведены экспериментальные результаты измерения угла крена летательного аппарата. Среднеквадратичная ошибка измерения угла крена составила 0.98° .

DOI: 10.31857/S0032816222040048

ВВЕДЕНИЕ

Известные методы измерения угла крена летательного аппарата (л.а.) основаны на использовании инерциальных систем навигации, в частности гироскопических систем ориентации [1–4]. Таким методам измерения и реализующим их устройствам присущ ряд недостатков. Во-первых, с течением времени происходит постоянное накопление ошибки измерений, и за один час полета она составляет несколько единиц градусов [2, 3]. Во-вторых, если л.а. развивает значительные перегрузки, то происходит увеличение собственной скорости прецессии гироскопа, что в ряде случаев может приводить к полной потере его работоспособности [2].

В настоящей работе рассматривается радиолокационный метод измерения угла крена л.а. по пассивному радиомаяку в виде поляризационно-анизотропного уголкового отражателя с заданными поляризационными характеристиками рассеяния с использованием поляризационно-модулированных по углу ориентации плоскости поляризации зондирующих сигналов.

Использование поляризационных характеристик рассеяния пассивного радиомаяка для оценки угла крена л.а. обуславливает необходимость их рассмотрения в конкретных поляризационных базисах и в различных системах координат, связанных с радиомаяком и л.а. При этом выбор

опорной системы координат (о.с.к.), связанной с радиомаяком, собственной системы координат (с.с.к.), связанной со строительными осями л.а., а также алгоритма обработки поляризационно-модулированных принятых сигналов определяется как особенностями решаемой технической задачи, так и удобством анализа с точки зрения физической интерпретации полученных результатов.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Суть радиолокационного метода определения угла крена л.а. заключается в следующем.

Расположим в точке O с известными координатами пассивный радиомаяк в виде поляризационно-анизотропного радиолокационного отражателя с горизонтальной собственной поляризацией (рис. 1). Радиолокационный отражатель выполнен в виде трехгранного уголкового отражателя (UO), состоящего из трех плоских взаимно перпендикулярных металлических или металлизированных треугольных граней одинакового размера, значительно превышающего длину волны. Введем декартову о.с.к., оси OX и OZ которой находятся в горизонтальной плоскости XOZ , а ось OY перпендикулярна ей. Вершину UO поместим в начало о.с.к. — точку O (см. рис. 1). Известно [5, 6], что для придания поляризационно-изотропному трехгранному UO поляризационно-анизотропных свойств с горизонтальной соб-

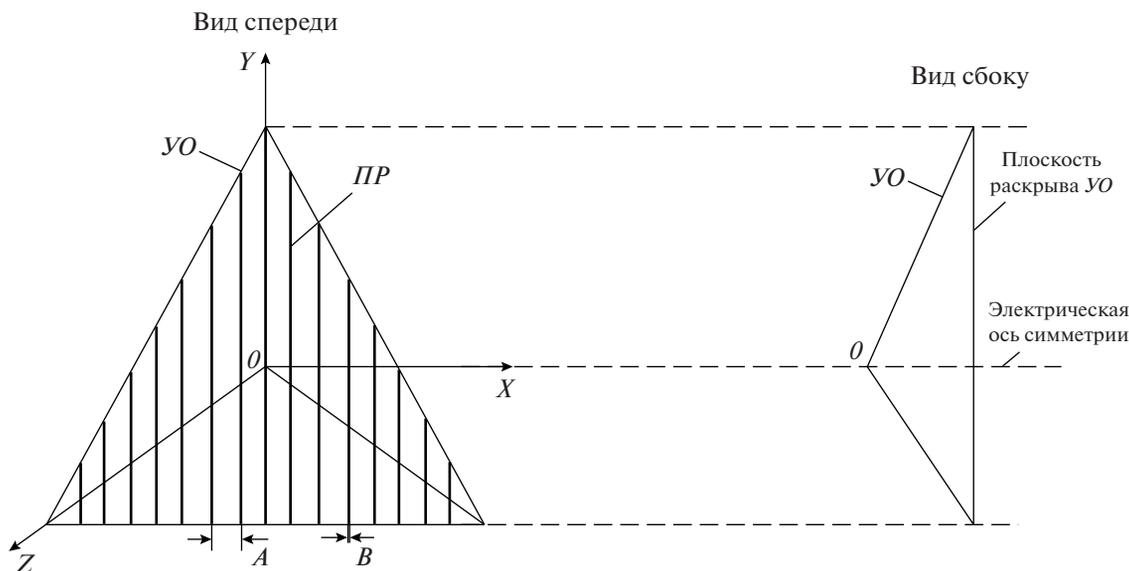


Рис. 1. Поляризационно-анизотропный радиолокационный отражатель. УО – трехгранный уголкоый отражатель с треугольными гранями; ПП – поляризационная решетка.

ственной поляризацией необходимо в раскрые УО разместить вертикально ориентированную поляризационную решетку (ПП) из параллельных металлических стержней (или проволок) с шагом A и диаметром стержней B . Параметры A и B поляризационной решетки выбираются такими [5, 6], чтобы составляющая вектора напряженности электрического поля падающей электромагнитной волны, плоскость поляризации которой ортогональна стержням решетки (проводам), пройдя через ПП, практически не изменялась. После трехкратного отражения от граней УО электромагнитная волна распространяется в направлении, обратном направлению падения. При этом отраженная электромагнитная волна всегда горизонтально поляризована, независимо от угла ориентации плоскости поляризации падающей волны, и ее фазовый центр рассеяния находится в вершине УО, расположенной в точке O [5].

В то же время составляющая вектора напряженности электрического поля, плоскость поляризации которой параллельна стержням (или проволокам), находится в вертикальной плоскости и полностью отражается от ПП, как от плоской металлической пластины [5]. Таким образом, трехгранный УО с размещенной в плоскости раскрытия вертикально ориентированной ПП рассматривается как поляризационно-анизотропный объект с горизонтальной собственной поляризацией, которая всегда совпадает с горизонтальной плоскостью XOZ . Его матрица рассеяния в собственной о.с.к. в линейном поляризационном базисе может быть представлена в виде [6–8]:

$$[S] = \sqrt{\sigma_m} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\sigma_m = \lambda_1^2$ – максимально возможная эффективная поверхность рассеяния поляризационно-анизотропного трехгранного УО при облучении его горизонтально поляризованной электромагнитной волной. Максимум эффективной поверхности рассеяния совпадает с электрической осью симметрии, проходящей через вершину УО в точке O перпендикулярно плоскости раскрытия. λ_1 – модуль собственного числа матрицы рассеяния.

Из формулы (1) следует, что в собственной о.с.к. вырожденная матрица рассеяния трехгранного УО, в раскрые которого помещена вертикально ориентированная ПП, в линейном поляризационном базисе эквивалентна матрице рассеяния ярко выраженного поляризационно-анизотропного радиолокационного объекта, представляющего собой горизонтальный вибратор [8].

Рассмотрим случай, когда с борта л.а. поляризационно-анизотропный УО с матрицей рассеяния (1) облучается линейно поляризованной электромагнитной волной, вектор напряженности электрического поля которой вращается с частотой Ω . Тогда отраженная от граней трехгранного УО электромагнитная волна, независимо от угла ориентации плоскости поляризации падающей волны, будет всегда иметь горизонтальную поляризацию, вектор напряженности электрического поля \vec{E}_r , которой совпадает с осью OX о.с.к. и находится в горизонтальной плоскости XOZ (рис. 2а). При этом максимум амплитуды отраженной от УО волны будет наблюдаться при сов-

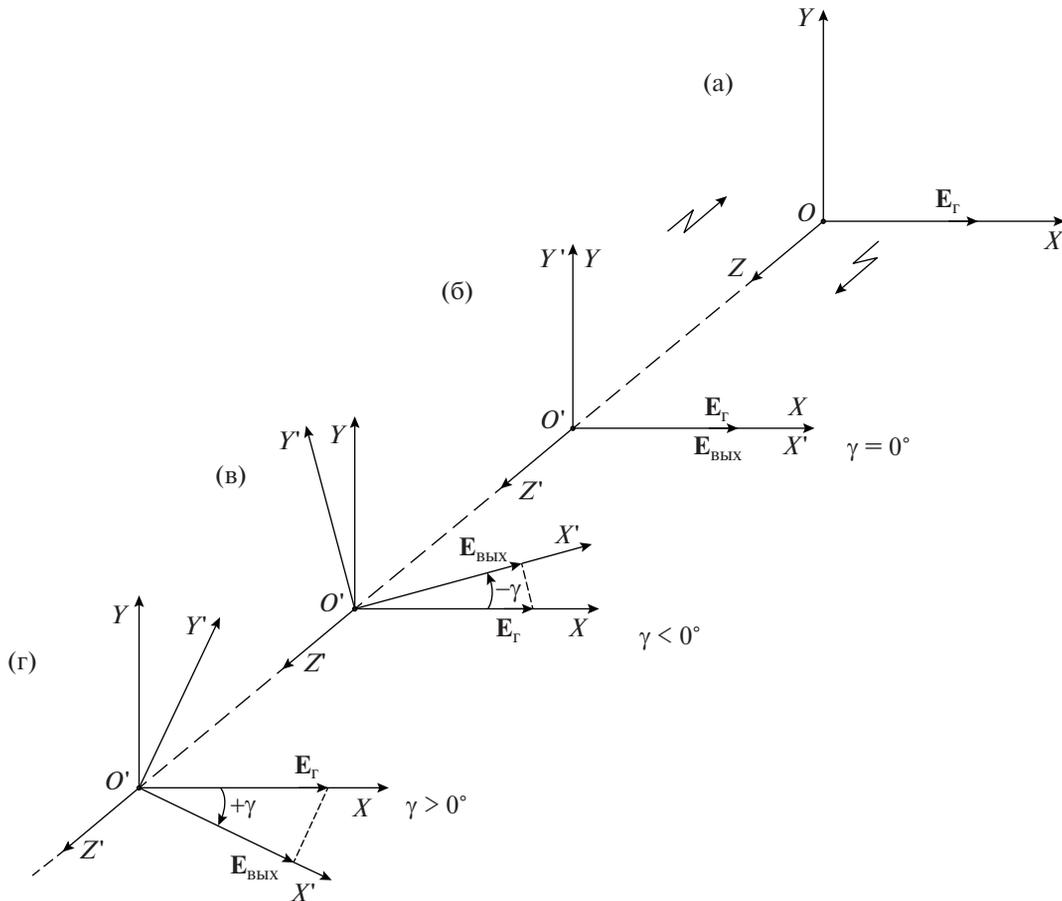


Рис. 2. К пояснению определения угла крена γ л.а.

падении горизонтальной линейной поляризации излученной электромагнитной волны с собственной горизонтальной линейной поляризацией поляризационно-анизотропного УО, которая всегда находится в горизонтальной плоскости XOZ . Минимум амплитуды будет наблюдаться при вертикальной ориентации плоскости поляризации излученной электромагнитной волны. Тогда за полный оборот вращения плоскости поляризации излученной волны с частотой Ω амплитуда отраженной от УО и соответственно принятой на борту л.а. волны будет промодулирована с частотой 2Ω .

Пусть л.а. находится в точке O' и движется в направлении на пассивный радиомаяк, и его углы тангажа и рыскания равны нулю. Определим с.с.к., связанную с корпусом л.а., как подвижную декартову систему координат $X'O'Y'$, образованную поперечной $O'X'$, вертикальной $O'Y'$ и продольной $O'Z'$ строительными осями л.а. Начало ее поместим в точку O' , совпадающую с центром масс л.а. Очевидно, что когда крен л.а. отсутствует, т.е. $\gamma = 0$, направление правой поперечной полуоси $O'X'$ и положительное направление оси OX совпадают с направлением вектора электриче-

ского поля E_Γ отраженной от УО электромагнитной волны, и они лежат в горизонтальной плоскости XOZ (рис. 2б). Соответственно, излученная горизонтально линейно поляризованная электромагнитная волна и принятая на борту л.а. электромагнитная волна с вектором E_Γ совпадают по поляризации и также находятся в горизонтальной плоскости XOZ .

Когда $\gamma \neq 0$, правая поперечная полуось $O'X'$ л.а. будет повернута против часовой или по часовой стрелке в плоскости XOY на угол, равный углу крена $\pm\gamma$ (рис. 2в и 2г). Таким образом, возникновение крена л.а. эквивалентно операции поворота с.с.к. в ту или другую сторону на угол $\pm\gamma$ относительно о.с.к. в плоскости XOY . Сама операция поворота с.с.к. может быть определена с помощью соответствующих операторов поворота [6, 7], которые будут рассмотрены ниже.

Пусть л.а. имеет в общем случае крен $\pm\gamma$. Тогда, используя формализм векторов и матриц Джонса [9], найдем вектор Джонса на выходе линейного поляризатора в линейном поляризационном базисе с помощью преобразований вида [10]:

$$\mathbf{E}_{\text{вых}} = C\{\Pi\}[R(-\alpha)][R(\mp\gamma)][S][R(\pm\gamma)][R(\alpha)]\mathbf{E}\}, \quad (2)$$

где $\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ – вектор Джонса исходной горизонтально линейно поляризованной, излучаемой передатчиком электромагнитной волны, совпадающей с правой поперечной полуосью $O'X'$ л.а.; $[R(\alpha)] = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}$ – оператор вращателя линейной плоскости поляризации излученной электромагнитной волны на угол $\alpha = \Omega t$ (Ω – частота вращения, t – время) [9]; $[R(\pm\gamma)] = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \pm\sin\gamma \\ \mp\sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix}$ – прямой оператор поворота на угол крена $\pm\gamma$ л.а.; $+\gamma$ – положительный угол крена, когда правое крыло или правая поперечная полуось $O'X'$ л.а. находится ниже горизонтальной плоскости XOZ [4]; $-\gamma$ – отрицательный угол крена, когда правое крыло или правая поперечная полуось $O'X'$ л.а. находится выше горизонтальной плоскости XOZ [4]; $[S] = \sqrt{\sigma_m} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ – матрица рассеяния поляризационно-анизотропного трехгранного $УО$ с горизонтальной линейной собственной поляризацией (1), всегда совпадающей с горизонтальной плоскостью XOZ ; $[R(\mp\gamma)] = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \mp\sin\gamma \\ \pm\sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix}$ – обратный оператор поворота на угол крена $\mp\gamma$ л.а.; $[R(-\alpha)] = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}$ – оператор вращателя плоскости поляризации принимаемой на борту л.а. электромагнитной волны на угол $-\alpha$; $[\Pi] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ – оператор линейного поляризатора (переход с круглого волновода на прямоугольный волновод) с горизонтальной линейной собственной поляризацией, совпадающей с правой поперечной полуосью $O'X'$ л.а.; C – постоянная величина, учитывающая потенциал передатчика, расстояние от передатчика до поляризационно-анизотропного $УО$ и обратно, его максимально возможную эффективную поверхность рассеяния σ_m и чувствительность приемника.

Выполнив в формуле (2) необходимые матричные преобразования, получим вектор Джонса на выходе линейного поляризатора в виде:

$$\mathbf{E}_{\text{вых}} = C \begin{bmatrix} \cos^2(\alpha \pm \gamma) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Тогда сигнал непосредственно на входе приемника будет иметь вид:

$$E_{\text{вх}} = C \cos^2(\alpha \pm \gamma). \quad (4)$$

Амплитуда сигнала на выходе приемника с логарифмической амплитудной характеристикой и линейным детектором будет равна

$$A(\alpha) = \lg C + \lg |\cos^2(\alpha \pm \gamma)|. \quad (5)$$

После преобразований (5), с учетом того, что уровень сигнала в случае логарифмического приемника обычно измеряют в децибелах, при $\alpha = \Omega t$ получим:

$$A(\Omega t) [\text{дБ}] = 20 \lg C + 20 \lg \left\{ \frac{1}{2} (1 + \cos(2\Omega t \pm 2\gamma)) \right\}. \quad (6)$$

Соотношение (6) позволяет рассчитать зависимость амплитуды выходного сигнала логарифмического приемника от углового положения α плоскости поляризации излучаемого сигнала для различных значений угла крена γ . Результаты расчета приведены на рис. 3. Кривые 1–3 соответствуют значениям угла крена γ , равным $0, 15^\circ, -15^\circ$.

Согласно рис. 3, амплитуда сигнала на выходе приемника промодулирована удвоенной частотой вращения плоскости поляризации излучаемого сигнала. При этом амплитудная модуляция сигнала достигает 100%-ной глубины и не зависит от крена γ л.а., а сдвиг сигнала по фазе определяет удвоенный угол крена γ л.а. Поэтому в спектре огибающей выходного сигнала логарифмического приемника присутствует спектральная составляющая на частоте 2Ω . Ее амплитуду $A_{2\Omega}$ с учетом формулы (6) можно найти с помощью фурье-преобразования вида:

$$A_{2\Omega} [\text{дБ}] = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} A(\Omega t) \cos 2\Omega t d(\Omega t), \quad (7)$$

и она будет равна $A_{2\Omega} = 17.37$ дБ и не будет зависеть от угла крена, а ее фаза $\varphi_{2\Omega}$, с учетом формулы (6), связана с углом крена γ л.а. соотношением:

$$\gamma [\text{рад}] = \pm \frac{\varphi_{2\Omega}}{2}, \quad (8)$$

где знак “+” соответствует положительному углу крена γ , знак “–” – отрицательному.

Фаза $\varphi_{2\Omega}$ отсчитывается относительно фазы опорного сигнала $\cos(2\Omega t)$, определяемой угловым положением плоскости поляризации излучаемого сигнала.

Необходимо также отметить, что амплитуда $A_{2\Omega}$ и фаза $\varphi_{2\Omega}$ не зависят от потенциала передатчика, чувствительности приемника и расстояния от л.а. до пассивного радиомаяка и его эффективной поверхности рассеяния. Энергетические параметры определяют постоянную составляющую сигнала на выходе логарифмического приемника бортовой радиолокационной станции (р.л.с.).

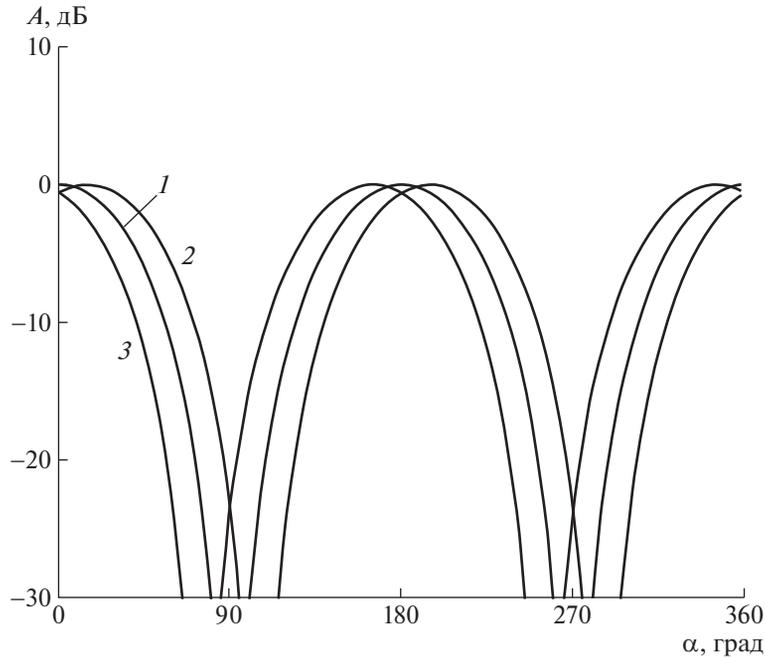


Рис. 3. Зависимости амплитуды выходного сигнала логарифмического приемника от угла ориентации α плоскости поляризации излучаемых сигналов при углах крена γ : 0° (1), 15° (2) и -15° (3).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ПОЛЯРИЗАЦИОННО-МОДУЛЯЦИОННОЙ Р.Л.С.

С целью проверки результатов теоретических исследований и получения экспериментальных оценок точности определения угла крена γ л.а. создан макет поляризационно-модуляционной р.л.с. Функциональная схема макета представлена на рис. 4. Макет включает в себя наземный пассивный радиомаяк, расположенный в точке с известными координатами, а также сверхвысокочастотную (с.в.ч.) одноканальную поляризационно-модуляционную р.л.с. на основе самолетной р.л.с. “Гроза-26”. Пассивный радиомаяк представляет собой поляризационно-анизотропный трехгранный УО, в раскрытие которого помещена вертикально ориентированная ПР в виде проводников с шагом $A = 8$ мм и диаметром проводников $B = 0.8$ мм. Для реализации предложенного метода был доработан штатный облучатель приемно-передающей антенны р.л.с. “Гроза-26” путем установки в него поляризационного модулятора. Поляризационный модулятор включал в себя вращающуюся секцию круглого волновода с полуволновой фазовой пластиной, которая изменяла плоскость поляризации излучаемых сигналов с частотой $\Omega = 20$ Гц. Приемно-передающая антенна представляла собой параболическое зеркало диаметром 760 мм. Ширина диаграммы направленности антенны по уровню половинной мощности составляла 3° , коэффициент усиления антенны 25 дБ, чувствительность приемника -120 дБ/Вт,

длительность излучаемых импульсов 3.5 мкс; частота повторения импульсов 400 Гц; мощность излучения 9 кВт.

Поляризационно-модуляционная р.л.с. работает следующим образом.

В точке с известными координатами устанавливают пассивный радиомаяк, представляющий собой поляризационно-анизотропный трехгранный УО с горизонтальной собственной поляризацией, в раскрытие которого помещена вертикально ориентированная ПР. Внешний вид пассивно-поляризационно-анизотропного радиомаяка представлен на рис. 5.

С борта л.а. передатчик P генерирует исходный радиоимпульс с горизонтальной поляризацией, который через антенный переключатель АП поступает на линейный поляризатор ЛП с горизонтальной собственной поляризацией, совпадающей с поперечной осью л.а. Линейный поляризатор представляет собой переход от волновода с прямоугольным сечением к волноводу с круглым сечением. С выхода ЛП со стороны круглого волновода сигнал через поляризационный модулятор ПМ поступает в бортовую зеркальную приемно-передающую антенну БЗА и излучается в направлении наземного радиомаяка. Поляризационный модулятор осуществляет вращение с частотой Ω плоскости поляризации излучаемых сигналов. Частота вращения Ω удовлетворяет условию:

$$\Omega \ll 2\pi F_n, \quad (9)$$

где F_n — частота повторения импульсов.

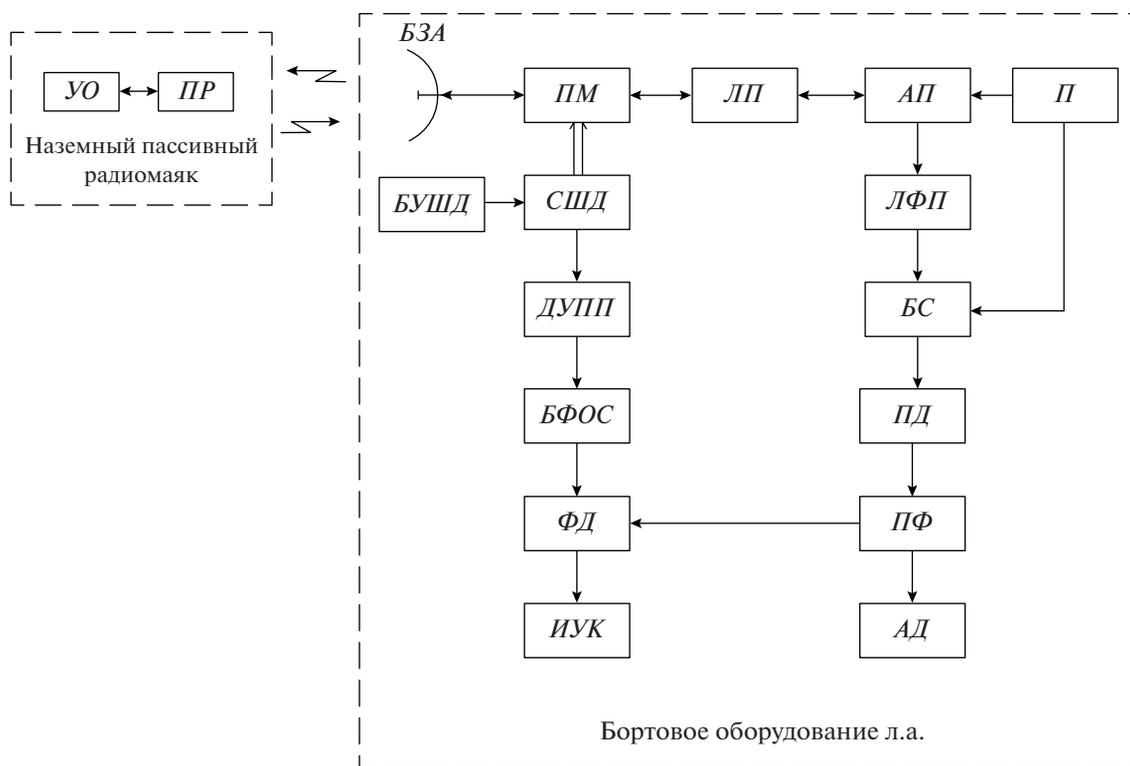


Рис. 4. Функциональная схема поляризационно-модуляционной р.л.с. для определения угла крена л.а. УО – трехгранный угольный отражатель; ПР – поляризационная решетка; БЗА – бортовая зеркальная приемно-передающая антенна; ПМ – поляризационный модулятор; ЛП – линейный поляризатор; АП – антенный переключатель; П – передатчик; БУШД – блок управления шаговым двигателем; СШД – синхронный шаговый двигатель; ЛФП – логарифмический приемник; ДУПП – датчик углового положения полуволновой фазовой пластины; БС – блок стробирования; БФОС – блок формирования опорного сигнала; ПД – пиковый детектор; ФД – фазовый детектор; ПФ – полосовой фильтр; ИУК – индикатор угла крена л.а.; АД – амплитудный детектор.

Выполнение условия (9) необходимо для согласования поляризаций зондирующих и принимаемых сигналов. Вращение плоскости поляризации излучаемого сигнала в ПМ осуществляется за счет механического вращения с частотой

$$\Omega' = \Omega/2 \quad (10)$$

круглой волноводной секции с вмонтированной в нее полуволновой фазовой пластиной. Вращение волноводной секции осуществляется синхронным шаговым двигателем СШД, механически связанным с помощью шестеренной передачи 1:1 с волноводной секцией и датчиком углового положения фазовой пластины ДУПП. Управление СШД осуществляется по сигналам, поступающим от блока управления шаговым двигателем БУШД, который задает механическую частоту вращения волноводной секции, равной $\Omega' = 10$ Гц. Датчик углового положения фазовой пластины выполнен в виде геркона, подключенного через нагрузочное сопротивление к бортовой сети +27 В. Управление герконом осуществляется двумя магнитами, диаметрально расположенными на шестерне СШД. По выходному сигналу ДУПП в бло-

ке формирования опорного сигнала БФОС формируется опорное косинусоидальное напряжение с учетом условия (10) с частотой $4\Omega'$, необходимое для работы фазового детектора ФД. Внешний вид поляризационного модулятора, выполненного на основе штатного облучателя приемно-передающей антенны р.л.с. “Гроза-26”, представлен на рис. 6.

Излученная с борта л.а. в направлении пассивного радиомаяка электромагнитная волна падает на трехгранный УО, в плоскости раскрытия которого помещена ПР. Плоскость поляризации электромагнитной волны вращается с частотой $\Omega = 20$ Гц. Действие ПР сводится к тому, что отраженная от УО волна становится промодулированной по амплитуде удвоенной частотой вращения плоскости поляризации 2Ω . При этом плоскость поляризации отраженной от УО электромагнитной волны всегда горизонтальна и не зависит от ориентации плоскости поляризации падающей на УО волны. Принятая на борту л.а. приемной антенной амплитудно-модулированная волна проходит через ПМ, ЛП и АП на вход логарифмического приемника ЛФП. Продетектированный сигнал на

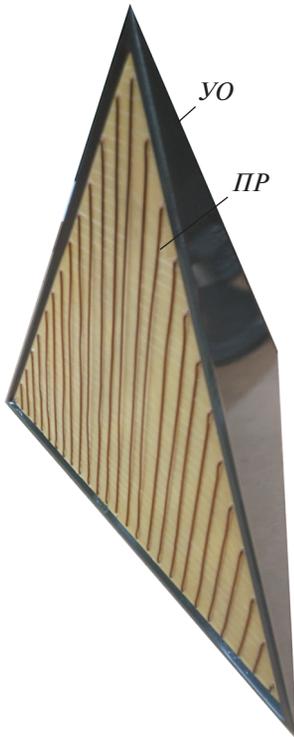


Рис. 5. Внешний вид пассивного радиомаяка. *УО* – трехгранный уголкового отражатель, *ПР* – поляризационная решетка.

его выходе будет иметь вид (6). Поскольку частота вращения Ω плоскости поляризации связана с частотой вращения Ω' *ПМ* соотношением (10), амплитуда на выходе *ЛФП* будет иметь вид:

$$A(\Omega't) [\text{дБ}] = 20 \lg C + 20 \lg \left\{ \frac{1}{2} (1 + \cos(4\Omega't \pm 2\gamma)) \right\}. \quad (11)$$

Из формулы (11) следует, что при использовании *ПМ* в виде вращающейся с частотой Ω' волноводной секции с полуволновой пластиной амплитуда сигнала становится промодулированной учетверенной частотой вращения этой пластины $4\Omega'$.

С выхода *ЛФП* протестированный сигнал поступает на блок стробирования *БС*, где происходит съем информации с дальности, на которой находится пассивный радиомаяк. В пиковом детекторе *ПД* осуществляется запоминание амплитуды сигнала на период повторения зондирующих импульсов. В полосовом фильтре *ПФ* выделяется спектральная составляющая на частоте $4\Omega'$, содержащейся в спектре огибающей выходного сигнала *ЛФП*. Информация об угле крена γ л.а. содержится в фазе этой спектральной составляющей $\varphi_{4\Omega'}$ и, в соответствии с формулой (11), определяется соотношением

$$\gamma [\text{рад}] = \pm \frac{\varphi_{4\Omega'}}{2}. \quad (12)$$

В *ФД* измеряется фаза $\varphi_{4\Omega'}$ относительно фазы опорного сигнала $\cos(4\Omega't)$, поступающего из *БФОС*. Фаза последнего определяется угловым положением полуволновой фазовой пластины. Амплитуда спектральной составляющей $A_{4\Omega'}$ измеряется амплитудным детектором *АД*, а значение угла крена γ л.а., с учетом формулы (12), выводится на индикатор угла крена *ИУК*.

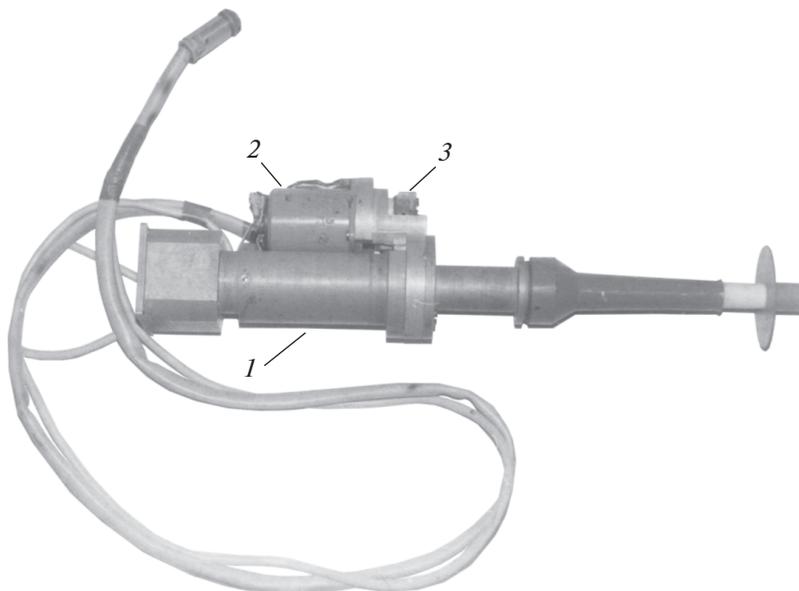


Рис. 6. Внешний вид штатного облучателя бортовой зеркальной антенны р.л.с. “Гроза-26” с поляризационным модулятором. *1* – поляризационный модулятор с вмонтированной внутрь полуволновой фазовой пластиной; *2* – синхронный шаговый двигатель; *3* – датчик углового положения полуволновой фазовой пластины.

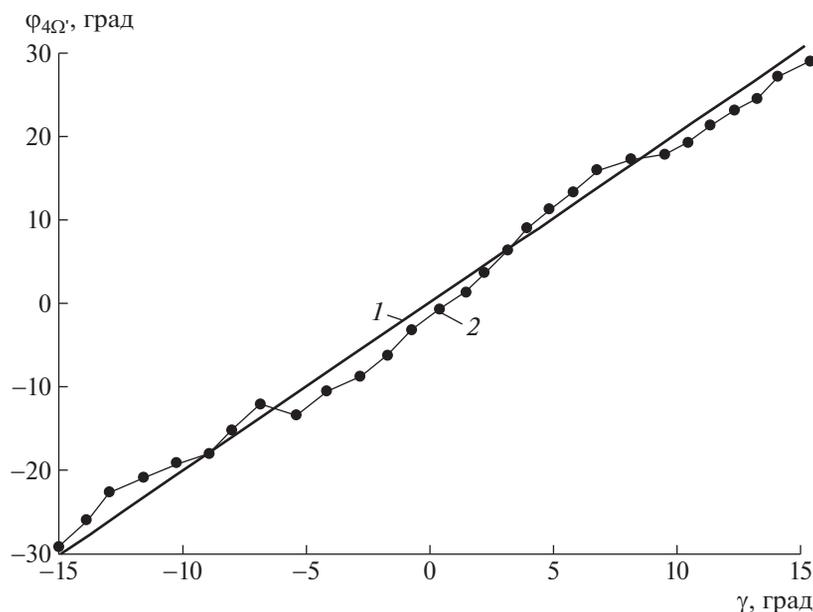


Рис. 7. Зависимость фазы $\varphi_{4\Omega'}$ от угла крена γ : 1 – теория; 2 – эксперимент.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проверки работоспособности предложенного метода измерения угла крена л.а. эксперимент проводился на наземной наклонной трассе протяженностью 1300 м. Пассивный радиомаяк (поляризационно-анизотропный трехгранный УО) располагался на земной поверхности. Эффективная поверхность рассеяния УО составляла 420 м^2 . Приемно-передающая антенна поляризационно-модуляционной р.л.с. была установлена на крыше радиотехнического корпуса ТУСУР на высоте 18 м и наведена на пассивный радиомаяк.

Методика измерения заключалась в следующем.

Радиолокационная станция облучала пассивный радиомаяк поляризационно-модулированным сигналом и принимала отраженный от него радиосигнал. На выходе логарифмического приемника р.л.с. регистрировались амплитуда спектральной составляющей $A_{4\Omega'}$ и ее фаза $\varphi_{4\Omega'}$, по которой определялся угол крена.

Имитация изменения угла крена осуществлялась путем изменения ориентации пассивного радиомаяка в вертикальной плоскости вокруг его электрической оси симметрии с шагом 1° в пределах $\pm 15^\circ$ относительно исходного вертикально ориентированного положения ПР. Вертикально ориентированное положение ПР соответствовало нулевому значению угла крена.

Измерения фазы $\varphi_{4\Omega'}$ проводились для каждого углового положения пассивного радиомаяка в заданном диапазоне углов в течение тридцатисекундного интервала времени с последующим

усреднением. При этом фиксировался и средний уровень отраженного сигнала.

Результаты измерений $\varphi_{4\Omega'}$ приведены на рис. 7 (кривая 2). На этом же рисунке представлена теоретическая зависимость (кривая 1), полученная в соответствии с выражением (12). Среднеквадратическое отклонение измеренного угла крена от заданного составило $\sigma_\gamma = 0.98^\circ$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен и опробован поляризационно-модуляционный метод измерения угла крена по пассивному поляризационно-анизотропному радиомаяку, основанный на использовании поляризационно-модулированных по углу ориентации плоскости поляризации зондирующих сигналов.

2. Теоретически исследована и экспериментально подтверждена связь фазы спектральной составляющей на частоте $4\Omega'$ с углом крена для исследуемого поляризационного модулятора в виде вращающейся с частотой Ω' полуволновой фазовой пластины.

3. Получены экспериментальные оценки точности измерения угла крена.

4. Описанный метод может найти применение в системах ориентации летательного аппарата при заходе на посадку по приборам. Метод технически прост в реализации, так как измерение навигационного элемента осуществляется на выходе приемника на частоте, кратной частоте поляризационной модуляции.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № FEWM-2020-0039 от 01.03.2020.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Skrypnik O.N.* Radio Navigation Systems for Airports and Airways. Springer, 2019.
2. *Пельпор Д.С., Ягодкин В.В.* Гироскопические системы. М.: Высшая школа, 1988.
3. *Александров А.С., Арно Г.Р.* Современное состояние и тенденции развития зарубежных средств и систем навигации подвижных объектов военного и гражданского назначения. СПб.: ГУНИО МО РФ, 1994.
4. *Ярлыков М.С.* Статистическая теория радионавигации. М.: Радио и связь, 1985.
5. *Кобак В.О.* Радиолокационные отражатели. М.: Сов. Радио, 1975.
6. *Богородский В.В., Канарейкин Д.Б., Козлов А.И.* Поляризация рассеянного и собственного радиоизлучения земных покровов. Л.: Гидрометеиздат, 1981.
7. *Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А.* Поляризация радиоволн “Радиолокационная поляриметрия”. М.: Радиотехника, 2007.
8. *Бадудин Н.Н., Гулько В.Л., Масалов Е.В.* // Изв. вузов МВ и ССО СССР. Радиоэлектроника. 1986. Т. 29. № 11. С. 81.
9. *Аззам Р., Башара Н.* Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир. 1981.
10. *Гулько В.Л.* Патент RU 2537384, МПКG01S13/93 // БИ. № 1 Оpubл. 10.01.2015.

ЛАБОРАТОРНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 531.552

РЕГИСТРАЦИЯ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ СКОРОСТНОЙ
КАМЕРОЙ НАНОГЕЙТ-22/16© 2022 г. С. И. Герасимов^{a,b,d,*}, М. И. Крутик^c, В. С. Роженцов^a,
А. Г. Сироткина^b, К. В. Тотышев^a^a РФЯЦ-ВНИИ экспериментальной физики

Россия, 607190, Саров Нижегородской обл., просп. Мира, 37

^b Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ «МИФИ»

Россия, 607186, Саров Нижегородской обл., ул. Духова, 6

^c Научно-производственное предприятие «НАНОСКАН»

Россия, 107076, Москва, ул. Стромынка, 18

^d Институт проблем машиностроения РАН – филиал Института прикладной физики РАН

Россия, 603024, Нижний Новгород, ул. Белинского, 85

*e-mail: s.i.gerasimov@mail.ru

Поступила в редакцию 11.11.2021 г.

После доработки 30.11.2021 г.

Принята к публикации 02.12.2021 г.

Представлен способ регистрации быстропротекающих процессов на основе разработанной в России скоростной восьмиканальной шестнадцатикадровой электронно-оптической камеры НАНОГЕЙТ-22/16, предназначенной для регистрации серии из 8-ми или 16-ти кадров изображения быстропротекающих процессов в видимой области спектра. Приведены описание, принцип работы и методика использования камеры.

DOI: 10.31857/S0032816222030028

При регистрации быстропротекающих процессов, как правило, приходится сталкиваться с процессами, характеризующимися различными уровнями освещенности. Работа взрывных или ствольных разгонных устройств сопровождается излучением ударно сжатого газа при разлете продуктов детонации или горения в воздух; соударение ударника с преградой может сопровождаться образованием излучающей отраженной ударной волны или горением мелкодисперсных металлических частиц и т.д. При этом стандартные высокоскоростные камеры, работающие, как правило, с частотой, определяемой максимальным значением, при котором реализуется предельно возможное разрешение, не позволяют варьировать эту частоту с целью выделения разных фаз процесса, например, характеризующихся разным уровнем освещенности. Для того чтобы устранить этот недостаток, была разработана отечественная скоростная восьмиканальная шестнадцатикадровая электронно-оптическая камера (э.о.к.) НАНОГЕЙТ-22/16, предназначенная для регистрации серии из 8-ми или 16-ти кадров изображения быстропротекающих процессов в видимой области спектра (рис. 1).

Пылевлагозащищенный корпус э.о.к. обеспечивает возможность ее применения в условиях полигона.

Электронно-оптическая камера представляет собой 8-канальную систему, состоящую из одного входного объектива, зеркально-линзового блока разделения изображения на восемь каналов (дополнительный объектив, зеркальная восьмигранная призма, восемь зеркал) и самих электронно-оптических каналов (K_1-K_8). Данные, полученные в результате регистрации изображения быстропротекающего процесса, через восемь волоконно-оптических линий связи OP_i передаются на трансивер, преобразующий сигналы на восьми оптических входах в сигнал на единственном выходе USB-3, который соединен с соответствующим входом компьютера. На мониторе персонального компьютера визуализируются все 16 зарегистрированных изображений.

Технические характеристики камеры

Камера имеет следующие характеристики:

– количество независимых электронно-оптических каналов – 8; в состав одного канала входит



Рис. 1. Электронно-оптическая камера НАНОГЕЙТ-22/16.

электронно-оптический преобразователь (э.о.п.) с модулями управления его работой, проекционный объектив с апертурой 0.32 и переменным масштабом переноса с экрана э.о.п. на цифровую систему считывания импульсного оптического изображения;

– число кадров, регистрируемых камерой при поступлении запускающего сигнала на вход “Пуск”, – 16;

– минимальный временной интервал между первыми восемью кадрами – 5 нс;

– число кадров, регистрируемых с каждого канала, – 2;

– временной интервал между двумя кадрами в каждом канале – 2.7–1000 мкс;

– спектральный диапазон чувствительности фотокатода э.о.п. – 380–800 нм;

– рабочий диаметр фотокатода – 18 мм;

– длительность стробирующего (затворного) импульса от 5 нс до 20 мкс;

– пространственное разрешение при всех значениях длительности строб-импульсов ≥ 36 пар линий/мм;

– временная задержка срабатывания затвора э.о.к. – от 100 нс до 4 мс;

– временная нестабильность (джиттер) запуска каждого канала э.о.к. ≤ 10 нс;

– режим многократной экспозиции (для восьмикадрового варианта) 1–4;

– напряжение на микроканальной пластине э.о.п. (определяет конкретное значение коэффициента преобразования э.о.п. и устанавливается с шагом 1 В) – 400–910 В;

– максимальная частота запуска камеры – 1 Гц;

– разрядность аналого-цифрового преобразователя 12 бит;

– размер фоточувствительной поверхности камеры на основе прибора с зарядовой связью (п.з.с.) 15.4×15.4 мм;

– тип развертки – прогрессивная;

– число пикселей $\geq 2048 \times 2048$;

– формат сохраняемого файла изображения – tiff;

– количество волоконно-оптических выходов для связи с компьютером – 8.

Параметры запускающих сигналов и импульса Синхр

Электронно-оптическая камера запускается внешним импульсом, поступающим на вход “Пуск”, со следующими параметрами:

– полярность – положительная;

– амплитуда 5–15 В;

– регулируемый уровень запуска 5–12 В;

– длительность фронта импульса ≤ 5 нс;

– длительность импульса 60–1000 нс;

– входное сопротивление 50 Ом;

– импульс синхронизации на выходе “Синхр” – положительный, уровня TTL, фронт которого опережает фронт затворного импульса э.о.п. на 15–20 нс ($R_{нар} = 50$ Ом).

Функциональные возможности

– Независимая установка значений длительности затворных импульсов, задержки открытия затворов и коэффициентов усиления для каждого канала.

– Раздельная и одновременная визуализация всех зарегистрированных изображений на компьютере в среде Windows 7 (Windows 10).

– Габаритные размеры (без объектива) $580 \times 300 \times 330$ мм.

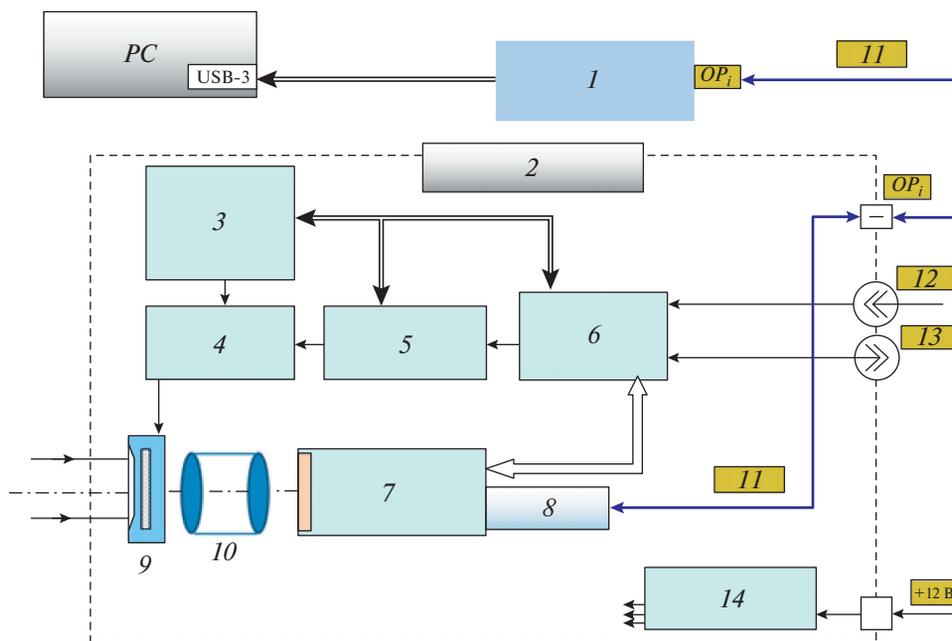


Рис. 2. Структурная схема одного из восьми электронно-оптических каналов. 1 – один из восьми каналов блока оптических трансиверов; 2 – электронно-оптический канал K_i ($i = 1-8$); 3 – высоковольтный источник питания (определяет коэффициент усиления э.о.п.); 4 – формирователь высоковольтного наносекундного затворного импульса; 5 – программируемый формирователь длительности затворного импульса; 6 – программируемый формирователь временных интервалов задержки; 7 – цифровая п.з.с.-система Наноскан 2048×2048 ; 8 – оптический трансивер; 9 – э.о.п. с диаметром фотокатода 18 мм; 10 – объектив 1:1; 11 – волоконно-оптические линии связи; 12 – вход “Пуск”; 13 – выход “Синхр”; 14 – модули DC-DC-преобразователей.

– Масса ≤ 32 кг.

Каждый из восьми каналов (K_i) представляет собой электронно-оптический модуль. Все модули идентичны между собой. Структурная схема электронно-оптического модуля приведена на рис. 2.

Принцип работы электронно-оптического модуля в режиме однокадровой съемки быстропротекающего процесса основан на импульсном управлении (стробировании) э.о.п., синхронном считывании полученного импульсного изображения с его экрана п.з.с.-камерой и записи оцифрованного кадра в память компьютера в формате *.tiff. Временные и энергетические параметры э.о.к. устанавливаются дистанционно с помощью программного обеспечения НАНОГЕЙТ.

После включения камеры и запуска программы управления НАНОГЕЙТ компьютера осуществляется установка параметров э.о.к.: длительности затвора э.о.п., задержки его срабатывания, коэффициента усиления э.о.п.

Регистрируемое изображение через входной объектив фокусируется на фотокатоде э.о.к. В момент прихода импульса *Пуск* через установленное время задержки (модуль программируемого формирователя временных интервалов) открывается затвор э.о.п. на время, также установленное при

подготовке эксперимента (модули программируемого формирователя длительности затворных импульсов и формирователя высоковольтного наносекундного импульса). Одновременно формируется импульс, переводящий п.з.с.-матрицу в режим накопления. Прошедшие через затвор электроны усиливаются в микроканальной пластине э.о.п., коэффициент усиления которой определяется приложенным к ней напряжением (модуль программируемого высоковольтного источника питания). На выходе “Синхр” формируется импульс, фронт которого упрещает на 15–20 нс момент открытия затвора э.о.п.

Через высокоапертурный проекционный объектив с масштабом 1:1 импульсное и усиленное изображение переносятся на фоточувствительную поверхность п.з.с.-матрицы. Накопленные в ячейках заряды считываются, преобразуются в цифровой код и передаются через одномодовый волоконно-оптический кабель на один из оптических разъемов восьмиканального трансивера. Выходной кабель USB-3 подключен к USB-входу промышленного компьютера.

Каждый из восьми каналов регистрирует два последовательных независимых кадра с интервалом от 2.7 мкс. Таким образом, при последовательном срабатывании от первого до восьмого ка-

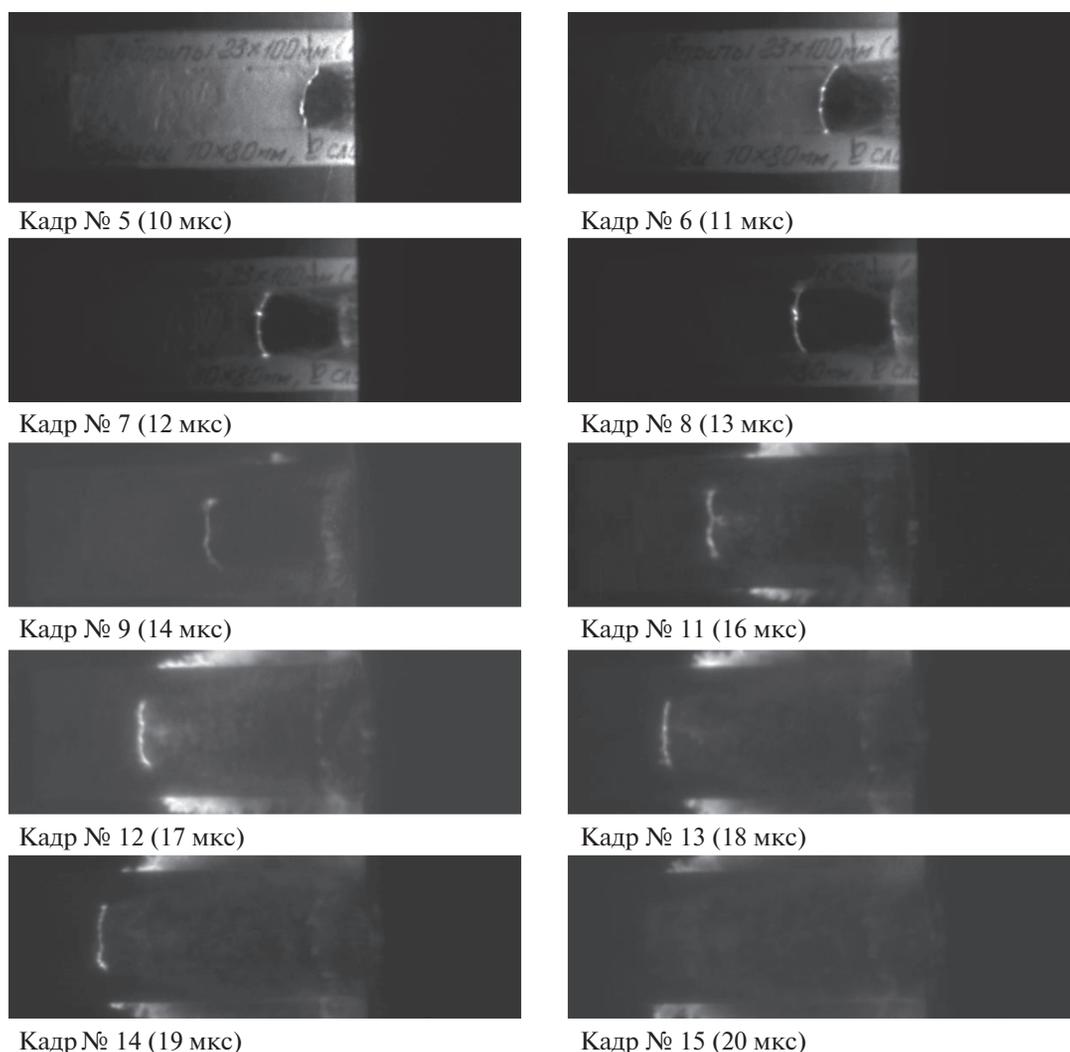


Рис. 3. Кадры регистрации детонации пленки состава ВС-2.

налов с интервалом 340 нс повторное срабатывание первого канала произойдет через 2.7 мкс.

Каждый канал может работать в режиме с многократной экспозицией. Затвор э.о.п. может открываться установленное количество раз при поступлении единственного импульса на разъем “Пуск”. Длительность всех затворных импульсов одинакова и равна установленному значению в окошке “Длительность”. Число затворных импульсов может устанавливаться от 1 до 4. Интервалы между повторяющимися импульсами задаются одинаковыми в диапазоне от 50 нс до 100 мкс.

Рабочая программа НАНОГЕЙТ обеспечивает возможность независимой установки параметров съемки индивидуально для каждого канала. После прихода импульса одновременно на все входы “Пуск” каждый э.о.п. срабатывает в соответствии с установленными параметрами (задержкой, дли-

тельностью экспозиции и напряжением на микроканальной пластине, определяющими коэффициент усиления), и все шестнадцать зарегистрированных изображений визуализируются на мониторе компьютера, отображая шестнадцать фаз быстропротекающего процесса.

Примеры использования камеры в условиях взрывного эксперимента и выстрела из легкогазовой установки приведены на рис. 3, 4.

В опытах со светочувствительными энергосыщенными материалами было зарегистрировано распространение детонационной волны в пленках состава ВС-2 [1]. Согласно рис. 3, фронт детонационной волны имеет форму ломаной кривой, изменяющейся со временем. Указанное время на кадрах отсчитывается от момента появления инициирующего светового импульса газоразрядного протяженного излучателя [2].

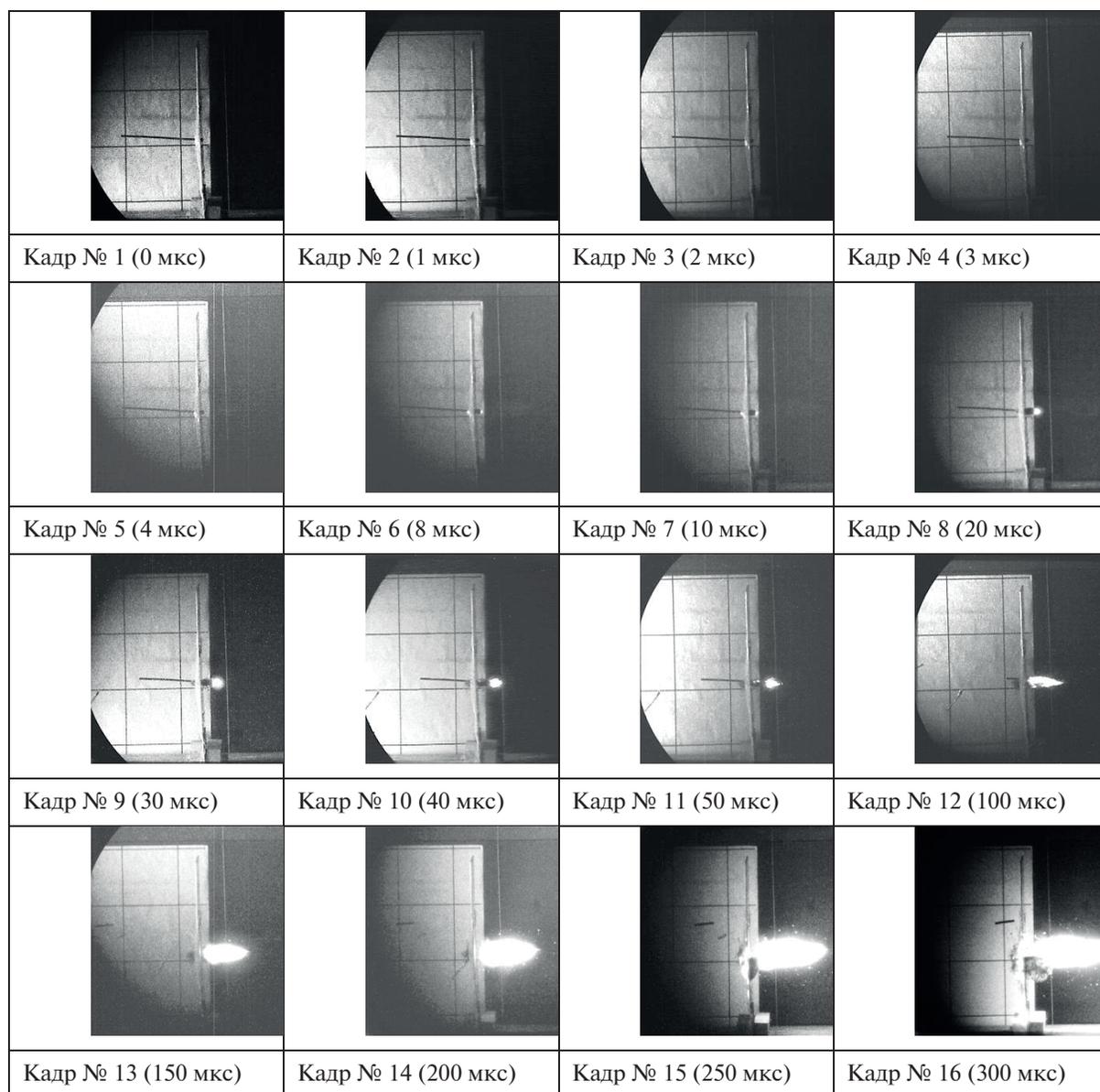


Рис. 4. Кадры регистрации высокоскоростного пробивания преграды стержнем. Указано время от срабатывания контактного датчика.

Кадры на рис. 4 получены при регистрации соударения стального стержня длиной 300 мм на скорости 2.2 км/с с алюминиевой преградой толщиной 5 мм. В экспериментах для фоторегистрации применялся объектив с фокусным расстоянием 300 мм и диафрагмой 5.0. Настройки параметров э.о.к.: время экспозиции 240 нс, напряжение на э.о.п. 800 В. В эксперименте регистрация проводилась без использования внешней подсветки. Время на кадрах отсчитывалось от срабатывания контактного датчика, расположенного на преграде. Поскольку камера позволяет варьировать время между кадрами, в данном случае решались две

задачи: определение появления светового импульса в начальной стадии соударения с визуализацией процесса пенетрации, а также регистрация светящейся зоны после прохождения преграды и деформации стержня. Для этого половина кадра перед преградой имеет светлый размеченный фон, а зона за преградой затемнена авиационным брезентом (авизентом).

Первые кадры получены с частотой 10^6 кадров/с, а заключительные – $2 \cdot 10^4$ кадров/с. Свечение в данном случае определяется зажиганием алюминиевых частиц, собираемых у торца стерж-

ня через 7–8 мкс после соударения. Область горения алюминиевых частиц сопровождается прохождением стержнем преграды, отставая от стержня к моменту времени 250 мкс, размеры области горения соизмеримы с линейным размером стержня.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-19-00613).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов С.И., Илюшин М.А., Кузнецов П.Г., Путьис С.М., Душенок С.А., Роженцов В.С. // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47. Вып. 3. С. 11.
<https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.03.50567.18490>
2. Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Кикеев В.А., Кузьмин В.А., Тотышев К.В., Косяк Е.Г., Кузнецова П.Г., Герасимова Р.В. // ПТЭ. 2020. № 5. С. 92.
<https://doi.org/10.31857/S0032816220040254>

К ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТЕКЛЯННЫХ КАПИЛЛЯРОВ В КАЧЕСТВЕ ЗОНДА АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА, РАБОТАЮЩЕГО В ГИБРИДНОЙ МОДЕ

© 2022 г. А. А. Жуков^{a,*}, С. Г. Романова^{b,c}

^a Институт физики твердого тела РАН

Россия, 142432, Черноголовка Московской обл., ул. Академика Осипьяна, 2

^b Московский физико-технический институт

Россия, 141701, Долгопрудный Московской обл., Институтский переулок, 9

^c Московский областной научный-исследовательский клинический институт им. М.Ф. Владимирского

Россия, 129110, Москва, ул. Щепкина, 61/2

*e-mail: azhukov@issp.ac.ru

Поступила в редакцию 29.12.2021 г.

После доработки 28.01.2022 г.

Принята к публикации 31.01.2022 г.

Продемонстрирована возможность использования стеклянного капилляра в качестве зонда атомно-силового микроскопа, работающего в гибридной моде. Приведены примеры получения топографического изображения поверхности с разрешением по высоте 20 нм, а также использования данного зонда в микрофлюидике. Показана возможность перемещения данным зондом капель субфемтолитрового объема без касания поверхности, на которой лежит капля.

DOI: 10.31857/S0032816222040085

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] была предложена гибридная мода работы атомно-силового микроскопа (а.с.м.). Мода является гибридной, поскольку объединяет особенности двух стандартных мод, а именно: контактной моды, в которой зонд а.с.м. не отрывается от поверхности, и полуконтактной моды, поскольку в качестве сигнала обратной связи используется изменение амплитуды колебания кварцевого резонатора, к которому прикреплен зонд. В настоящее время использование а.с.м. в медицине и биологии получает все более широкое распространение, при этом стеклянные капилляры с внешним диаметром на конце >100 нм становятся практически стандартным вариантом зонда. Атомно-силовой микроскоп в этом случае работает в полуконтактной моде или так называемой “shear mode”, когда капилляр колеблется параллельно поверхности сканирования [2].

Использование в микро- и нанофлюидике острия а.с.м. для перемещения капель жидкости [3] или в качестве пера для проведения литографии мономолекулярным слоем [4, 5] получило широкое распространение в настоящее время. При этом а.с.м. используется, как правило, в стандартной контактной моде. Если применяется специально приготовленный кантилевер [6], то

также может быть использована и полуконтактная мода а.с.м.

В данной работе продемонстрирована возможность использования стеклянного капилляра с диаметром $d = 2$ мкм на конце в качестве зонда а.с.м., работающего в гибридной моде. Пространственное разрешение а.с.м. в направлении, перпендикулярном оси капилляра, которое определяется его диаметром, составило 1 мкм. Пространственное разрешение в направлении, перпендикулярном поверхности сканирования (по вертикали), – 20 нм. Скорость сканирования в обычных условиях составила 0.5 мкм/с. Продемонстрирована возможность применения а.с.м. в данной конфигурации в микрофлюидике.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве капилляров были использованы боросиликатные стеклянные заготовки длиной 10 см с исходным внешним диаметром 1.5 мм и внутренним диаметром 0.86 мм (BF150-86-10, Sutter Instruments). Для изготовления микропипеток из боросиликатных стеклянных заготовок использовался пуллер для микропипеток Флеминга–Брауна (модель P-95, Sutter Instruments). Микропипетки необходимых диаметра и длины кончика вытягивались в несколько этапов. Для каждого

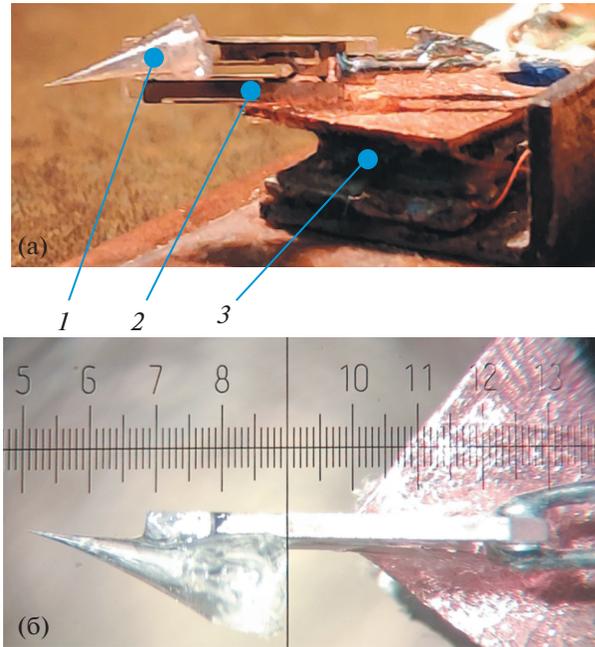


Рис. 1. Фотографии крепления капилляра при реализации гибридной моды а.с.м.: а – вид сбоку (1 – капилляр, 2 – кварцевый резонатор, 3 – пьезоактюатор), б – вид сверху, цена деления 1 мм.

этапа подбирались температура, скорость вытягивания и давление. Диаметр кончика контролировался под микроскопом микрокузницы (Narishige). Далее, с помощью микрокузницы проводилась окончательная полировка кончика микропипетки. Характерный внешний диаметр капилляра на конце составлял 2 мкм.

Полученный капилляр монтировался на кварцевый резонатор (к.р.) с собственной частотой $f = 32768$ Гц (рис. 1). Характерная частота кварцевого резонатора с установленным капилляром составляла $f = 10\text{--}20$ кГц. Механические колебания кварцевого резонатора возбуждались при помощи пьезоактюатора, электрический сигнал с к.р. поступал на усилитель тока, а затем на синхронный детектор (Signal Recovery 7225). Изменение амплитуды колебаний кварцевого резонатора использовалось в качестве сигнала обратной связи для блока электроники а.с.м. (NT-MDT SI, BL222TNTF). Собранный блок с кварцевым резонатором и смонтированным острием помещался в а.с.м.-манипулятор [1].

В качестве жидкости для микрофлюидики использовался толуол особой чистоты (ТУ 2631-065-44493179-01). Капли толуола были помещены на поверхность кремниевой подложки, покрытой термически выращенным оксидом кремния.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены изображения капилляра, касающегося поверхности кремниевой подложки, полученные в оптическом микроскопе (увеличение $20\times$). Изображения были получены с использованием линейных поляризатора и анализатора, взаимная ориентация плоскостей поляризации ортогональна. Амплитуда колебания к.р. на рис. 2а равна $A = 0.998A_0$, где A_0 – амплитуда свободных колебаний. Амплитуда колебаний A , а следовательно, и сила прижима капилляра к поверхности поддерживались постоянными блоком управляющей электроники а.с.м. На рис. 2б–2г изображен капилляр при последовательно уменьшающейся амплитуде колебания к.р., а именно: $0.9955A_0$, $0.9934A_0$ и $0.9912A_0$. Применение поляризаторов позволяет увидеть увеличение длины изогнутого в вертикальной плоскости участка капилляра по мере уменьшения амплитуды колебания к.р., т.е. увеличения силы прижима капилляра к поверхности. Место начала изгиба капилляра отмечено стрелкой на каждом рисунке.

На рис. 3 изображены два положения капилляра, амплитуда колебания к.р. $0.9912A_0$. Виден изгиб капилляра в горизонтальной плоскости. Данные изображения служат дополнительным доказательством того, что реализована именно гибридная мода а.с.м., а не полуконтактная.

На рис. 4 представлен результат измерения топографии участка калибровочной решетки (TGZ2, NT-MDT SI), а также его профиль. Характерный шум при измерении топографии составил порядка $\Delta h = 20$ нм, что соответствует точности поддержания прижимающей силы $\Delta F = \Delta h k = 8$ мкН, где $k = 400$ Н/м – жесткость стеклянного капилляра, использованного в эксперименте.

В данном эксперименте использован капилляр с большим диаметром (2 мкм) на конце, который имеет достаточно большую жесткость. Тем не менее, можно показать, что есть возможность перемещения капли жидкости по поверхности кремния при помощи данного капилляра без касания им поверхности кремния, т.е. максимально аккуратно образом.

Серия изображений на рис. 5 демонстрирует последовательность этапов перемещения капли. На рис. 5а показано исходное положение капли и капилляра над поверхностью, на рис. 5б – захват капли капилляром, а на рис. 5в – перемещение капли на новое место. Рис. 5г служит доказательством того, что перемещение капли было осуществлено без касания поверхности кремния, амплитуда колебаний к.р. была уменьшена, капилляр коснулся поверхности кремния, а площадь капли несколько увеличилась. На рис. 5д показа-

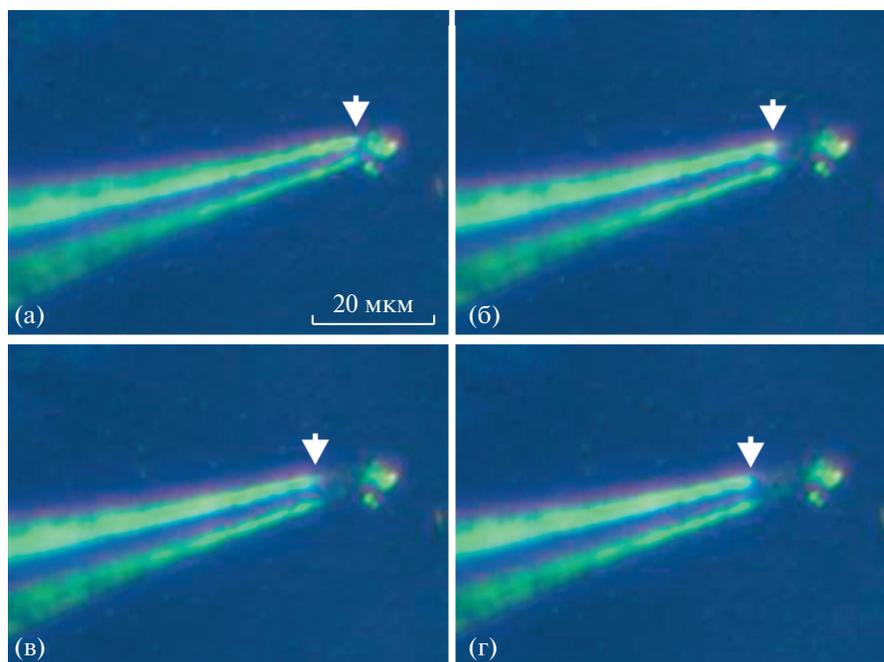


Рис. 2. Фотографии капилляра на поверхности оксида кремния при различной величине прижимающей силы: **а** – наименьшая сила, $A = 0.99804A_0$; **б** – $A = 0.99554A_0$; **в** – $A = 0.99344A_0$; **г** – $A = 0.99124A_0$. Место перехода от прямого участка капилляра (более светлый) к изогнутому (более темный) отмечено стрелкой.

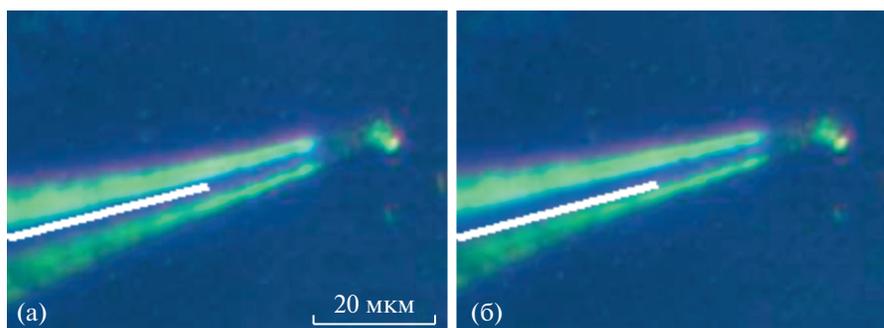


Рис. 3. Фотографии капилляра на поверхности оксида кремния. Белый отрезок служит репером для сравнения позиции и направления горизонтального изгиба капилляра на представленных фотографиях.

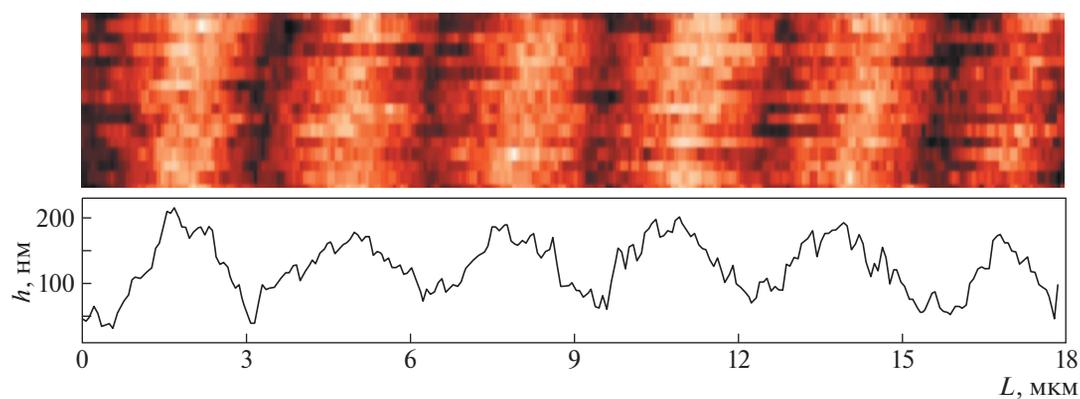


Рис. 4. Результат сканирования топографии участка калибровочной решетки (вверху), а также его профиль (внизу).

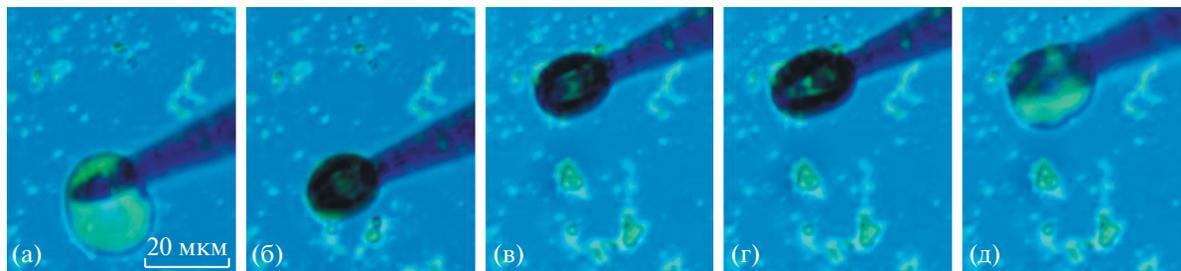


Рис. 5. Серия снимков, демонстрирующая последовательность этапов перемещения капли: **а** – капилляр расположен над каплей; **б** – захват капли, острие коснулось поверхности капли; **в** – новое положение перемещенной капли; **г** – острие касается поверхности кремния, видно некоторое увеличение поперечных размеров капли; **д** – острие отведено.

на капля жидкости на новом месте, капилляр отведен от поверхности.

Для дополнительного доказательства того, что чувствительность к.р. в данной конфигурации а.с.м. достаточна для надежной фиксации капилляра на поверхности капли без касания им поверхности подложки, была выполнена спектроскопия в исходном положении капилляра (над каплей). Результат спектроскопии представлен на рис. 6. При $A/A_0 = 0.9976$ капилляр касается поверхности капли. При дальнейшем уменьшении A/A_0 происходит касание капилляра поверхности кремния, о чем свидетельствует изменение наклона зависимости $\Delta h(A/A_0)$. Разность в высоте от точки касания поверхности капли до точки касания поверхности кремния можно рассматривать как характерную толщину слоя жидкости в капле, т.е. $h \sim 1000$ нм. Следует отметить, что в данной конфигурации измерить топографию капли не представляется возможным, поскольку капилляр смачивается жидкостью, т.е. форма

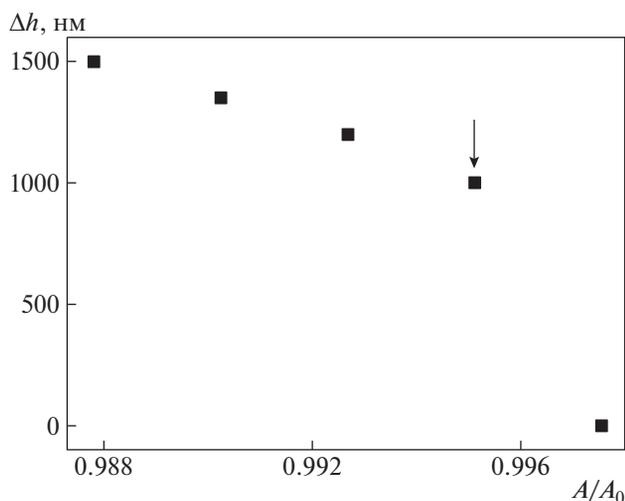


Рис. 6. Измерение спектроскопии а.с.м. в режиме гибридной моды. Точка касания поверхности кремния капилляром отмечена стрелкой.

капли существенным образом искажена, и мы можем говорить только об оценке характерной толщины слоя жидкости.

Если капилляр чист, то его внутренний объем можно частично заполнить толуолом, поместив кончик капилляра внутрь большой капли толуола, после чего оказывается возможным дозированное помещение толуола на поверхность кремния. На рис. 7 представлен результат помещения на поверхность кремния каплю толуола. Капли 1 и 4 были сформированы после краткого касания капилляром поверхности кремния (менее 1 с), а капли 3, 5 и 6 – после длительного (10 с) касания поверхности. Ясно видны кольца Ньютона, что позволяет определить объем (V_i) получившихся капель: $V_1 = 214 \cdot 10^{-15}$ л, $V_3 = 420 \cdot 10^{-15}$ л, $V_4 = 232 \cdot 10^{-15}$ л, $V_5 = 386 \cdot 10^{-15}$ л и $V_6 = 413 \cdot 10^{-15}$ л, т.е. кратковременное касание поверхности формирует каплю объемом около $210 \cdot 10^{-15}$ л, а долговременное касание – каплю объемом около $406 \cdot 10^{-15}$ л. Две отдельно стоящие капли можно далее при помощи капилляра слить в одну, капля 7 на рис. 7.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрирована возможность использования стеклянного капилляра в качестве зонда а.с.м., работающего в гибридной моде. Пространственное разрешение а.с.м. в направлении, перпендикулярном оси используемого капилляра, составило 1 мкм, а в направлении, перпендикулярном плоскости поверхности сканирования (по вертикали), – 20 нм. Скорость сканирования в обычных условиях составила 0.5 мкм/с. Показаны примеры применения а.с.м. в данной конфигурации в микрофлюидике – аккуратное (без касания поверхности острием а.с.м.) манипулирование каплями жидкости, а также формирование дозированных капель жидкости на поверхности.

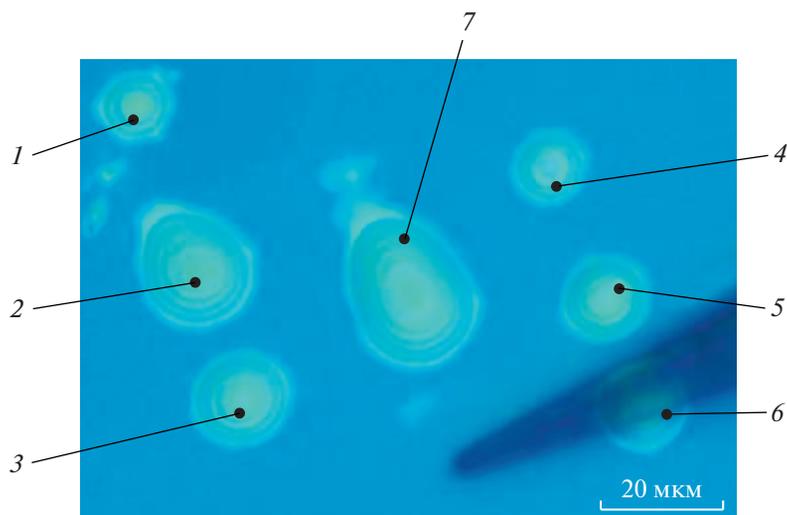


Рис. 7. Изображения капель на поверхности кремния. Капли 1 и 4 сформированы после короткого (менее 1 с) касания капилляром поверхности кремния, капли 3, 5 и 6 – после длительного (10 с) касания поверхности, капля 7 – результат слияния двух капель в одну.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа была выполнена в рамках госпрограммы Института физики твердого тела РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhukov A.A., Stoliarov V.S., Kononenko O.V. // *Rev. Scient. Instrum.* 2017. V. 88. P. 063701. doi.org/https://doi.org/10.1063/1.4985006
2. Betzig E., Finn P.L., Weiner J.S. // *Applied Physics Letters.* 1992. V. 60. P. 2484. doi.org/https://doi.org/10.1063/1.106940
3. O'Connell C.D., Higgins M.J., Marusic D., Moulton S.E., Wallace G.G. // *Langmuir.* 2014. V. 30. P. 2712. doi.org/https://doi.org/10.1021/la402936z
4. Piner R.D., Zhu J., Xu F., Hong S., Mirkin Ch.A. // *Science.* 1999. V. 283. P. 661. doi.org/https://doi.org/10.1126/science.283.5402.661
5. Ginger D.S., Zhang H., Mirkin C.A. // *Angewandte Chemie International Edition.* 2004. V. 43. P. 30. doi.org/https://doi.org/10.1002/anie.200300608
6. Fang A., Dujardin E., Ondarcuhu Th. // *Nano Letters.* 2006. V. 6. P. 2368. doi.org/https://doi.org/10.1021/nl061694y

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ,
ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ВЫСОКОВАКУУМНЫХ СИСТЕМАХ© 2022 г. А. В. Бурдаков^{a,c}, А. В. Варанд^a, А. А. Краснов^{a,b,d}, О. И. Мешков^{a,b},
М. А. Михайленко^d, А. М. Семенов^{a,c,d,*}, Б. П. Толочко^{a,d}, А. А. Шошин^{a,b}^a Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 11^b Новосибирский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1^c Новосибирский государственный технический университет
Россия, 630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20^d Институт химии твердого тела и механохимии
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Кутателадзе, 18

*e-mail: A.M.Semenov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 12.01.2022 г.

После доработки 19.01.2022 г.

Принята к публикации 20.01.2022 г.

Приведены результаты исследования газовой выделения в вакууме карбида бора и прочного сверхвысокомолекулярного полиметилметакрилата (органическое стекло). Показано, что карбид бора, изготовленный фирмой ООО “Вириал” (Санкт-Петербург) методом холодного прессования с последующим свободным спеканием при температуре около 2200°C, соответствует требованиям, заявленным ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Результаты исследования сверхвысокомолекулярного прочного полиметилметакрилата (СВМ-ПММА), изготовленного в Институте химии твердого тела и механохимии СО РАН (ИХТТМ СО РАН) по оригинальным технологиям, показали, что СВМ-ПММА с фронтальной полимеризацией имеет наименьшее газовыделение по сравнению с “обычным” ПММА и весьма перспективен для изготовления специализированных вакуумных камер электрофизических установок.

DOI: 10.31857/S0032816222030132

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время термическое газовыделение стандартных материалов, применяемых в высоком вакууме, таких как нержавеющая сталь, медь и ее сплавы, алюминий и его сплавы, хорошо изучено [1]. Тем не менее, часто возникает необходимость в использовании новых веществ, не получивших до настоящего времени широкого распространения в вакуумных технологиях, например карбида бора, который используется для защиты персонала и оборудования от излучения, вызванного быстрыми нейтронами. Растет популярность органических стекол, которые по своим механическим свойствам сопоставимы с конструкционной сталью. Все эти новые материалы перед применением в высоковакуумных системах требуют подробных исследований вакуумных свойств, таких как газовыделение, проницаемость для различных газов и т.д.

Карбид бора решено использовать в ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor),

Франция, для обеспечения безопасности персонала и оборудования в условиях радиационных нагрузок, вызванных быстрыми нейтронами. Сверхвысокомолекулярный полиметилметакрилат (СВМ-ПММА) может использоваться в ускорительных трубках промышленных ускорителей, поскольку в этом случае сверхвысокого вакуума не требуется.

В данной статье представлены результаты измерения термического газовыделения данных материалов в зависимости от способа изготовления, длительности и условий вакуумных испытаний.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА
И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Схема установки для измерения коэффициента термического газовыделения приведена на рис. 1.

Стенд состоит из центральной камеры с измерительным оборудованием и двух одинаковых камер для загрузки образцов. Все камеры изготовлены из бесшовной трубы из нержавеющей стали

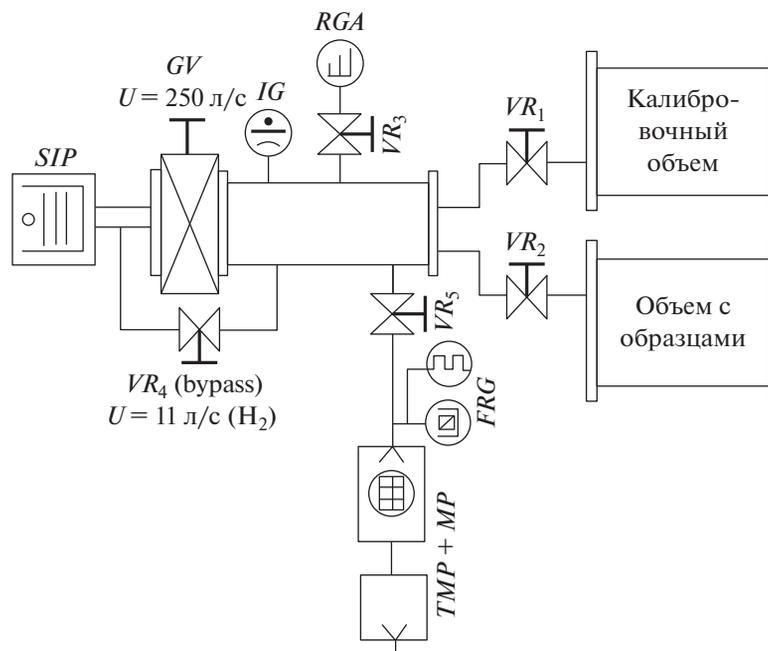


Рис. 1. Стенд для измерения коэффициента термического газыделения. VR_1 – VR_5 – цельнометаллические угловые клапаны; GV – прямопролетный затвор; SIP – комбинированный (магниторазрядный + сублимационный) вакуумный насос; IG – ионизационный датчик давления с горячим катодом типа Extractor; FRG – широкодиапазонный (10^{-9} –1000 мбар) датчик давления; TMP – турбомолекулярный насос; MP – безмасляный форвакуумный (мембранный) насос.

304L. Если ожидаемое газыделение из образцов сравнимо по величине с газыделением со стенок загрузочной камеры, то образцы загружаются только в одну камеру. В этом случае вторая (пустая) камера используется для измерения газыделения со стенок, полученные результаты в последующем будут использоваться для вычисления газыделения из образцов. Разумеется, данный способ учета потока газа со стенок загрузочных камер будет корректным только в том случае, если обе камеры находятся в одинаковых условиях (температурный режим, быстрота откачки) в течение всего эксперимента. Цельнометаллические угловые клапаны VR_1 и VR_2 открыты практически в течение всего эксперимента и закрываются на сравнительно короткое время для измерения потоков газа.

Давление в системе измерялось ионизационным датчиком давления с горячим катодом IG (от $2 \cdot 10^{-12}$ до 10^{-4} мбар). Измерение парциальных давлений газов (до 200 а.е.м.) проводилось при помощи квадрупольного масс-спектрометра RGA фирмы SRS (Стэнфорд, США). Для предотвращения попадания атмосферы в масс-спектрометр RGA последний во время вскрытия отсекался от основного объема цельнометаллическим угловым клапаном VR_3 .

До проведения экспериментов была рассчитана методом Монте-Карло в программе MolFlow

молекулярная проводимость bypass (обходной канал) VR_4 , составившая 9.8 л/с по водороду. Также были измерены коэффициенты чувствительности датчиков давления с горячим катодом и масс-спектрометра. После каждого вскрытия на атмосферу проводилась повторная калибровка всех измерителей вакуума.

Предварительная откачка системы осуществлялась турбомолекулярной станцией, включающей в себя турбомолекулярный насос TMP и безмасляный мембранный насос MP через цельнометаллический угловой клапан VR_5 . Измерение форвакуума и высокого вакуума осуществлялось широкодиапазонным датчиком давления FRG фирмы Pfeiffer, расположенным на откачной станции и состоящим из датчика Pirani (от 10^{-4} до 1000 мбар) и датчика давления с холодным катодом (от 10^{-9} до 10^{-4} мбар). Сверхвысокий вакуум в системе достигался при помощи комбинированного насоса (магниторазрядный насос и титановый сублимационный насос) с суммарной быстротой действия до 1000 л/с по водороду.

Установка прогревалась резистивным методом, контроль за температурой выполнялся с использованием термомпар (хромель/копель).

Методика определения коэффициента термического газыделения основана на измерении перепада давления на элементе с известной про-

водимостью (bypass). Газовый поток может быть вычислен следующим образом [2]:

$$Q = U (P_{до} - P_{после}) K,$$

где U – известная молекулярная проводимость трубопровода bypass, равная 9.8 л/с для водорода и 2.7 л/с для азота при комнатной температуре; $P_{до}$, мбар – давление в измерительной системе до закрытия клапана (VR_1 или VR_2); $P_{после}$, мбар – давление в измерительной системе после закрытия клапана (VR_1 или VR_2); K – коэффициент чувствительности для датчика давления, равный 2.3 для водорода и 1 для азота.

Коэффициент термического газовыделения находится следующим образом:

$$q = \frac{U(P_{до} - P_{после})K - Q_{reference}}{A_{обр}},$$

где $Q_{reference}$, л мбар/с – газовый поток из пустого объема из нержавеющей стали; $A_{обр}$, см² – полная площадь образцов.

Для определения потока отдельных газов использовались парциальные давления, полученные при помощи масс-спектрометра.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Карбид бора

Одним из предназначений диагностических порт-плаггов ITER является защита от нейтронов оборудования, установленного в порту, а также снижение радиационного фона в зоне элементов реактора, к которым периодически требуется доступ обслуживающего персонала. ИЯФ СО РАН является одним из разработчиков и изготовителей диагностических портов (экваториальный порт № 11 [3], верхние порты № 2, № 7, № 8 [4]).

Строгое ограничение на общую массу порта не позволяет заполнить весь порт металлом. Полости внутри порта вместе с прямыми вакуумными трубками диагностических систем делают невозможным обеспечение требуемого ослабления радиационной дозы для защиты диагностических детекторов и для безопасного нахождения обслуживающего персонала вблизи данного оборудования. Другой вариант, с использованием большого количества воды в качестве замедлителя нейтронов, был запрещен французским ядерным регулированием. По этой причине было предложено использовать другие материалы, в первую очередь карбид бора, которые первоначально на этапе концептуального проектирования в диагностических портах не использовались.

Из-за малой атомной массы и большого сечения поглощения нейтронов карбид бора может служить эффективным средством для уменьшения потока как быстрых, так и тепловых нейтронов.

В соответствии с требованиями ITER Vacuum Handbook [5] термический коэффициент газовыделения должен быть меньше 10^{-10} л · мбар/(с · см⁻²) для водорода и меньше 10^{-12} л · мбар/(с · см⁻²) для каждого из остальных газов.

Кроме того, предъявляются следующие требования к спектру остаточных газов:

- сумма максимальных значений пиков 39, 41, 42, 43, 45, ..., за исключением 69, 77, 132, 129, 131, 84, 86, 83, деленная на сумму всех пиков, должна быть меньше либо равна 0.1;

- сумма максимальных значений пиков 69 и 77, деленная на сумму всех пиков, должна быть меньше либо равна 0.01;

- сумма максимальных значений пиков 35 и 37, деленная на сумму всех пиков, должна быть меньше либо равна 0.01.

Для испытаний использовалось 638 образцов размером $55 \times 55 \times 5$ мм (суммарная площадь 4.56 м²), изготовленных фирмой ООО “Вириал” (Санкт-Петербург) методом свободного спекания, т.е. холодного (автоматического) прессования и спекания в высокотемпературной печи при температуре примерно 2200°C. Такой способ дешевле горячего прессования и позволяет производить керамику в больших количествах. При данном методе возможна пористость ~5%, плотность ~2.3–2.4 г/см³, химический состав: $\geq 99\%$ В₄С, $\leq 1\%$ примесей (кислород, алюминий, кремний).

До проведения испытаний образцы были промыты в этиловом спирте, затем – в дистиллированной воде в ультразвуковой ванне, после чего высушены на воздухе при температуре 120–150°C. Для уменьшения содержания водорода в объеме карбида бора образцы были прогреты при температуре 1000°C в высокотемпературной вакуумной печи. Затем образцы размещались в высоковакуумном стенде и прогревались на месте при постоянной вакуумной откачке. Измерения проводились как при температуре 100°C через каждые 3 месяца, так и при комнатной температуре в течение 2.5 лет [6–8]. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Спектр остаточных газов карбида бора при 100°C представлен на рис. 2. Согласно рис. 2, доминирующим газом является водород. Пики монооксида углерода на два порядка меньше. Пики остальных газов (вода, метан, двуокись углерода) еще меньше. С учетом того, что молекулярная проводимость обратно пропорциональна квадратному корню из молекулярной массы, можно утверждать, что по сравнению с термическим газовыделением водорода суммарное газовыделение всех остальных газов на два порядка меньше.

Таблица 1. Коэффициент термического газовыделения для карбида бора при различных температурах

Время откочки	q , мбар · л/(с · см ⁻²), при	
	100°C	20°C
5 ч	$1.0 \cdot 10^{-11}$	—
24 ч	$9.66 \cdot 10^{-12}$	—
29 ч	$9.58 \cdot 10^{-12}$	$3.06 \cdot 10^{-12}$
8 месяцев	$4.0 \cdot 10^{-12}$	$1.46 \cdot 10^{-13}$
12 месяцев	$2.95 \cdot 10^{-12}$	$7.4 \cdot 10^{-14}$
25 месяцев	$2.2 \cdot 10^{-12}$	$2.9 \cdot 10^{-14}$
30 месяцев	$2.06 \cdot 10^{-12}$	$2.66 \cdot 10^{-14}$

*Сверхвысокомолекулярный
полиметилметакрилат*

Полиметилметакрилат или органическое стекло относится к классу термопластичных пластмасс, которые при нагревании размягчаются, переходят в вязкотекучее состояние, а при последующем охлаждении затвердевают.

Наиболее важными преимуществами термопластичных пластмасс перед другими конструкционными материалами (металлами, керамическими соединениями) являются их небольшая плотность, эластичность, высокая механическая прочность, хорошие диэлектрические свойства и высокая химическая стойкость. Однако с точки зрения вакуумной техники данный материал обладает

рядом недостатков: низкой термостойкостью и высоким коэффициентом температурного расширения (как правило, на порядок больше, чем у металлов). Также, из-за того что в пластмассы добавляются наполнители, отвердители и другие специальные добавки, у них более высокий коэффициент термического газовыделения по сравнению с металлами.

В Институте химии твердого тела и механохимии СО РАН (ИХТТМ СО РАН) был изготовлен сверхвысокомолекулярный полиметилметакрилат (СВМ-ПММА). В отличие от общепринятых способов изготовления ПММА (литье под давлением, прессование и экструзия [9]), в экспериментах использовался метилметакрилат, который подвергался очистке методом пленочного испарения под пониженным давлением с использованием ротационного испарителя. Иницирование процесса полимеризации осуществлялось потоком ускоренных электронов с использованием импульсного линейного ускорителя ИЛУ-6. Принцип работы и параметры ускорителя ИЛУ-6 подробно описаны в работе [10].

Было изготовлено два образца СВМ-ПММА:

— образец № 1 получен методом объемной полимеризации в массе при температуре 60°C в течение 5 сут; молекулярная масса $M_w \sim 8 \cdot 10^6$ г/моль, степень полидисперсности равна примерно 3–3.5;

— образец № 2 получен методом фронтальной полимеризации при температуре 60°C в течение 5 сут; $M_w \sim 10^7$ г/моль, степень полидисперсности имеет такие же значения, что и у образца № 1 (для

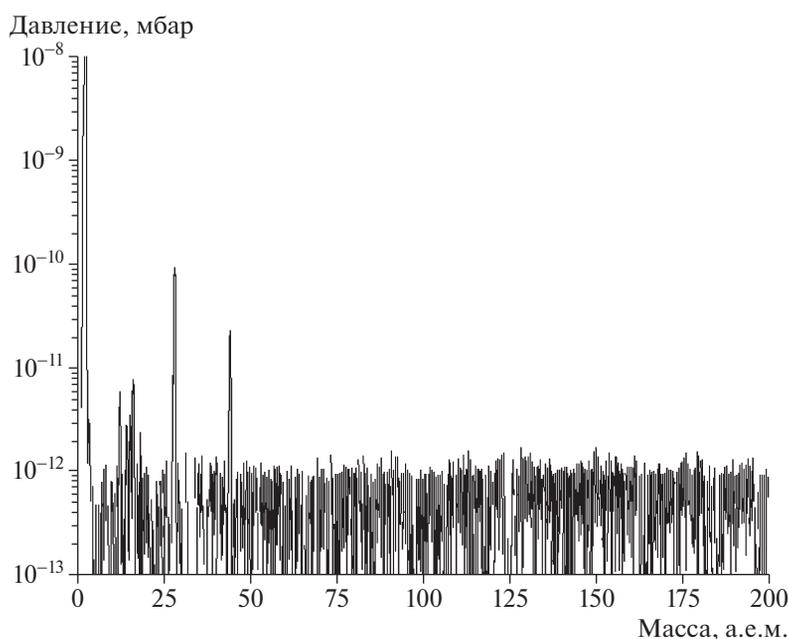


Рис. 2. Спектр остаточных газов для карбида бора после прогревания при 240°C, остывания до комнатной температуры и последующего нагрева до 100°C через 24 ч непрерывной откочки.

Табл. 2. Коэффициент термического газовыделения для различных материалов

Время откочки	$q, \text{ л} \cdot \text{ мбар}/(\text{с} \cdot \text{ см}^2)$				
	Нержавеющая сталь 316L	ПММА марки Ст-1	Образец № 1 СВМ-ПММА (трихлорэтилен)	Образец № 1 СВМ-ПММА	
				неотожженный	отожженный
1 день	$2.3 \cdot 10^{-10}$	$3.0 \cdot 10^{-6}$	$6.0 \cdot 10^{-6}$	$2.5 \cdot 10^{-6}$	$1.8 \cdot 10^{-6}$
2 дня	—	$2.0 \cdot 10^{-6}$	$3.5 \cdot 10^{-6}$	$1.5 \cdot 10^{-6}$	$1.0 \cdot 10^{-6}$

сравнения, у обычного полиметилметакрилата молярная масса равна 10^6 г/моль).

Образцы подвергались механической обработке и полировке. Часть образцов подвергалась прогреву при 110°C в течение 1 сут на воздухе.

Для изучения коэффициента термического газовыделения были взяты следующие материалы: образец № 1 СВМ-ПММА (отожженный и неотожженный), образец № 2 СВМ-ПММА и обычный ПММА марки Ст-1. В качестве эталона принят коэффициент термического газовыделения из нержавеющей стали. Полученные результаты представлены в табл. 2 и 3.

Как видно из табл. 2, образец № 1 СВМ-ПММА, подвергнутый очистке в ультразвуковой ванне с трихлорэтиленом, обладает наибольшим коэф-

фициентом газовыделения. Кроме того, трихлорэтилен приводит к растворению полиметилметакрилата. С точки зрения вакуумной техники наиболее перспективным материалом является СВМ-ПММА, полученный методом фронтальной полимеризации. Результаты измерения коэффициента газовыделения из данного материала после прогрева под вакуумом при температуре образца 110°C в течение 72 ч с последующим остыванием до комнатной температуры, а также после воздействия атмосферного давления в течение 2–3 ч приведены в табл. 3.

ВЫВОДЫ

1. Коэффициент термического газовыделения карбида бора соответствует требованиям ITER Vacuum Handbook. Этот материал производится в больших объемах, что делает его еще более привлекательным для использования в ITER. Тем не менее, применение карбида бора создает значительную газовую нагрузку на вакуумную систему, что требует использования дополнительных вакуумных насосов.

2. СВМ-ПММА с фронтальной полимеризацией имеет наименьшее газовыделение по сравнению с “обычным” ПММА. Данный материал является весьма перспективным для изготовления специализированных вакуумных камер электрофизических установок. В связи с этим ИХТТМ СО РАН и ИЯФ СО РАН разработали совместную программу по созданию прототипов вакуумных камер, включающих фланцевые соединения. В программе предусмотрены расширенные эксперименты по оптимизации технологических процессов изготовления СВМ-ПММА с целью дальнейшего снижения газовыделений и газопроницаемости.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Соглашения с Минобрнауки России № 075-15-2021-1359/2 и проекта Минобрнауки АААА-А19-119062690004-0.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sgobba S.* // Proc. of CAS-CERN Accelerator School and ALBA Synchrotron Light Facility: Course on Vac-

Таблица 3. Коэффициент термического газовыделения для образца № 2 СВМ-ПММА (отожженный)

Продолжительность откочки, дни	$q, \text{ л} \cdot \text{ мбар}/(\text{с} \cdot \text{ см}^2)$
Откочка	
1-й	$7.8 \cdot 10^{-7}$
2-й	$4.4 \cdot 10^{-7}$
3-й	$3.3 \cdot 10^{-7}$
4-й	$2.7 \cdot 10^{-7}$
7-й	$2.0 \cdot 10^{-7}$
8-й	$1.6 \cdot 10^{-7}$
11-й	$1.2 \cdot 10^{-7}$
После прогрева до температуры 110°C в течение 72 ч с последующим остыванием до комнатной температуры	
1-й	$1.6 \cdot 10^{-8}$
2-й	$1.46 \cdot 10^{-8}$
3-й	$1.34 \cdot 10^{-8}$
После воздействия атмосферного давления в течение 2–3 ч	
1-й	$1.17 \cdot 10^{-7}$
4-й	$2.75 \cdot 10^{-8}$

- uum in Accelerators. (Platja d'Aro, Spain, 16–24 May 2006) Switzerland, Geneva: CERN Accelerator School, 2007. P. 117.
<http://cds.cern.ch/record/923393/files/CERN-2007-003.pdf>
2. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. М.: Высшая школа, 1990.
 3. Sulyaev Y.S., Alexandrov E.V., Burdakov A.V., Ivantsivskiy M.V., Zemlyanskiy Y.N., Pischinskiy K.V., Sharafjeva S.R., Shiyankov S.V., Noryshev E.A., Porotnikov A.B., Shoshin A.A., Ivanova A.N., Klimenko M.V., Smirnov A.B., Pozhilov A.A., Kirienko I.D., Modestov V.S. // IEEE T. Plasma Sci. 2020. V. 48. Issue 6. P. 1631.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2020.2985113>
 4. Listopad A., Alexandrov E., Burdakov A., Buslakov I., Gorbovsky A., Zaitsev E., Ivantsivskiy M., Kirienko I., Loginov I., Lobachev A., Manaenkova Yu., Modestov V., Seleznev P., Shagniev O., Shiyankov S., Shoshin A. // IEEE T. Plasma Sci. 2020. V. 48. Issue 6. P. 1721.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2020.2985401>
 5. ITER Vacuum Handbook. Reference: ITR-19-004.
https://www.iter.org/doc/www/content/com/Lists/ITER%20Technical%20Reports/Attachments/10/ITER_Vacuum_Handbook.pdf
 6. Shoshin A., Burdakov A., Ivantsivskiy M., Polosatkin S., Klimenko M., Semenov A., Taskaev S., Kasatov D., Shchudlo I., Makarov A., Davydov N. // IEEE T. Plasma Sci. 2020. V. 48. Issue 6. P. 1474.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2019.2937605>
 7. Shoshin A., Burdakov A., Ivantsivskiy M., Polosatkin S., Semenov A., Sulyaev Yu., Zaitsev E., Polozova P., Taskaev S., Kasatov D., Shchudlo I., Bikhurina M. // Fusion Eng. Des. 2021. V. 168. P. 112426.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112426>
 8. Shoshin A., Burdakov A., Ivantsivskiy M., Klimenko M., Polosatkin S., Semenov A. // Fusion Eng. Des. 2019. V. 146. Part B. P. 2007.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.03.088>
 9. Справочник по пластическим массам / Под ред. В.М. Катаева, В.А. Попова, Б.И. Сажина. М.: Химия, 1975.
 10. Auslender V.L. // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. B. 1994. V. 89. P. 46.

**ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ДЕМОНСТРАЦИОННОГО
И УЧЕБНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

УДК 621.396.96

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННЫ ВИВАЛЬДИ© 2022 г. Е. Л. Шошин^{а,*}^а Сургутский государственный университет

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

*e-mail: shoshin_el@surgu.ru

Поступила в редакцию 30.12.2021 г.

После доработки 15.01.2022 г.

Принята к публикации 20.01.2022 г.

Рассмотрено применение антенны Вивальди в подповерхностной радиолокации. Выполнен анализ влияния дерновых почв на характеристики антенны антиподального типа. Получены оценки ширины главного лепестка диаграммы направленности, коэффициента направленного действия, уровня отношения Front-to-Back антенны в зависимости от влажности почв. Рассчитаны диаграммы направленности антенны при зондировании песка с влажностью 2, 8 и 22%. Рассмотрена установка для исследования характеристик антенн с использованием скалярного анализатора P2M-18. Выполнены измерения дисперсионных характеристик, диаграммы направленности и коэффициента усиления лабораторного образца антенны.

DOI: 10.31857/S0032816222030193

ВВЕДЕНИЕ

Антенны Вивальди способны работать в широком частотном диапазоне, что достигается благодаря расширяющейся щелевой линии передачи [1, 2]. Антенны Вивальди имеют симметричный главный лепесток, хорошее усиление и низкий уровень боковых лепестков. В отличие от спиральных, логопериодических антенн и антенн “бабочка”, излучатели Вивальди при парном соединении позволяют формировать излученные сигналы с линейной, круговой и эллиптической поляризацией и выполнять прием рассеянных сигналов [3, 4]. Антенны Вивальди получили широкое распространение при реализации беспроводных систем связи. Еще одной областью применения антенн Вивальди является подповерхностная радиолокация, в цели которой входят определение состояния почвогрунтов, обнаружение и реконструкция объектов, размещенных в подповерхностных средах [5]. Направленные свойства и дисперсионные характеристики излучателя Вивальди зависят от формы излучателя, а в случае подповерхностного радиолокационного зондирования на энергетические характеристики излучателя будут оказывать влияние почвогрунты. Зондируемые подповерхностные среды представляют собой сложные объекты, у которых комплексная диэлектрическая проницаемость $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$, тангенс диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ и электропроводность σ зависят от материала среды, частоты электромагнитного поля, плотности, пористости, влажности и температуры [6].

Целью данной работы является разработка конструкции антенны Вивальди для подповерхностного радиолокационного зондирования, численный расчет параметров антенны в условиях различной влажности почвогрунтов и экспериментальное исследование характеристик лабораторного образца антенны.

КОНСТРУКЦИЯ АНТЕННЫ

Излучатель Вивальди антиподального типа конструктивно представляет собой печатный излучатель, построенный на основе щели с экспоненциальным профилем [7]:

$$W(y) = W_S e^{ay}, \quad (1)$$

$$a = (1/L_S) \ln(W_{OUT}/W_{IN}), \quad (2)$$

где W_{IN} — ширина щелевой линии в области возбуждения, W_{OUT} — ширина щелевой линии на выходе антенны, L_S — длина нерегулярной щелевой линии.

Конструкцией георадаров предусматривается использование сменных антенных блоков, выполняющих подповерхностное радиолокационное зондирование в диапазоне частот от 25 до 1700 МГц [5]. Низкочастотные антенны используются при проведении инженерно-геологических работ и обследовании объектов на глубинах до 10–30 м с разрешением по глубине 0.5–2 м. Высокочастотные антенны позволяют проводить детальные исследования приповерхностных слоев с разреше-

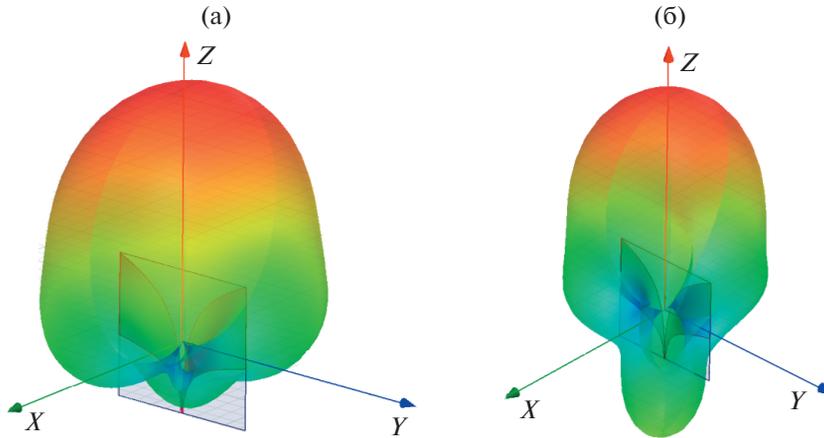


Рис. 1. Трехмерная диаграмма направленности антенны Вивальди в ближнем поле излучения: **а** – в сухой песок; **б** – в умеренно-влажную глину.

нием по глубине 3–5 см, а также выявлять металлические включения при зондировании бетонных строительных конструкций. Подповерхностное радиолокационное зондирование на центральных частотах 400 и 700 МГц позволяет провести исследование инженерно-геологических элементов почвогрунтов, диагностику состояния находящихся в эксплуатации подземных сетей коммуникации и измерение длины железобетонных свай, установленных в грунт [4, 5].

Рассмотрим применение антенны Вивальди для работы в составе георадара в диапазоне частот 400–750 МГц. Обоснуем выбор толщины подложки. Согласно работе [8], требование к эффективной толщине $t_{эф}$ подложки антенн с расширяющейся щелью определяется как

$$\frac{t_{эф}}{\lambda_0} = \frac{(\sqrt{\epsilon_r} - 1)t}{\lambda_0}, \quad (3)$$

где λ_0 – длина волны в свободном пространстве, t – толщина подложки, а ϵ_r – диэлектрическая проницаемость подложки.

Условие направленной передачи сигналов антеннами с расширяющейся щелью имеет вид

$$0.005 \leq \frac{t_{эф}}{\lambda_0} \leq 0.03. \quad (4)$$

Нижняя граница в формуле (4) связана с режим уменьшения коэффициента направленного действия антенны, а превышение верхней границы приводит к появлению нежелательных мод в подложке, которые способствуют увеличению боковых лепестков в диаграмме направленности антенны.

Для работы излучателя Вивальди в выбранном диапазоне частот в качестве материала подложки можно использовать стеклотекстолит толщиной 3 мм с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 5$.

Выполним параметрический синтез топологии излучателя Вивальди, направленный на достижение минимальных значений коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН < 2) с учетом требований по формированию направленных свойств излучателя в ближней зоне. В качестве подповерхностной среды выберем сухой песок ($\epsilon = 4.6$ и $\sigma = 0.002$ См/м). Ниже приведены результаты численного расчета параметров топологии излучателя:

Параметр	L	L_S	W	W_S
Величина, мм	400	230	430	5

ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВОГРУНТОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕННЫ ВИВАЛЬДИ

Подповерхностная среда оказывает существенное влияние на характеристики антенны Вивальди. Частотные зависимости электрофизических параметров дерново-подзолистой почвы, песка и глины определяются содержанием влаги и наличием солей [6]. У сухих почвогрунтов частотная дисперсия параметров ϵ' и $\text{tg}\delta$ в диапазоне частот 50–3.5 ГГц отсутствует.

На рис. 1 приведена рассчитанная 3D-диаграмма направленности антенны Вивальди при контактном излучении в песок ($\epsilon = 4.5$, $\text{tg}\delta = 0.065$) и умеренно влажную глину ($\epsilon = 13$, $\text{tg}\delta = 0.33$). Сравнение рис. 1а и рис. 1б демонстрирует деформацию главного лепестка диаграммы направленности, обусловленную значительной электропроводностью умеренно-влажной глины и возникающими при этом потерями электромагнитных волн.

Увеличение влажности дерновых почвогрунтов практически во всех случаях приводит к сужению главного лепестка диаграммы направленно-

сти излучателя Вивальди, одновременно с этим увеличивается коэффициент направленного действия, который учитывает степень рассогласования с линией питания. Результаты численного моделирования свидетельствуют, что при изменении влажности песка, дерна и глины от 2 до 30% главный лепесток диаграммы направленности излучателя на частоте 600 МГц в плоскости подложки антенны сужается до 45° (рис. 2а), коэффициент направленного действия увеличивается до 7.5–9 (рис. 2б), а коэффициент Front-to-Back уменьшается до 2–3 (рис. 2в).

Анализ характеристик антенны Вивальди при излучении в воду ($\epsilon = 81$) показывает, что возникающая рассогласованность при излучении и значительная электропроводность морской воды являются основными причинами, затрудняющими глубоководное зондирование водоемов. При излучении в морскую воду уровень главного лепестка диаграммы направленности антенны оказывается меньше уровня обратного излучения, если конструкцией антенны не предусмотрен экран между излучателем и воздушной полусферой. В табл. 1 приведены результаты численного расчета влияния электропроводности воды на характеристики антенны Вивальди.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что дерновые почвогрунты и вода влияют практически на все характеристики излучателя Вивальди. Наиболее благоприятной средой для подповерхностного зондирования является песок, на рис. 3 для него приведены диаграммы направленности, рассчитанные для частоты 600 МГц в зависимости от влажности песка.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННЫ

Установка предназначена для измерения дисперсионных и энергетических характеристик антенн в диапазоне частот от 10 МГц до 18 ГГц. В состав установки входит скалярный анализатор P2M-18 [9], который может работать в качестве индикатора мощности. Для управления P2M-18 и отображения результатов измерений используется программа P2M под управлением операционной системы Microsoft Windows.

Таблица 1. Характеристики антенны Вивальди при излучении в воду

Вода	Наличие экрана	Ширина главного лепестка	Уровень боковых лепестков, дБ	Коэффициент направленного действия
Дистиллированная	нет	45°	-6.4	7.0
Речная	нет	45°	-3.2	3.6
Морская	есть	42°	-3	8.8

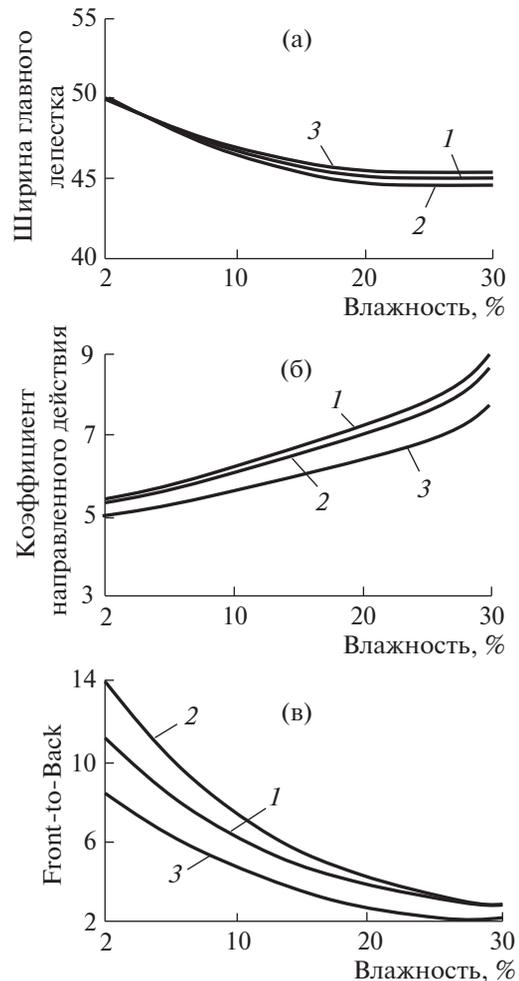


Рис. 2. Влияние влажности песка (1), дерна (2) и глины (3) на характеристики излучателя Вивальди: а – ширину главного лепестка диаграммы направленности; б – коэффициент направленного действия; в – коэффициент Front-to-Back.

P2M-18 имеет сверхвысокочастотные (с.в.ч.) входы и выход:

- вход “А” – (по умолчанию) для подключения датчика коэффициента стоячей волны (КСВ);
- вход “В” – (по умолчанию) для подключения детектора;

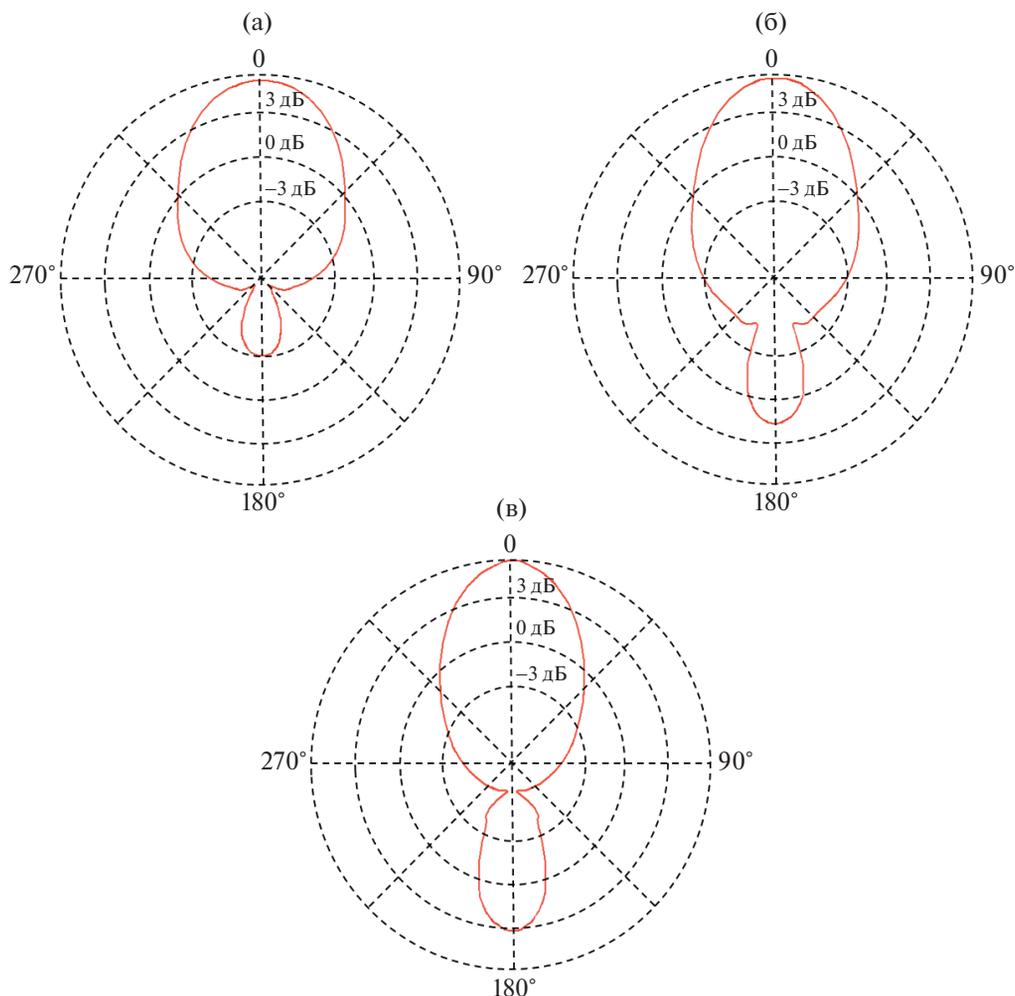


Рис. 3. Диаграммы направленности излучателя Вивальди при зондировании: **а** – песка (влажность 2%); **б** – умеренно-влажного песка (8%); **в** – влажного песка (22%).

– вход “R” – (по умолчанию) для подключения детектора опорного сигнала в режимах измерений “A/R” и “B/R”;

– “СВЧ” – выходной разъем генерируемых с.в.ч.-колебаний.

Технические характеристики анализатора P2M-18:

– диапазон рабочих частот – от 10 МГц до 18 ГГц;

– полоса качания частоты – от 0.001 до 3990 МГц;

– уровень мощности на выходном разьеме “СВЧ” – ± 10 дБм;

– диапазон измерений КСВН – от 1.05 до 5.00;

– диапазон измерений модуля коэффициента передачи – не менее 50;

– пределы допускаемой погрешности измерения КСВН при $K_{CT} \leq 2$ – не более $\pm(3K_{CT} + 1)\%$, где K_{CT} – измеряемое значение КСВН;

– пределы допускаемой погрешности измерения модуля коэффициента передачи – не более

$\pm(0.03A + 0.2)$ дБ, где A – измеряемое значение коэффициента передачи.

Фотография установки для измерения дисперсионных характеристик антенны Вивальди приведена на рис. 4.

Характеристики датчика $D_{КСВ}$:

– максимальный уровень входной мощности – 500 мВт;

– вносимые потери – 6.5 дБ;

– направленность – 35 дБ;

– КСВН измерительного входа – не хуже 1.2.

На рис. 5 приведены измеренные дисперсионные характеристики антенны Вивальди при зондировании в воздушную полусферу и песок.

Для измерения направленных свойств и коэффициента усиления исследуемой антенны традиционно применяют измерительную антенну. Последнюю при этом используют на излучение, а исследуемую антенну – на прием. Совокупность

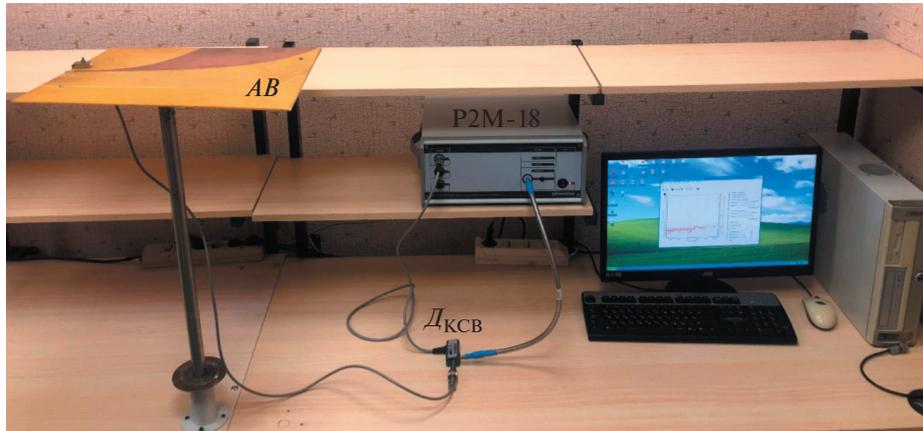


Рис. 4. Схема лабораторной установки для измерения дисперсионных характеристик антенны. *AB* – антенна Вивальди; *ДКСВ* – выносной датчик для измерения отражений; P2M-18 – скалярный с.в.ч.-анализатор.

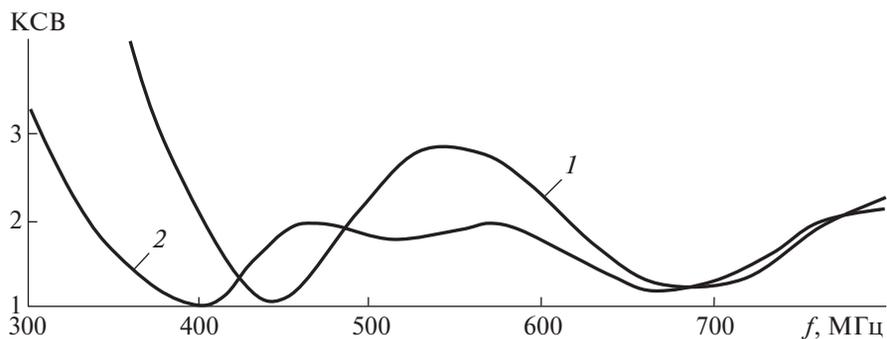


Рис. 5. Дисперсионные характеристики антенны Вивальди при зондировании в воздушную полусферу (1) и песок (2).

измерений уровней принятых сигналов, полученных при угловых перемещениях приемной антенны, позволяет построить диаграмму направленности. На основе абсолютных измерений уровней излученного и принятого сигналов можно определить коэффициент усиления испытываемой антенны. В случае исследования антенны Вивальди в силу ее широкой полосы рабочих частот можно провести измерение коэффициента усиления не на одной частоте, а на нескольких. Для этого измерительная антенна должна иметь узкий диапазон рабочих частот с возможностью перестройки центральной частоты.

Фотография лабораторной установки для исследования энергетических характеристик антенны Вивальди приведена на рис. 6.

Характеристики детекторной секции:

- максимальный уровень входной мощности – 100 мВт;
- динамический диапазон – от –50 до +16 дБм;
- неравномерность частотной характеристики – 1 дБ;
- КСВН измерительного входа – не хуже 1.15.

Излучающий четвертьволновый вибратор, оснащенный плоским контррефлектором и имеющий два плеча в форме медных круглых стержней с изменяемой длиной, устанавливается на неподвижном штативе и подключается к разъему “СВЧ” скалярного с.в.ч.-анализатора. Коэффициент усиления четвертьволнового вибратора составляет 2.2 дБ.

Приемная антенна Вивальди устанавливается на подвижном штативе и с помощью коаксиального кабеля подключается ко входу выносной детекторной секции. Для измерения диаграммы направленности антенна Вивальди поворачивается вокруг оси в плоскости подложки, что обеспечивает снятие зависимости мощности принятого сигнала от угла поворота.

При измерении коэффициента усиления антенны Вивальди ее необходимо установить в угловое положение, соответствующее максимуму уровня принятого сигнала мощностью $P_{пр}$, дБм. Расчет коэффициента усиления G_{AB} , дБ, антенны Вивальди выполняется по формуле

$$G_{AB} = P_{пр} - P_{изл} - G_{ЧВ} - (\eta_{AB} + \eta_{ЧВ}) - 2W,$$



Рис. 6. Схема установки для измерения диаграммы направленности и коэффициента усиления антенны Вивальди. ЧВ – четвертьволновый вибратор; АВ – антенна Вивальди; Д – детекторная секция; P2M-18 – скалярный с.в.ч.-анализатор.

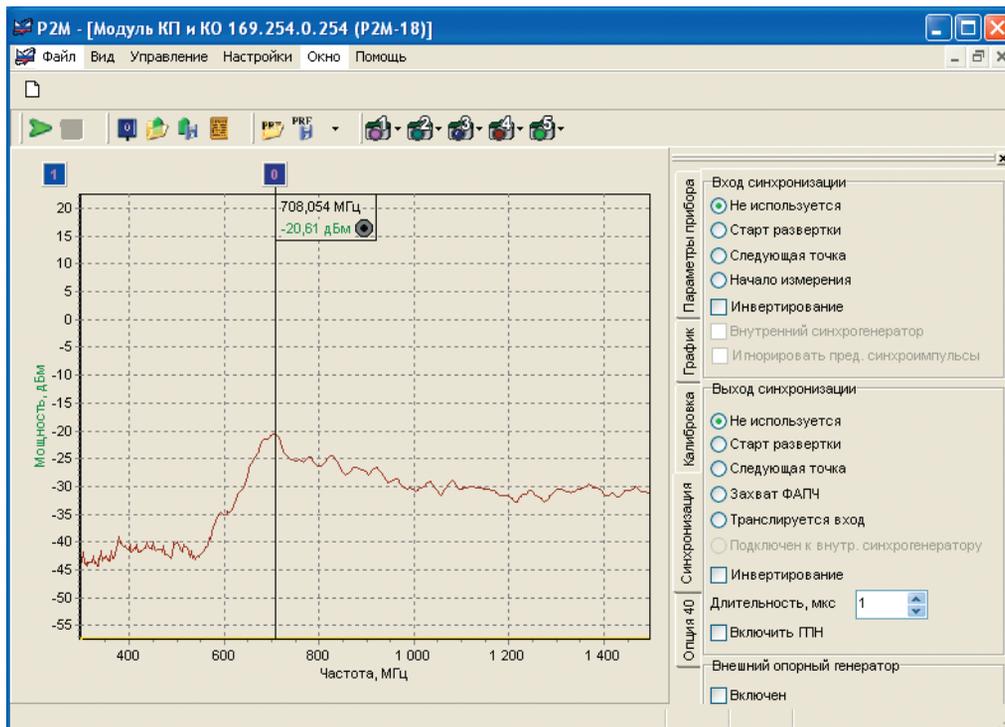


Рис. 7. Окно программы P2M.

где $P_{\text{изл}}$, дБм – мощность сигнала с разъема “СВЧ”; $G_{\text{ЧВ}}$, дБ – коэффициент усиления четвертьволнового вибратора; $(\eta_{\text{AB}} + \eta_{\text{ЧВ}})$, дБ – потери в коаксиальных кабелях; $2W$, дБ – потери сигнала по радиоканалу:

$$2W = 10 \lg \left(\frac{\lambda^2}{16\pi^2 R^2} \right),$$

где λ – длина волны, $R = 1$ м – расстояние между излучающей и приемной антеннами.

На рис. 7 приведено окно программы P2M, с использованием которой выполнено измерение уровня принимаемого сигнала на частоте 708 МГц.

Характеристики антенны Вивальди:

– полоса рабочих частот – 320–760 МГц;

- ширина главного лепестка диаграммы направленности в плоскости подложки:
 - при излучении в песок – 50° ,
 - при атмосферном приеме – 55° ;
- коэффициент усиления:
 - при излучении в песок на частоте 600 МГц – 5.8 дБ,
 - при атмосферном приеме на частоте 520 МГц – 4.3 дБ;
 - при атмосферном приеме на частоте 610 МГц – 4.5 дБ;
 - при атмосферном приеме на частоте 708 МГц – 4.1 дБ;
- уровень боковых лепестков – 12 дБ;
- габариты – $600 \times 600 \times 3$ мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Энергетические характеристики антенны Вивальди позволяют использовать ее в составе радиолокатора подповерхностного зондирования. При контактном излучении в сухой песок ширина главного лепестка диаграммы направленности антенны антиподального типа в плоскости подложки достигает 50° , а уровень боковых лепестков составляет –12 дБ. При изменении влажности дерновых почв от 2 до 30% главный лепесток диаграммы направленности антенны на частоте 600 МГц в плоскости подложки сужается до 45° , коэффициент направленного действия увеличивается до 7.5–9. При излучении в речную воду уровень боковых лепестков антенны возрастает до –3.2 дБ.

Использование скалярного с.в.ч.-анализатора P2M-18 позволяет выполнить измерение дисперсионных и энергетических характеристик антенны Вивальди. Диапазон рабочих частот лабораторного образца антенны при излучении в песок составляет 320–760 МГц. Коэффициент усиления антенны при атмосферном приеме радиосигналов с частотами 520–708 МГц изменяется в пределах 4.1–4.5 дБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Perdana M.Y., Hariyadi T., Wahyu Y.* // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. V. 180 (1). P. 012058. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/180/1/012058>
2. *Костиков Г.А.* Автореф. дисс.... канд-та техн. наук. СПб., 2007.
3. *Банков С.Е., Курушин А.А.* Расчет антенн и СВЧ-структур с помощью HFSS Ansoft. М.: ЗАО “НПП Родник”, 2009.
4. *Шошин Е.Л.* // Вестник кибернетики. 2020. № 3 (39). С. 62.
5. Вопросы подповерхностной радиолокации. Коллективная монография / Под ред. А.Ю. Гринева. М.: Радиотехника, 2005.
6. *Финкельштейн М.И., Карпухин В.И., Кутев В.А., Метелкин В.Н.* Подповерхностная радиолокация. М.: Радио и связь, 1994.
7. *Gibson P.J.* // 9th European Microwave Conference Proceedings. Brighton, 17–20 September 1979. P. 101.
8. *Wood I.* Ph.D. dissertation. USA, University of Victoria, 2005.
9. Измеритель модуля коэффициента передачи и отражения P2M-18. Руководство по эксплуатации в двух частях. 2007.

**ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ
В ЛАБОРАТОРИЯХ**

УДК 53.07

**БЛОК УПРАВЛЕНИЯ НАУЧНОЙ АППАРАТУРОЙ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ
ЭКСПЕРИМЕНТОВ С АВТОМАТИЧЕСКИМ ВВОДОМ РЕЗЕРВА**

© 2022 г. Д. В. Лисин

Поступила в редакцию 18.01.2022 г.

После доработки 19.01.2022 г.

Принята к публикации 20.01.2022 г.

DOI: 10.31857/S0032816222030168

Блок управления системой (б.у.с.) сбора научной информации и управления комплексом научной аппаратуры разработан в ИЗМИРАН в ходе реализации программы космических экспериментов по ионосферному зондированию Земли и может быть использован во всех других проектах спутниковых платформ, в том числе в системах малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли и предупреждения техногенных катастроф. Блок обладает уникальными возможностями по автоматическому вводу резерва основной телеметрической системы, что важно именно при проведении длительных экспериментов на орбите Земли. Кроме того, он предназначен для решения следующих задач управления комплексом научной аппаратуры космического аппарата:

- коммутация бортового питания приборов комплекса, приемников и передатчиков командной радиолинии по сигналам управления, формируемым бортовой системой управления;
- обеспечение автоматического переключения питания между основным и резервным блоками бортовой системы управления в случае отказа активного блока без команды извне;
- обеспечение принудительного переключения между основным и резервным блоками бортовой системы управления подачей специально выделенной релейной команды от служебной системы космического аппарата;
- обеспечение безусловной подачи питания на основной блок бортовой системы управления в случае отказов внутри соответствующих узлов самого б.у.с.;
- обеспечение возможности управления коммутацией питания приборов комплекса научной аппаратурой, приемников и передатчиков командной радиолинии в случае отказов внутри б.у.с.;
- прием, предварительная обработка, запоминание и передача в активный блок бортовой системы управления 32-х разовых релейных команд, получаемых от служебной системы управления космиче-

ским аппаратом (резервный контур управления комплексом);

- формирование и передача в служебную телеметрическую систему платформы космического аппарата требуемых телеметрических параметров.

В состав блока входят:

- контроллер сторожевого таймера и обработки релейных команд;
- вторичный преобразователь питания, помехоподавляющий фильтр;
- набор твердотельных ключей для коммутации питания внешних нагрузок;
- набор формирователей телеметрических сигналов для передачи в служебную телеметрическую систему.

Интегрированный контроллер сторожевого таймера и обработки релейных команд реализован на основе однократно программируемой интегральной схемы, выполненной по технологии наращиваемых перемычек [1].

Основной функцией контроллера является непрерывный контроль признаков работоспособности активного комплекта бортовой системы управления. После подачи бортового питания контроллер обеспечивает безусловное включение основного блока системы управления, даже в случае собственного отказа. Далее начинается процесс наблюдения за работоспособностью бортовой системы управления. Если в течение заданного времени (20 с) активный блок не выдает признака подтверждения исправности, то контроллер обеспечивает снятие питания с основного блока бортовой системы управления и подачу питания на резервный блок. В случае, если внутренний источник питания резервного блока не включился, питание с основного блока не снимается. Далее осуществляется наблюдение за работоспособностью резервного блока. Если в течение заданного времени (20 с) резервный блок бортовой системы управления не выдает призна-

ка подтверждения исправности, то контроллер переключает основной и резервный блок в цикле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисин Д., Лебедев Н., Смерек В. // Компоненты и технологии. 2016. № 5. С. 73.

Адрес для справок: Россия, 108840, Москва, г.о. Троицк, Калужское ш., 4, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова, Центр космических информационных технологий (ИЗМИРАН); тел. (495) 851-97-30. E-mail: lisindy@izmiran.ru

АННОТАЦИИ СТАТЕЙ, НАМЕЧАЕМЫХ К ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ ПТЭ

DOI: 10.31857/S003281622203020X

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Elif Ebru Ermis, Cuneyt Celiktas. Применение метода временных измерений. — 5 с., 7 рис.

Поскольку в спектрах β -распада β -частицы могут иметь любую энергию от нуля до максимума, низкоэнергетическая часть β -спектра скрывается в электронных шумах регистрирующего устройства. Нами предложен экспериментальный метод выделения сигналов от β -частиц в избранной части шумового спектра в низкоэнергетической части спектра источника ^{204}Tl методом временной привязки с постоянным порогом. Полученные результаты показали, что предлагаемый метод вполне успешно выделяет импульсы от β -частиц среди шумовых сигналов. Сделано заключение, что использованный метод позволяет отделять не только шумовые сигналы, но также и разделять импульсы от частиц разных типов, например, отделять сигналы фона от сигналов источника, что улучшает возможности детектирования.

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 двухканального сцинтиляционного спектрометра. — 7 с., 6 рис.

Представлены результаты калибровок двухканального сцинтиляционного спектрометра толщиной $0.5X_0$, выполненных на космических мюонах и пучке вторичных квазимоноэнергетических электронов с энергиями от 3 до 100 МэВ ускорителя “Пахра” Физического института им. П.Н. Лебедева РАН. Регистрация световых сигналов в спектрометре осуществлялась фотоэлектронными умножителями ФЭУ-52. Обнаружено, что зависимости относительного энергетического разрешения отдельных каналов спектрометра от энергии электронов идентичны. При энергии электронов $E \approx 32$ МэВ относительные энергетические разрешения каналов спектрометра составили $\sim 11\%$, а суммы сигналов обоих каналов $\sim 7\%$.

Гуров Ю.Б., Лапушкин С.В., Розов С.В., Сандуковский В.Г., Чернышев Б.А. Метод восстановления спектров короткопробежных частиц в реакциях поглощения π^- -мезонов. — 8 с., 6 рис.

Описан метод восстановления спектров короткопробежных заряженных частиц в экспериментах по исследованию поглощения остановившихся пионов ядрами. Данный подход основан на использовании мониторинной системы, состоящей из двух Si-детекторов, и “живой” мишени, в качестве которой также используется Si-детектор. Анализ информации одновременно с мониторинных детекторов и “живой” мишени позволяет определить глубину остановки пиона в мишени. Показано, что использование представленного

метода “прицеливания” позволяет корректно восстанавливать энергетические спектры изотопов гелия ^3He , ^4He в диапазоне энергий 16–35 МэВ при использовании мишеней толщиной ~ 0.1 г/см 2 .

Кузьмин Е.С., Бокучава Г.Д., Зимин И.Ю., Круглов А.А., Кучинский Н.А. Изготовление и характеристики композитных сцинтилляторов на основе литиевого стекла. — 11 с., 7 рис.

Разработаны и изготовлены образцы композитных сцинтилляторов, состоящих из фрагментов литиевого стекла NE 912, расположенных в органической матрице. Образцы изготавливались размерами $\varnothing 40 \times 2$ мм и с концентрацией литиевого стекла 25, 30 и 35%. В качестве нейтральной матрицы использовались эпоксицидная и акриловая смолы, а также силиконовый компаунд. Испытания образцов проводились в составе сцинтилляционного детектора на пучке тепловых нейтронов и с источником γ -квантов ^{60}Co . Определялись эффективность регистрации тепловых нейтронов и γ -чувствительность в сравнении с гомогенным стеклянным сцинтиллятором. Полученные результаты подтвердили возможность снижения на два порядка чувствительности детектора к γ -квантам за счет незначительного (50%) снижения эффективности регистрации нейтронов.

ЭЛЕКТРОНИКА И РАДИОТЕХНИКА

Song Li, Peng Fan, Jingming Gao, Hanwu Yang, Dongqun Chen, Baoliang Qian. A Compact Repetitive High-Power Pulse Generator based on Air-Cored Pulse Transformer. — 5 p., 8 fig. (публикуется только в английской версии ПТЭ).

A compact repetitive high-power pulse generator, which could be used for high voltage applications including high power microwave and low temperature plasma, is described. Stray resistances which influence the performance of the generator were discussed and numerically optimized. Then, the high-power pulse generator was built in our laboratory. Experimental results show that pulses with peak power of 30 MW, peak voltage of 87.6 kV, and rise time of 60 μs , approximately, were obtained on a capacitive load of 200 nF. The repetitive rate was 10 Hz and the generator has successfully worked for over 10000 shots for high voltage applications.

Жарков Я.Е., Мошкунов С.И., Ребров И.Е., Хомич В.Ю., Ямщиков В.А. Генерация прямоугольных импульсов на базе высоковольтных коммутаторов на транзисторной основе при работе в синхронном и асинхронном режимах. — 12 с., 10 рис.

Рассмотрены два режима — синхронный и асинхронный — работы высоковольтного импульсного генератора на основе параллельно соединенных высоко-

вольтных коммутаторов (ВВК) для формирования прямоугольных импульсов. В синхронном режиме достигнута крутизна фронта нарастания 336 В/нс при подключении четырех ВВК и 188 В/нс при подключении одного ВВК на резистивной нагрузке 330 Ом при питающем напряжении 8 кВ. Исследована зависимость длительности нарастания высоковольтного импульса от уровня питающего напряжения и количества коммутируемых ВВК. Для случая асинхронного режима достигнута частота следования импульсов 4 МГц и эффективность 75% при мощности в нагрузке 41 кВт. На примере моделирования показано влияние частоты коммутации на параметры формируемых импульсов на нагрузке.

Козлов А.А., Козлов А.В., Шурупов А.В., Гусев А.Н. Блок запуска управляемого разрядника. — 5 с., 3 рис.

Описан блок запуска управляемого разрядника типа РВУ-43. Для запуска используется оптический импульс с генератора синхроимпульсов, поступающий через пластиковый световод на фотоприемник блока запуска. Амплитуда импульса напряжения запуска (при отсутствии пробоя управляемого разрядника) не менее 7 кВ. Амплитуда импульса тока запуска (после пробоя управляемого разрядника) не более 5 кА. Фронт импульсов напряжения запуска не более 0.1 мкс. Задержка от входного синхроимпульса до появления напряжения на выходе блока запуска не более 0.5 мкс. Блок запуска не требует дополнительного электрического питания. Питание осуществляется от емкостного накопителя через высокоомный резистор. Максимальный ток потребления не превышает 1 мА. Рабочее напряжение емкостного накопителя от 1 до 50 кВ.

Коротков С.В., Жмодиков А.Л., Коротков Д.А. Исследование реверсивно включаемых динисторов в нетрадиционном режиме переключения субмикросекундными импульсами тока управления. — 12 с., 9 рис.

Приведены результаты оптимизации мощного коммутатора, состоящего из блока реверсивно включаемых динисторов с диаметром структур 50 мм, блока запуска динисторов и дросселя с насыщающимся сердечником, который обеспечивает уменьшение мощности блока запуска путем создания задержки резкого нарастания основного тока при протекании тока управления, имеющего противоположную полярность. Показано, что требуемое для существенного уменьшения габаритов и индуктивности дросселя уменьшение традиционной микросекундной длительности запускающего воздействия до нескольких сотен наносекунд не приводит к увеличению потерь энергии в динисторах, если ток управления имеет достаточно большую амплитуду, и величина запускающего заряда не изменяется. Описана конструкция оптимизированного коммутатора, имеющего индуктивность ~200 нГн и рабочее напряжение 16 кВ. Показана возможность его долговременного использования для коммутации импульсов тока с амплитудой ~100 кА, нарастающих со скоростью ~30 кА/мкс.

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Bhuvanewari S., Abitha Memala W. Comparative Analysis of Resonant Converters for X-ray Generator Tube. — 8 p., 11 fig. (публикуется только в английской версии ПТЭ).

High voltages are the need of the hour as they have wide applications in testing, transmission, and Distribution. The industries are more using the high voltages for various Purposes. This work proposes a Resonant Converter for generation of high voltages for X-ray Generator tube. X-rays generator when used in industries for non-destructive testing gets heated up due to continuous usage. To reduce the heat, the losses developed in the X-ray generator tube are reviewed and the ways of reducing the losses are proposed. The various topologies of resonant converters are compared and LCC Resonant Converter has been selected based on the capability of High Voltage and High Efficiency generation. Various losses such as switching losses and conduction losses have been calculated for LLC, CLL, and LCC Resonant Converters. Based on the calculation of losses, LCC Converter has been simulated in open loop and closed loop with PID Controller and Fuzzy Logic Controller in MATLAB Simulink. The output voltages, efficiency, and time domain specifications have been studied and also compared with simulation of Fuzzy Logic Controller. The Fuzzy Logic controller serves as the best controller from the time domain specifications.

Григорьева И.Г., Макаров А.А., Корф А.Н., Салахутдинов Г.Х. Сравнительные характеристики методов измерения спектров импульсно-рентгеновского излучения. — 7 с., 4 рис.

Проведен анализ наиболее эффективного метода спектрометрии импульсного рентгеновского излучения горячей плазмы — метода фильтров поглощения. Метод реализован на основе многоканальных спектрометров с использованием метода эффективных энергий и математического моделирования процессов регистрации импульсного рентгеновского излучения. С целью дальнейшего развития методов восстановления спектров импульсного рентгеновского излучения и определения их точности создан измерительный стенд на основе импульсной рентгеновской трубки. Разработанный стенд показал точность измерения спектра импульсного рентгеновского излучения методом фильтров поглощения, сравнимую со спектральным анализом импульсного рентгеновского излучения.

Долгов А.Н., Клячин Н.А., Прохорович Д.Е. Метод исследования наносекундных процессов в плазме микропинчового разряда. — 14 с., 5 рис.

Описана методика и приведены результаты исследований пространственной структуры и динамики источников рентгеновского излучения в плазме микропинчового разряда. Примененная методика позволила осуществить временную привязку процесса ускорения электронов в квазистатическом электрическом поле резистивной природы к процессу формирования микроперетяжки в Z-пинче в среде тяжелых элементов с наносекундным временным разрешением.

Стяпшин В.М., Михеев Г.М. Фотовольтаический метод определения “быстрой” оси четвертьволновых пластинок. — 9 с., 3 рис.

Предложен простой метод определения “быстрой” оси четвертьволновых пластинок, основанный на регистрации возникающих в пленочных структурах поверхностных фототоков, зависящих от направления вращения вектора электрического поля падающего импульсного лазерного излучения. В качестве поляризаторно-чувствительных пленочных структур можно использовать серебро-палладиевые (Ag/Pd) наноконформные пленки, изготовленные по толстопленочной

технологии, а также тонкие нанокompозитные пленки CuSe/Se, синтезированные методом вакуумно-термического напыления. Разработанный метод позволяет оперативно определять “быструю” ось четвертьволновых пластинок, работающих в широком диапазоне длин волн, от 266 до 4000 нм, без использования дополнительных оптических приспособлений.

Таряник Н.В., Варюхин Д.В., Федюк Д.О. Сверхпроводниковая магнитная система спектрометра ядерного магнитного резонанса на частоте 400 МГц. — 8 с., 2 рис.

Приведены результаты разработки и исследований сверхпроводниковой магнитной системы с индукцией магнитного поля 9.5 Тл для спектрометра ядерного магнитного резонанса высокого разрешения на частоте 400 МГц. Показана возможность получения высокооднородного и стабильного магнитного поля с индукцией 9.5 Тл в соленоиде с диаметром рабочего отверстия ≥ 80 мм, изготовленном из сверхпроводникового провода сплава HT-50. Применение сверхпроводниковых обмоток компенсации осевых и радиальных градиентов магнитного поля соленоида позволило улучшить однородность поля с $2 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-8}$ отн. ед. в объеме ампулы диаметром 5 мм и высотой 10 мм. Высокая стабильность магнитного поля в “замороженном” режиме на уровне порядка 10^{-8} отн. ед./ч достигается при токе в соленоиде на 6–8% меньше критического.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

Jingxuan Ban, Lei Wang, Gang Chen. A platform control algorithm for long-endurance hybrid inertial navigation system with fiber optic gyroscope. — 14 p., 7 fig. (публикуется только в английской версии ПТЭ).

Hybrid inertial navigation system is a new solution to increase long-endurance navigation performance based on fiber optic gyroscope. It relies on rotational mechanism tracking navigation coordinate system and isolating carrier's angular motion with static error free, while realizing rotational modulation at the same time. The output of gyroscope is always used to calculate control command. However, the axis of gyroscope and the axis of motor are nonorthogonal because of rotation modulation and carrier's motion. Therefore, it is necessary to study an effective platform control algorithm achieving both stabilization and rotation modulation. The paper proposes a platform control algorithm for tri-axis hybrid inertial navigation system. Experiments are conducted to verify the method using a self-researched hybrid navigation system. According to experimental results, the proposed method has an advantage over the traditional method.

Qunfeng Zeng, Hao Jiang, Qi Liu, Gaokai Li. A method for measuring interlayer vacuum degree of the LNG (Liquified Natural Gas) vacuum multi-layer insulation pipe by temperatures. — 9 p., 10 fig. (публикуется только в английской версии ПТЭ).

It is difficult to obtain the interlayer vacuum degree of the LNG (Liquified Natural Gas) vacuum multi-layer insulation pipe at any position, especially for pipes that are in service. Thus, this paper proposes a method for measuring interlayer vacuum degree of the vacuum multi-layer insulation pipe by temperatures. A vacuum multi-layer insulation pipe model was built to find the temperature parameters, and a field investigation and experiments with a test bench

were carried out to verify the simulation results. The experimental results show that the simulation results have a good reference value for actual measurement. This method for measuring the interlayer vacuum degree will play an important role in the popularization of vacuum multilayer insulation pipes.

Sinmaz E.K., Kocasecer M., Ayyildiz M. The Effect of Book Preconditioning on Page-Turning Success Rate during Automated Book Digitization. — 18 p., 5 fig. (публикуется только в английской версии ПТЭ в режиме Open Access).

The growing popularity of e-books and the adoption of e-book reader devices have increased the need for book digitization. Traditional flatbed scanners are easily accessible and widely available; however, manual scanning of books is tiring, tedious, and time-consuming when the book has many pages. Developing automated book scanning instruments at a low cost can allow more people to efficiently access and execute the book digitization. In this study, we propose a cost-effective book scanner with an automated page-flipping function. Our prototype uses a motorized moving shuttle with a vacuum gripper to hold the page and a fan to ensure the turning of the page in the correct direction and number of times. A Raspberry Pi 4 takes pictures of the left and right sides of the book using two digital cameras. When the picture capturing process is completed, it combines pictures into text-based digital formats such as PDF using OCR technology. In our experiments, we scanned five different books having different page numbers (120–700) with various paper characteristics such as paper size (A4 and A5), paper type (coated vs. uncoated), and paperweight (60–250 g/m²). The results showed that we obtained less than 0.9% error in book scanning when the paperweight was between 60–120 g/m². We achieved the most successful scanning with uncoated paper type, A4, A5 paper size, and 115–125 g/m² paperweight. We observed that the unsuccessful page scan rating decreased as the number of scanning repetitions increased. The results also showed that it was challenging to turn the pages of new books without encountering problems unless pages were preconditioned by turning. We concluded that three iterations of preconditioning are necessary for new books to reduce errors in the page-turning process.

Алукер Н.Л., Артамонов А.С., Неггманн М. Дозиметрический контроль в угольных шахтах как мера повышения безопасности угледобычи. — 14 с., 6 рис.

Обоснована необходимость проведения дозиметрического контроля на объектах угледобычи для выявления высокой ионизации газопылевой смеси в воздушной среде шахт. Предлагается оценка шахтных полей по поверхностной дозиметрии для выявления возможных утечек газа при нарушении целостности массивов (разломы, изменение проницаемости пород при ведении работ). Приводятся примеры, иллюстрирующие применение дозиметрии в рассмотренных ситуациях.

Бикчурин М.И., Быков Т.А., Колесников Я.А., Макаров А.Н., Остринов Г.М., Савинов С.С., Таскаев С.Ю., Щудло И.М. Измерение фазового портрета пучка ионов в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией. — 14 с., 11 рис.

Одним из ускорителей заряженных частиц с относительно малой энергией и относительно большим током является ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией, предложенный для бор-нейтронозахватной те-

рапии и планируемый к использованию в ряде других приложений, требующих более удаленного размещения нейтроногенерирующей мишени от ускорителя. В работе проведено измерение фазового портрета пучка ионов и его зависимость от тока пучка ионов и силы магнитной линзы, фокусирующей пучок отрицательных ионов водорода на вход ускорителя. Показано, что модернизация магнитной линзы способствовала уменьшению сферической абберации линзы и улучшила качество пучка отрицательных ионов. Установлено, что эмиттанс пучка ионов растет с увеличением тока и пространственный заряд влияет на фазовый портрет пучка ионов в тракте транспортировки низкой энергии. Для компенсации действия пространственного заряда на фазовый портрет пучка протонов изменяют силу магнитной линзы. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что пучок протонов может быть транспортирован до места планируемого размещения нейтроногенерирующей мишени без добавления фокусирующих элементов.

Пияков А.В., Телегин А.М. Измерение распределения частиц по сечению тракта ускорителя для моделирования микрометеоритов с помощью индукционного датчика. — 11 с., 11 рис.

Рассмотрены методы определения координаты по сечению тракта ускорителя пролета микронных частиц. Приведены расчеты и результаты моделирования работы датчика для измерения распределения частиц по сечению тракта ускорителя и данные проведения эксперимента. Показано, что распределение частиц по сечению тракта на входе в камеру близко к нормальному закону распределения.

ЛАБОРАТОРНАЯ ТЕХНИКА

Сао Yuxiao, Chen Chunjun, Deng Chao. Исследование вибрационного воздействия на пьезорезистивный датчик давления. — 16 с., 21 рис.

Измеренная величина бокового давления на корпус высокоскоростного поезда будет зависеть от вибраций поезда в условиях сложной испытательной среды. Данная статья посвящена исследованию влияния виброускорения на измерение бокового давления, воздействующего на поверхность стен кузова высокоскоростных поездов. С целью изучения влияния вибраций на пьезорезистивные датчики давления создана лабораторная платформа с соединительной муфтой вибрационного давления. С экспериментальной платформы собираются данные выходного сигнала пьезорезистивного датчика давления при вибрационных нагрузках различной частоты. Выходные сигналы датчика вибрации и давления разделяются с помощью метода, основанного на принципе EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition). Путем анализа различных вибрационных нагрузок и выходного сигнала датчика давления получены их внутренние соотношения. Кроме того, результаты данного исследования дают теоретические рекомендации для измерения как бокового давления, оказываемого на стенки высокоскоростного поезда, так и давления, оказываемого на поверхности транспортных средств в других условиях ускоренной нагрузки.

Gaofa Nie, Yuanling Lin, Xuhong Miao, Yuhang Tang. Static and Dynamic Testing of a Nonlinear Molecular Spring of Vehicle Suspension. — 10 p., 7 fig. (публикуется только в английской версии ПТЭ).

The paper explains a concept of a vehicle molecular spring suspension whose stiffness in middle stage can be as low as 13 N/mm. The design of this suspension spring on the basis of a hydrophobic nanoporous material is introduced. The test methods of determining the static and dynamic mechanical properties of the novel suspension spring are described. The rationality of experimental design and the accuracy of theoretical analysis is proved by the negligible error between experimental results and theoretical analysis. The vibration isolation test results show that the natural frequency of the suspension can be as low as 1.06 Hz.

Смирнов А.И., Солдатов Т.А., Эдельман В.С. Погружной микрокриостат растворения для СВЧ-спектроскопии и магнитного резонанса. — 16 с., 10 рис.

Описан автономный микрорефрижератор растворения, изготовленный в виде вставки в гелиевый криостат со сверхпроводящим магнитом. В этом рефрижераторе циркуляция ^3He по заполненному смесью ^3He – ^4He контуру (миксер–теплообменник–испаритель–конденсатор–теплообменник–миксер) достигается благодаря конденсации паров смеси на стенках конденсатора, охлаждаемого ванной ^3He , которая откачивается сорбционным насосом, и стеканию конденсата в миксер под действием силы тяжести. С миксером связан теплопроводом резонатор 8-миллиметрового диапазона с исследуемым образцом, расположенным в центре сверхпроводящего соленоида с полем до 80 кЭ. Излучение от генератора с помощью волноводов попадает в резонатор, а прошедший через резонатор сигнал — на детектор. Генератор и детектор находятся при комнатной температуре. Прибор предназначен для микроволновой спектроскопии магнитных материалов при температурах в диапазоне ~ 0.09 –3 К. Время поддержания температуры на уровне ~ 0.1 К составляет 4–6 ч. Приведены результаты тестового эксперимента по наблюдению антиферромагнитного резонанса в монокристалле MnCO_3 .

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ДЕМОНСТРАЦИОННОГО И УЧЕБНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Глазков В.Н., Ракигин М.П. Демонстрационный эксперимент по резонансным колебаниям маятника для студенческого практикума по физике. — 8 с., 5 рис.

Колебания на студенческих практикумах по механике обычно изучаются на примерах свободных колебаний математических и физических маятников. Вынужденные колебания и явление резонанса, как правило, рассматриваются в практикумах по электричеству на примере RLC -контуров. В данной статье предлагается описание простой установки, которая совмещает в себе демонстрационную наглядность маятника и возможность наблюдения явлений вынужденных колебаний, резонанса и биений.

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.

В 2022 г. наш журнал открывает новый раздел по тематике “Приборы и техника демонстрационного и учебного эксперимента”. Требования к статьям этого раздела не отличаются от требований к статьям других разделов ПТЭ. Мы надеемся, что авторы этого раздела будут представлять не только текстовые описания новых приборов, но и представлять видеоматериалы о том, как эти демонстрации используются в лекционной и лабораторной практике работы со студентами. Эти материалы можно давать в виде ссылок на свои ресурсы или оформлять их как “дополнительные материалы” к статье (<https://www.pleiades.online/ru/authors/guidlines/prepare-electronic-version/supplementary-materials/>).

Дополнительные материалы публикуются только в электронной версии на сайте <https://link.springer.com/> (для англоязычных журналов) и <https://elibrary.ru> (для русскоязычных журналов).

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) ра-

нее 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, изготовленные 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 редколлегии 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 следует 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/guidelines/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 расстоянии 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/guidelines/prepare-electronic-version/images/>).

9. К статье должен быть приложен список специальных 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 отре-

дактировать 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/>