СОДЕРЖАНИЕ

Номер 6, 2020

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Модернизация сканирующего двухмерного ионизационного монитора профиля в каналах транспортировки пучка

Ю. Г. Тетерев, А. Т. Исатов, С. В. Митрофанов, А. И. Крылов 5

Мониторирование фотонного пучка

В. И. Алексеев, В. А. Басков, В. А. Дронов, А. И. Львов, А. В. Кольцов, Ю. Ф. Кречетов, В. В. Полянский, С. С. Сидорин 11

Повышение электрической прочности ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией

Я. А. Колесников, И. Н. Сорокин, С. Ю. Таскаев 17

ЭЛЕКТРОНИКА И РАДИОТЕХНИКА

Экспериментальные исследования и оптимизация компактного многоканального генератора наносекундных импульсов

В. А. Бурцев, Е. П. Большаков, Д. В. Гетман, Н. В. Калинин 26

Метод определения углов пеленга и крена летательного аппарата по ортогонально линейно поляризованным сигналам радиомаяка

В. Л. Гулько, А. А. Мещеряков 32

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Быстродействующий регулятор анодного напряжения гиротрона

Б. З. Мовшевич, А. И. Цветков, М. Ю. Глявин, А. П. Фокин 40

Акустооптические устройства на основе многолучевой дифракции

С. Н. Антонов, Ю. Г. Резвов 46

Измерение спектра отражения в однолучевой схеме

А. А. Ковалёв 53

Генератор суперконтинуума с накачкой импульсами фемтосекундного лазера на хром-форстерите в прозрачных конденсированных средах

И. В. Крюков, Н. Х. Петров, М. В. Алфимов 57

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

Спектрофотомерия вод в ультрафиолетовом и видимом диапазоне как элемент экоаналитики водных ресурсов

Н. Л. Алукер, М. Е. Herrmann, Я. М. Суздальцева 64

Компактный мюонный телескоп для мониторинга потоков вторичных космических лучей

Ю. В. Балабин, Б. Б. Гвоздевский, А. В. Германенко, Е. А. Михалко, Е. А. Маурчев, Л. И. Щур 71

Результаты разработки прототипа мобильной РСДБ-станции

М. Б. Зотов, Д. В. Иванов, В. Ю. Быков, С. А. Гренков, И. А. Поздняков, И. А. Рахимов, В. Г. Стэмпковский, А. А. Царук, В. К. Чернов, И. В. Шахнабиев, А. М. Шишикин 76

Цифровой модуль регистрации сигнала для пылеударного масс-спектрометра

И. В. Пияков, М. П. Калаев, К. И. Сухачев, К. Е. Воронов, А. М. Телегин 83

Приемный датчик для специализированного малогабаритного магнитно-резонансного томографа

А. А. Баязитов, Я. В. Фаттахов, А. Р. Фахрутдинов, В. А. Шагалов 89

Автономная низкочастотная широкополосная гидроакустическая излучающая станция с электромагнитным преобразователем

А. А. Пивоваров, И. О. Ярощук, А. Н. Швырев, А. Н. Самченко 95

Спектрорадиометр 5-миллиметрового диапазона для исследования атмосферы и подстилающей поверхности

А. А. Швецов, М. В. Беликович, А. А. Красильников, М. Ю. Куликов, Л. М. Кукин, В. Г. Рыскин, О. С. Большаков, И. В. Леснов, А. М. Щитов, А. М. Фейгин, В. Б. Хайкин, И. В. Петров 100

ЛАБОРАТОРНАЯ ТЕХНИКА

Установка для исследования процессов трехмерной криопечати

А. В. Миронов, П. Ю. Алгебраистова, В. С. Комлев, О. А. Миронова, В. К. Попов 105

Изучение газопоглощающих свойств геттерных насосов по различным газам

В. В. Анашин, А. А. Краснов, А. М. Семенов 109

Экспериментальный стенд для исследования растворимости диоксида углерода в углеводородах в широком интервале рабочих температур и давлений

А. В. Радаев, А. А. Мухамадиев, А. Н. Сабирзянов 115

Источник примесного сверхзвукового пучка молекул щелочно-галоидных солей

В. М. Азриель, В. М. Акимов, Е. В. Ермолова, Д. Б. Кабанов, Л. И. Колесникова, Л. Ю. Русин, М. Б. Севрюк 120

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ В ЛАБОРАТОРИЯХ

Модуль усиления и временной фиксации одноэлектронных сигналов фотоумножителей

Ф. А. Ермалицкий, А. Е. Радько, М. П. Самцов 125

Мобильный лабораторный масс-спектрометр на основе коммерческого анализатора остаточных газов CIS-300

М. Л. Кусков, И. О. Лейпунский, А. Н. Горбачев, А. Н. Жигач, Б. В. Кудров 127

Устройство для совмещения микроструктур на двух подложках с микрометрической точностью

А. Р. Гейвандов, И. В. Касьянова 130

Устройство для контролируемого импульсного теплового воздействия на вещество

А. Н. Котов, К. В. Лукьянов, В. Н. Сафонов, А. А. Старостин, В. В. Шангин 133

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ ЖУРНАЛА “ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА” ЗА 2020 ГОД

Алфавитный указатель 135

Предметный указатель 148

СИГНАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Аннотации статей, намечаемых к публикации в журнале ПТЭ 161

Правила публикации в ПТЭ 166

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 6, с. 5–10

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.08

МОДЕРНИЗАЦИЯ СКАНИРУЮЩЕГО ДВУХМЕРНОГО ИОНИЗАЦИОННОГО МОНИТОРА ПРОФИЛЯ В КАНАЛАХ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА

© 2020 г. Ю. Г. Тетерев[a,*], А. Т. Исатов[a,b], С. В. Митрофанов[a], А. И. Крылов[a]

[a] *Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных реакций Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6*

[b] *Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева Казахстан, 010000, Нур-Султан, ул. Сатпаева, 2*

**e-mail: teterev@jinr.ru*

Поступила в редакцию 03.05.2020 г.
После доработки 09.05.2020 г.
Принята к публикации 10.05.2020 г.

Проведена модернизация сканирующего двухмерного ионизационного монитора профиля (и.м.п.) для диагностики в каналах транспортировки пучка. Монитор состоит из основных частей: экстрактора, сканера и двух анализаторов с щелью, в которые направляются продукты ионизации остаточного газа с пути пучка протяженностью до 50 мм. Для повышения чувствительности и.м.п., в условиях высокого уровня вакуума ($n \cdot 10^{-6}$ Па), за щелью каждого анализатора располагается усилитель тока из микроканальных пластин, а затем коллектор тока. Получение двумерного изображения профиля достигается сканированием. Для сканирования и управления работой и.м.п. создан блок электроники, в котором размещены высоковольтные источники и измерители токов с коллекторов. На каждом из каналов циклотрона ДЦ-280 ЛЯР ОИЯИ на пути от ускорителя до физических установок расположено по три модернизированных и.м.п. Обработка данных и отображение результатов измерений одновременно с нескольких и.м.п. осуществляется с помощью программы, которая разработана в среде проектирования LabVIEW. Минимальный ток пучка ионов ^{40}Ar с энергией 5 МэВ/нуклон, при котором монитор сохраняет свою работоспособность, оценивается в десятки пикоампер. В процессе эксплуатации модернизированного и.м.п. продемонстрирована безотказность его работы.

DOI: 10.31857/S0032816220050389

ВВЕДЕНИЕ

Мониторы профиля ускоренных частиц, основанные на сборе продуктов ионизации остаточного газа проходящим пучком, создавались еще в 60-х годах прошлого века [1, 2]. В литературе они сокращенно называются ионизационными мониторами профиля (и.м.п.). Использование таких приборов относится к неинвазивным методам диагностики. Широкое распространение метод получил после того, как для усиления тока собираемых продуктов ионизации были использованы микроканальные пластины (м.к.п.). С применением м.к.п. стало возможным создать столь быстрые и чувствительные приборы, что с их помощью можно наблюдать изменения профилей каждого из последовательных банчей пучка при ускорении частиц на синхротронах. Поэтому наибольшего применения и.м.п. находят в создании систем контроля для оптимальной настройки процесса ускорения в синхротронах [3–5] или линейных ускорителях [6]. Вместе с созданием новых ускорителей происходит и усовершенствование и.м.п. путем устранения выявляемых в процессе эксплуатации недостатков. В работах, например [7], отмечается, что и.м.п. страдают от эффекта старения м.к.п., усиление не является стабильным и уменьшается с течением времени, причем скорость старения растет с увеличением загрузки и подаваемого на м.к.п. напряжения. Деградация неоднородна, наибольшему старению подвергается та часть м.к.п., на которую попадают продукты ионизации из наиболее интенсивной области пучка. Для отслеживания процесса деградации устанавливаются специальные устройства, и время от времени с их помощью проводится калибровка. Далее программным путем проводят коррекцию измеренного профиля пучка на эффект деградации. В работе [8] для замедления старения перед м.к.п. ставят управляющую сетку, которая периодически перекрывает поток продуктов

ионизации, за счет чего уменьшается загрузка и, следовательно, увеличивается время службы.

Условия для работы и.м.п. в каналах транспортировки пучка более мягкие. Во-первых, вакуум в каналах не столь высок, как в ускорителях, следовательно, число продуктов ионизации, образуемых при прохождении пучка, пропорционально больше, а значит, и генерируется больший сигнал. Во-вторых, время измерения профиля обычно ограничено только скоростью реакции оператора при наблюдении за изменениями пучка [8]. Зачастую в каналах могут создаться условия, при которых даже нет необходимости использовать м.к.п. В этом случае эксплуатация и.м.п. существенно упрощается, и ресурс может считаться бесконечным. Но в некоторых случаях есть необходимость использовать м.к.п., следовательно, возникают и связанные с ними проблемы. К сожалению, несмотря на более легкие условия при работе в каналах транспортировки принципиальное исполнение и.м.п. с использованием м.к.п. остается таким же традиционным [9], с теми же проблемами и столь же дорогим.

В каналах транспортировки в и.м.п. также используют м.к.п. больших размеров, чтобы охватить контролем большую область. Для измерения профиля пучка используют два метода. Один из них состоит в том, что электроны с выхода м.к.п. собирают на коллектор, разбитый на большое количество стрипов. С каждого стрипа снимают сигнал либо с помощью многоканальной электроники, либо пользуясь какими-либо коммутаторами в случае сигналов большой амплитуды. В другом методе электроны с выхода м.к.п. ускоряют в электрическом поле и направляют на люминофор. Полученное изображение наблюдают с помощью радиационно-стойких многопиксельных камер, которые весьма недешевы и тоже подвержены деградации при работе в жестких условиях радиации, особенно в нейтронных полях.

Остается традиционным, что в случае измерения распределения одновременно по двум ортогональным координатам используют два одномерных и.м.п., разделенных некоторым промежутком для исключения взаимного влияния электрических полей. Это требует значительного места в линии транспортировки для установки и.м.п.

Имеется еще одна проблема, которая не отмечена в литературе. Она заключается в том, что в мониторах в обычном исполнении м.к.п. расположена близко к траектории исследуемого пучка и подвергается, особенно в период настройки, воздействию гало рассеянных частиц, которое для нее очень пагубно. Близко располагая м.к.п., удается достигнуть максимального пространственного и временного разрешения. Но далеко не всегда это требуется в каналах транспортировки, где пучки имеют размеры около 1 см. Например, в работах [10, 11] достигнуто пространственное разрешение 1 мм, когда продукты ионизации попадают на защищенные от гало пучка м.к.п. уже после прохождения анализирующего конденсатора, предлагаемого авторами в качестве дополнительного элемента в и.м.п. Было предложено использовать свойство собираемых в электрическом поле продуктов ионизации, заключающееся в том, что в процессе движения они приобретают энергию, пропорциональную пройденному пути, т.е. координате. Продукты ионизации, в частности ионы, пропускают в анализирующий конденсатор через протяженную, перпендикулярную оси пучка щель шириной 1 мм, и они попадают на м.к.п. уже после разделения по набранным энергиям, а следовательно, и по ортогональной координате. Таким образом, достигается получение двумерного изображения профиля пучка с помощью одного и.м.п. Недостатком такого метода является более низкая чувствительность, так как для достижения хорошего разрешения сбор продуктов ионизации осуществляется с пути пучка, равного ширине щели, т.е. протяженностью 1 мм, в то время как в традиционных и.м.п. этот путь достигает 50 мм. И так же остается проблема неоднородной деградации м.к.п.

В работе [12] при создании и.м.п. использована идея применения анализирующего конденсатора [10]. Для повышения чувствительности с сохранением разрешения в него направляются продукты ионизации с пути пучка протяженностью до 50 мм, а затем часть из них собирается на коллектор через такой же протяженности щель шириной 1 мм, но уже ориентированную параллельно оси пучка. Для получения двумерного изображения профиля проводится сканирование, при котором в щель последовательно попадают продукты ионизации из различных областей канала транспортировки пучка. Это устройство и было выбрано в качестве прототипа для создания и.м.п. высокой чувствительности и невысокой стоимости, пригодного для работы в каналах транспортировки пучка.

ПРИНЦИП РАБОТЫ И КОНСТРУКЦИЯ СКАНИРУЮЩЕГО ДВУХМЕРНОГО ИОНИЗАЦИОННОГО МОНИТОРА ПРОФИЛЯ ПУЧКА

Ионизационный монитор состоит из трех основных частей: экстрактора, сканера и анализатора (рис. 1). Каждая из частей работает как пара параллельных проводящих пластин, между которыми существует однородное электрическое поле. Исследуемый пучок проходит через пространство между электродами экстрактора. В результате взаимодействия частиц пучка и молекул остаточного газа последние ионизируются. Продукты ионизации ускоряются в направлении электрического

поля и приобретают энергию, пропорциональную пройденному расстоянию. Ускоренные положительные ионы проходят через сетчатый электрод экстрактора и попадают в сканер. В сканере все ионы приобретают дополнительную одинаковую энергию. Ионы покидают сканер через другой сеточный электрод и достигают анализатора, где электроды развернуты на угол α по отношению к электродам сканера. В постоянном электрическом поле анализатора ионы отклоняются, и часть из них проходит через узкую выходную щель. Условие баланса энергии для ионов, прошедших выходную щель анализатора, можно записать в виде линейного уравнения относительно координат:

$$(E_1 y + U)\cos 2\alpha = E_2 x/4\sin\alpha, \qquad (1)$$

где E_1 и E_2 – напряженности электрического поля между пластинами экстрактора и анализатора; U – разность потенциалов между электродами сканера; α – угол, на который электроды анализатора развернуты по отношению к электродам сканера; $(\pi - \alpha)$ – угол между векторами электрического поля $\mathbf{E}_1$ и $\mathbf{E}_2$; x и y – координаты места образования электронно-ионной пары на плоскости, перпендикулярной оси пучка.

Среди всех ионов, образующихся в экстракторе, в выходную щель попадают только те, которые возникают в тонком плоском слое, ширина которого зависит от ширины щели. Расположение этой области в экстракторе можно менять, сканируя значение разности потенциалов U. Если напряженности электрического поля между пластинами экстрактора и анализатора постоянны, то ширина слоя и его наклон в плоскости (x, y) остаются неизменными при любом значении U.

Дополнительный вывод, вытекающий из анализа линейного уравнения (1), состоит в том, что распределение пучка может быть измерено одновременно в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Для этого необходимо определить знак коэффициента перед переменной x в уравнении (1) и, в простейшем случае, преобразовать (1) к виду $E_2 = E_1 2\sin 2\alpha\cos\alpha$. Это условие выполняется, если угол $\alpha = 45°$. С конструктивной точки зрения это означает, что монитор, оснащенный одним общим экстрактором и сканером, может иметь два анализатора, расположенных последовательно по траектории пучка. Для того чтобы изменить знак переменной x, второй анализатор должен быть повернут на 180° относительно первого, так что его выходная щель окажется на противоположной стороне. Таким образом, с помощью одного и.м.п. можно одновременно измерять двухмерный профиль пучка и сэкономить место для размещения детекторов в линии транспортировки.

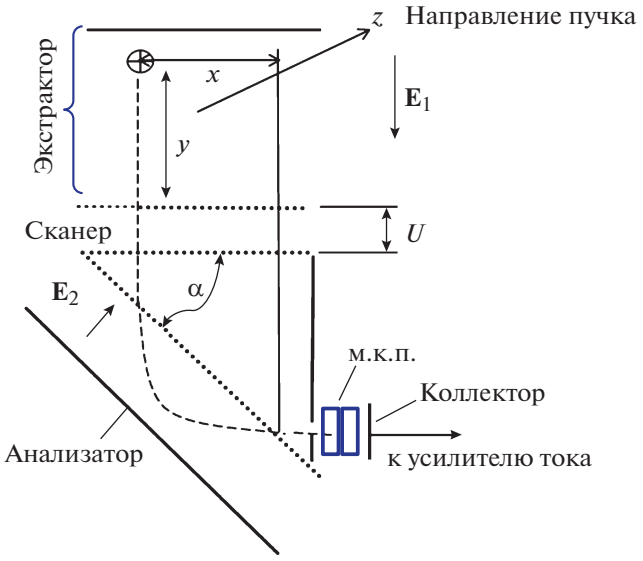


Рис. 1. Принципиальная схема работы сканирующего двухмерного ионизационного монитора профиля пучка. $\mathbf{E}_1$ и $\mathbf{E}_2$ – векторы напряженности электрического поля между пластинами экстрактора и анализатора; U – разность потенциалов между электродами сканера; α – угол, на который электроды анализатора развернуты по отношению к электродам сканера; $(\pi - \alpha)$ – угол между векторами электрического поля $\mathbf{E}_1$ и $\mathbf{E}_2$; x и y – координаты места образования электронно-ионной пары на плоскости, перпендикулярной оси пучка.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ИОНИЗАЦИОННОГО МОНИТОРА ПРОФИЛЯ ПУЧКА

Для того чтобы существенно повысить чувствительность и.м.п., между щелью и коллектором размещается усилитель тока из узкой и длинной м.к.п. или в зависимости от требований усиления в виде шеврона из двух м.к.п. Можно также использовать узкий вторично-электронный умножитель. Естественно, что при этом полярность тока с коллектора окажется отрицательной. При работе с м.к.п. на катод собираются электроны, а в прототипе – ионы. Один узкий коллектор гораздо легче экранировать от наводок, чем широкий, состоящий из узких стрипов, используемый в традиционных мониторах. При экранировании узкого коллектора достаточно легко обеспечить уровень шума ниже 1 пА, что позволяет достичь необходимой чувствительности при меньшем напряжении на м.к.п. и уменьшить эффект старения. Необходимо отметить, что для достижения почти 100% эффективности регистрации продуктов ионизации, имеющих разную энергию, отрицательное напряжение на входной плоскости м.к.п. должно быть больше 1.9 кВ [13].

При режиме сканирования на вход м.к.п. периодически попадает как высокоинтенсивный поток продуктов ионизации из области прохождения пучка, так и слабый из областей перифе-

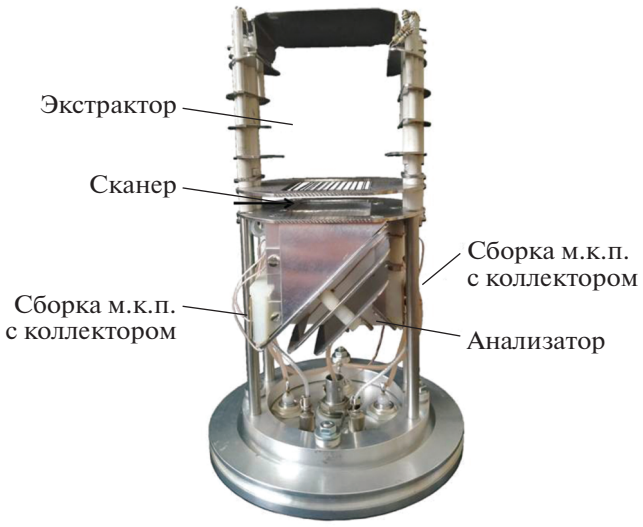


Рис. 2. Внешний вид и.м.п. для установки в блок диагностики через отверстие ДУ-100.

рии, таким образом, исчезает проблема неоднородной деградации м.к.п. и существенно увеличивается время старения. Для отслеживания деградации м.к.п. достаточно при одном и том же уровне вакуума периодически вводить в пучок цилиндр Фарадея и сравнивать его показания с интегральным по профилю значением показаний и.м.п. Потерю усиления при старении м.к.п. легко компенсировать увеличением напряжения.

Имеющиеся в ЛЯР ОИЯИ ускорители оборудованы линиями транспортировки пучка с внутренними диаметрами канала: 100 и 70 мм. Первые на своем протяжении оснащены блоками диагностики для размещения оборудования через отверстия ДУ-160, вторые – через ДУ-100. Соответственно разработаны конструкции и изготовлено необходимое количество и.м.п. двух размеров. Обе конструкции разработаны таким образом, что в каждой имеется по две сборки м.к.п. с коллектором, закрепленные на двух винтах, которые могут быть быстро заменены в случае достижения недопустимой деградации. На рис. 2 показан внешний вид и.м.п. для установки в блок диагностики через ДУ-100.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СЧИТЫВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ

При сканировании достаточно использовать только два канала электроники для сбора информации, что существенно упрощает и удешевляет создание и эксплуатацию описываемого и.м.п. Для работы с и.м.п. был разработан специальный модуль PRFL-01, внешний вид которого показан на рис. 3. Модуль выполнен в едином корпусе и состоит из нескольких частей: микропроцессора,

Рис. 3. Модуль PRFL-01 для ионизационного монитора.

высоковольтного источника питания и программного обеспечения.

Микропроцессорная часть

Основу модуля PRFL-01 составляет микроконтроллер фирмы Atmel ATmega1281. Взаимодействие с внешними цепями осуществляется через канал связи Ethernet. Настройка параметров TCP/IP и обмен данными осуществляется посредством HTML-протокола. Модуль имеет собственный WEB-интерфейс для настройки и управления.

Сигналы с коллекторов и.м.п. поступают на два изолированных от общей схемы аналоговых входа. Преобразователь тока в напряжение выполнен по классической схеме на мезонинной плате. Коэффициент преобразования равен 1 В/нА. Далее сигналы оцифровываются 16-битным аналого-цифровым преобразователем. Измерения синхронизованы с формированием сканирующего напряжения треугольной формы. За один период измерение профиля осуществляется дважды: сначала при нарастании, затем при уменьшении сканирующего напряжения. Период составляет 2 с. За 1 период сканирующего напряжения проводятся 400 отсчетов. Данные формируются в виде простой таблицы в HTML-форме с 3 столбцами и обновляются каждую секунду. Первый столбец – значение сканирующего напряжения, второй и третий – данные интенсивности соответственно по координатам x и y.

Высоковольтная часть

Высоковольтная часть собрана на двух платах и отделена от микропроцессорной части экраном. Питание высоковольтной части имеет управление. Включение или отключение питания осуществляется по команде оператора, но при выключении программы управления на компьютере питание отключается автоматически. Высокое напряжение формируется преобразователями

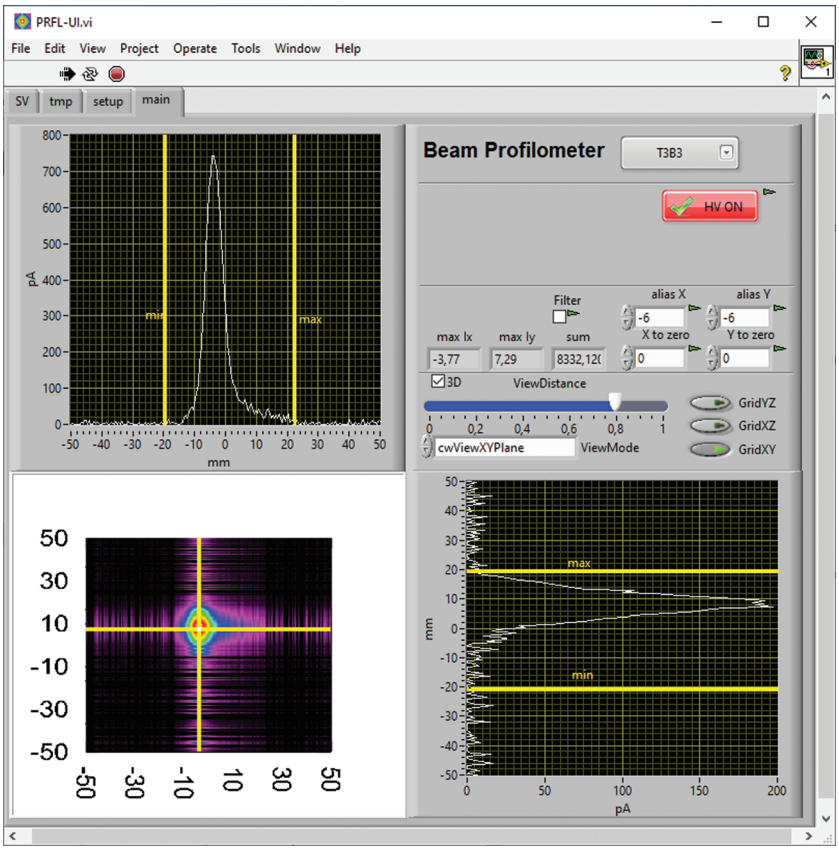


Рис. 4. Главное окно программного обеспечения для визуализации и управления монитором профиля пучка. Приведено изображение профиля пучка в одном из каналов транспортировки из циклотрона ДЦ-280, полученное при проведении настройки.

фирмы “EMCO”, для стабилизации напряжения применена внешняя схема с обратной связью на операционном усилителе. В отличие от работы [12], где ранее для сканирования использовался генератор треугольных высоковольтных импульсов U, теперь напряжение формируется микроконтроллером с помощью цифроаналогового преобразователя. Это позволяет программным образом менять время сканирования, значение напряжения и количество отсчетов (разрешение).

Программное обеспечение

Программа для управления, обработки данных и отображения результатов измерений разработана в среде проектирования LabVIEW. В закладке tmp доступны не обработанные данные в виде графиков. На закладке main представлено главное окно визуализации профиля пучка (рис 4). Здесь доступны данные по координатам x и y, сформированный профиль пучка с интенсивностью в виде цвета, тренд суммарной интенсивности и площадь сечения пучка. Из элементов управления доступны включение/выключение высокого напряжения, фильтрация сигналов от помех, калибровка положения пучка, запись профиля в файл, воспроизведение профиля пучка из сохраненного файла.

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И.М.П. В КАНАЛАХ ТРАНСПОРТИРОВКИ

Необходимость повышения чувствительности и.м.п., описанного в работе [12], возникла при его использовании в каналах транспортировки пучка на сильноточном циклотроне ДЦ-280 ЛЯР ОИЯИ [14]. Для снижения потерь пучка в процессе транспортировки приняты специальные меры, в частности существенно улучшен вакуум в каналах до уровня $n \cdot 10^{-6}$ Па. В пилотном режиме при токе пучка до 100 мкА и при указанном вакууме монитор профиля продолжал успешно работать без м.к.п. Но с таким монитором невозможно проводить настройку ускорителя, которая обычно делается при низких токах пучка, чтобы не создавать повышенную радиационную обстановку. В связи с этим на каждом из каналов установлено по три модернизированных и.м.п. и создана программа, с помощью которой можно одновременно наблюдать прохождение пучка по каналу от

ускорителя до мишени пользователя. Для подачи и регулирования напряжения на м.к.п. использованы источники высокого напряжения с дистанционным управлением через канал связи Ethernet. На рис. 4 приведено изображение профиля пучка в одном из каналов транспортировки из циклотрона ДЦ-280, полученное при проведении настройки. При выходе интенсивности пучка на пилотный режим напряжение, подаваемое на м.к.п., приходится существенно снижать, даже ниже 1.9 кВ.

Блоки электроники мониторов и источники напряжения для м.к.п. располагаются в защищенных от радиационного излучения помещениях и отстоят от установленных в каналах и.м.п. на расстояниях до 15 м.

Проведена попытка определения минимального порога чувствительности модернизированных и.м.п. при работе с пучком ускоренных ионов ^{40}Ar с энергией 5 МэВ/нуклон. Ток пучка измерялся с помощью цилиндра Фарадея, который был установлен на канале в блоке диагностики сразу после и.м.п. Минимальный ток, который мог быть измерен с помощью цилиндра Фарадея, составлял 1 нА. Отмечено, что при таком значении тока можно надежно измерять профиль пучка. Судя по отношению сигнал/фон сделана примерная оценка, что профиль пучка мог бы быть измерен и при токе порядка десятков пикоампер.

В процессе эксплуатации модернизированного и.м.п. были продемонстрированы его высокая чувствительность и безотказность работы. Он может быть использован и там, где для производства изотопов используются пучки протонов или где проводятся исследования в области биологии и материаловедения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена модернизация сканирующего двухмерного ионизационного монитора профиля для диагностики в каналах транспортировки пучка. Монитор состоит из основных частей: экстрактора, сканера и двух анализаторов с щелью, в которые направляются продукты ионизации остаточного газа с пути пучка протяженностью до 50 мм. Для повышения чувствительности и.м.п., в условиях высокого уровня вакуума ($n \cdot 10^{-6}$ Па), после щели каждого анализатора располагается усилитель тока из микроканальных пластин, а затем коллектор тока. Получение двумерного изображения профиля достигается сканированием. Для сканирования и управления работой и.м.п. создан блок электроники, в котором размещены высоковольтные источники и измерители токов с коллекторов. На каждом из каналов циклотрона ДЦ-280 ЛЯР ОИЯИ на пути от ускорителя до физических установок расположено по три модернизированных и.м.п. Обработка данных и отображение результатов измерений одновременно с нескольких и.м.п. осуществляется с помощью программы, которая разработана в среде проектирования LabVIEW. Минимальный ток пучка ионов ^{40}Ar с энергией 5 МэВ/нуклон, при котором монитор сохраняет свою работоспособность, оценивается в десятки пикоампер. В процессе эксплуатации модернизированного и.м.п. продемонстрирована безотказность его работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dimov G., Dudnikov V.* // Instrum. and Experimental Techniques. 1967. № 5. P. 15.
2. *De Luca W.H.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1969. V. NS-16. №3. Part 1. P. 813.
3. *Zagel J.R., Jansson A., Meyer T., Morris D.K., Slimmer D., Sullivan T., Yang M.* // Proceedings of BIW10. 2010. P. 112.
4. *Connolly R., Michnoff R., Tepikian S.* // Proceedings of the 2005 Particle Accelerator Conference. 2005. P. 230. https://doi.org/10.1109/PAC.2005.1590402
5. *Wittenburg K.* // Proceedings of 3rd European Particle Accelerator Conference (EPAC'92). 1992. P. 1133.
6. *Benedetti F., Abbon P., Belloni F., Coulloux G., Gougnaud F., Lahonde-Hamdoun C., Le Bourlout P., Mariette Y., Marroncle J., Mols J.P., Nadot V., Scola L., Tauzin G., Tarkeshian R., Thomas C.* // EPJ. Web of Conferences. 2020. V. 225. 01009. https://doi.org/10.1051/epjconf/202022501009
7. *Zagel J.R., Alvarez M., Fellenz B., Jensen C., Lundberg C., McCrory E., Slimmer D., Thurman-Keup R., Tinsley D.* // Proceedings of IBIC2014. 2014. P. 408.
8. *Dudnikov V., Abrams R., Cummings M.A.C., Johnson R.P.* // Proceedings of IPAC2017. 2017. P. 469. https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2017-MOPAB144
9. *Vignet J.L., Delannoy A., Guéroult E., Gangant P., Foy J.C., Cuzon S., Houarner C., Blaizot M.* // Proceedings of DIPAC09. 2009. P. 176.
10. *Mikhailov V.G., Ludin L.I., Leonov V.V., Roshchin A.A., Rezov V.A., Sklyarenko V.I., Artem'ev A.N., Rakhimbabaev T.Y.* // Proceedings of EPAC94. 1994. P. 1743.
11. *Poggi M., Boscagli L., Dainese A., Ponchia R., Mostert H.W., Conradie J.L., Crombie M.A., de Villiers J.G., Springhorn K.A.* // Proceedings of DIPAC09. 2009. P. 384.
12. *Teterev Yu. G., Kaminski G., Phi Thanh Huong, Kozik E.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2011. V. 58. № 1. P. 170. https://doi.org/10.1109/TNS.2010.2092790
13. *Tarty H., Bosqued J.M., Reme H.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1969. V. 69. P. 254.
14. *Gulbekian G.G., Dmitriev S.N., Itkis M.G., Oganessyan Yu.Ts., Gikal B.N., Kalagin I.V., Semin V.A., Bogomolov S.L., Buzmakov V.A., Ivanenko I.A., Kazarinov N.Yu., Osipov N.F., Pashenko S.V., Sokolov V.A., Pchelkin N.N., Prokhorov S.V., Khabarov M.V., Gikal K.B.* // Phys. Particles and Nucl. Lett. 2019. V. 16(6). P. 866.

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 6, с. 11–16

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.08

МОНИТОРИРОВАНИЕ ФОТОННОГО ПУЧКА

© 2020 г. В. И. Алексеев[a], В. А. Басков[a,*], В. А. Дронов[a], А. И. Львов[a], А. В. Кольцов[a], Ю. Ф. Кречетов[b], В. В. Полянский[a], С. С. Сидорин[a]

[a] *Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН*
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53
[b] *Объединенный институт ядерных исследований*
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6
**e-mail: baskov@x4u.lebedev.ru*

Поступила в редакцию 14.04.2020 г.
После доработки 22.05.2020 г.
Принята к публикации 24.05.2020 г.

Представлены характеристики систем мониторирования интенсивности тормозного фотонного пучка ускорителя С-25Р “Пахра” ФИАН на основе черенковских счетчиков.

DOI: 10.31857/S0032816220060014

ВВЕДЕНИЕ

Для тестирования и калибровок детекторов и электронного оборудования на электронном синхротроне “Пахра” ФИАН создан калибровочный канал квазимонохроматических электронов на основе пучка тормозных фотонов. Мониторирование фотонного пучка, включающее контроль интенсивности и профиля пучка в различных точках его транспортировки от внутренней мишени ускорителя до конвертора перед основным спектрометрическим магнитом СП-57, было решено осуществлять с помощью черенковских счетчиков на основе твердотельных радиаторов [1].

Мониторирование фотонных пучков подобным способом было осуществлено ранее в работах [2–4], в которых мониторирование высокоинтенсивных фотонных пучков с энергиями в десятки мегаэлектронвольт осуществлялось годоскопическими системами с применением тонких оптических волокон на основе SiO_2.

Особенностями применения черенковского излучения для мониторирования фотонного пучка являются:

1) низкая эффективность взаимодействия фотонов с веществом по сравнению с взаимодействием электронов (меньше в ~10^3–10^4 раз), что дает возможность применять черенковский счетчик для мониторирования фотонных пучков с широким диапазоном интенсивностей 10^6–10^{10} γ/с (невозмущающая система мониторирования, при которой фотонный пучок практически не испытывает изменений [4]);

2) малое время формирования черенковского импульса в радиаторе по сравнению, например, со сцинтилляционным (в ~3–5 раз), что необходимо при высокой интенсивности пучка;

3) радиационная стойкость радиатора (кварцевое стекло, оргстекло) по сравнению со сцинтиллятором (полистирол) выше.

Самое важное – пропорциональная зависимость числа черенковских фотонов от числа проконвертировавших в веществе счетчика e^-e^+-пар, что дает возможность сопоставлять число зарегистрированных e^-e^+-пар числу прошедших через него фотонов и общей интенсивности фотонного пучка [5, 6]. Оценка показывает, что число черенковских фотонов, при прохождении через оргстекло толщиной 1 см фотонного пучка с интенсивностью ~10^9 γ/с, составляет $N_{\text{чф}} \sim 5 \cdot 10^7 - 5 \cdot 10^8$ фотонов/с (с учетом прохождения двух частиц – электрон-позитронной пары), что вполне приемлемо для создания системы мониторирования [4, 6, 7].

МОНИТОРИРОВАНИЕ ПОЛНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Исследования были выполнены на канале тормозного пучка фотонов ускорителя “Пахра” ФИАН, с помощью которого формируется калибровочный квазимонохроматический пучок вторичных электронов (рис. 1). Тормозной пучок фотонов, образованный в результате сброса электронов в кольце на внутреннюю мишень, после выхода из камеры ускорителя (*1*) формируется свинцовыми коллиматорами K_1–K_4 и очищающим магнитом СП-3. Далее пучок по воздуху транспортируется к

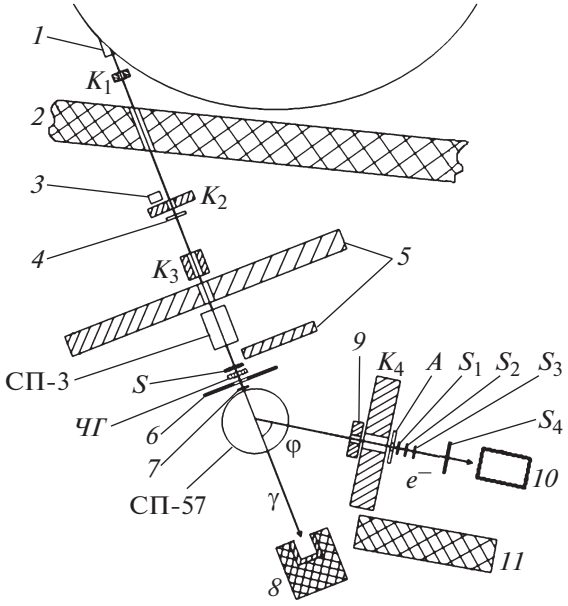


Рис. 1. Схема канала тормозного фотонного пучка ускорителя "Пахра" ФИАН и канала калибровочного квазимонохроматического пучка вторичных электронов. K_1 – коллиматор с отверстием ∅13 мм; K_2 – коллиматор с размером отверстия 90 × 90 мм; K_3 – коллиматор с отверстием ∅30 мм; K_4 – основной коллиматор с отверстием ∅30 мм; S, S_1–S_4 – сцинтилляционные счетчики; A – сцинтилляционный счетчик антисовпадений; *ЧГ* – черенковский годоскоп; СП-3 – очищающий магнит; СП-57 – магнит; *1* – выходное окно камеры ускорителя; *2* – бетонная стена ускорительного зала; *3* – монитор "растяжки"; *4* – монитор пучка; *5* – стенки свинцовой защиты; *6* – металическая плита (размер отверстия 140 × 140 мм); *7* – конвертор; *8* – поглотитель фотонного пучка ("могильник"); *9* – дополнительный коллиматор (∅10 мм); *10* – калибруемый детектор; *11* – бетонный блок.

конвертору *7*, находящемуся непосредственно на магните СП-57. В магните осуществляется разделение выходящих из конвертора электронов по импульсам. Вторичный пучок электронов формируется под углом $\varphi = 36°$ относительно первоначальной траектории фотонов с помощью коллиматоров (дополнительного *9* и K_4) и сцинтилляционных счетчиков S_1–S_4, A (антисовпадений).

Система мониторирования фотонного пучка разбита на две подсистемы: первая подсистема (монитор пучка *4*) определяет полную интенсивность фотонного пучка в начале канала транспортировки перед коллиматором K_3 с отверстием ∅30 мм; вторая подсистема (сцинтилляционный счетчик S и черенковский годоскоп *ЧГ*) – интенсивность и положение фотонного пучка в горизонтальной плоскости перед конвертором *7*, находящимся на срезе полюсов магнита СП-57 [1].

Монитор *4*, контролирующий интенсивность фотонного пучка в начале канала транспортировки, расположен во втором экспериментальном

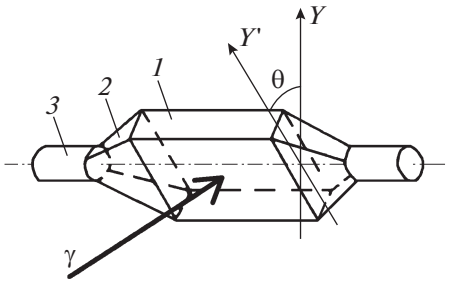


Рис. 2. Схема монитора тормозного фотонного пучка, расположенного в начале канала фотонного пучка. *1* – радиатор из оргстекла; *2* – воздушный светосборник; *3* – фотоэлектронный умножитель ФЭУ-85 (θ – угол поворота монитора между вертикальной осью Y и рабочим положением, определяемым осью Y' ($\theta \approx 40°$)).

зале ускорителя "Пахра" непосредственно в пучке за коллиматором K_2 (рис. 1) и является черенковским счетчиком. Этот счетчик (рис. 2) состоит из радиатора *1* на основе оргстекла размером 100 × 100 × 10 мм ($t = 0.025X_0$, – толщина счетчика в радиационных длинах X_0), с двух торцов через воздушные светосборники *2* "просматриваемые" двумя фотоэлектронными умножителями ФЭУ-85 (*3*). Интенсивность фотонного пучка определяется по счету совпадений сигналов от обоих ф.э.у., зарегистрировавших конверсионную e^+e^--пару.

Монитор (*4*, рис. 1) на траектории фотонного пучка повернут на угол $\theta \approx 40°$ относительно вертикальной оси Y (рис. 2). Так как угол полного внутреннего отражения для оргстекла составляет также около 40°, то сопряжение угла входа фотонов в монитор и угла полного внутреннего отражения радиатора ведет к уменьшению числа отражений внутри радиатора монитора и соответственно к минимальному ослаблению сигнала, формируемого ф.э.у., что в свою очередь увеличивает эффективность работы монитора.

Калибровка монитора была осуществлена непосредственно в рабочем положении на фотонном пучке расположением за монитором квантометра. При интенсивности фотонного пучка $\sim 2 \cdot 10^9$ эквивалентных фотонов/с счет каждого плеча монитора составлял $\sim 5 \cdot 10^5$ e^+e^-/с, счет совпадений обоих каналов монитора составил $\sim 5 \cdot 10^3$ совпадений/с (напряжения на делителях обоих ф.э.у. составляли 875 В).

Сигналы совпадения с плеч монитора подавались на частотомер, с помощью которого проводился визуальный контроль интенсивности фотонного пучка, или на вход стандартного блока "счетчик" системы КАМАК для записи сигналов в память компьютера.

Монитор фотонного пучка давал возможность контролировать интенсивность каждого сброса электронного пучка на внутреннюю мишень

ускорителя и суммарную интенсивность пучка за заданное время.

ЧЕРЕНКОВСКИЙ ГОДОСКОП

Для мониторирования “текущей” интенсивности и положения фотонного пучка на конверторе перед магнитом СП-57, а также суммарной интенсивности за время набора экспериментальной статистики был создан черенковский годоскоп (*ЧГ*). *ЧГ* способен также определять координаты образования электрон-позитронной пары и, соответственно, точки входа ее в магнитное поле СП-57, чтобы в дальнейшем, по известным характеристикам магнитного поля и с помощью счетчиков, регистрирующих вторичные электроны (позитроны), можно было определять угол выхода электрона (позитрона) из СП-57 и его дальнейшую траекторию.

Схема мониторирования фотонного пучка перед медным 1-мм конвертером ∅32 мм представлена на рис. 3. Сцинтилляционный счетчик *S* размером 100 × 40 × 5 мм располагается непосредственно перед *ЧГ* и является конвертором для каждого из счетчиков *ЧГ* и триггерным счетчиком для системы (*S* + *ЧГ*).

ЧГ представляет собой сборку из 13 каналов, являющихся прозрачными и отполированными с каждой стороны пластинами из оргстекла толщиной 6.5 и шириной 25 мм (вставка на рис. 3). Каждая пластина с помощью нагревания относительно вертикальной оси повернута на угол 90°. На торце каждой пластины расположен фотоумножитель ФЭУ-85. Длина части пластины, на которой помещен ф.э.у., относительно точки поворота определена таким образом, чтобы фотокатод ф.э.у. располагался в одной плоскости по вертикали относительно фотокатода первого сверху ф.э.у. Длина частей пластин до и после поворота, на которых находятся первый и последний ф.э.у., равны 65 и 70 мм, а также 570 и 165 мм соответственно.

В качестве отражающей поверхности для обертывания пластин каналов *ЧГ* изучались ватман, металлизированный майлар и металлическая фольга. По результатам исследований выяснилось, что все три материала дают примерно одинаковые результаты, был выбран металлизированный майлар. Все грани каждой пластины годоскопа, кроме той, к которой без смазки плотно прижат ф.э.у., обернуты металлизированным майларом и черной бумагой.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ КАЛИБРОВКА

С помощью источника ионизирующего излучения ^{90}Sr была проведена предварительная калибровка *ЧГ*. Цель калибровки – выяснить возможность практического использования данного метода для определения положения “точечного” источника заряженных частиц, а также предварительно определить напряжения на делителях ф.э.у. *ЧГ*.

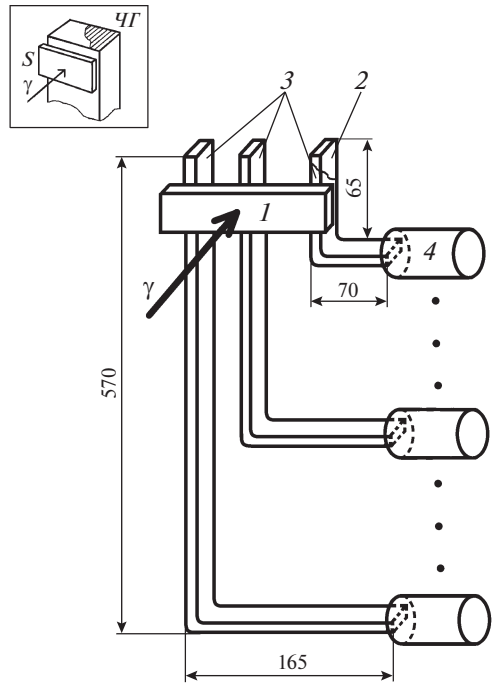


Рис. 3. Схема мониторирования тормозного фотонного пучка с помощью черенковского годоскопа (*ЧГ*). *1* – сцинтилляционный счетчик *S*; *2* – канал черенковского годоскопа *ЧГ* (пластина из оргстекла); *3* – металлизированный майлар; *4* – ФЭУ-85.

Схема калибровки представлена на рис. 4. Электроны от источника ионизирующего излучения ^{90}Sr с максимальной энергией 2.2 МэВ проходили через триггерные счетчики S_1 и S_2 (15 × 15 × 1 мм) и регистрировались каналом *ЧГ*. Сигналы от S_1, S_2 и канала *ЧГ* подавались на формирователи с постоянным порогом $Ф_1$, $Ф_2$ и *Ф* (пороги формирователей составляли 10 мВ). Сигналы от $Ф_1$ и $Ф_2$ через задержки $З_1$ и $З_2$ поступали на входы схемы совпадения *СС*. Сигнал *Start* от *СС* являлся запускающим сигналом блока “Счетчик импульсов” и подавался на вход “Запуск”.

На вход “Анализ” счетчика импульсов от формирователя *Ф* через задержку *З* последовательно подавался сигнал с 1-го канала *ЧГ* по 13-й. Для коллимации потока электронов от источника ^{90}Sr между источником и *ЧГ* располагался коллиматор *K*, являющийся свинцовой пластиной размером 100 × 100 × 5 мм с отверстием по центру пластины ∅5 мм.

Отбор ф.э.у. для использования в *ЧГ* не проводился, поэтому калибровка *ЧГ* проходила в два этапа. На первом этапе проводилось последова-

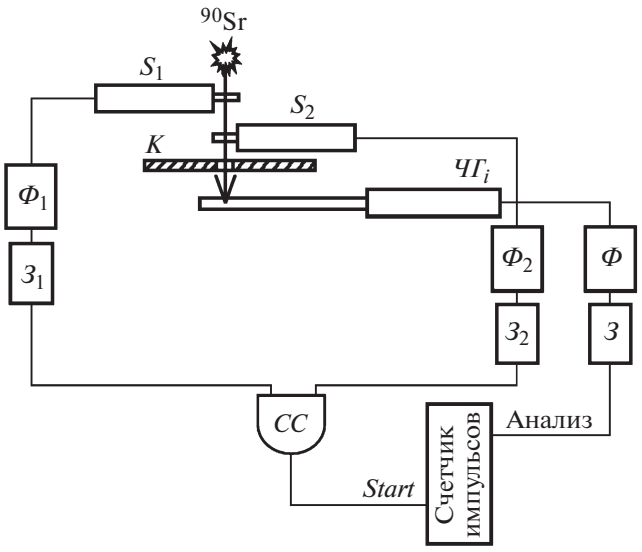


Рис. 4. Схема предварительной калибровки черенковского годоскопа с помощью радиоактивного источника ^{90}Sr. S_1 и S_2 – сцинтилляционные счетчики; $ЧГ_i$ – i-канал черенковского годоскопа; K – коллиматор; $Ф_1$, $Ф_2$ и $Ф$ – формирователи; $З_1$, $З_2$ и $З$ – задержки; $СС$ – схема совпадений.

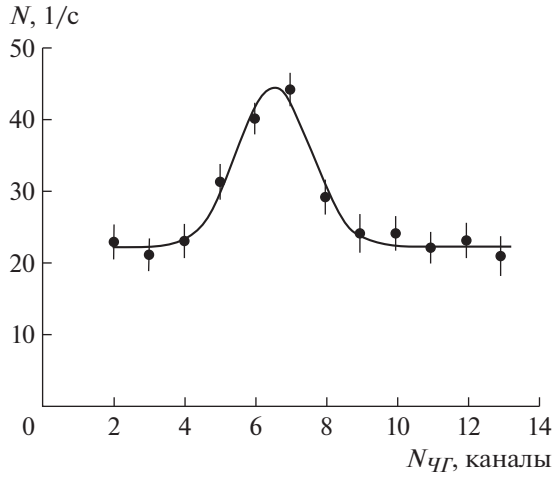


Рис. 5. Зависимость числа событий N в каналах черенковского годоскопа ($N_{ЧГ}$) от положения источника ^{90}Sr.

тельное выравнивание счета сигналов каждого канала годоскопа изменением напряжения на делителе ф.э.у. при расположении источника ионизирующего излучения ^{90}Sr, свинцовой пластины и счетчиков S_1, S_2 над соответствующим каналом. Выравнивание счетов проводилось относительно счета центрального канала (7-й канал), счет которого был взят за основу. Максимальный счет центрального канала был определен из зависимости счета тройных совпадений сигналов счетчиков S_1, S_2 и сигнала 7-го канала *ЧГ* от напряжения на делителе напряжения 7-го канала *ЧГ*.

На втором этапе проводилось определение профиля источника ионизирующего излучения при расположении триггерных счетчиков S_1, S_2 и источника ^{90}Sr в отсутствие свинцового коллиматора по центру *ЧГ* над 7-м каналом. Результат второго этапа калибровки представлен на рис. 5. Из рисунка видно, что максимум счета $N_{max} \approx 45$ событий/с приходится на центральную часть *ЧГ*. Полная ширина на половине высоты координатного профиля пучка, определенного *ЧГ*, соответствует примерно 3 каналам *ЧГ*, что в свою очередь соответствует $6.5 \cdot 3 = 19.5$ мм. Это близко к размерам триггерных счетчиков с учетом многократного рассеяния низкоэнергетических электронов в счетчиках и на воздухе (около 20 мм между счетчиками S_1, S_2 и каналом *ЧГ*) и неточности расположения триггерных счетчиков друг относительно друга.

Результаты предварительной калибровки с помощью источника ^{90}Sr показали возможность использования данной конструкции *ЧГ* для регистрации заряженных частиц.

ОСНОВНАЯ КАЛИБРОВКА

Основная калибровка черенковского годоскопа была выполнена непосредственно на фотонном пучке в положении “калибровка” (рис. 6а). Для получения одинаковой эффективности регистрации каждым каналом *ЧГ* электрон-позитронных пар, являющихся результатом конверсии тормозных фотонов в счетчике S, расположенном перед годоскопом, годоскоп на траектории фотонного пучка был помещен таким образом, чтобы электрон-позитронные пары входили в *ЧГ* перпендикулярно стороне шириной 25 мм и проходили через все каналы годоскопа.

Напряжение питания счетчика S было выбрано таким, чтобы шумовой счет ф.э.у. счетчика составлял не более ~10 с$^{-1}$ ($U_S = 900$ В).

Блок-схема регистрации фотонного пучка *ЧГ* представлена на рис. 7 в положениях “калибровка” (*1*) и “рабочее” (*2*). Сигнал от конверсионной электрон-позитронной пары, возникшей в S от прохождения через него фотона, через формирователь $Ф$ и задержку $З$ подавался на разветвитель. Сигналы с блока разветвителя далее подавались на вторые входы схем совпадений $СС_1$–$СС_{13}$, на первые входы которых подавались сформированные формирователями $Ф_1$–$Ф_{13}$ сигналы с каналов годоскопа.

Сигналы со схем совпадений $СС_1$–$СС_{13}$ далее подавались на входы многоканального блока регистров, запуск которого осуществлялся от сиг-

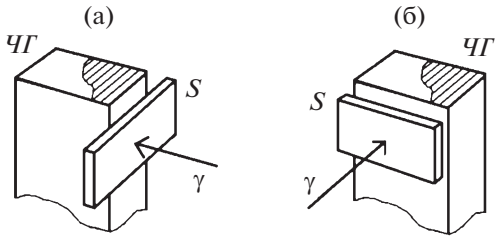


Рис. 6. Положения черенковского годоскопа *ЧГ* относительно фотонного пучка: **а** – “калибровка”, **б** – “рабочее”. *S* – сцинтилляционный счетчик.

нала *Start*, пришедшего от разветвителя, после чего через крейт-контролер *КК* системы КАМАК проводилась запись сигнала с блока регистров в память компьютера.

В положении “калибровка” выравнивание счета каждого канала годоскопа происходило изменением напряжения на делителях напряжения счетчиков годоскопа. Для каждого канала *ЧГ* была построена зависимость изменения счета канала от напряжения на делителе напряжения ф.э.у. данного канала. В дальнейшем была выбрана величина счета, одинаковая для всех каналов годоскопа, составившая 180 ± 10 с$^{-1}$.

После выравнивания счетов всех каналов годоскоп был поставлен в “рабочее” положение (рис. 6б), при котором регистрация конверсионных электрон-позитронных пар, выходящих из счетчика *S*, осуществлялась одним из каналов годоскопа (рис. 3). В этом положении электрон-позитронные пары входили в *ЧГ* перпендикулярно стороне шириной 6.5 мм. Аппертура *ЧГ* в этом положении составляла 90 мм по горизонтали и 65 мм по вертикали. Однако с учетом аппертуры счетчика *S* рабочая апертура *ЧГ* составляла по горизонтали и вертикали 90 и 40 мм соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 8 показан профиль фотонного пучка перед конвертором, расположенным на срезе полюсов магнита СП-57 (рис. 1), измеренного черенковским годоскопом.

Полная ширина на половине высоты профиля составила 5 каналов, что с учетом ширины канала *ЧГ* соответствует диаметру коллиматора K_3 (∅30 мм), находящемуся перед очищающим магнитом СП-3 и *ЧГ* [1]. Общая скорость счета в гистограмме профиля фотонного пучка составила $\sim 2 \cdot 10^3$ 1/с, что соответствует интенсивности фотонного пучка $\sim 10^9$ γ/с, падающего на медный конвертор. Профиль показывает, что фотонный пучок имеет фоновую составляющую около 13% от общей интенсивности основного пучка (5 центральных каналов) или $\sim 1.3 \cdot 10^8$ γ/с. Отсюда можно видеть, что число событий, определяемое *ЧГ* ($\sim 2 \cdot 10^3$ 1/с), существенно меньше не только интенсивности всего фотонного пучка ($\sim 10^9$ γ/с), но и интенсивности фоновой составляющей ($\sim 1.3 \cdot 10^8$ γ/с).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная система мониторирования тормозного фотонного пучка, предназначенного для формирования калибровочного квазимонохроматического пучка вторичных электронов, построенная на основе черенковских детекторов, способна контролировать интенсивность и про-

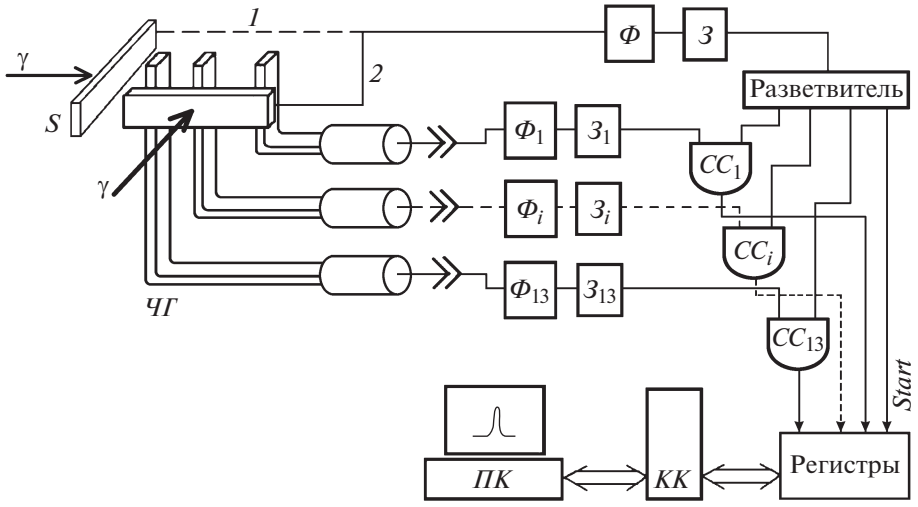


Рис. 7. Блок-схема при положениях “калибровка” (*1*) и “рабочее” (*2*) черенковского годоскопа *ЧГ* на фотонном пучке. *S* – сцинтилляционный счетчик; *Ф*, $Ф_1$–$Ф_{13}$ – формирователи; *З*, $З_1$–$З_{13}$ – задержки; $СС_1$–$СС_{13}$ – схемы совпадений; *КК* – крейт-контроллер; *ПК* – персональный компьютер.

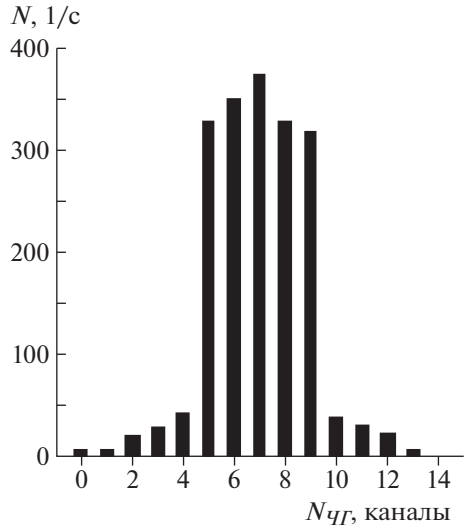


Рис. 8. Профиль фотонного пучка, измеренный черенковским годоскопом перед конвертором на срезе полюсов магнита СП-57.

филь фотонного пучка в различных точках его транспортировки.

Надо отметить, что системы мониторирования на основе черенковского излучения имеют большие конструктивные и функциональные возможности в экспериментальной практике. Например, при проведении эксперимента с применением фотонного пучка для изучения сечений ядерных реакций профиль фотонного пучка на входе в экспериментальную мишень можно определять при каждом “сбросе” ускорителем первичного пучка на внутреннюю вольфрамовую мишень и, таким образом, определять интегральный профиль за заданное время.

Каналы черенковского годоскопа способны служить “активными конверторами”, т.е. работать без первичного конвертора перед годоскопом. В этом случае счетчики годоскопа могут являться триггерными счетчиками и самостоятельно определять координату образования электрона (позитрона) и, соответственно, точку входа его в магнитное поле СП-57.

В дальнейшем по известным характеристикам магнитного поля и геометрическим параметрам магнитной системы можно определить угол выхода электрона из магнита и его дальнейшую траекторию. Знание траектории электрона позволит улучшить (в ~1.5–2 раза) энергетическую ширину спектра вторичного электронного пучка [1].

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований (NICA-РФФИ) № 18-02-40061 и № 18-02-40079.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев В.И., Басков В.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кречетов Ю.Ф., Малиновский Е.И., Павлюченко Л.Н., Полянский В.В., Сидорин С.С.* // ПТЭ. 2019. № 2. С. 5. https://doi.org/10.1134/S0032816219020162
2. *Agustsson R., Andonian G., Murokh A., Tikhoplav R.* // Proc. of IPAC 2012. New Orleans, USA. 2012. P. 996.
3. *Wu S., Andonian G., Campese T., Murokh A., Agustsson R.* // Proc. of IPAC 2013. Pasadena, USA. 2013. P. 1205.
4. *Новокшенов А.И.* Автореф. ... канд. физ.-мат. наук. Национальный исследовательский политехнический Томский университет. 2017. 22 с.
5. *Денисов С.П., Евдокимов В.Н., Козеллов А.В., Прокопенко Н.Н., Солдатов М.М., Стоянова Д.А., Якимчук В.И.* // Краткие сообщения по физике. 2010. № 4. С. 17. https://doi.org/10.3103/S1068335610040032
6. *Алексеев В.И., Басков В.А., Далькаров О.Д., Кольцов А.В., Львов А.И., Мамонов И.А., Павлюченко Л.Н., Полянский В.В.* // Краткие сообщения по физике. 2019. № 11. С. 37. https://doi.org/10.3103/S1068335619110071
7. *Ляпидевский В.К.* Методы детектирования излучений. М.: Энергоатомиздат, 1987.

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 6, с. 17–25

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 537.521.7

ПОВЫШЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ УСКОРИТЕЛЯ-ТАНДЕМА С ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

© 2020 г. Я. А. Колесников[a,b], И. Н. Сорокин[a,b,*], С. Ю. Таскаев[a,b]

[a] *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН*
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11
[b] *Новосибирский государственный университет*
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2
**e-mail: I.N.Sorokin@inp.nsk.su*

Поступила в редакцию 17.04.2020 г.
После доработки 20.05.2020 г.
Принята к публикации 29.05.2020 г.

Представлены результаты исследований электрической прочности керамических изоляторов, проведенных на созданном высоковольтном вакуумном стенде, и результаты исследований электрической прочности ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией с модернизированными проходными изоляторами. По результатам проведенных исследований и модернизации напряжение в ускорителе повышено с 1 до 1.15 МВ и достигнут режим работы без высоковольтных пробоев.

DOI: 10.31857/S0032816220060105

ВВЕДЕНИЕ

В Институте ядерной физики СО РАН разработан источник эпитепловых нейтронов на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и литиевой мишени [1], созданный для развития перспективной методики лечения злокачественных опухолей – бор-нейтронозахватной терапии [2]. На установке получен стационарный протонный пучок с энергией 2 МэВ, осуществлена генерация нейтронов и проведены исследования влияния нейтронного излучения на клеточные культуры [3] и лабораторных животных [4]. Однако для лечения глубоко расположенных опухолей необходимо повысить энергию протонов до 2.3 МэВ [5], с тем чтобы сформировать терапевтический пучок нейтронов с требуемыми параметрами.

Цель данной работы – модернизация проходного изолятора ускорителя для достижения напряжения, необходимого для получения пучка протонов с энергией 2.3 МэВ.

КОНСТРУКЦИЯ УСКОРИТЕЛЯ

Схема ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией представлена на рис. 1. Пучок протонов с энергией 2 МэВ и током до 9 мА получают следующим образом. Из поверхностно-плазменного источника *1* вытягивают пучок отрицательных ионов водорода с энергией до 25 кэВ. В магнитном поле источника ионов пучок поворачивают на угол 15°, после чего фокусируют магнитной линзой *2* на вход ускорителя *11*, где ускоряют до энергии 1 МэВ. В газовой обдирочной мишени *7*, установленной внутри высоковольтного электрода *5* ускорителя, отрицательные ионы водорода превращаются в протоны, которые тем же потенциалом 1 МВ ускоряются до энергии 2 МэВ.

Потенциал на высоковольтный электрод *5* и пять промежуточных электродов *6* ускорителя подают от высоковольтного источника напряжения *10* через проходной изолятор *9*, в котором установлен омический делитель. Откачку газа осуществляют турбомолекулярными насосами *8*, установленными у источника ионов и на выходе ускорителя, и криогенным насосом *4* через жалюзи электродов.

Вакуумная часть высоковольтного проходного изолятора (рис. 2) собрана из 24-х кольцевых стеклянных изоляторов диаметром 394 мм и высотой 35 мм, вакуумно-плотно стянутых с промежуточными электродами. Газовая часть изолятора, расположенная в баке высоковольтного выпрямителя, состоит из 14-ти керамических колец диаметром 394 мм и высотой 30 и 60 мм, склеенных с электродами. Внутренняя часть проходного изолятора заполнена элегазом SF_6 при давлении 0.3 МПа. Бак высоковольтного выпрямителя заполнен элегазом при давлении 0.8 МПа.

Общее сопротивление резистивного делителя напряжения проходного изолятора составляет

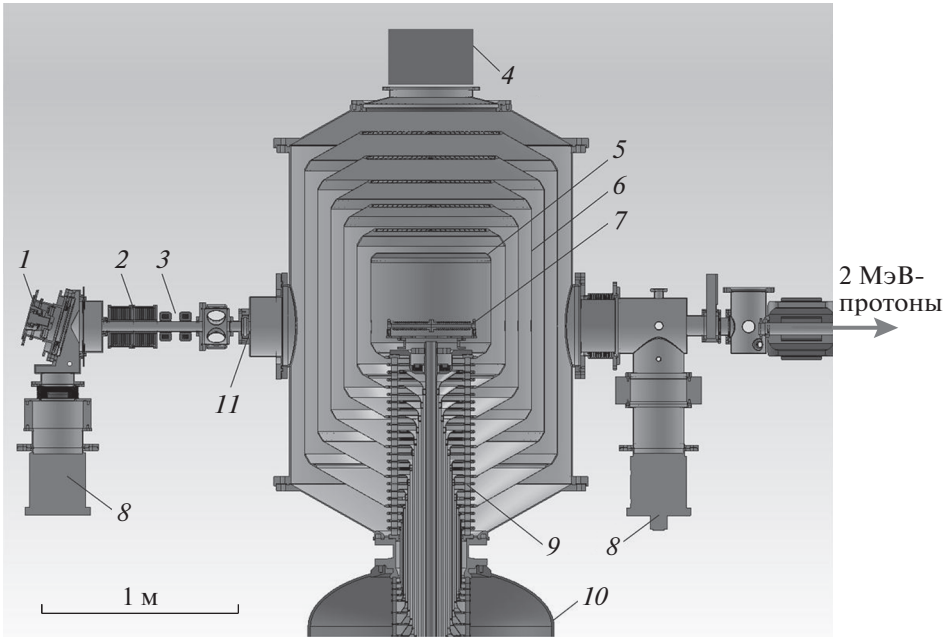


Рис. 1. Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией. *1* – источник отрицательных ионов водорода; *2* – магнитные линзы; *3* – корректоры; *4* – криогенный насос; *5* – высоковольтный электрод; *6* – промежуточные электроды; *7* – газовая обдирочная мишень; *8* – турбомолекулярный насос; *9* – проходной изолятор; *10* – высоковольтный источник питания; *11* – место размещения входной диафрагмы ускорителя.

1.8 ГОм. Резисторы, расположенные вокруг нижней газовой части проходного изолятора, распределяют потенциал на промежуточные ускоряющие электроды через электроды газовой части изолятора, металлические тонкостенные трубы, различные по длине и диаметру и расположенные коаксиально внутри проходного изолятора, и электроды верхней вакуумной части изолятора. Распределение потенциала на электродах вакуумной части изолятора, гальванически не связанных с коаксиальными трубками, задают резисторы, расположенные внутри вакуумной части проходного изолятора.

Проходной изолятор позволяет получить напряжение 1 МВ и работать в течение длительного времени. Повышение напряжения U до 1.15 МВ, как показано на рис. 3, достижимо. Выдержкой под напряжением осуществляется тренировка ускоряющих зазоров, и со временем уменьшаются остаточное давление $P_{\text{вак}}$, темновой ток $I_{\text{темн}}$ и мощность дозы D рентгеновского излучения.

В то же время темновой ток в ускоряющих зазорах остается значительным. Из-за этого в относительно маломощном резистивном делителе напряжения возникает перераспределение потенциала промежуточных электродов, что приводит к увеличению напряженности электрического поля в отдельных ускоряющих зазорах и к высоковольтному пробою по поверхности изолятора.

Наибольший урон состоял в выгорании резисторов делителя напряжения (рис. 4), размещенного внутри проходного изолятора, из-за провисания цепочек резисторов вследствие значительного выделяемого тепла в ограниченном пространстве. Замена сопротивлений занимала длительное время, поскольку требовала полной разборки ускорителя и проходного изолятора.

Для решения проблемы с выгоранием резисторов было предложено увеличить высоту отдельных изоляторов в два раза и избавиться от той части омического делителя, которая находится внутри проходного изолятора, т.е. оставить в верхней вакуумной части проходного изолятора только электроды, электрически соединенные с электродами нижней газовой части внутренними коаксиальными металлическими трубами. Поскольку в проходном изоляторе также был убран ряд электродов изолятора, то для сохранения общей высоты проходного изолятора требовалось увеличить высоту отдельных изоляторов с 35 до 73 мм. Это привело к увеличению напряжения на единичном изоляторе с 50 до 100 кВ и потребовало экспериментальной проверки.

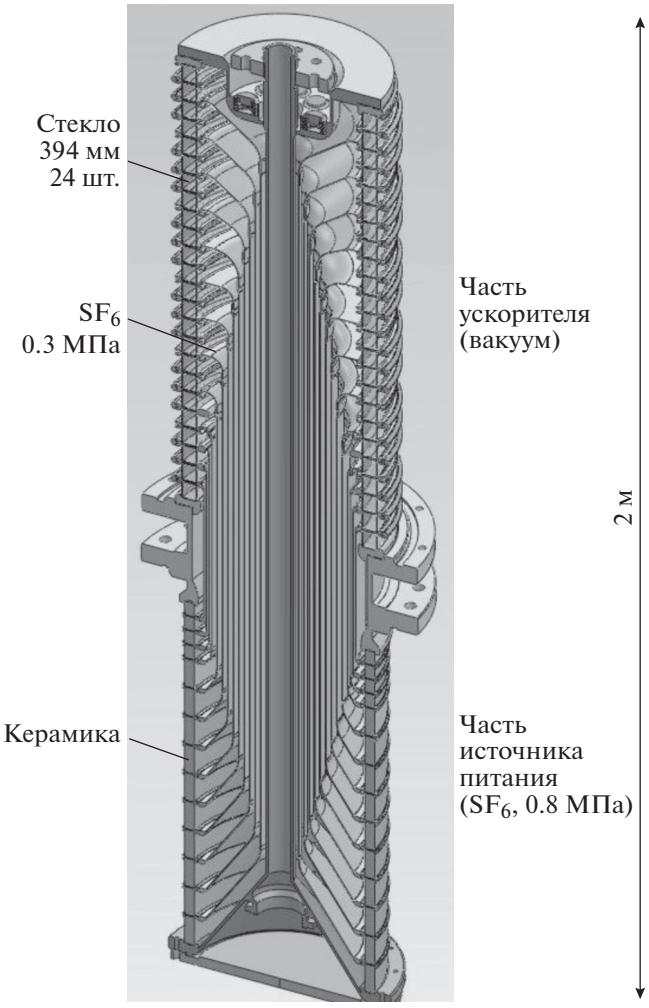


Рис. 2. Схема конструкции проходного изолятора ускорителя.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ИЗОЛЯТОРОВ

Для экспериментального исследования электрической прочности изоляторов сконструирован и изготовлен стенд. Испытуемый изолятор, вакуумно-плотно стянутый между заземленным и высоковольтным электродами, расположен внутри вакуумного объема высоковольтного стенда. Через высоковольтный ввод на испытуемый изолятор подавали высокое напряжение. Уровень мощности дозы рентгеновского излучения измеряли дозиметром.

Исследованию были подвергнуты керамические кольца высотой 73 мм, с внешним диаметром 394 мм и внутренним 336 мм, с гладкой (рис. 5а) и ребристой (рис. 5б) вакуумными поверхностями. Давление остаточного газа при проведении эксперимента составляло $2 \cdot 10^{-4}$ Па.

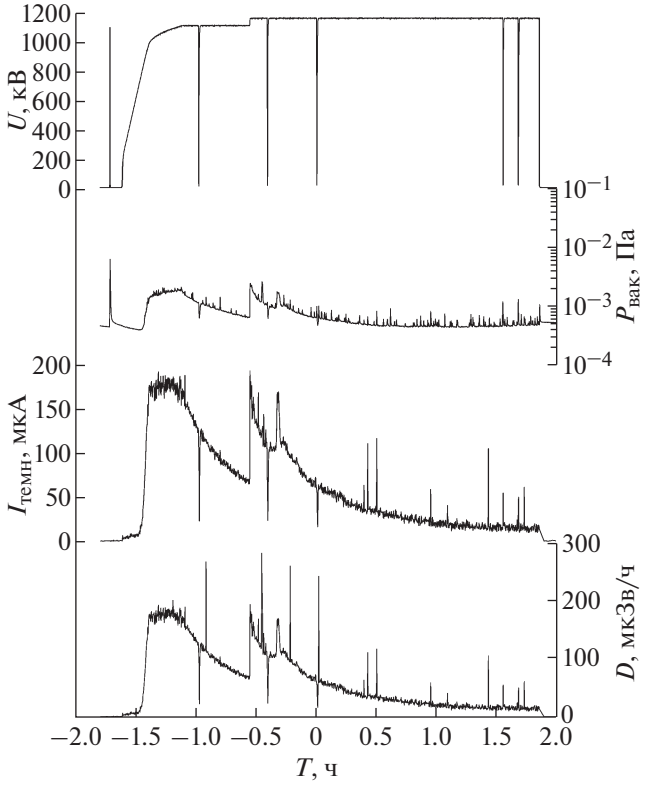


Рис. 3. Графики подъема напряжения на ускорителе.

На рис. 6 представлен график подъема напряжения на керамических изоляторах с гладкой (рис. 6а) и ребристой (рис. 6б) поверхностями. На обоих изоляторах получено требуемое напряжение 100 кВ, и любой из них может быть использован для решения проблемы с выгоранием резисторов, размещенных внутри проходного изолятора.

Было принято решение использовать керамические изоляторы с гладкой наружной поверхностью, поскольку они технологически более просты в изготовлении. Вместе с тем тренировка изолятора с ребристой поверхностью проходила быстрее, и максимальное напряжение, при котором не происходило множественных пробоев, составило 140 кВ, тогда как на изоляторе с гладкой поверхностью эта величина равна 120 кВ.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРОХОДНОГО ИЗОЛЯТОРА

По результатам исследования электрической прочности отдельных керамических колец осуществлена модернизация проходного изолятора. Для этого стеклянные кольца в верхней вакуумной части проходного изолятора (рис. 7а) заменены на гладкие керамические кольца (рис. 7б). В первом

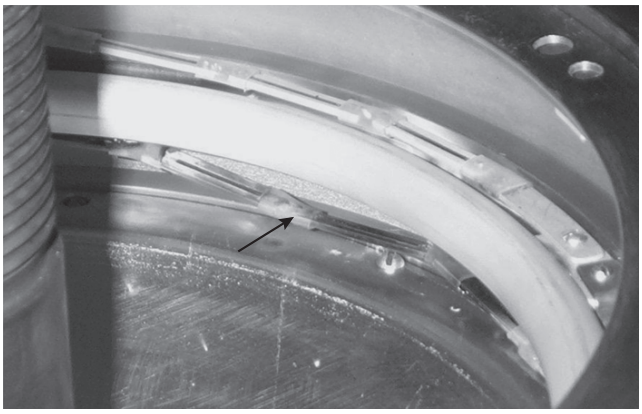


Рис. 4. Провисание и выгорание части делителя (показано стрелкой), находящегося внутри проходного изолятора.

ускорительном зазоре использовано четыре кольца высотой по 35 мм, в остальных пяти – по два кольца высотой по 73 мм.

Изолятор нижней газовой части остался прежний. Общая высота проходного изолятора не изменилась. Также был изготовлен и установлен снаружи нижней газовой части проходного изолятора новый резистивный делитель напряжения с суммарным сопротивлением 1.8 ГОм.

После установки нового проходного изолятора в ускоритель и стандартной тренировки, проводимой после вскрытия на атмосферу, напряжение 1 МВ было достигнуто без каких-либо отличий от процедуры, применяемой ранее. Это означало, что повышение напряжения на единичном изоляторном кольце в два раза за счет увеличения его высоты в два раза не привело к каким-либо ограничениям в достижении требуемого напряжения или к ухудшению его надежности.

На рис. 8 представлены результаты эксперимента по получению напряжения 1.15 МВ. Первый пробой прошел при напряжении выше 1 МВ, и требуемое напряжение 1.15 МВ получено при наличии нечастых пробоев. После этого за 2 ч тренировки напряжение было повышено до 1.21 МВ и продержалось на этом уровне в течение 1 ч при одном пробое. Затем напряжение было снижено до 1.15 МВ и достигнута его стабилизация на этом уровне в течение более 1 ч, как это следует из рис. 9, сопровождаемая снижением темнового тока и уровня мощности дозы тормозного излучения.

Для наблюдения разрядов и пробоев в вакуумном баке ускорителя были просверлены отверстия, в которые вварены патрубки KF с окнами. На патрубки с окнами установлены видеокамеры Hikvision (Китай). Две камеры были направлены на входную диафрагму первого ускоряющего электрода, две камеры – на выходную диафрагму

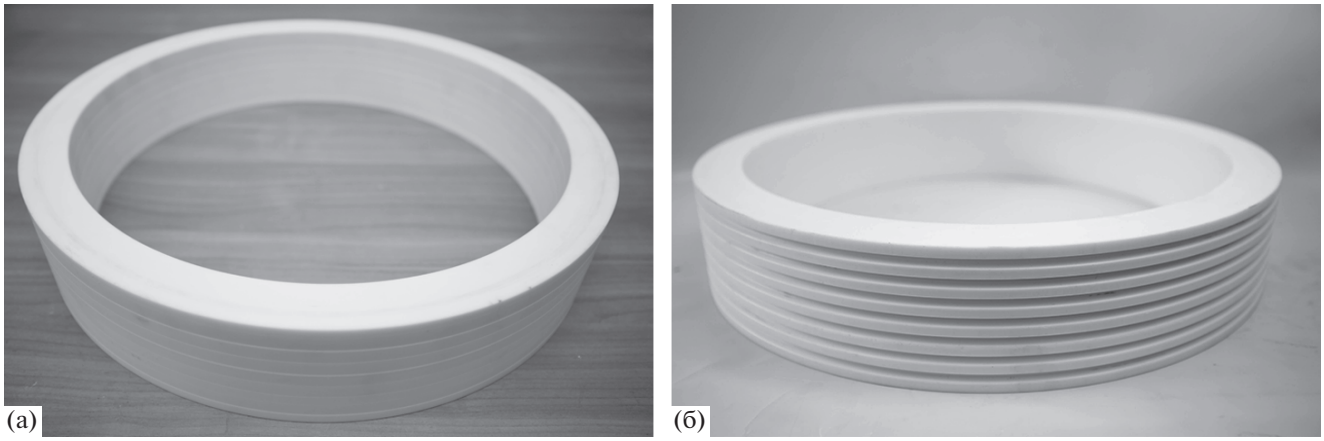


Рис. 5. Керамический изолятор с гладкой (**а**) и ребристой (**б**) наружной поверхностью.

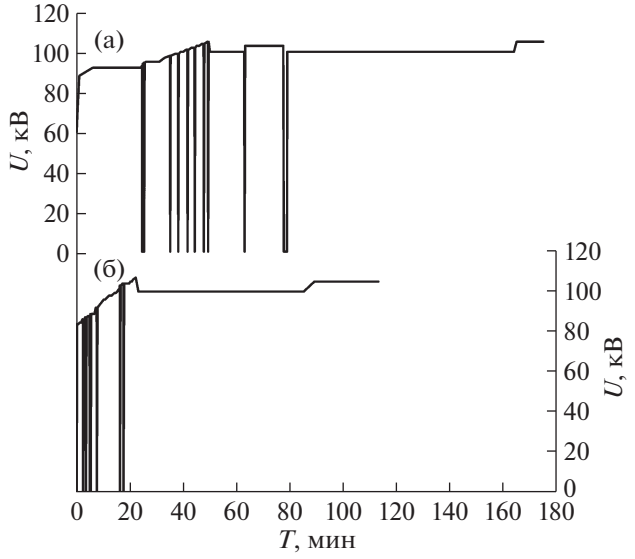


Рис. 6. Подъем напряжения на изоляторах высотой 73 мм с гладкой (**а**) и ребристой (**б**) наружными поверхностями.

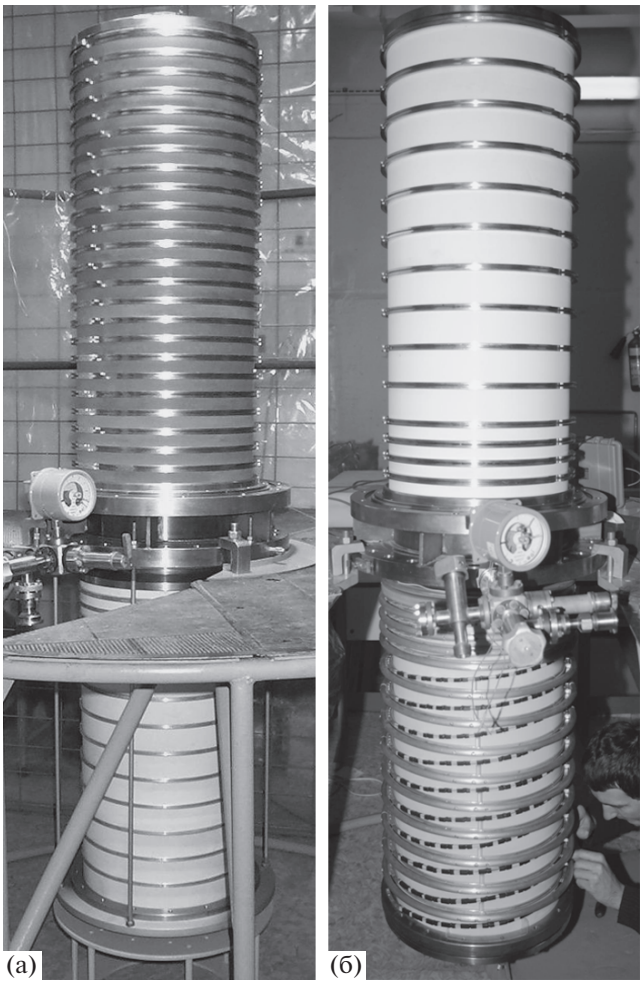


Рис. 7. Фотографии проходного изолятора со стеклянными кольцами высотой 35 мм (**а**) и с гладкими керамическими кольцами высотой 73 и 35 мм (**б**).

первого ускоряющего электрода и две камеры сверху смотрели на первый ускоряющий зазор.

На один из патрубков в нижнем конусе вакуумного бака ускорителя была установлена видеокамера, направленная на керамические изоляторы высотой 35 мм. На втором патрубке в нижнем конусе вакуумного бака ускорителя была закреплена галогенная лампа LFP-10WP-R (Shibuya, Япония) для подсветки. Еще одна камера была установлена на торце горизонтального тракта транспортировки пучка протонов, она смотрела вдоль ускорительного канала.

Видеокамерами зарегистрированы разряды и пробои. Фотографии пробоев по поверхности керамических колец проходного изолятора приведены на рис. 10. После пробоя на поверхности изолятора остается видимый трек (рис. 11б). Стоит заметить, что молния может пройти совсем рядом с ранее образовавшимся треком, как это видно на рис. 10а.

Наблюдение за разрядами позволяет утверждать, что перед вспышкой молнии в одном из ускоряющих зазоров загорается разряд с током от 1 до 3 мА. Протекание тока такой величины в зазоре приводит к уменьшению напряжения в этом зазоре и к увеличению напряжения в других ускоряющих зазорах, поскольку потенциал на промежуточные электроды задается относительно маломощным омическим делителем напряжения 1.8 ГОм.

Стоит обратить внимание на то, что средняя напряженность электрического поля по поверхности изолятора составляет 14 кВ/см, что в 1.4 раза выше рекомендуемой для работы без пробоев. Естественно, что при загорании разряда в одном из зазоров в остальных зазорах напряженность электрического поля возрастает еще сильнее и происходит пробой.

При получении пучка протонов и генерации нейтронов в результате реакции ^{7}Li(p, n)^{7}Be программное обеспечение системы управления и сбора данных установки автоматически восстанавливает параметры ускорителя за 10 с после пробоя. Пробои, приводящие к временному прекращению генерации нейтронов, происходят каждые 3–10 мин и, в принципе, могут не мешать проведению терапии, но избавление от них желательно.

Для решения этой проблемы есть два пути. Первый – увеличить высоту отдельных изоляторов в 1.4 раза, что приведет к увеличению габаритов ускорителя и повышению энергии, запасен-

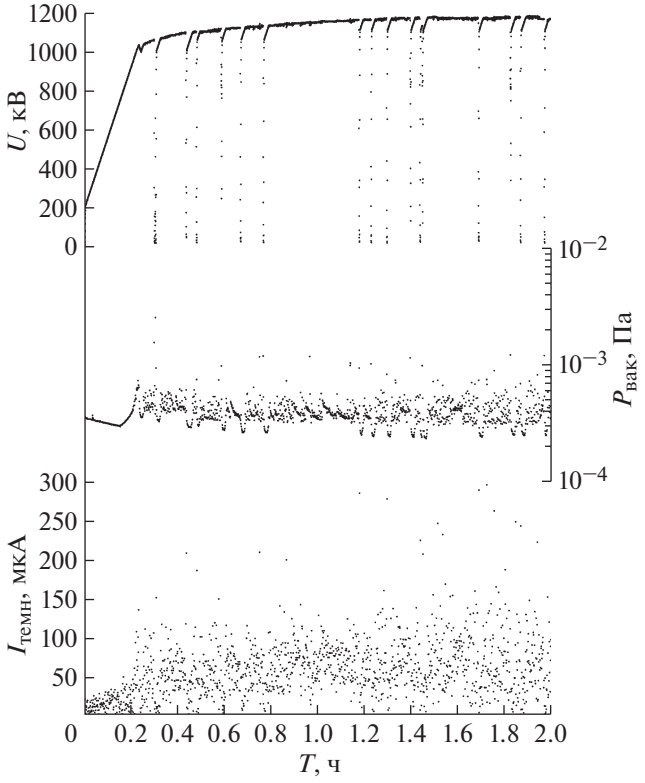


Рис. 8. Графики зависимости напряжения U, остаточного давления $P_{вак}$, темнового тока $I_{темн}$ на ускорителе от времени T при подъеме напряжения.

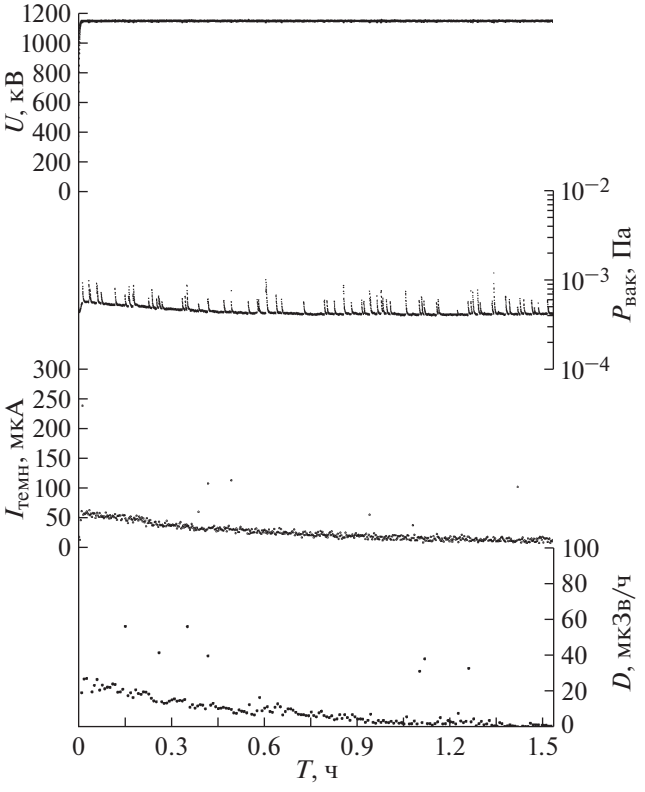


Рис. 9. Графики зависимости напряжения U, остаточного давления $P_{вак}$, темнового тока $I_{темн}$ и мощности дозы тормозного излучения D ускорителя при выстаивании напряжения на уровне 1.15 МВ.

ной в ускоряющих зазорах. Второй – сделать поверхность вакуумной части керамических колец гофрированной, что увеличит путь вдоль поверхности изолятора и, как следствие, снизит среднюю напряженность электрического поля по поверхности. Ранее нами по результатам испытаний на стенде установлено, что ребристая поверхность обеспечивает повышение электрической прочности до 1.5 раза по сравнению с гладкой поверхностью [6].

Однако гофрирование также приводит к повышению максимальной напряженности поля в некоторых местах, поскольку эквипотенциали электрического поля в конструкции компактного ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией не перпендикулярны поверхности гладких керамических колец, поэтому не очевидно, какой эффект будет преобладающим.

Керамические кольца с ребристой наружной вакуумной поверхностью были изготовлены (рис. 12) и установлены вместо гладких керамических изоляторов в проходном изоляторе. Радиус ребер и впадин был выбран 1 мм, исходя из ранее полученных результатов [6]. Высота новых отдельных ребристых керамических изоляторов не изменилась. Общая высота проходного изолятора также осталась прежней.

После установки проходного изолятора с ребристой наружной вакуумной поверхностью керамических колец и стандартной тренировки ускорителя напряжение 1 МВ было достигнуто за время, в два раза меньшее, и с меньшим количеством пробоев, чем на проходном изоляторе с гладкой керамической поверхностью колец (рис. 13). Затем напряжение было повышено до 1.2 МВ (рис. 14), при этом в течение 1 ч прошло всего 2 пробоя. Величина темнового тока снизилась и не превышала 20 мкА.

В третьей серии экспериментов поднялись до уровня рабочего напряжения 1.15 МВ без пробоев (рис. 15). Заметим, что средняя напряженность электрического поля на изоляторе с гладкой поверхностью составила ~14 кВ/см, а на изоляторе с ребристой вакуумной поверхностью, с учетом увеличения ее длины, ~9 кВ/см. Эта величина часто приводится в литературных источниках как обеспечивающая требуемую прочность.

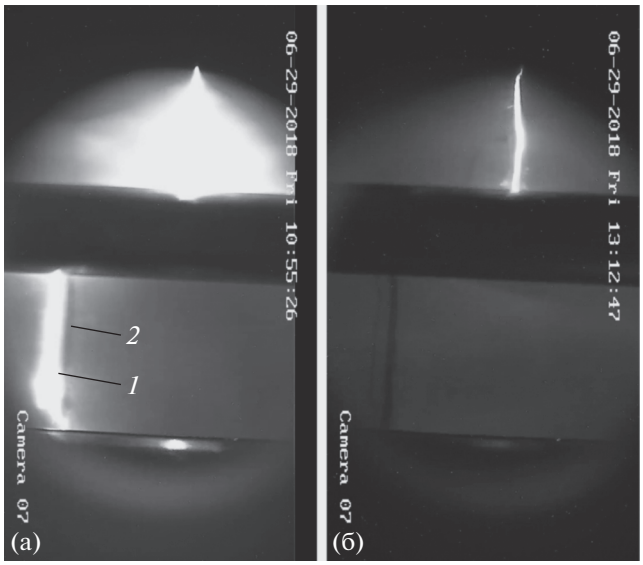


Рис. 10. Фотографии пробоев по поверхности изолятора: *1* – текущий пробой, *2* – трек, образовавшийся от ранее прошедшего пробоя.

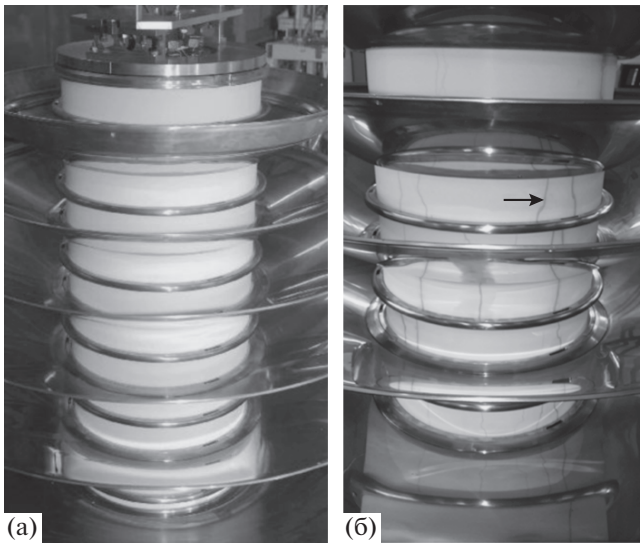


Рис. 11. Фотографии гладкой керамической поверхности изолятора до (**а**) и после тренировки со следами пробоев (**б**). Стрелка указывает на один из треков, образовавшихся после пробоя.

Рабочее напряжение 1.15 МВ продержалось 1.5 часа без пробоев. Требуемый режим работы ускорителя был достигнут. Следовательно, электрическую прочность ускорителя удалось повысить за счет уменьшения средней напряженности электрического поля по поверхности изолятора до 8.4 кВ/см, при этом максимальная напряженность в некоторых местах достигала 21 кВ/см.

После шести месяцев эксплуатации, в течение которых обеспечивалось получение пучка протонов и генерация нейтронов без пробоев, установка была разобрана. Было обнаружено, что на реб-

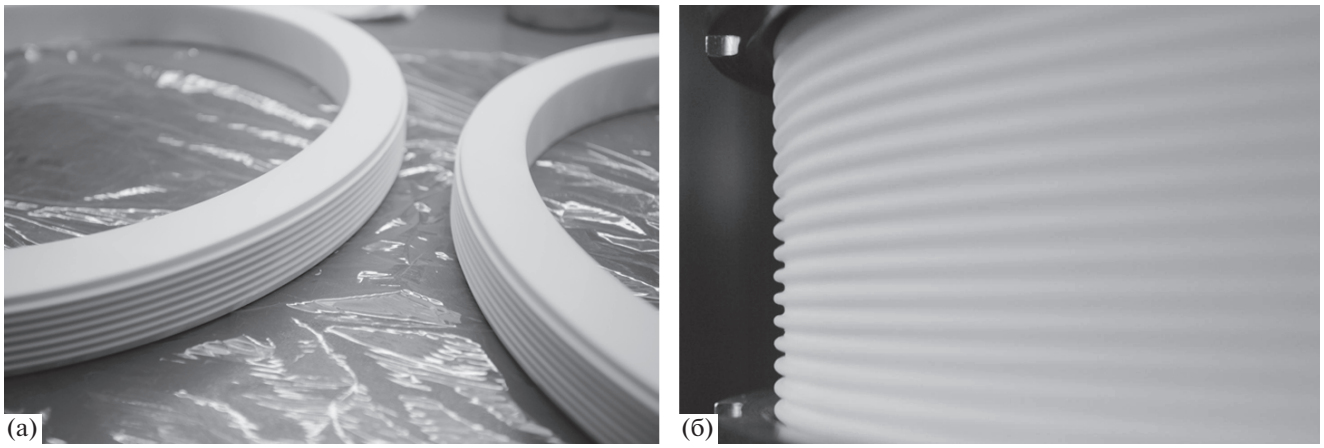


Рис. 12. Керамические изоляторы с ребристой наружной поверхностью высотой 35 мм (**а**) и 70 мм (**б**).

ристой вакуумной поверхности проходного изолятора следов от пробоев нет (рис. 16). Даже те редкие пробои, которые случались при подъеме напряжения и тренировке, вероятнее всего, не были связаны с пробоями по поверхности изолятора.

Таким образом, экспериментально установлено, что применение в проходном изоляторе единичных керамических колец удвоенной высоты с ребристой вакуумной поверхностью и отказ от использования части резистивного делителя внутри проходного изолятора оправданы: напряжение 1.15 МВ получено и надежность работы ускорительного источника нейтронов существенно повышена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Институте ядерной физики СО РАН создан и функционирует источник эпитепловых нейтронов на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и литиевой мишени, предназначенный для развития перспективной методики лечения злокачественных опухолей – бор-нейтронозахватной терапии и других приложений.

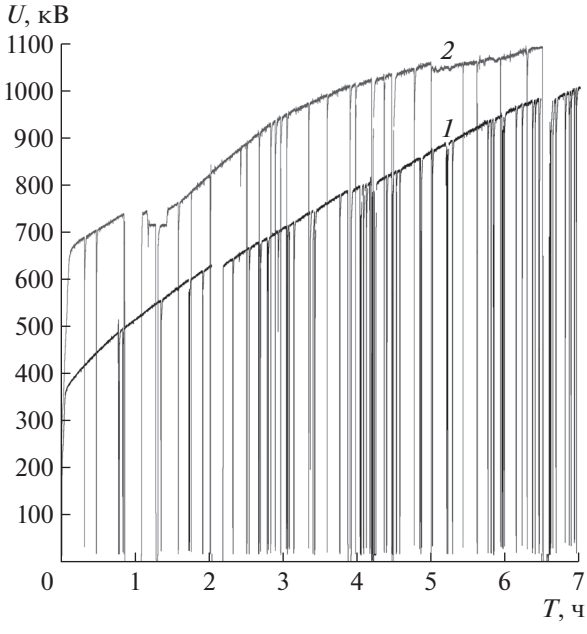


Рис. 13. Графики первого подъема напряжения на ускорителе: *1* – для гладкой керамической поверхности изолятора, *2* – для ребристой поверхности керамики.

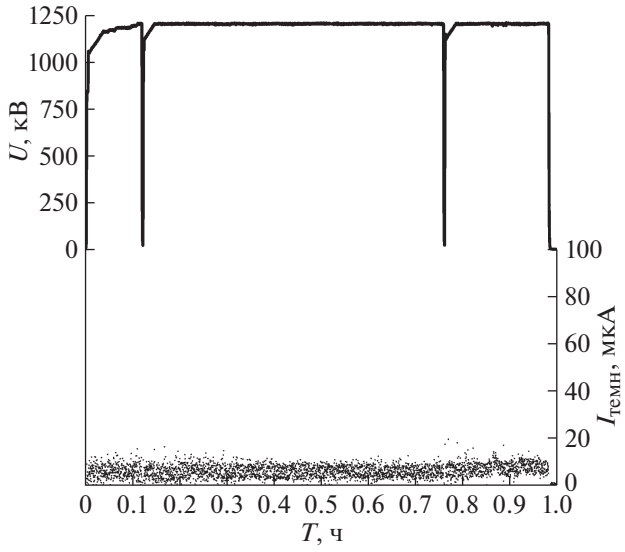


Рис. 14. Графики зависимости напряжения U и темнового тока $I_{темн}$ от времени T на ускорителе.

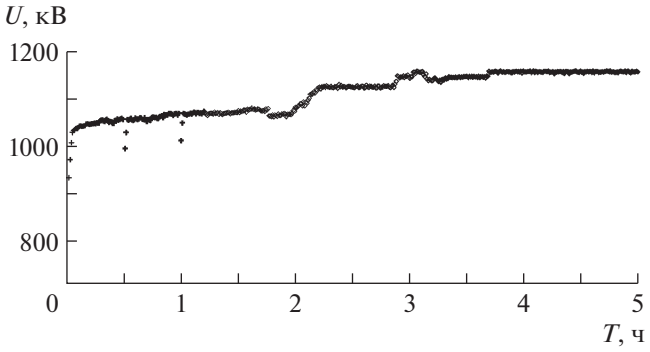


Рис. 15. График зависимости напряжения U на ускорителе от времени T при подъеме и выстойке на уровне 1.15 МВ.

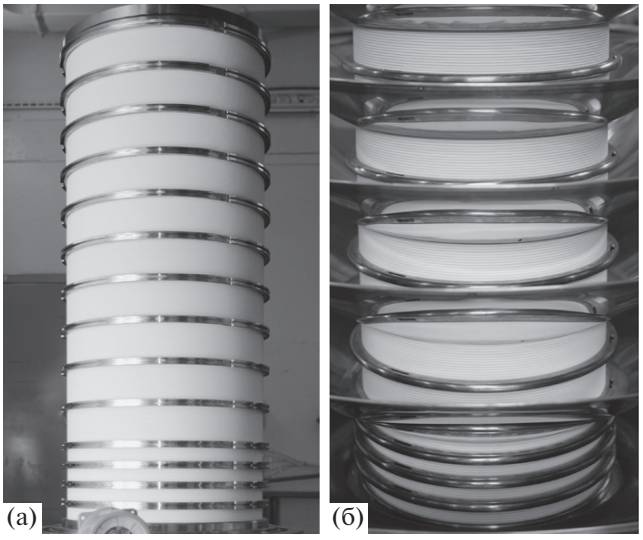


Рис. 16. Фотографии ребристой поверхности керамического изолятора до **(а)** и после тренировки **(б)**.

Для решения задач, связанных с получением терапевтического пучка нейтронов, в наибольшей степени удовлетворяющего требованиям бор-нейтронозахватной терапии, необходимо было повысить энергию протонов с 2 до 2.3 МэВ, т.е. повысить напряжение тандемного ускорителя с 1 до 1.15 МВ. Для достижения поставленной цели изучена электрическая прочность керамических изоляторов и проведена модернизация проходного изолятора, на первом этапе состоящая в замене стеклянных колец на гладкие керамические кольца удвоенной высоты, что позволило также отказаться от размещения части резистивного делителя напряжения внутри проходного изолятора, а на втором – в замене гладких керамических колец на гофрированные.

В результате проведенных исследований установлено, что повышение электрической прочности проходного изолятора достигается снижением средней напряженности электрического поля по поверхности изолятора за счет гофрировки, несмотря на формирование локальных мест с повышенной напряженностью поля. После модернизации в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией получено требуемое напряжение 1.15 МВ и обеспечен режим работы без высоковольтных пробоев, что важно для применения источника нейтронов в терапии и для других приложений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-30005) при поддержке Института ядерной физики СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Таскаев С.Ю.* // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2015. Т. 46. № 6. С. 1770. https://doi.org/10.1134/S1063779615060064
2. Neutron Capture Therapy: Principles and Applications / Eds. W. Sauerwein, A. Wittig, R. Moss, Y. Nakagawa. Springer, 2012. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31334-9
3. *Sato E., Zaboronok A., Yamamoto T., Nakai K., Taskaev S., Volkova O., Mechetina L., Taranin A., Kanygin V., Isobe T., Mathis B., Matsumura A.* // J. Radiat Res. 2018. V. 59. P. 101. https://doi.org/10.1093/jrr/rrx071
4. *Таскаев С.Ю.* // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2019. Т. 50. № 5. С. 657. https://doi.org/10.1134/S1063779619050228
5. *Zaidi L., Belgaid M., Taskaev S., Khelifi R.* // Applied Radiation and Isotopes. 2018. V. 139. P. 316. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.05.029
6. *Kolesnikov Ya., Sorokin I., Taskaev S.* // Proc. 27th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Suzhou, China, 2016. V. 2. P. 778. https://doi.org/10.1109/DEIV.2016.7764033

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 6, с. 26–31

ЭЛЕКТРОНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 533.9.07

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПАКТНОГО МНОГОКАНАЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ

© 2020 г. В. А. Бурцев[a], Е. П. Большаков[b,*], Д. В. Гетман[c], Н. В. Калинин[a,]**

[a] *Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН*
Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
[b] *ООО "Лаборатория им. В.А. Бурцева", Санкт-Петербург, Россия*
[c] *НИИ электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова, С.-Петербург, Россия*
**e-mail: bolep@inbox.ru*
***e-mail: nvkalinin@rambler.ru*

Поступила в редакцию 22.04.2020 г.
После доработки 12.05.2020 г.
Принята к публикации 14.05.2020 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований высоковольтного многоканального генератора на напряжение до 100 кВ с длительностью импульса 100 нс и фронтом 8 нс. Рассмотрены варианты оптимизации выходных параметров с использованием численного моделирования схемы замещения генератора.

DOI: 10.31857/S0032816220050286

ВВЕДЕНИЕ

Высоковольтные генераторы наносекундных импульсов широко применяются в различных областях науки и техники, включая газовые лазеры, электронные ускорители, а также источники электромагнитного воздействия в биологии и квантовой медицине. При создании генераторов обычно используются типичные схемы высоковольтных импульсных источников [1] с различными модификациями.

Генераторы выполняются по схемам Аркадьева–Маркса, Фитча, а также на основе *LC*- или *RC*-инверторов. Для накопления энергии в генераторах используются конденсаторы или отрезки линий с распределенными параметрами. При формировании импульсов напряжения необходимой длительности в схемах таких генераторов применяются дополнительные обостряющие или срезающие разрядники, что приводит к снижению эффективности передачи энергии в нагрузку.

Для формирования мощных высоковольтных импульсов напряжения с требуемой длительностью предпочтительно использовать генераторы на основе искусственных накопительно-формирующих линий, выполненных по технологии, применяемой при изготовлении секций импульсных малоиндуктивных конденсаторов. Такие линии, разработанные совместно кафедрой техники высоких напряжений СПбПУ (им. Петра Великого) и НИИЭФА, были использованы в генераторе для питания крупноапертурных эксимерных лазеров с электронно-пучковой накачкой [2].

В работе [3] представлен подробный анализ результатов создания высоковольтных одинарных формирующих линий (о.ф.л.), которые имеют высокую плотность запасаемой энергии, формируют импульсы напряжения формой, близкой к прямоугольной. Такие линии могут работать на низкоомную согласованную нагрузку от долей ома до десятка ом при напряжении на нагрузке 50–200 кВ. Амплитуда тока может составлять десятки килоампер, а длительность фронта импульса – от 15–30 нс. Частота следования импульсов зависит от конкретных исполнений и применений и может достигать 1 кГц.

Параметры о.ф.л. определяются по заданным значениям сопротивления нагрузки R и длительности импульса τ из соотношений: $L_0 = nL_з = \tau R/2.2$, $C_0 = nC_з = \tau/2.2R$, где n – число звеньев, $L_з$ – индуктивность звена, $C_з$ – емкость звена. Для согласованного режима волновое сопротивление линии $\rho = R = (L_з/C_з)^{1/2}$.

На рис. 1 приведена классическая расчетная форма импульсов напряжения генератора на основе многозвенной одинарной искусственной линии в зависимости от числа одинаковых звеньев – 2, 3 и 4. При расчетах принято, что волновое сопротивление линии согласовано с активной

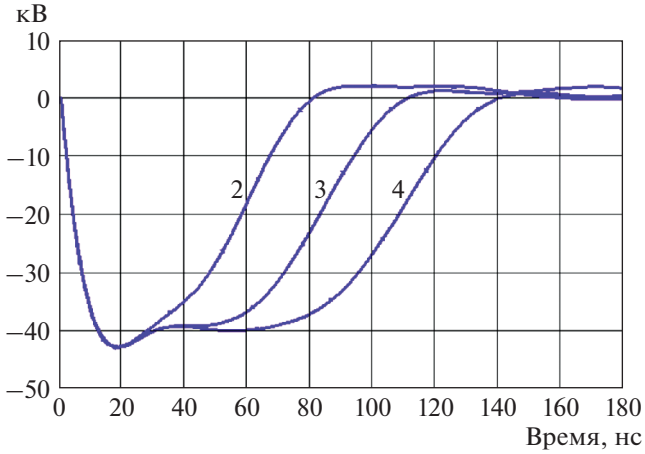


Рис. 1. Расчетный импульс напряжения искусственной формирующей линии при разном количестве звеньев (их число указано у кривых).

нагрузкой и составляет 4 Ом. Длительность импульса на полувысоте возрастает с числом звеньев и для четырех звеньев составляет около 100 нс. При зарядном напряжении линии 80 кВ расчетная амплитуда напряжения на согласованной нагрузке составляет около 42 кВ.

На вершине импульса видны колебания, для уменьшения амплитуды которых применяются цепи коррекции. В простейшем случае такой коррекцией может служить добавление индуктивности к звену линии, которое примыкает к коммутатору генератора. Следует отметить, однако, что такая коррекция вершины импульса приводит к увеличению длительности фронта. Наличие потерь в звеньях линии приводит к уменьшению амплитуды сигналов и искажениям их формы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Многоканальный импульсный генератор (рис. 2) имеет 8 параллельных выходов по 75 Ом и выполнен на основе разработанной и изготовленной в СПбПУ искусственной двойной формирующей линии (д.ф.л.) с бумажно-масляной изоляцией с волновым сопротивлением ρ, близким к 8 Ом. Д.ф.л. состоит из двух одинарных 4-звенных линий, расположенных одна над другой по свернутой схеме со шпилечными выводами на торцевых сторонах пластмассового корпуса. При максимальном зарядном напряжении 100 кВ в д.ф.л. запасается энергия до 120 Дж.

Оборудование генератора смонтировано в виде подвески на съемной крышке корпуса, заполненного трансформаторным маслом. Такое размещение оборудования позволяет проводить ремонтно-профилактические работы с неполным сливом масла. На рис. 2а отмечены основные узлы генератора. Выходные шпильки д.ф.л. выходят в сторону обостряющего коммутатора, входные шпильки, выходящие с противоположной стороны бака, с помощью медных шин подсоединялись к пусковому разряднику. Все конденсаторы линий заряжались параллельно от выпрямителя типа Spellman (SR 110 кВ, 6 кВт) с отрицательной полярностью выходного напряжения, подаваемого на среднюю шину д.ф.л. Пилотные результаты применения генератора доложены на международной конференции в 2002 году [4].

Генератор обеспечивает на согласованной нагрузке (8 Ом) импульс напряжения с амплитудой до 100 кВ при длительности на полувысоте до 100 нс и длительности фронта до 8 нс. Принципиальная схема генератора представлена на рис. 2б.

Пусковой разрядник S_1 (газонаполненный, рельсового типа) имеет два симметричных зазора (первый зазор между “верхним” основным электродом и пусковым электродом, второй – между “нижним” основным электродом и пусковым электродом; иллюстрации к аналогичному разряднику можно найти в работе [5]) и управляется по принципу искажения электрического поля. Основные электроды разрядника в поперечном сечении имеют форму полуцилиндров с радиусом 15 мм, длина электродов 150 мм. Расстояние между кромкой пускового электрода и каждым из основных электродов – 11 мм. Для обеспечения работы разрядника с образованием нескольких каналов разряда (многоканальный режим работы) пусковой электрод выполнен в виде заостренной пластины общей длиной 120 мм и углом схождения (пересечения) граней, равным ~17°, и радиусом скругления острой кромки – 0.5 мм [6], а острая кромка этого электрода профилирована пазами квадратной формы глубиной 10 мм с шагом 20 мм.

Если в режиме запуска разрядника управляющий электрод приобретает отрицательный потенциал по сравнению с обоими основными электродами, то возникшие на остриях эмиссионные центры приводят к развитию электронных лавин и, далее, к пробою одного из межэлектродных промежутков (зазоров), что сильно облегчает пробой в другом зазоре. Профилирование острой кромки не только обеспечивает возникновение взрывной эмиссии, но и способствует уменьшению скорости распространения вдоль электродов волны нулевого напряжения, возникающей при опережающем развитии одного из каналов разряда, и это способствует тому, что все острия в условиях наличия сильного искажения электрического поля дают свои электронные лавины.

Корпус разрядника изготовлен из органического стекла, материал электродов – латунь. При давлении азота 0.3 МПа статическое напряжение самопробоя было не менее 80 кВ.

Инициирование пробоя пускового разрядника осуществлялось с помощью одноканального 25-кВ

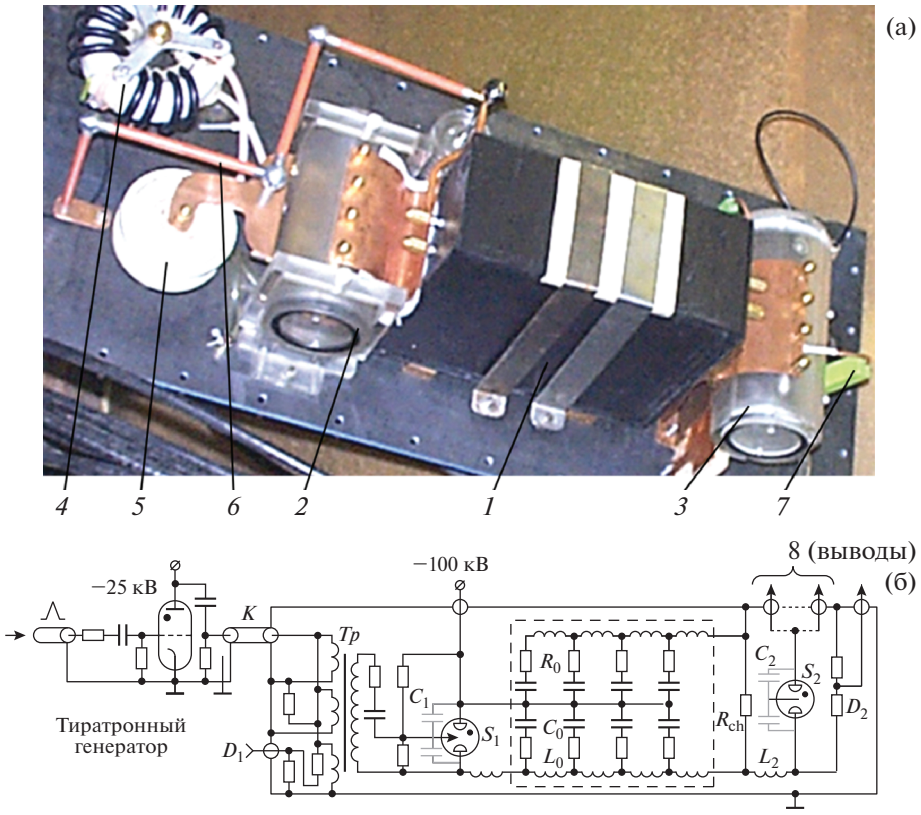


Рис. 2. Многоканальный импульсный генератор 100 кВ, 100 нс, 8 Ом: **а** – внешний вид (*1* – д.ф.л.; *2* – пусковой разрядник; *3* – обостряющий разрядник; *4* – импульсный трансформатор; *5* – разделительный конденсатор; *6* – высоковольтный омический делитель; *7* – зарядный резистор); **б** – принципиальная схема (штриховой линией выделена д.ф.л.).

тиратронного генератора (на основе тиратрона ТГИ-25/1) через передающий кабель *K* на 75 Ом длиной 10 м и повышающий трансформатор *Tp* с коэффициентом передачи 1/3. Трансформатор с обмоткой из трех витков коаксиального кабеля на 75 Ом выполнен на двух ферритовых сердечниках размером D120/D80×20. Внутренний проводник кабеля образовывал вторичную обмотку трансформатора, а внешний проводник, разделенный на три равные части, включенные параллельно, представлял собой первичную обмотку.

Малая индуктивность рассеяния трансформатора позволяла практически без искажения передавать 400-нс импульс запуска с фронтом ~40 нс на управляющий электрод разрядника. Осциллограммы напряжения и тока одноканального генератора при работе на кабельную линию 75 Ом приведены на рис. 3. Для регистрации напряжения использовался омический делитель D_1 на основе резисторов типа ТВО с коэффициентом порядка 620, для тока – низкоомный шунт ~0.11 Ом в оплетке кабеля.

Выход д.ф.л. через линейный обостряющий газовый разрядник S_2 подсоединяется к передающей 8-канальной кабельной линии длиной 10 м из кабелей по 75 Ом. Разрядник S_2 аналогичен разряднику S_1, с тем лишь отличием, что к верхнему электроду подсоединены центральные жилы коаксиальных кабелей 75 Ом.

На рис. 4 представлены экспериментальные (*1*–*4*) осциллограммы импульса напряжения на

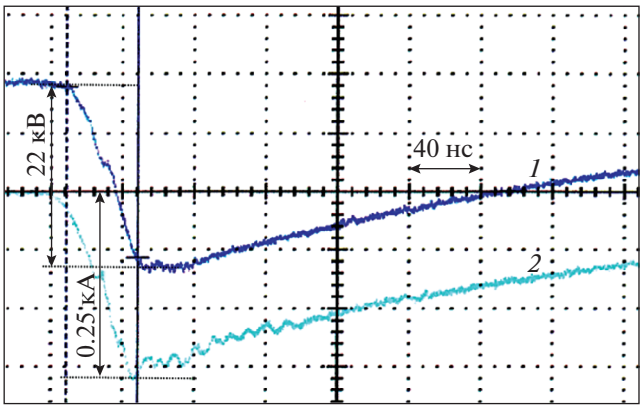


Рис. 3. Осциллограммы напряжения (*1*) и тока (*2*) одноканального генератора при работе на кабельную линию 75 Ом.

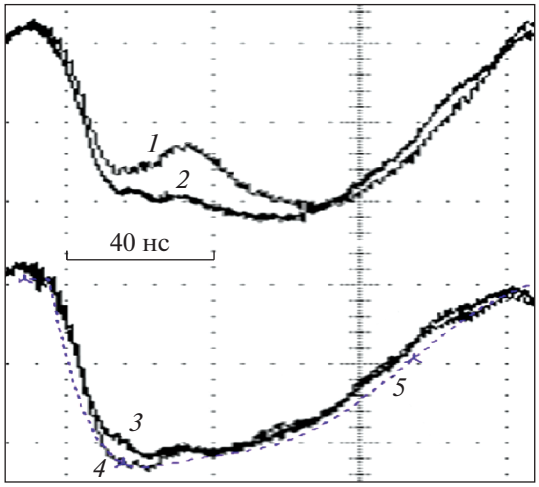


Рис. 4. Осциллограммы импульса напряжения на согласованной нагрузке (9 Ом): *1* – 0.2 МПа, *2* – 0.3 МПа, *3* – 0.4 МПа, *4* – 0.5 МПа; *5* – расчетная кривая. $U_0 = 80$ кВ.

согласованной с кабелями общей активной нагрузке (R ~ 9 Ом), полученные при различном давлении газа в обостряющем разряднике S_2 и фиксированном зарядном напряжении, а также расчетная кривая (*5*). Для регистрации сигналов напряжения использовался внутренний делитель D_2 из сопротивлений ТВО с коэффициентами примерно 2100 и аналогичный внешний делитель (на рис. 2б не показан).

Давление в разряднике S_1 не изменялось. Повышение давления в обостряющем разряднике S_2 с 0.2 до 0.5 МПа приводит не столько к изменению длительности фронта импульса на нагрузке, сколько к возрастанию напряжения сразу за фронтом. Видно, что диапазон давлений около 0.4 МПа наиболее оптимален для обострения фронта импульса от д.ф.л. Суммарное время задержки срабатывания обоих разрядников было ~50 нс и практически не зависело от давления в обостряющем разряднике. Разброс задержки срабатывания обоих разрядников не превышал 10 нс.

С увеличением давления газа в обострителе длительность фронта уменьшается и достигает 8 нс при давлении 0.5 МПа, а амплитуда приближается к уровню зарядного напряжения. При этом выравнивается провал на вершине импульса напряжения. Поскольку обостритель коммутируется в режиме самопробоя, определяющим условием для обострения фронта выходного импульса является плотность газа. Создаются условия инициирования газового разряда при максимуме напряжения на выходе линии.

Макет многоканального наносекундного генератора использовался в качестве пускового устройства для коммутации малоиндуктивного газового рельсового разрядника на напряжение 100 кВ и ток до 1 МА с разбросом времени включения ~15 нс [7]. Импульс напряжения от генератора поступал по восьми кабельным линиям 75 Ом длиной 10 м на секции среднего управляющего электрода газового разрядника, при этом число кабельных линий соответствовало числу управляющих секций. Развязка секций газовыми промежутками способствовала коммутации в многоканальном режиме. Рабочее давление газа (азот N_2) в разряднике – до 0.6 МПа.

Следующий вариант многоканального наносекундного генератора использовался при экспериментальных исследованиях компактного источника экстремального ультрафиолетового излучения на малоиндуктивных капиллярных разрядах. Для транспортировки энергии генератора к источнику также использовалась 8-канальная кабельная линия длиной 10 м. Обладая низким суммарным волновым сопротивлением, линия одновременно позволила исключить влияние отраженного сигнала на процессы ионизации газа в капилляре.

Исследования основного разряда в источнике излучения при изменении давления газа на шесть порядков показали, что малоиндуктивный капиллярный разряд является универсальным источником коллимированного излучения в диапазоне от мягкого рентгеновского до видимого красно-оранжевого диапазонов, включая экстремальный ультрафиолет [8–10]. Перестройка источника на нужный диапазон спектра достигается простым изменением начального давления газа. Этот результат показал возможность создания многодиапазонного источника коллимированного излучения для биофизики, бактериологии и других областей науки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЫ ГЕНЕРАТОРА

При исследовании процессов формирования импульсов использовалась схема замещения генератора с сосредоточенными параметрами (рис. 2б). В расчетной схеме 8-канальная кабельная линия заменена активной нагрузкой $R_н$, установленной между выходом разрядника S_2 и корпусом. Численное моделирование переходных процессов в электрических схемах замещения проводилось с использованием графического редактора PSpice Schematics Version 9.2, входящего в программный комплекс OrCAD v. 9.2 2000 г., который предназначен для сквозного проектирования аналоговых, цифровых и смешанных аналого-цифровых устройств.

В состав расчетной схемы были включены следующие элементы: разрядник S_1 с межэлектродными емкостями C_1, индуктивность ошиновки L_1,

д.ф.л., индуктивность ошиновки L_2, разрядник S_2 с межэлектродными емкостями C_2, зарядное сопротивление R_{ch}. В процессе численных исследований определялось влияние индуктивностей ошиновки и обостряющей емкости на фронт формируемого импульса напряжения при работе генератора в режиме холостого хода и работе на согласованное сопротивление. Проведена оценка индуктивностей ошиновки L_1, L_2 и разрядников S_1, S_2, а также времени коммутации разрядников. Для уменьшения индуктивности соединения выводов формирующей линии с разрядниками выполнены плоскими шинами с изоляцией из полиэтиленовой пленки (120 мкм) с общей толщиной до 1 мм.

Поскольку соединения д.ф.л. с разрядниками имеют сложную геометрию, для приближенного расчета индуктивностей были использованы схемы замещения разрядных цепей в виде треугольных контуров с применением формул работы [11].

С учетом визуального контроля количества эрозионных пятен на электродах индуктивности L_1 и L_2 разрядников S_1 и S_2 определены в пределах 16–30 нГн и 28–40 нГн, соответственно. С учетом индуктивности кабельных разделок индуктивность разрядника S_2 имеет несколько большее значение.

В качестве аналогов разрядников S_1 и S_2 в расчетной схеме используются “открытые ключи” с сопротивлением в открытом состоянии порядка $1 \cdot 10^6$ Ом и в закрытом состоянии порядка $4 \cdot 10^{-3}$ Ом. Расчетное время перехода ключей из открытого состояния в закрытое определено по методике [12] с учетом времени коммутации газового промежутка для разрядника с резко неоднородным полем в многоканальном режиме работы.

Для пускового разрядника S_1 расчетное время коммутации $t_к$ составляет примерно 2–3 нс, для разрядника S_2 – около 4 нс. В расчетах использовались измеренные величины емкостей C_1 и C_2 разрядников, составляющие порядка 9.6 пФ.

Расчетные кривые напряжения на выходе генератора без обостряющего разрядника S_2 представлены на рис. 5 при $L_1 = 30$ нГн, $t_к = 4$ нс для двух вариантов активной нагрузки $R_н = 8$ Ом и 2.4 кОм. Для согласованного режима, когда сопротивление нагрузки $R_н$ и волновое сопротивление д.ф.л. равны 8 Ом, амплитуда напряжения на выходе линии д.ф.л. равна зарядному напряжению $U_0 = 80$ кВ, длительность импульса 103 нс, длительность фронта 34 нс. При сопротивлении нагрузки 2.4 кОм амплитуда напряжения удваивается.

Моделирование показало слабую зависимость длительности фронта импульса от длительности времени коммутации ключей S_1 и S_2.

Известно, что задержка срабатывания газового разрядника при прочих равных условиях находится в прямой зависимости от давления. Для сокращения длительности фронта импульса необходимо обеспечить условия, при которых разрядник срабатывает в диапазоне, близком к максимуму напряжения. В расчетной схеме такие условия обеспечиваются временной задержкой коммутации ключа S_2 относительно S_1.

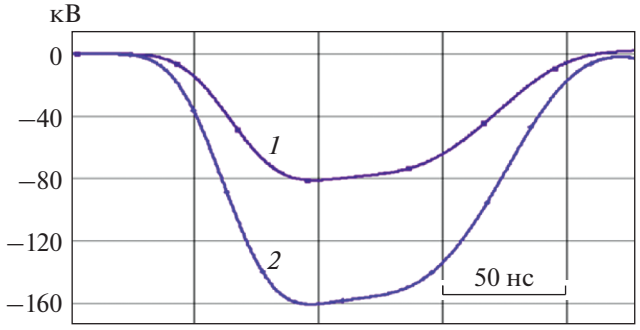


Рис. 5. Расчетное напряжение на выходе генератора при $U_0 = 80$ кВ: *1* – $R_н = 8$ Ом; *2* – $R_н = 2.4$ кОм.

Ниже представлена зависимость параметров генератора от временной задержки между ключами:

$t_з$, нс	40	50	60	70	80	90	100
$\tau_ф$, нс	30	21	8	7	6	6	6
$U_{вых}$, кВ	22	55	99	137	158	163	163
$U_н$, кВ	82	82	83	95	96	96	96
$t_{имп}$, нс	102	102	94	83	74	65	56

откуда видно, что длительность фронта импульса напряжения $\tau_ф$ на нагрузке изменяется от 30 до 6 нс при изменении времени задержки между ключами $t_з$ от 40 до 100 нс соответственно.

Наилучшие параметры генератора достигаются при времени задержки $t_з$, близком к 90 нс. При этой задержке амплитуда напряжения на выходе генератора $U_{вых}$ равна 163 кВ, что соответствует максимуму амплитуды для зарядного напряжения 80 кВ. Напряжение на нагрузке $U_н$ равно 96 кВ при длительности фронта $\tau_ф$, близкой к 6 нс. Расчетная амплитуда тока в нагрузке составляет 10.6 кА. Следует отметить, что длительность импульса напряжения на нагрузке сокращается с увеличением задержки начального момента включения ключа S_2, что приводит к некоторому уменьшению энергии, передаваемой в нагрузку. В обостряющем разряднике с фиксированным зазором обеспечивается давление газа для коммутации при напряжениях, близких к максимальному значению д.ф.л. В результате сокращается длительность фронта и всего импульса.

Характерные расчетные сигналы напряжений в этом режиме представлены на рис. 6, который иллюстрирует соответствие расчетных амплитуд

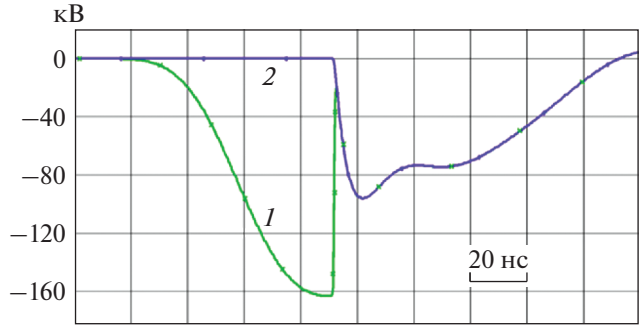


Рис. 6. Расчетные напряжения при задержке 90 нс: *1* – на выходе генератора; *2* – на нагрузке 8 Ом.

выходных напряжений генератора относительно зарядного напряжения.

Следует отметить близость по форме и амплитуде импульсов напряжений генератора, полученных экспериментально (рис. 4) и модельными расчетами (рис. 6). В экспериментах достигнута минимальная длительность фронта импульса напряжения 8 нс при давлении газа 0.5 МПа в обостряющем разряднике S_2. В расчетной модели такая длительность фронта обеспечивается при задержке срабатывания обострителя >50 нс. В этих условиях коммутация обострителя происходит на максимуме амплитуды выходного напряжения линии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты испытаний многоканального генератора показали высокую стабильность работы газовых разрядников. При давлении азота 0.5 МПа в обостряющем разряднике длительность фронта импульса выходного напряжения 8 нс.

Численное моделирование переходных процессов показало близкое соответствие параметров генератора и эквивалентной схемы его замещения. Расчетная модель может использоваться для оптимизации конструктивных параметров генератора на этапе его проектирования.

Компактный генератор может найти применение в качестве источника для накачки лазеров, питания импульсных ускорителей, источников высокочастотного излучения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № 18-08-01066.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Месяц Г.А., Осипов В.В., Тарасенко В.Ф.* Импульсные газовые лазеры. М.: Наука, 1991.
2. *Бурцев В.А., Василевский М.А., Водовозов В.М., Комин С.Н., Морозов Е.А., Осеевский М.Э., Целищева В.И.* // Электричество. 1989. № 7. С. 85.
3. *Кучинский Г.С., Вехорева Л.Т., Шилин О.В.* // Электричество. 1997. № 9. С. 18.
4. *Bolshakov E.P., Burtsev V.A., Getman D.V., Sedov A.V.* // Digest of technical papers on Twenty-Fifth Int. Power Modulator Symposium and 2002 High-Voltage Workshop. 2002. California. P. 394.
5. *Бурцев В.А., Бурцев А.А., Бельский Д.Б., Большаков Е.П., Бронзов Т.П., Ваганов С.А., Гетман Д.В., Елисеев С.И., Калинин Н.В., Самохвалов А.А., Сергушичев К.А., Смирнов А.А., Тимшина М.В.* // ПТЭ. 2020. № 4. С. 23.
6. *Большаков Е.П., Бурцев В.А.* Патент на изобретение 2247453 РФ // Опубл. 27.02.2005. Бюл. № 6.
7. *Burtsev V.A., Babalin A.I., Bolshakov E.P., Dubianskiy V.A., Getman D.V., Kozlov V.P., Sedov A.V., Chernobrovin V.I., Pecherskiy O.P.* // Pulsed Power Plasma Science Conference (PPPS-2001). 17–22 June 2001, Las Vegas, Nevada, USA. IEEE. 2002. V. 1. P. 1750. https://doi.org/10.1109/PPPS.2001.1001910
8. *Burtsev V.A., Bolshakov E.P., Ivanov A.S., Kalinin N.V., Kubasov V.A., Kurunov R.F., Smirnov V.G., Chernobrovin V.I.* // 9-th International Conference on x-ray lasers ICXRL-2004. 24–28 May 2004, Beijing, China. Paper 02505. 2004. P. 167.
9. *Бурцев В.А., Большаков Е.П., Иванов А.С., Калинин Н.В., Кубасов В.А., Курунов Р.Ф., Смирнов В.Г., Чернобровин В.И.* // Материалы конференции “Физика экстремального состояния вещества – 2005”. Черноголовка, 2005. С. 212.
10. *Burtsev V.A., Bolshakov E.P., Ivanov A.S., Kalinin N.V., Kubasov V.A., Kurunov R.F., Smirnov V.G., Chernobrovin V.I., Engelko V.I.* // Intern. Conf. Pulsed Power PPC-2005. 13–18 July 2005, Monterey, USA. Paper 10010. 2005.
11. *Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А.* Расчет индуктивностей. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
12. *Кремнев В.В., Месяц Г.А.* Методы умножения и трансформации импульсов в сильноточной электронике. Новосибирск: Наука, 1987.

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 6, с. 32–39

ЭЛЕКТРОНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 629.7.052

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВ ПЕЛЕНГА И КРЕНА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПО ОРТОГОНАЛЬНО ЛИНЕЙНО ПОЛЯРИЗОВАННЫМ СИГНАЛАМ РАДИОМАЯКА

© 2020 г. В. Л. Гулько[a], А. А. Мещеряков[a,*]

[a] *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)*
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 40
**e-mail: msch@rts.tusur.ru*

Поступила в редакцию 18.05.2020 г.
После доработки 28.05.2020 г.
Принята к публикации 30.05.2020 г.

Для определения углов пеленга и крена летательного аппарата ортогонально линейно поляризованные сигналы радиомаяка одновременно излучаются из двух пространственно разнесенных в горизонтальной плоскости точек. Результирующие векторные сигналы радиомаяка принимаются приемной антенной на борту летательного аппарата. В облучателе антенны установлен поляризационный модулятор в виде ферритового вращателя плоскости поляризации. Оценка пеленга и крена производится на выходе приемника на частоте, кратной частоте поляризационной модуляции принимаемых сигналов радиомаяка. Описан макет установки, реализующей этот метод. Приведены результаты измерения навигационных элементов. Среднеквадратическая ошибка измерения пеленга составила 0.48°, а угла крена – 0.35°.

DOI: 10.31857/S0032816220060087

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных путей расширения функциональных возможностей радионавигационного бортового и наземного оборудования является практическое использование векторной природы радиосигналов как носителя навигационной информации.

Существующие методы определения углового положения летательного аппарата (л.а.) в радиомаячных системах (РМС) навигации основаны на использовании амплитудных, частотных, фазовых или временных характеристик сигналов радиомаяка [1]. Для измерения таких навигационных элементов, как крен и тангаж, применяются дорогостоящие и технически сложные инерциальные средства навигации [2]. Поляризационные же характеристики сигналов радиомаяка практически не используются [3].

В работах [4–6] для оценки пеленга [4, 5] и крена [6] подвижного объекта поляризационно-модуляционным методом исследовалась возможность использования ортогонально линейно поляризованных сигналов радиомаяка. Суть метода заключается в том, что сигналы с вертикальной и горизонтальной поляризациями с равными амплитудами, длинами волн λ и известными начальными фазами излучались одновременно из двух точек, пространственно разнесенных в горизонтальной плоскости на расстоянии d.

Результирующие векторные сигналы радиомаяка принимались на борту л.а. приемной антенной, в одноканальный с.в.ч.-тракт которой установлен поляризационный модулятор в виде механически вращающейся с частотой Ω секцией круглого волновода с размещенной внутри полуволновой $\lambda/2$ [4, 6] или четвертьволновой $\lambda/4$ [5] фазовыми пластинами. Вращение фазовой пластины осуществляется шаговым двигателем, механически связанным с секцией круглого волновода. Пеленг α определялся как угол между нормалью к середине базы d и направлением на подвижный объект по формуле [4–6]

$$\alpha = \pm \arcsin\left(\frac{\lambda}{2\pi d}\Delta\varphi\right) \pm n\pi, \qquad (1)$$

где $n = 0, 1, 2...$; $\Delta\varphi$ – высокочастотная разность фаз между ортогонально линейно поляризованными сигналами в точке приема на борту подвижного объекта.

Разность фаз $\Delta\varphi$, входящую в (1), было предложено в [5] оценивать косвенным способом на выходе приемника по амплитуде спектральной составляющей на частоте 2Ω в случае использования четвертьволновой фазовой пластины, а в [4, 6] при использовании полуволновой фазовой пластины

по амплитуде спектральной составляющей на частоте 4Ω, а крен γ по ее фазе [6]:

$$\gamma, \text{ рад} = \pm\frac{\varphi_{4\Omega}}{2}. \quad (2)$$

В [7] были получены экспериментальные оценки измерения пеленга по ортогонально линейно поляризованным сигналам радиомаяка с использованием поляризационного модулятора в виде вращающейся полуволновой фазовой пластины. Среднеквадратическая ошибка измерения пеленга составила величину 0.38°.

Недостаток методов [4–7] заключается в том, что для осуществления поляризационной модуляции принимаемых сигналов радиомаяка требуется механическое вращение секции круглого волновода, которое в свою очередь ограничено техническими возможностями шагового двигателя. Это приводит к ограничению быстродействия измерения навигационных элементов и усложнению конструкции самого поляризационного модулятора.

В данной статье рассмотрен метод измерения пеленга и угла крена летательного аппарата с использованием электронного поляризационного модулятора в виде ферритового вращателя плоскости поляризации и приводятся экспериментальные оценки точности измерения навигационных элементов.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Пусть радиомаяк из двух точек, пространственно разнесенных в горизонтальной плоскости на расстояние d, одновременно излучает ортогонально линейно поляризованные сигналы с вертикальной и горизонтальной поляризациями с равными амплитудами, начальными фазами и длинами волн λ. Тогда результирующий сигнал на направлении α может быть представлен в линейном поляризационном базисе в векторной форме [4–6]:

$$\mathbf{E}_\text{P} = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix} 1 \\ e^{j\Delta\varphi} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $\Delta\varphi = \dfrac{2\pi d}{\lambda}\sin\alpha$ – фазовый сдвиг между ортогонально линейно поляризованными сигналами в точке приема на борту л.а.

Наличие множителя $1/\sqrt{2}$ в выражении (3) обусловлено принятой для удобства единичной интенсивностью результирующего сигнала.

В [4] отмечается, что результирующий сигнал (3) в точке приема на борту л.а. имеет в общем случае эллиптическую поляризацию. При этом угол ориентации эллипса поляризации β может принимать два фиксированных значения: первое – $\beta_1 = \pi/4$, а второе – $\beta_2 = 3\pi/4$. При переходе через круговое состояние поляризации результирующего сигнала происходит скачок изменения угла ориентации эллипса поляризации от значения $\beta_1 = \pi/4$ к значению $\beta_2 = 3\pi/4$ и наоборот.

Для описания взаимодействия результирующего сигнала (3) с с.в.ч.-элементами приемной антенны с установленным поляризационным модулятором в виде ферритового (фарадеевского) вращателя плоскости поляризации воспользуемся оператором Джонса [8].

Ферритовый вращатель плоскости поляризации представляет собой отрезок круглого волновода, в центральной части которого помещен ферритовый стержень. Он расположен по оси продольного магнитного поля катушки с током, намотанной с внешней стороны волновода [8]. Гармоническое изменение тока подмагничивания в таком модуляторе приводит вследствие эффекта Фарадея к вращению плоскости поляризации волны, распространяющейся по круглому волноводу, не изменяя при этом параметров эллиптичности волны. Частота вращения плоскости поляризации выходной волны задается частотой гармонического изменения тока подмагничивания в модуляторе. Угол поворота плоскости поляризации определяется величиной протекающего тока через катушку и длиной ферритового стержня (или стержней, размещенных друг за другом) [8].

Предположим, что л.а. имеет в общем случае крен γ, определяемый как угол между правой относительно центра масс поперечной полуосью л.а. и горизонтальной плоскостью [6, 9]. Тогда вектор Джонса сигнала на выходе линейного поляризатора, представляющего собой переход с круглого волновода на прямоугольный, можно записать в линейном поляризационном базисе как результат преобразования:

$$\mathbf{E}_\text{out}(\theta) = C\frac{1}{\sqrt{2}}[\Pi][\text{M}][R(\pm\gamma)]\mathbf{E}_\text{P}, \quad (4)$$

где $\mathbf{E}_\text{P}$ – вектор Джонса результирующего сигнала (3), определенный в линейном поляризационном базисе; $[R(\pm\gamma)] = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \mp\sin\gamma \\ \pm\sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix}$ – оператор поворота на угол крена $\pm\gamma$; $+\gamma$ – положительный угол крена, когда правая поперечная полуось (или правое крыло л.а.) находится ниже горизонтальной плоскости; $-\gamma$ – отрицательный угол крена, когда правая поперечная полуось (или правое крыло л.а.) находится выше горизонтальной плоскости [9]; $[\text{M}] = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$ – оператор Джонса поляризационного модулятора в виде ферритового вращателя плоскости поляризации волны на угол $\theta = \Omega t$, являющийся гармонической функцией напряженности магнитного поля H и заданный в линейном

поляризационном базисе [8]; $[\Pi] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ – оператор Джонса линейного поляризатора (переход с круглого волновода на прямоугольный) с горизонтальной собственной поляризацией, совпадающей с правой поперечной полуосью л.а., заданный в линейном поляризационном базисе; C – постоянная, учитывающая потенциал радиомаяка и расстояние от него до л.а.

Выполнив в (4) необходимые преобразования, получим вектор Джонса выходного сигнала линейного поляризатора в виде

$$\mathbf{E}_{\text{out}}(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2}} C \begin{bmatrix} \cos(\theta \pm \gamma) + \sin(\theta \pm \gamma) e^{j\Delta\varphi} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

С учетом (5) сигнал на входе приемника как функция углового положения θ будет иметь вид

$$\dot{E}_{\text{вх}}(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2}} C \{\cos(\theta \pm \gamma) + \sin(\theta \pm \gamma) e^{j\Delta\varphi}\}. \quad (6)$$

Амплитуда сигнала на выходе приемника с логарифмической амплитудной характеристикой и линейным детектором равна

$$A(\theta) = \lg \frac{1}{\sqrt{2}} C + \lg |\cos(\theta \pm \gamma) + \sin(\theta \pm \gamma) e^{j\Delta\varphi}|. \quad (7)$$

После преобразований (7), с учетом того, что уровень сигнала в случае логарифмического приемника обычно измеряют в децибелах, при $\theta = \Omega t$ получим

$$A(\Omega t),\ \text{дБ} = 20 \lg \frac{1}{\sqrt{2}} C + 10 \lg\{1 + \cos\Delta\varphi \sin(2\Omega t \pm 2\gamma)\}. \quad (8)$$

Из (8) видно, что амплитуда сигнала на выходе приемника с логарифмической амплитудной характеристикой промодулирована удвоенной частотой 2Ω вращения плоскости поляризации сигнала. Глубина модуляции зависит от разности фаз Δφ и определяет поляризационное состояние результирующего сигнала (3) в точке приема на борту л.а. Поэтому в спектре огибающей выходного сигнала приемника будет присутствовать спектральная составляющая на частоте 2Ω. Причем ее амплитуда $A_{2\Omega}$ определяется косинусом разности фаз Δφ и, с учетом (1), связана с оценкой угловой координатой α* соотношением

$$\alpha^* = \pm \arcsin \frac{\lambda}{2\pi d} \Delta\varphi^* \pm n\pi, \quad (9)$$

где Δφ* – оценка разности фаз Δφ, полученная косвенным путем через измерение амплитуды $A_{2\Omega}$ спектральной составляющей на частоте 2Ω.

В то же время ее фаза $\varphi_{2\Omega}$ с учетом (8) определяется только углом крена γ и связана с ним соотношением

$$\gamma,\ \text{рад} = \pm \frac{\varphi_{2\Omega}}{2}. \quad (10)$$

Необходимо отметить, что фаза $\varphi_{2\Omega}$ отсчитывается от фазы опорного сигнала $\sin 2\Omega t$, определяемой задающим генератором вращения плоскости поляризации сигнала.

При этом амплитуда $A_{2\Omega}$ и фаза $\varphi_{2\Omega}$ не зависят от потенциала радиомаяка и расстояния от него до л.а. Энергетические параметры определяют постоянную составляющую сигнала на выходе логарифмического приемника.

Однако множитель $\cos\Delta\varphi$, входящий в (8), является четной функцией угловой координаты α, что не позволяет определять сторону отклонения л.а. от нулевого направления (α = 0), совпадающего с нормалью к середине базы d. Чтобы избежать этого недостатка, предлагается излучать в этом направлении ортогонально линейно поляризованные сигналы с равными амплитудами и длинами волн, но с начальной разностью фаз $\Delta\varphi_0 = \pm\pi/2$. В этом случае результирующий сигнал (3) в точке приема на борту л.а. на равносигнальном направлении при α = 0 будет поляризован по левому или правому кругу. Подставляя в (8) постоянный начальный фазовый сдвиг $\Delta\varphi_0$, например, π/2 получим

$$A(\Omega t),\ \text{дБ} = 20 \lg \frac{1}{\sqrt{2}} C + 10 \lg\{1 - \sin\Delta\varphi \sin(2\Omega t \pm 2\gamma)\}. \quad (11)$$

В этом случае в (11) амплитуда спектральной составляющей на частоте $A_{2\Omega}$ определяется синусом разности фаз Δφ и является нечетной функцией угловой координаты α.

Соотношение (11) позволяет рассчитать зависимость амплитуды выходного сигнала логарифмического приемника от углового положения θ плоскости поляризации сигнала поляризационного модулятора для различных значений Δφ и γ и по форме этих зависимостей проследить механизм появления в спектре огибающей выходного сигнала приемника спектральной составляющей на частоте 2Ω.

Результаты расчета приведены на рис. 1 и 2. На рис. 1 кривые *1–3* соответствуют значениям Δφ, равным 0, π/2, π/4 при γ = 0 соответственно, а на рис. 2 – значениям угла крена γ, равным 0°, 15°, –15° для $\Delta\varphi = \pi/2$ соответственно.

Из анализа рис. 1 следует, что при Δφ = 0 (кривая *1*) амплитуда выходного сигнала приемника постоянна и не зависит от углового положения θ плоскости поляризации выходного сигнала поляризационного модулятора. Результирующий сигнал (3) в этом случае, с учетом введенного начального фазового сдвига $\Delta\varphi_0 = \pi/2$, на нулевом направлении α = 0 поляризован по кругу, и амплитуда $A_{2\Omega}$ равна нулю.

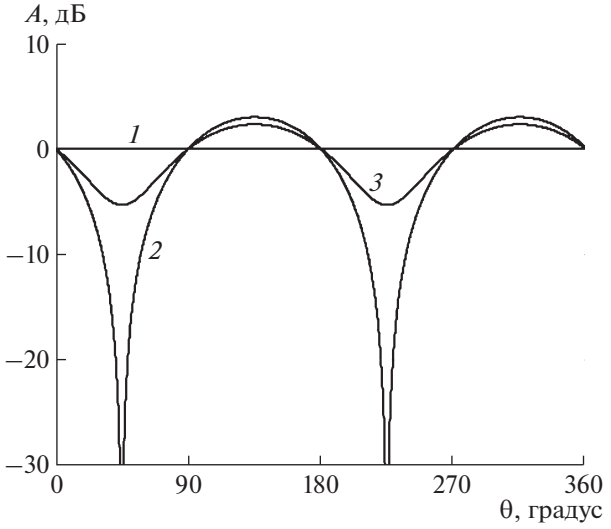


Рис. 1. Зависимости амплитуды выходного сигнала приемника от угла ориентации плоскости поляризации θ при Δφ, равном 0 (*1*), π/2 (*2*) и π/4 (*3*).

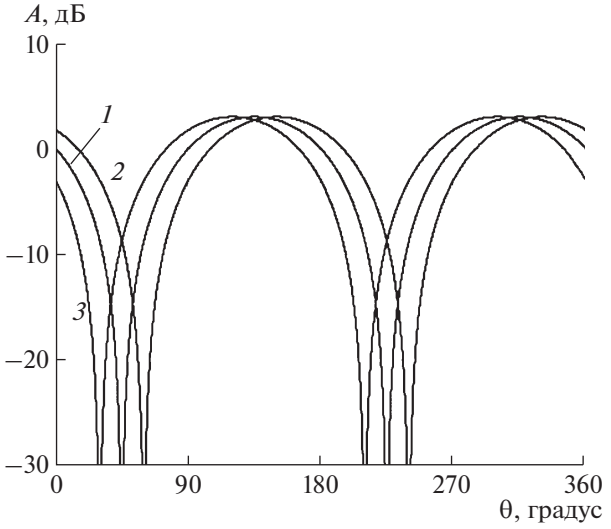


Рис. 2. Зависимости амплитуды выходного сигнала приемника от угла ориентации плоскости поляризации θ при угле крена γ, равном 0° (*1*), 15° (*2*) и −15° (3) для $\Delta\varphi = \pi/2$.

В случае, если $\Delta\varphi = \pi/2$ (кривая *2*), амплитудная модуляция сигнала на выходе приемника достигает 100% глубины. За полный оборот вращения плоскости поляризации θ амплитуда сигнала становится промодулированной удвоенной частотой вращения 2Ω плоскости поляризации сигнала. Поэтому в спектре огибающей выходного сигнала приемника будет присутствовать информативная спектральная составляющая на частоте 2Ω и ее амплитуда $A_{2\Omega}$ достигает своего максимального значения. При этом результирующий сигнал (3) в точке приема на борту л.а. будет поляризован линейно. В промежуточном случае, когда $\Delta\varphi = \pi/4$ (кривая *3*), результирующий сигнал (3) будет иметь эллиптическую поляризацию, и амплитуда $A_{2\Omega}$ принимает промежуточные значения.

Аналогичные зависимости наблюдаются для отрицательных значений Δφ, равных $-\pi/2$ и $-\pi/4$ при $\gamma = 0$, с той лишь разницей, что они становятся в противофазе по сравнению с кривыми *2* и *3* на рис. 1, полученными для положительных значений Δφ, равных $\pi/2$ и $\pi/4$ соответственно. Как отмечается в [4], это обусловлено тем, что при переходе через круговое состояние поляризации результирующего сигнала (3) происходит скачкообразное изменение угла ориентации эллипса поляризации в пространстве от значения $\pi/4$ к значению $3\pi/4$ и наоборот. Это обстоятельство, с учетом введенного постоянного начального фазового сдвига $\Delta\varphi_0 = \pi/2$, позволяет определить сторону отклонения л.а. от нулевого направления $\alpha = 0$.

Из анализа рис. 2 (кривые *1*–*3*) следует, что когда, например, $\Delta\varphi = \pi/2$, т.е. результирующий сигнал (3) поляризован в точке приема линейно, то, как отмечалось выше, амплитудная модуляция сигнала на выходе логарифмического приемника достигает 100% глубины. При этом различные значения угла крена γ не влияют на форму этой зависимости и не влияют на глубину амплитудной модуляции сигнала, а определяют только его сдвиг по фазе на удвоенный угол крена γ л.а. Аналогичные зависимости наблюдаются для значений $\Delta\varphi \neq 0$. Это обстоятельство подтверждает правильность полученного соотношения (8), характеризующего связь угла крена л.а. с фазой спектральной составляющей на частоте 2Ω.

Амплитуда $A_{2\Omega}$ на выходе логарифмического приемника может быть рассчитана путем применения преобразования Фурье к соотношению (11), как

$$A_{2\Omega},\ \text{дБ} = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} A(\Omega t)\sin 2\Omega t d\Omega t. \qquad (12)$$

Результаты расчета зависимости $A_{2\Omega}$ от разности фаз Δφ при $\Delta\varphi_0 = \pi/2$ и угла крена $\gamma = 0$ приведены на рис. 3 (кривая *1*).

Из рис. 3 видно, что амплитуда достигает своего максимального значения 8.69 дБ при $\Delta\varphi = \pm\pi/2$, а при $\Delta\varphi = 0$ амплитуда $A_{2\Omega}$ равна 0 дБ. В первом случае, как уже отмечалось выше, результирующий сигнал (3) в точке приема на л.а. поляризован линейно, во втором – поляризован по кругу.

На рис. 3 (кривая *2*) показана зависимость начальной фазы $\varphi_{02\Omega}$ спектральной составляющей на частоте 2Ω от разности фаз Δφ. В диапазоне изменения $-\pi/2 \le \Delta\varphi < 0$ ее начальная фаза совпадает с фазой опорного сигнала $\sin 2\Omega t$ и скачком из-

меняется на π, находясь с ней в противофазе при $0 < \Delta\varphi \le \pi/2$. Последнее позволяет определить сторону (знак) отклонения л.а. от нулевого направления $\alpha = 0$ и расширить диапазон однозначного измерения амплитуды $A_{2\Omega}$ до $-\pi/2 < \Delta\varphi \le \pi/2$. Так как диапазон однозначного измерения $\Delta\varphi$ в данном случае составляет π, то с учетом (9) сектор однозначного измерения угла α для $n = 0$ определяется как

$$\Delta\alpha = \pm\arcsin\left(\frac{\lambda}{2d}\right). \qquad (13)$$

Таким образом, зависимость амплитуды $A_{2\Omega}$ от разности фаз $\Delta\varphi$ по сути является пеленгационной характеристикой угломерной РМС и оценка угловой координаты α определяется соотношением (9).

Причем крутизна пеленгационной характеристики, а следовательно, и потенциальная точность измерения пеленга л.а. определяются пространственным разносом d точек излучений, а не направленными свойствами приемной бортовой антенны, где габариты и вес имеют первостепенное значение.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА УГЛОМЕРНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-МОДУЛЯЦИОННОЙ РМС

С целью проверки результатов теоретических исследований и получения экспериментальных оценок точности определения углов пеленга α и крена γ л.а. был создан макет угломерной поляризационно-модуляционной РМС, схема которой представлена на рис. 4.

Макет содержит наземный радиомаяк, одновременно излучающий из двух точек пространственно разнесенных в горизонтальной плоскости на расстояние d ортогонально линейно поляризованные сигналы с вертикальной и горизонтальной поляризациями и расположенный в точке с известными координатами, а также бортовое с.в.ч. одноканальное приемное устройство на основе самолетной метеонавигационной радиолокационной станции “Гроза-26” с штатным фарадеевским вращателем плоскости поляризации, расположенным внутри облучателя антенны [10] и работающим в новом для себя режиме поляризационной модуляции. Частота модуляции $\Omega = 40$ Гц.

Приемная бортовая антенна представляла собой параболическое зеркало ∅760 мм. Ширина диаграммы направленности антенны по уровню половинной мощности составляла 3°, коэффициент усиления антенны 25 дБ, чувствительность приемника -120 дБ/Вт.

Угломерная поляризационно-модуляционная РМС работает следующим образом.

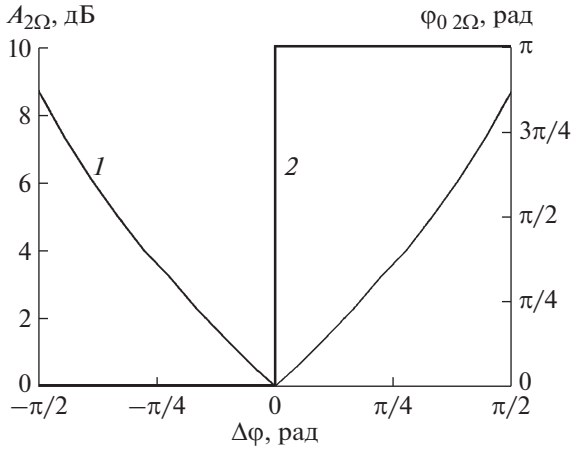


Рис. 3. Зависимости амплитуды $A_{2\Omega}$ (*1*) и начальной фазы $\varphi_{02\Omega}$ (*2*) спектральной составляющей на частоте 2Ω от разности фаз $\Delta\varphi$ при $\Delta\varphi_0 = \pi/2$.

Стандартный генератор высокочастотных сигналов Г4-126 (*Г*) излучает, например, непрерывные сигналы на частоте $f = 9370$ МГц, с мощностью излучения $P = 10$ мВт, которые через вращающееся в горизонтальной плоскости волноводное соединение *ВВС* поступают на вход двойного волноводного Т-образного разветвителя *ВР*, где разветвляются на два равных по амплитуде сигнала.

С выходов разветвителя *ВР* один сигнал через волноводную скрутку на 90° *ВС* поступает на рупорную передающую антенну *РАГП*, другой – через фазовращатель на $\pi/2$ *Ф* на рупорную передающую антенну *РАВП*. В результате в пространство в направлении α излучаются ортогонально линейно поляризованные сигналы с вертикальной и горизонтальной поляризациями с равными амплитудами, длинами волн, но с начальной разностью фаз $\Delta\varphi_0 = \pi/2$. Внешний вид передающих рупорных антенн радиомаяка показан на рис. 5.

На борту л.а. результирующий сигнал, вектор Джонса которого в направлении α имеет вид (3), принимается всеполяризованной бортовой зеркальной антенной *БЗА* и поступает на сигнальный вход поляризационного модулятора *ФВ*, который выполнен в виде ферритового вращателя плоскости поляризации проходящего через него результирующего сигнала.

В волноводном линейном поляризаторе *ВЛП*, представляющем собой переход с волновода круглого сечения на прямоугольный, происходит выделение горизонтально поляризованной составляющей модулированного по углу ориентации $\theta = \Omega t$ плоскости поляризации сигнала. Частота модуляции задается генератором *ЗГ*, который формирует управляющий гармонический сигнал $\sin\Omega t$ с частотой модуляции $\Omega = 40$ Гц, по-

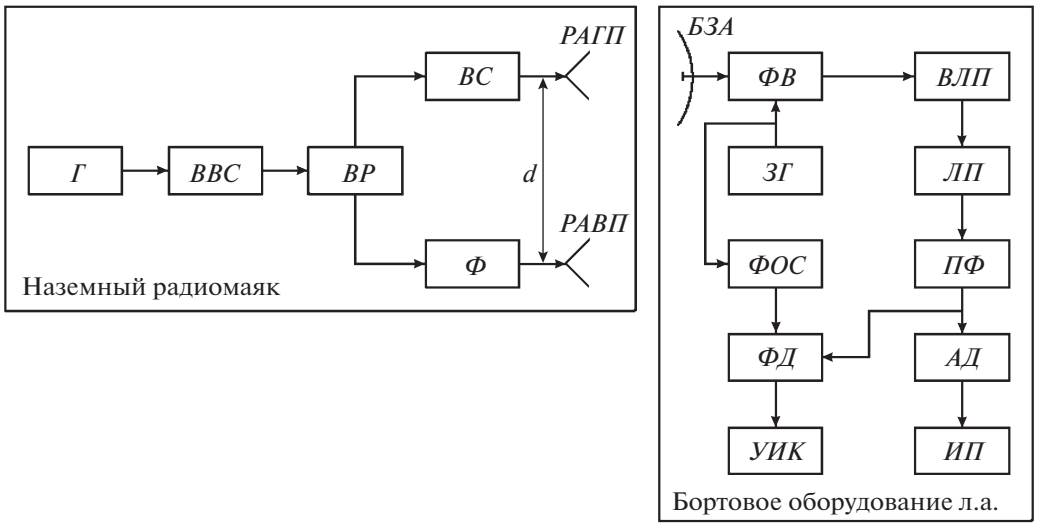


Рис. 4. Функциональная схема угломерной поляризационно-модуляционной радиомаячной системы измерения углов пеленга α и крена γ летательного аппарата. *Г* – высокочастотный генератор; *ВВС* – вращающееся волноводное соединение; *ВР* – двойной волноводный Т-образный разветвитель; *ВС* – волноводная скрутка на 90°; *РАГП* – рупорная антенна горизонтальной поляризации; *Ф* – фазовращатель на π/2; *РАВП* – рупорная антенна вертикальной поляризации; *БЗА* – бортовая зеркальная приемная антенна; *ФВ* – ферритовый вращатель плоскости поляризации; *ВЛП* – волноводный линейный поляризатор; *ЗГ* – низкочастотный задающий генератор опорного сигнала $\sin\Omega t$; *ЛП* – логарифмический приемник; *ФОС* – формирователь опорного сигнала $\sin 2\Omega t$; *ПФ* – полосовой фильтр на частоте 2Ω; *ФД* – фазовый детектор; *АД* – амплитудный детектор; *ИУК* – индикатор угла крена γ; *ИП* – индикатор пеленга α.

даваемый на управляющий вход поляризационного модулятора *ФВ*.

Выходной сигнал поляризатора *ВЛП* со стороны прямоугольного волновода, имеющий вид (5), поступает на вход логарифмического приемника *ЛП*, где происходит его детектирование. Внешний вид макета бортового оборудования л.а. показан на рис. 6.

В результате вращения плоскости поляризации входных сигналов с частотой Ω на выходе логарифмического приемника *ЛП* формируется продетектированный сигнал, модулированный по амплитуде удвоенной частотой вращения плоскости поляризации 2Ω, который имеет вид (8). При этом глубина амплитудной модуляции выходного сигнала приемника зависит только от разности фаз Δφ между ортогонально линейно поляризованными сигналами, излучаемыми передающими рупорными антеннами *РАГП* и *РАВП*, и определяет поляризационное состояние результирующего сигнала (3) в точке приема на борту л.а.

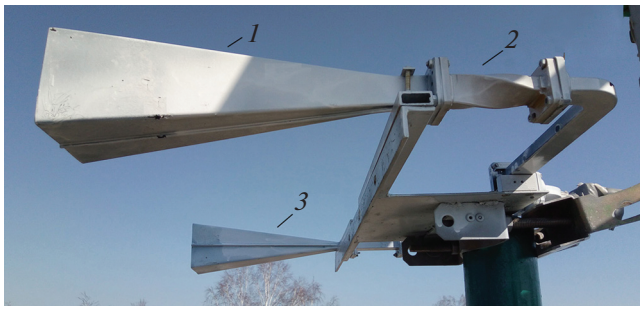


Рис. 5. Внешний вид передающих рупорных антенн радиомаяка. *1* – рупорная антенна горизонтальной поляризации; *2* – волноводная скрутка на 90°; *3* – рупорная антенна вертикальной поляризации.

В формирователе *ФОС*, по выходным сигналам генератора *ЗГ*, формируется опорное напряжение $\sin 2\Omega t$, необходимое для работы фазового детектора *ФД*. Полосовой фильтр *ПФ*, настроенный на частоту $2\Omega = 80$ Гц, выделяет спектральную составляющую на частоте 2Ω, содержащуюся в спектре огибающей выходного сигнала логарифмического приемника *ЛП*, и которая несет навигационную информацию о пеленге и крене л.а. В детекторах *ФД* и *АД* осуществляется ее фазовое и амплитудное детектирование, а их выходные сигналы регистрируются соответственно индикаторами *ИУК* и *ИП*, шкалы которых проградуированы в соответствии с установленными связями (10) и (9) в градусах угла крена γ и пеленга α.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Наземный радиомаяк был установлен на расстоянии 3 км от бортового радиоприемного устройства.

Для имитации изменения пеленга α рупорные передающие антенны *РАГП* и *РАВП* радиомаяка (рис. 4) через Т-образный волноводный разветвитель *ВР* подключались к выходу вращающего в го-

Рис. 6. Внешний вид макета бортового оборудования л.а. на базе самолетной радиолокационной станции “Гроза-26”. *1* – зеркальная антенна; *2* – облучатель с встроенным ферритовым вращателем плоскости поляризации; *3* – антенная колонка; *4* – приемоизмерительная аппаратура.

ризонтальной плоскости волноводного сочленения *ВВС*. Это позволяло изменять ориентацию равносигнального направления совпадающего с перпендикуляром к середине базы d, образованной рупорными передающими антеннами *РАГП* и *РАВП* с дискретом 0.5°. База d составляла 20 см. Для имитации изменения угла крена γ вращающееся волноводное соединение *ВВС* устанавливалось с возможностью вращения рупорных передающих антенн *РАГП* и *РАВП* с дискретом 1° в вертикальной плоскости.

Приемная антенна *БЗА* бортового радиоприемного устройства была установлена на крыше радиотехнического корпуса ТУСУР на высоте 18 м и ориентировалась в направлении на радиомаяк. Частота поляризационной модуляции принимаемых результирующих сигналов определялась задающим генератором *ЗГ* и равнялась $\Omega = 40$ Гц. На выходе логарифмического приемника *ЛП* выделялась спектральная составляющая на частоте $2\Omega = 80$ Гц и измерялись ее амплитуда $A_{2\Omega}$ и ее фаза $\varphi_{2\Omega}$, которые соответственно связаны с пеленгом α и углом крена γ.

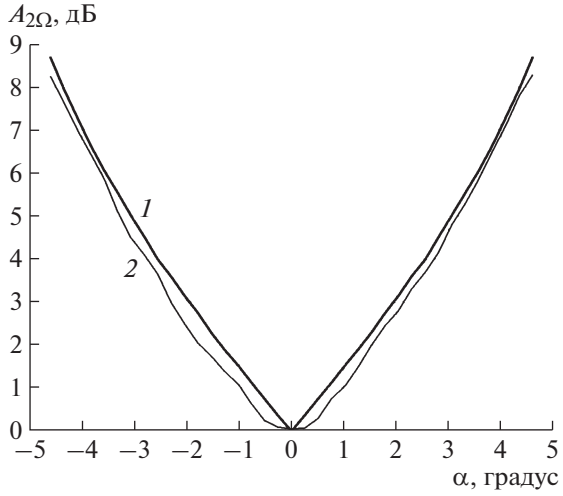


Рис. 7. Зависимость амплитуды спектральной составляющей на частоте 2Ω от пеленга α. *1* – теория; *2* – эксперимент.

К наблюдаемым параметрам относились средний, за несколько периодов поляризационной модуляции, уровень принимаемых сигналов, превышающий собственные шумы приемника на 20 дБ, а также амплитуда и фаза спектральной составляющей на частоте 2Ω. Их оценка формировалась путем усреднения тридцатисекундных реализаций.

На рис. 7 приведены результаты измерения зависимости амплитуды спектральной составляющей на частоте 2Ω от пеленга α. Теоретическая зависимость (кривая *1*) получена расчетным путем в соответствии с (12) для отношения $d/\lambda = 7.8$ при $\lambda = 3.2$ см и $d = 20$ см, а кривая *2* – экспериментально.

Видно, что зависимости носят неоднозначный характер. Ширина сектора однозначного измерения α зависит от отношения d/λ и определения соотношением (13).

Из рис. 7 следует, что экспериментально полученная зависимость близка к теоретической. Среднеквадратическое отклонение измеряемого параметра α от заданного составило величину $\sigma_\alpha = 0.48°$ при секторе однозначного измерения $\Delta\alpha = 9.2°$.

На рис. 8 приведены зависимости фазы $\varphi_{2\Omega}$ спектральной составляющей на частоте 2Ω от угла крена γ, где теоретическая зависимость (кривая *1*) получена расчетным путем в соответствии с (10), а кривая *2* – экспериментальная.

Из рис. 8 следует, что экспериментально измеренная зависимость также близка к теоретической. Среднеквадратическое отклонение измеренного угла крена γ от заданного составила величину $\sigma_\gamma = 0.35°$.

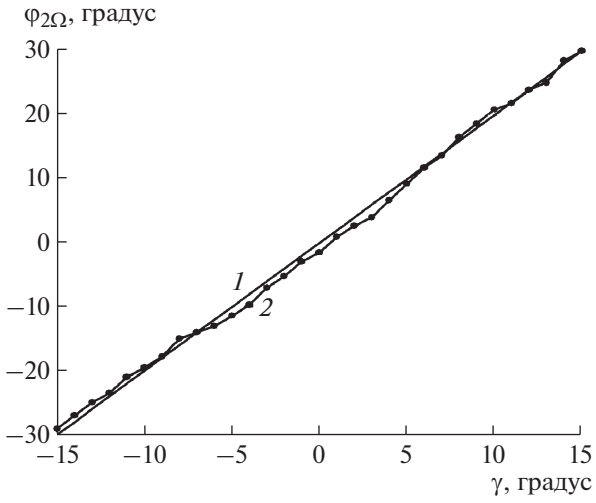


Рис. 8. Зависимость фазы $\varphi_{2\Omega}$ от угла крена γ. *1* – теория; *2* – эксперимент.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен и опробован поляризационно-модуляционный метод оценки пеленга и угла крена л.а. по излученным ортогонально линейно поляризованным сигналам радиомаяка с использованием ферритового вращателя плоскости поляризации с частотой Ω принимаемых сигналов на борту л.а.

2. Теоретически исследована и установлена связь амплитуды и фазы спектральной составляющей на частоте 2Ω с пеленгом α и углом крена γ л.а. для исследуемого поляризационного модулятора.

3. Получены экспериментальные оценки точности измерения не только пеленга, но и угла крена л.а. при использовании электронного поляризационного модулятора в виде фарадеевского вращателя плоскости поляризации.

4. Ошибка измерения пеленга предложенным методом по сравнению с методом, использующим поляризационный модулятор в виде механически вращающейся полуволновой фазовой пластины [7], имеет несколько большую величину, что вероятно обусловлено нелинейностью модуляционной характеристики ферритового вращателя плоскости поляризации.

Однако при этом быстродействие измерений выше и определяется частотой поляризационной модуляции принимаемых сигналов.

5. Описанный метод может найти применение в системах ориентации летательного аппарата при заходе на посадку по приборам, а также в космической навигации при стыковке космических аппаратов. Метод технически просто реализуем, так как измерение навигационных элементов 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.

При выполнении работ использовано оборудование ЦКП “Импульс” (проект поддержки Министерством науки и образования РФ № 075-15-2019-1644, ID RFMEFI62119X002).

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. *Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А.* Поляризация радиоволн “Радиолокационная поляриметрия”. М.: Радиотехника, 2007.
4. *Гулько В.Л., Мещеряков А.А.* // Доклады ТУСУР. 2015. № 2. С. 5.
5. *Gulko V.L., Mescheryakov A.A.* // Russian Physics Journal. 2020. V. 62. № 12. P. 2340. https://doi.org/10.1007/s11182-020-01986-9
6. *Гулько В.Л., Мещеряков А.А.* // Доклады ТУСУР. 2016. Т. 19. № 1. С. 5. https://doi.org/10.21293/1818-0442-2016-19-1-5-8
7. *Гулько В.Л., Мещеряков А.А.* // XXV Всероссийская открытая научная конференция “Распространение радиоволн”. 2016. Т. 3. С. 21.
8. *Богородский В.В., Конорейкин Д.Б., Козлов А.И.* Поляризация рассеянного и собственного радиоизлучения земных покровов. Л.: Гидрометеоиздат, 1981.
9. *Ярлыков М.С.* Статистическая теория радионавигации. М.: Радио и связь, 1985.
10. *Давыдов П.С., Козлов А.И., Уваров В.С., Лутин Э.А., Груздев Б.Г.* Радиолокационные системы воздушных судов. М.: Транспорт, 1988.

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 6, с. 40–45

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 537.3

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ РЕГУЛЯТОР АНОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ГИРОТРОНА

© 2020 г. Б. З. Мовшевич[a], А. И. Цветков[a,*], М. Ю. Глявин[a], А. П. Фокин[a]

[a] *Институт прикладной физики РАН*
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46
**e-mail: tsvetkov@ipfran.ru*

Поступила в редакцию 23.05.2020 г.
После доработки 01.06.2020 г.
Принята к публикации 03.06.2020 г.

Описывается устройство и приводятся данные испытаний блока быстрой регулировки анодного напряжения гиротрона. Блок позволяет пропорционально управляющему сигналу изменять напряжение на изолированном аноде гиротрона, имеющем емкость относительно земли 100–200 пФ, в пределах от 0.4 до 1.6 кВ с характерным временем около 1 мкс. Это позволяет использовать данный блок в цепи обратной связи системы фазовой автоподстройки частоты гиротрона. Управление частотой и фазой излучения открывает возможности для создания мощных высокостабильных генераторов и синхронизации большого числа гиротронов, что представляется актуальным, например, для задач высокоградиентного ускорения электронов.

DOI: 10.31857/S0032816220060142

ВВЕДЕНИЕ

Последние годы ознаменовались значительным прогрессом в развитии гиротронов, которые обеспечивают рекордные значения непрерывной и средней мощности в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн. Основной областью применения гиротронов остается нагрев плазмы и поддержание тока плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза. В настоящее время несколько стран, включая Россию, разрабатывают гиротроны, имеющие выходную мощность 1 МВт на частоте 170 ГГц в непрерывном режиме с к.п.д. 50% для международного реактора ИТЭР [1, 2]. Кроме того, гиротроны умеренной мощности активно используются в источниках ионов [3], для технологических [4] и ряда других приложений.

Весьма привлекательной представляется возможность практически неограниченного повышения мощности за счет когерентного сложения излучения от нескольких гиротронов. Для этого необходимо обеспечить высокую стабильность их выходных параметров, а также возможность управления частотой и фазой каждого из этих генераторов.

Еще одно потенциальное приложение мощных гиротронов – их использование в перспективных высокоградиентных ускорителях заряженных частиц [5]. Здесь также помимо высокой выходной мощности необходимо обеспечить синхронизацию фаз излучения гиротронов, питающих разные ускоряющие секции. При этом сдвиг фаз между соседними секциями должен управляться с высокой точностью.

Наконец, гиротроны с высокой стабильностью выходных параметров востребованы для диагностики плазмы методом коллективного томсоновского рассеяния [6].

Все перечисленные задачи можно решить путем захвата частоты гиротрона внешним (ведущим) высокостабильным источником с умеренным уровнем выходной мощности. Для этой цели разработан и в настоящее время находится на стадии изготовления гиротрон-драйвер [7] с частотой 170 ГГц и выходной мощностью около 25 кВт, сигналом которого предполагается захватить гиротрон мегаваттного уровня мощности.

Для стабилизации частоты излучения может быть использована схема фазовой автоподстройки частоты (ф.а.п.ч.) на основе цепи обратной связи с внешним высокостабильным опорным генератором малой мощности. Для этого необходимо обеспечить механизм быстрого регулирования частоты гиротрона.

Существуют различные способы управления частотой генерации гиротронов [8–11]. В силу релятивистской зависимости циклотронной частоты электронов от их энергии очевидными являются схемы, в которых частота регулируется за счет изменения катодного (ускоряющего) напря-

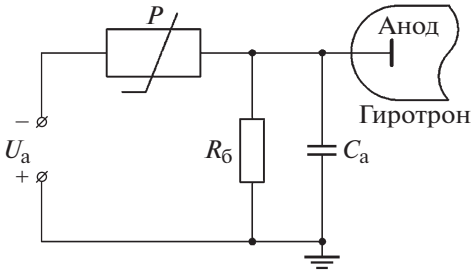


Рис. 1. Схема регулирования анодного напряжения гиротрона. *P* – быстродействующий регулятор анодного напряжения. C_a – емкость между анодом гиротрона и землей.

жения, т.е. энергии электронов. При этом для компенсации быстрых уходов частоты необходимо за короткие характерные времена изменять параметры мощного высоковольтного источника, что драматически увеличивает его стоимость и неизбежно приводит к существенному изменению мощности выходного излучения.

Другой способ возможен благодаря использованию в гиротронах схемы рекуперации – подаче на электрически изолированный резонатор прибора ускоряющего напряжения. Ток на резонатор практически стремится к нулю, однако большая емкость между коллектором и резонатором налагает дополнительные условия на оконечный каскад управляющей схемы – согласно оценкам, мощность выходного усилителя в полосе управления должна составлять несколько киловатт.

Наиболее экономичным и эффективным способом, обеспечивающим требуемое быстродействие, представляется управление частотой гиротрона с триодной электронной пушкой за счет изменения напряжения на изолированном бестоковом аноде, емкость которого относительно других электродов электронно-оптической системы невелика. В этом случае энергия электронов, которая определяется потенциалом катода относительно резонатора, фиксирована, а изменение анодного напряжения влияет на питч-фактор электронов (отношение вращательной скорости к поступательной). Управление питч-фактором сопровождается изменением как активной, так и реактивной составляющих проводимости электронного пучка относительно рабочей моды резонатора, вследствие чего изменяется частота автоколебаний. Значение частоты при этом остается в пределах полосы, определяемой добротностью рабочей моды резонатора.

При использовании ф.а.п.ч. разница между частотой гиротрона и частотой маломощного опорного генератора детектируется частотно-фазовым детектором. Сигнал ошибки, пропорциональный разности фаз сигналов, усиливается и подается на управляющий анод, смещая частоту гиротрона к частоте высокостабильного опорного сигнала. Подобный подход успешно применялся в работе [12], позволив достигнуть рекордных значений стабильности частоты излучения.

Ниже описывается быстродействующий регулятор анодного напряжения гиротрона, который будет использован в цепи обратной связи системы ф.а.п.ч. для подстройки и стабилизации выходных параметров ведущего гиротрона (мастер-генератора).

РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ РЕГУЛЯТОРА АНОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Основным фактором, оказывающим влияние на стабильность выходных параметров гиротрона, являются пульсации ускоряющего (катодного) напряжения. Измерение нестабильности выходного напряжения катодного источника питания показало, что для компенсации воздействия этого фактора скорость изменения анодного напряжения гиротрона должна составлять по меньшей мере 100 В/мкс.

Для компенсации влияния пульсаций мощного высоковольтного источника питания на стабильность частоты излучения гиротрона-драйвера, а также для подстройки частоты к целевому значению с учетом возможных ошибок изготовления резонатора достаточно иметь возможность регулировки анодного напряжения в диапазоне от 0.4 до 1.6 кВ. В середине диапазона управляющего сигнала фазового детектора системы автоподстройки частоты напряжение на аноде должно составлять 1 кВ, что соответствует номинальному режиму работы гиротрона.

Далее описывается устройство разработанного блока быстрого управления анодным напряжением. Структурная схема регулирования анодного напряжения гиротрона приведена на рис. 1.

Для питания анода гиротрона используется серийный высоковольтный источник регулируемого стабилизированного напряжения U_a. По оценкам для разработанного гиротрона [7] емкость C_a составляет 100–200 пФ.

Для создания цепи разряда емкости C_a, что обусловлено необходимостью быстрого снижения напряжения на аноде гиротрона в процессе стабилизации, параллельно аноду гиротрона подключается балластный резистор $R_б$. Ток, протекающий через резистор $R_б$, должен превышать величину, определяемую соотношением $I_б = C_a dU_a/dt$, составляющую десятки миллиампер.

Исходя из того, что нижняя граница диапазона регулировки анодного напряжения равна 400 В, сопротивление $R_б$ выбрано равным 20 кОм. Рассеиваемая мощность, на которую должен быть рассчитан балластный резистор, составляет не менее

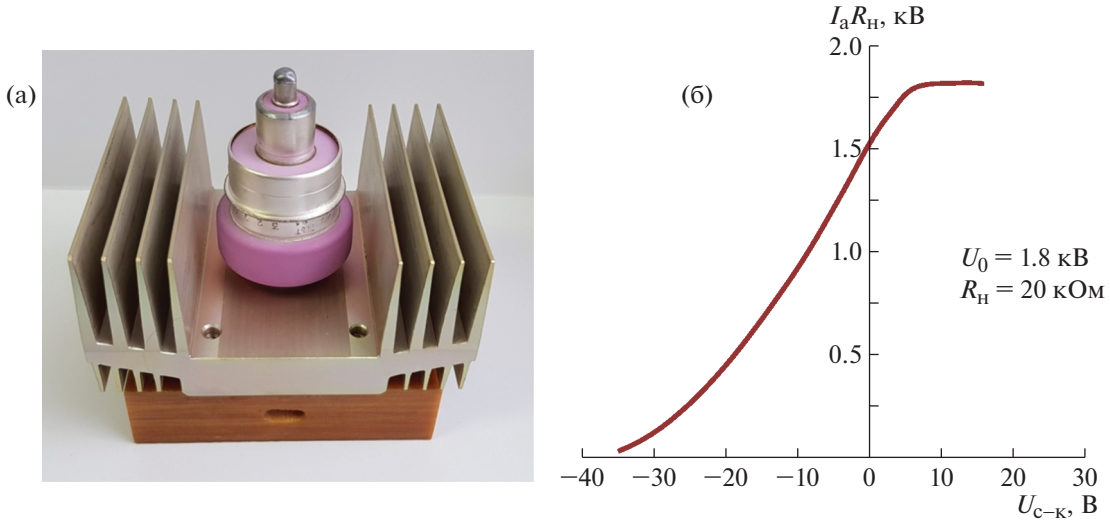


Рис. 2. Внешний вид триодной лампы ГИ-7Б с дополнительным радиатором (**а**); **б** – анодно-сеточная характеристика лампы ГИ-7Б, полученная экспериментально. U_0 = 1.8 кВ – напряжение источника питания; $R_н$ = 20 кОм – резистор, на который была нагружена лампа; $I_а$ – сила тока, протекающего через резистор $R_н$.

$U^2_{а\,max}/R_б \approx 130$ Вт. Из рис. 1 следует, что суммарное значение тока, потребляемое от анодного источника и протекающего через регулятор P, складывается из тока через балластный резистор $R_б$, емкость $C_а$, анодного тока гиротрона и может достигать 200 мА.

Исходя из изложенных выше требований и учитывая, что регулятор находится под потенциалом анода гиротрона, в качестве активного элемента регулятора выбрана электронная лампа – импульсный генераторный металлокерамический триод ГИ-7Б с воздушным охлаждением. На рис. 2а показан внешний вид лампы ГИ-7Б с дополнительным радиатором.

К достоинствам, определившим выбор данной лампы, следует отнести малые габариты (длину <100 мм и диаметр 47 мм); высокую крутизну характеристики (S = 23 мА/В), что значительно упрощает систему управления лампой; величину допустимого анодного напряжения 5 кВ; значительную мощность, рассеиваемую анодом лампы (до 350 Вт); малую мощность накала. Межэлектродные емкости ГИ-7Б составляют единицы пикофарад, что позволяет считать ее практически

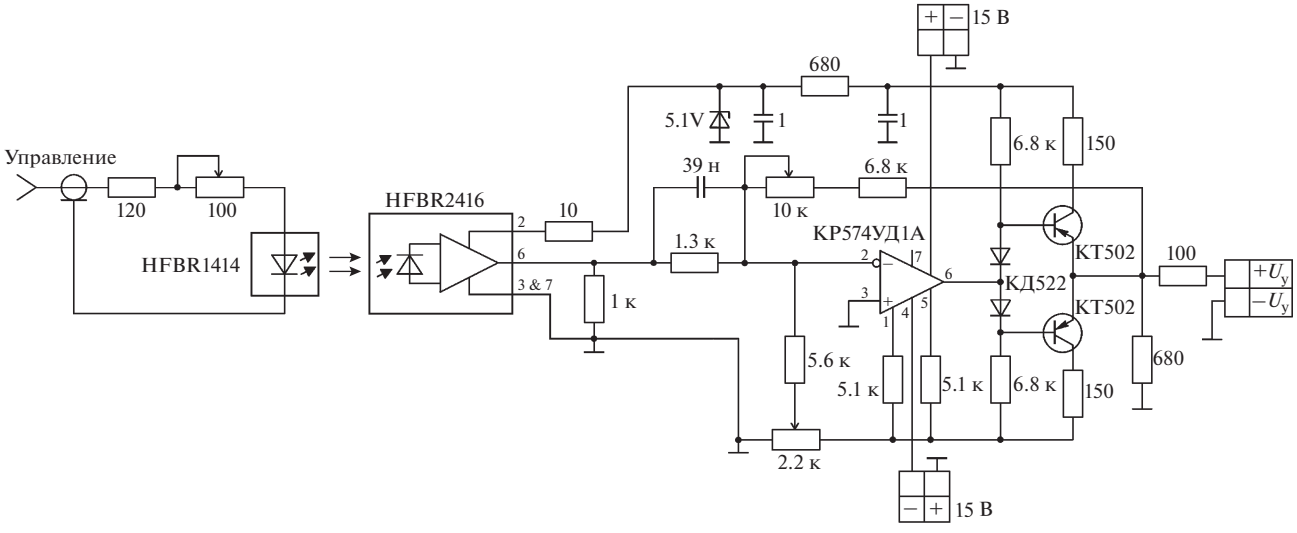


Рис. 3. Принципиальная схема управления лампой-регулятором.

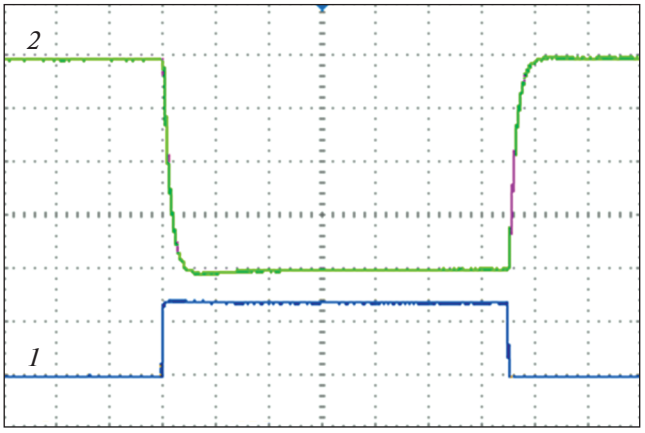


Рис. 4. Осциллограммы входного (*1*) и выходного (*2*) сигналов модуля управления, полученные на макете. Масштаб по вертикали 5 В/деление, по горизонтали – 5 мкс/деление.

безынерционным прибором в рассматриваемом временном диапазоне.

Экспериментально были получены анодно-сеточные характеристики лампы ГИ-7Б, нагруженной на резистор $R_н$ = 20 кОм, при различных напряжениях питания. Наиболее подходящая для рассматриваемой задачи характеристика приведена на рис. 2б. Из рисунка видно, что при напряжении источника питания U_0 = 1.8 кВ требуемый диапазон выходных напряжений от 0.4 до 1.6 кВ обеспечивается при изменении напряжения сетка–катод $U_{с–к}$ лампы от –22 до +2 В. При этом напряжение на нагрузке, равное 1 кВ, достигается при напряжении сетка–катод –8.6 В.

Создав положительное смещение $U_{см}$ = +8.6 В на катоде лампы включением в цепь катода соответствующего стабилитрона, заданное стационарное выходное напряжение 1 кВ обеспечивается при нулевом напряжении управления лампой $U_у$ ($U_у = U_{с–к} + U_{см}$). При этом необходимый диапазон выходных напряжений 0.4–1.6 кВ обеспечивается изменением напряжения $U_у$ в пределах от –12 до +12 В, что, в свою очередь, позволяет управлять лампой непосредственно с помощью умощненного операционного усилителя на серийной микросхеме.

Принципиальная схема устройства, позволяющая трансформировать сигнал с выхода фазового детектора, изменяющийся в диапазоне от 0 до +10 В, в сигнал, необходимый для управления электронной лампой-регулятором (–12 В/+12 В), представлена на рис. 3.

Так как регулирующий триод находится под высоким потенциалом, то и модуль управления лампой, источник накала лампы и вспомогательные источники питания также должны быть изолированы от земли на напряжение не менее 2 кВ. Для изоляции управляющего сигнала с фазового детектора, поступающего на вход модуля управления регулирующей лампы, используется оптоэлектронная развязка. В качестве передатчика сигнала управления применена оптопара HFBR1414/HFBR2416. Для линейного широкополосного усиления сигнала управления использован быстродействующий операционный усилитель КР574УД1А, имеющий скорость нарастания выходного сигнала 50 В/мкс.

Как видно из рис. 3, микросхема КР574УД1А выполняет функции инвертирующего усилителя и сумматора. На инвертирующий вход микросхемы поступает сигнал с оптического приемника и постоянное отрицательное смещение. Отрицательное смещение необходимо для компенсации положительного уровня, присутствующего на выходе волоконно-оптического приемника HFBR2416, и создания разнополярного сигнала на сетке лампы.

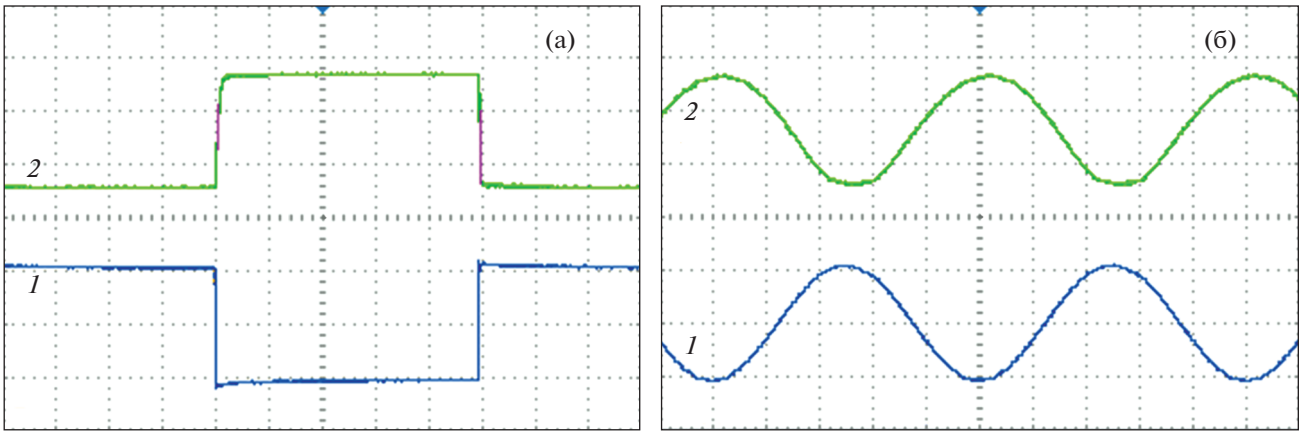


Рис. 5. Осциллограммы импульсов на сетке (*1*) и аноде (*2*) лампы ГИ-7Б при $R_б$ = 20 кОм в отсутствие емкости нагрузки. Масштаб по вертикали: *1* – 10 В/деление, *2* – 500 В/деление, по горизонтали: **а** – 10 мкс/деление, **б** – 2 мкс/деление.

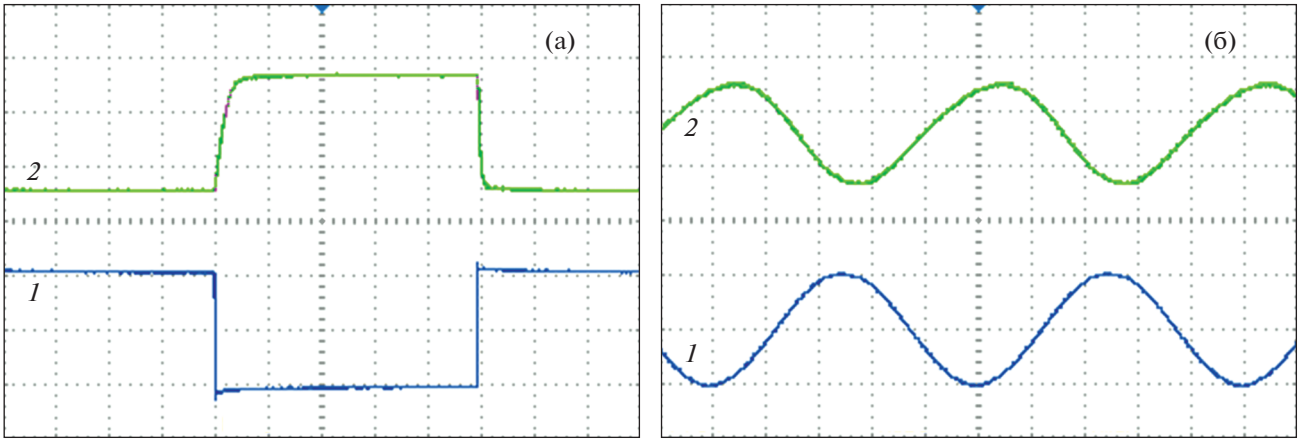


Рис. 6. Осциллограммы импульсов на сетке (*1*) и аноде (*2*) лампы ГИ-7Б при $R_б$ = 20 кОм и емкости 100 пФ, подключенной параллельно. Масштаб по вертикали: *1* – 10 В/деление, *2* – 500 В/деление, горизонтали: **а** – 10 мкс/деление, **б** – 2 мкс/деление.

Осциллограммы входного и выходного сигналов модуля управления, полученные на экспериментальном макете, приведены на рис. 4. Осциллограмма *1* – входной сигнал амплитудой 7 В. На выходе схемы получен разнополярный сигнал, изменяющийся от –10 до +10 В за время <2 мкс (осциллограмма *2*).

На рис. 5 приведены осциллограммы импульсов на сетке лампы ГИ-7Б (осциллограмма *1*) и на ее аноде (осциллограмма *2*) при $R_б$ = 20 кОм и отсутствии емкости нагрузки. На рис. 5а сигналы имеют прямоугольную форму, на рис. 5б – синусоидальную форму с частотой 100 кГц.

На рис. 6 приведены аналогичные осциллограммы с подключенной параллельно нагрузке емкостью 100 пФ, имитирующей паразитную емкость анода гиротрона относительно земли. Из приведенных осциллограмм видно, что наличие паразитной емкости приводит к незначительным искажениям выходных сигналов анодного напряжения, представляющимся несущественными для решения данной задачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и испытан на эквиваленте нагрузки блок быстрого управления анодным напряжением гиротрона. Устройство позволяет изменять напряжение на изолированном аноде гиротрона, имеющем емкость относительно земли 100–200 пФ, в пределах от 0.4 до 1.6 кВ за время <5 мкс пропорционально управляющему сигналу от 0 до +10 В. Полученные характеристики позволяют использовать разработанное устройство в цепи обратной связи системы ф.а.п.ч. для стабилизации выходной частоты гиротрона, используя сигнал фазового детектора в качестве управляющего.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 19-79-30071.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The year of the gyrotron // ITER Newsline 21.04.2020. URL: https://www.iter.org/newsline/-/2931
2. *Darbos C., Ferran A., Bonicelli T., Carannante G., Cavinato M., Cismondi F., Denisov G., Farina D., Gagliardi M., Gandini F., Gassmann T., Goodman T., Hanson G., Henderson M.A., Kajiwara K. et al.* // J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2016. V. 37. Issue 1. P. 4. https://doi.org/10.1007/s10762-015-0211-3
3. *Skalyga V., Izotov I., Sidorov A., Razin S., Zorin V., Tarvainen O., Koivisto H., Kalvas T.* // J. Instrumentation. 2012. V. 7. Article number P10010. https://doi.org/10.1088/1748-0221/7/10/P10010
4. *Bykov Yu.V., Egorov S.V., Eremeev A.G., Kholoptsev V.V., Rybakov K.I., Sorokin A.A.* // J. Am. Ceram. Soc. 2015. V. 98. Issue 11. P. 3518. https://doi.org/10.1111/jace.13809
5. *Nanni E.A., Huang W.R., Hong K.-H., Ravi K., Fallahi A., Moriena G., Miller R.J. Dwayne, Kärtner F.X.* // Nat. Commun. 2015. V. 6(1). Article number 8486. https://doi.org/10.1038/ncomms9486
6. *Saito T., Yamaguchi Y., Tatematsu Y., Fukunari M., Hirobe T., Tanaka S., Shinbayashi R., Shimozuma T., Kubo S., Tanaka K., Nishiura M.* // Plasma Fus. Res. Rapid Commun. 2017. V. 12. P. 1206013. https://doi.org/10.1585/pfr.12.1206013
7. *Denisov G.G., Kuftin A.N., Manuilov V.N., Zavolsky N.A., Chirkov A.V., Soluyanova E.A., Tai E.M., Bakulin M.I., Tsvetkov A.I., Fokin A.P., Novozhilova Yu.V., Movshevich B.Z., Glyavin M.Yu.* // Microw. Opt. Technol. Lett. 2020. V. 62. Issue 6. P. 2137. https://doi.org/10.1002/mop.32330

8. *Müller G., Erckmann V., Thumm M., Wilhelm R., Dorst D., Melkus W.* // Proc. 13th Symp. on Fusion Technology (SOFT). Varese. 1984. V. 2. P. 811.
9. *Fernandez A., Glyavin M., Martin R., Novozhilova J., Ofitserov M., Petelin M.I.* // 4th IEEE International Conference on Vacuum Electronics. 2003, Seoul, South Korea. 2003. P. 172. https://doi.org/10.1109/IVEC.2003.1286213
10. *Idehara T., Khutoryan E.M., Ogawa I., Matsuki Y., Fujiwara T.* // Terahertz Science and. Technology. 2016. V. 9. № 4. P. 117. https://doi.org/10.11906/TST.117-130.2016.12.12
11. *Fokin A., Tsvetkov A., Manuilov V., Sedov A., Bozhkov V., Genneberg V., Movshevich B., Glyavin M.* // Rev. Sci. Instrum. 2019. V. 90. Issue 12. P. 24705. https://doi.org/10.1063/1.5132831
12. *Fokin A., Glyavin M., Golubiatnikov G., Lubyako L., Morozkin M., Movschevich B., Tsvetkov A., Denisov G.* // Scientific Reports. 2018. № 8. Article Number 4317. https://doi.org/10.1038/s41598-018-22772-1

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 6, с. 46–52

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 535.241.13:534

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ МНОГОЛУЧЕВОЙ ДИФРАКЦИИ

© 2020 г. С. Н. Антонов[a],*, Ю. Г. Резвов[b],**

[a] *Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН Россия, 141190, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1*

[b] *Новомосковский институт Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева Россия, 301665, Новомосковск Тульской обл., ул. Дружбы, 8*

**e-mail: olga-ant@yandex.ru*

***e-mail: rezvovyug@mail.ru*

Поступила в редакцию 19.03.2020 г.
После доработки 30.04.2020 г.
Принята к публикации 04.05.2020 г.

Рассмотрена многолучевая акустооптическая брэгговская дифракция лазерного излучения – деление исходного луча на несколько независимо управляемых лучей (каналов) без принципиальных потерь световой мощности. Получены практически значимые соотношения, определяющие условия реализации многолучевой дифракции и ее основные параметры. Показано, что необходимым условием является вид управляющего радиосигнала, близкий к частотно(фазово)-модулированному. Экспериментальные исследования проведены на поляризационно-нечувствительном акустооптическом дефлекторе на кристалле парателлурита. Показаны практические применения многолучевой дифракции: лазерное нанесение изображений, многоканальная передача (переключения) оптической информации, формирование профиля лазерного луча.

DOI: 10.31857/S0032816220050262

1. ВВЕДЕНИЕ

Прикладная акустооптика (а.о.) – это управление параметрами оптического излучения ультразвуковыми волнами, распространяющимися в прозрачных средах [1–8]. Практически значимый оптический диапазон излучения простирается от ультрафиолета до десятков микрометров, акустический – от единиц до сотен мегагерц. Хорошо изучено использование а.о. в анализаторах радиосигналов, приборах спектральной обработки оптических изображений, в оптических процессорах и др. Принципиальными особенностями а.о.-приборов являются: возможность управления интенсивным (десятки и сотни киловатт на квадратный сантиметр) лазерным излучением, высокое быстродействие (до десятков наносекунд), отсутствие механически перемещаемых элементов, малые вносимые световые потери (единицы процентов), небольшие габариты и вес.

Развитие лазерных источников определяет и совершенствование методов управления параметрами излучения: интенсивностью лазерного луча (модуляторы) и его угловым положением (дефлекторы). Акустооптические модуляторы используются для модуляции добротности лазеров, внешней модуляции излучения, а.о.-дефлекторы (а.о.д.) предназначены для сканирования лазерного луча в системах обработки материалов и лазерного вывода изображений.

Основным материалом современных а.о.-приборов является монокристалл парателлурита (TeO_2). Кристалл обладает феноменально большой величиной а.о.-качества – $M_2 = 1000 \cdot 10^{-18}$ с^3/г (при дифракции света на медленной сдвиговой акустической моде); широким диапазоном прозрачности, от 0.35 до 5 мкм; высокой лучевой стойкостью; развитой технологией производства больших (со стороной более 20 мм) однородных кристаллов [9]. Теория а.о. на кристалле TeO_2 и ряд важных реализаций изучены и описаны весьма полно в работах [1, 2, 10–13].

Целью настоящей работы является рассмотрение а.о.-метода деления лазерного луча на несколько независимо управляемых лучей (каналов) без принципиальных потерь световой мощности. В теоретической части работы сообщается о принципах многолучевой а.о.-дифракции и делении луча с ее помощью, в практической – сделан обзор некоторых применений метода.

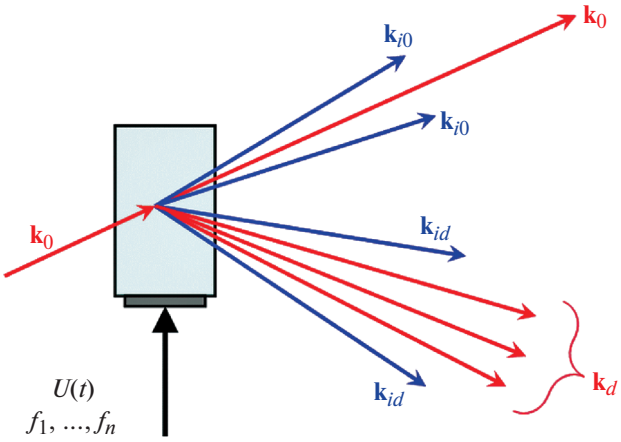


Рис. 1. Основные $\mathbf{k}_d$ и интермодуляционные $\mathbf{k}_{id}$ дифракционные лучи при подаче многочастотного акустического сигнала $U(t)$.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ МНОГОЛУЧЕВОЙ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ БРЭГГОВСКОЙ ДИФРАКЦИИ

2.1. Принцип многолучевой дифракции

Фотоупругий эффект (основа а.о.) в большинстве сред при рабочих интенсивностях звуковых волн линеен. Однако мощность дифракционных порядков от входной акустической мощности при дифракции на одночастотном акустическом сигнале зависит нелинейно [6]. В случае многочастотного сигнала, помимо основных дифракционных порядков, соответствующих акустическим частотам, в общем случае появляются интермодуляционные порядки [14–18]. Например, если сигнал состоит из частот f_1, f_2, f_3, то появятся дополнительные интермодуляционные дифракционные порядки, соответствующие комбинационным частотам: $2f_1 - f_2$, $2f_1 + f_2 - 2f_3$ и т.д. Кроме того, мощность каждого из основных порядков нелинейным образом зависит от мощности соответствующей ему компоненты входного сигнала. Таким образом, при эффективности дифракции более 40% дифракционное поле является сложной функцией амплитуд и фаз всех частотных компонент сигнала (рис. 1).

Исходное излучение $\mathbf{k}_0$ под воздействием звукового поля, образованного сигналом $U(t)$, создает световое поле:

– набор основных лучей $\mathbf{k}_d$, каждый из которых соответствует генерируемым частотам $f_1, \ldots, f_n$;

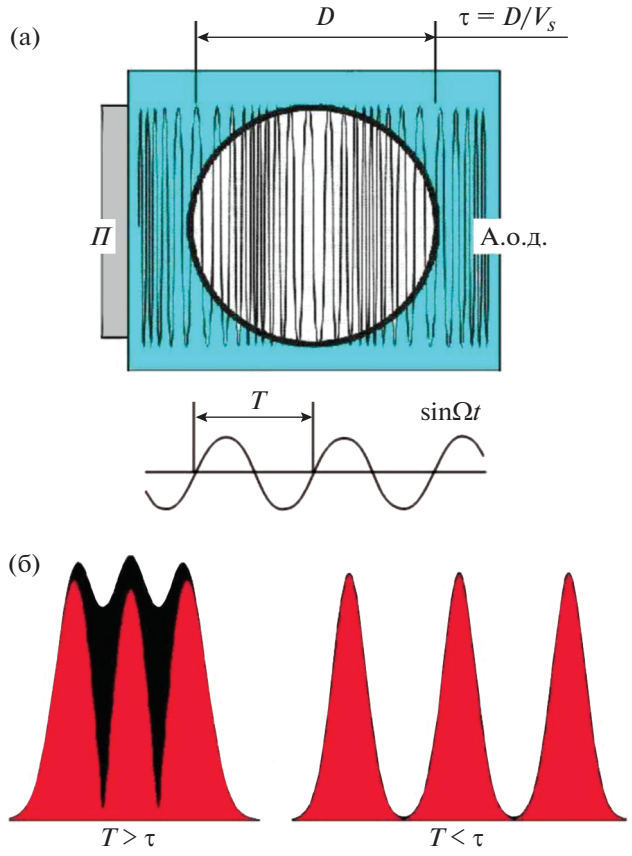


Рис. 2. Иллюстрация условия разделения лучей на примере трех радиочастот: **а** – *П* – пьезопреобразователь, D – апертура светового луча, V_s и T – соответственно скорость и период модуляции звуковой волны, τ – время прохода звуковой волны через световую апертуру; **б** – угловая картина дифракционного поля: слева – лучи перекрываются с образованием областей интерференции, справа – лучи разделены.

– набор интермодуляционных порядков $\mathbf{k}_{id}$ в поле основных дифракционных лучей и $\mathbf{k}_{i0}$ вблизи нулевого порядка.

Физический принцип, позволяющий подавлять интермодуляционные эффекты и формировать высокоэффективное многолучевое а.о.-поле, состоит в том, что акустическая волна подвергается угловой (частотной, фазовой) модуляции [19, 20]. В результате исчезают интермодуляционные лучи, и распределение световой мощности по дифрагированным лучам пропорционально распределению мощности по соответствующим частотным компонентам сигнала.

При этом важно соотношение между пространственным периодом модуляции T звука и поперечным размером D светового пучка (рис. 2). Так, если период T больше фазовой задержки τ, то световое поле на выходе дефлектора состоит из про-

странственно пересекающихся лучей, если меньше, то из пространственно разделенных лучей.

2.2. Синтез акустического сигнала для многолучевой дифракции

Сигнал с угловой модуляцией, сформированный аналоговым методом, очень сложен в аппаратной реализации. Был разработан метод цифрового синтеза сигнала (подобного фазово-модулированному) из конечного набора монохроматических частотных компонент.

Из заданного набора частот можно создать различные по форме сигналы в зависимости от их фаз. Поэтому необходимо подобрать такие фазы составляющих, чтобы результирующий сигнал максимально приблизился к оптимальному фазово-модулированному виду. Методика синтеза таких узкополосных сигналов изложена в [21]. При этом фазы составляющих не являются жестко определенными, а подчиняются связям, число которых меньше числа частот. При расширении полосы частот необходима коррекция сигнала, что позволяет дополнительно увеличить полезную эффективность [22].

Если период сигнала в несколько раз меньше времени пересечения звуком световой апертуры, то угловое расстояние между соседними рабочими лучами в несколько раз больше ширины их углового спектра. Многолучевая картина является практически стационарной, испытывая небольшие периодические биения из-за частичного наложения рабочих лучей. Очевидно, что многолучевую картину заданного вида можно масштабировать в угловом пространстве.

Для этого нужно совместно менять угол расходимости падающего света и период акустического сигнала. Поэтому возможна реализация определенной многолучевой диаграммы направленности с различной шириной спектра акустического сигнала. При смене многолучевой картины возникают переходные искажения. Как показано в [23], искажения минимальны, если в момент изменения акустического сигнала его фаза не меняется.

Рис. 3 иллюстрирует деление на 7 равномощных лучей с суммарной полезной эффективностью 85%.

В табл. 1 представлены расчетные параметры, формирующие деление на $N = 8$ и 9 эквидистантных равномощных лучей (k – номера позиций, занимаемых лучами в эквидистантном угловом наборе, $k = 0$ – позиция в центре дифрагированной картины) по критерию максимальной суммарной эффективности. Здесь параметр $\alpha_k = v/\pi$ – доля индекса фазовой модуляции v (и управляющего напряжения) от величины, при которой достигается максимальная эффективность дифракции (близкая к 100%) в одночастотном режиме.

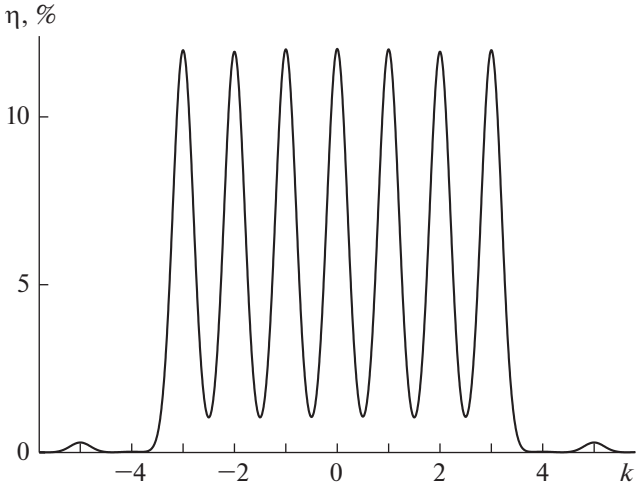


Рис. 3. Эквидистантная 7-лучевая диаграмма направленности.

Реализация наперед заданного набора дифракционных лучей осуществляется исключением из полного набора частот некоторых компонент. Например, исключение из 5-лучевой картины позиций $k = -1$ и 0 позволяет формировать 3-лучевую картину с однолучевой эффективностью 16% (см. результаты эксперимента ниже). Расчетные параметры для этого случая: $\alpha_{-2} = \alpha_1 = \alpha_2 = 0.31$, $\varphi_{-2} = -43°$, $\varphi_1 = -1°$, $\varphi_2 = -152°$.

Важно, что методика позволяет формировать произвольное высокоэффективное многолучевое поле в пределах всего углового диапазона а.о.-устройства.

3. РЕАЛИЗАЦИЯ МНОГОЛУЧЕВОЙ ДИФРАКЦИИ, РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 4.

Таблица 1.

k	α_k, φ_k ($N = 8$) при $\eta_k = 11\%$ и $\Sigma\eta_k = 90\%$	α_k, φ_k ($N = 9$) при $\eta_k = 11\%$ и $\Sigma\eta_k = 97\%$
−4		0.34, −124°
−3	0.32, 53°	0.32, −70°
−2	0.36, 151°	0.32, 36°
−1	0.33, −45°	0.32, 79°
0	0.29, 0°	0.33, 0°
1	0.29, 0°	0.32, 0°
2	0.33, −45°	0.32, −121°
3	0.36, 151°	0.32, 54°
4	0.32, 53°	0.34, −79°

Примечание. η_k – эффективность дифракции в каждый отдельный луч; $\Sigma\eta_k$ – суммарная полезная эффективность.

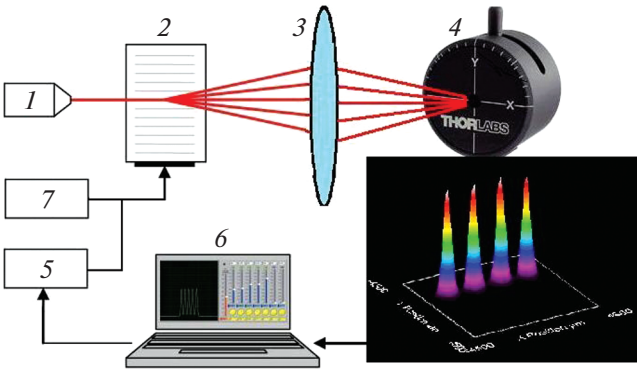


Рис. 4. Схема установки. *1* – одномодовый лазер с длиной волны 1.06 мкм и апертурой 0.6 мм; *2* – а.о.д.; *3* – формирующая оптическая система; *4* – измеритель профиля лазерного луча модели BP104; *5* – усилитель мощности; *6* – компьютер; *7* – осциллограф.

Акустооптический дефлектор выполнен из кристалла TeO_2, длина взаимодействия составляет 6 мм, акустическая и а.о.-полосы – от 20 до 45 МГц [24, 25]. Формировалось пять эквидистантных радиочастот – от 25 до 37 МГц с шагом 3 МГц. Для каждой частотной компоненты управляющего сигнала осуществлялась независимая установка амплитуды и фазы. Измеритель профиля отражал пространственное распределение дифрагированного поля. Сигнал на входе а.о.д. контролировался осциллографом. Рисунок 5 иллюстрирует относительную интенсивность дифракционных лучей (по оси абсцисс отложены абсолютные значения).

Видно, что подбор фаз обеспечивает заданное количество равноинтенсивных лучей при отсутствии “паразитных” и суммарной эффективности, близкой к 100%. Нарушение фазовых соотношений кардинальным образом меняет ситуацию: возникают дополнительные интермодуляционные лучи, а интенсивности основных лучей становятся существенно неравными, и снижается суммарная эффективность. Это иллюстрирует основополагающий для многолучевой а.о.-дифракции факт – чувствительность взаимодействия к фазовым соотношениям внутри управляющего сигнала.

4. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОЛУЧЕВОЙ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ ДИФРАКЦИИ

4.1. Система лазерного вывода изображения

Лазерные граверы предназначены для прямого изготовления печатных форм офсетной, высокой или глубокой печати, а также фотоформ гравированием посредством воздействия лазерного излучения большой мощности на фотоматериал. Как правило, используются лазеры с длиной волны 1.06 мкм, с помощью которых удаляется маска в местах формирования печатных элементов. Создание мощных лазеров и повышение чувствительности фотоматериалов обусловливают возможность повышения скорости записи. Многолучевой а.о.д. позволяет создать высокоскоростной лазерный гравер (рис. 6).

Вращение барабана обеспечивает развертку изображения по координате Y, а перемещение каретки с а.о.д. и коллиматором волоконного лазера – развертку по координате X. Высокая скорость записи обеспечивается одномоментным формированием линейки пикселей ΔX вдоль оси X.

Неполяризованное излучение мощного непрерывного волоконного лазера (мощность до 50 Вт, качество луча $M^2 < 1.05$) направляется на многолучевой а.о.д., состоящий из двух последовательно включенных а.о.д.: первый а.о.д. отклоняет одну поляризационную компоненту света, второй – ор-

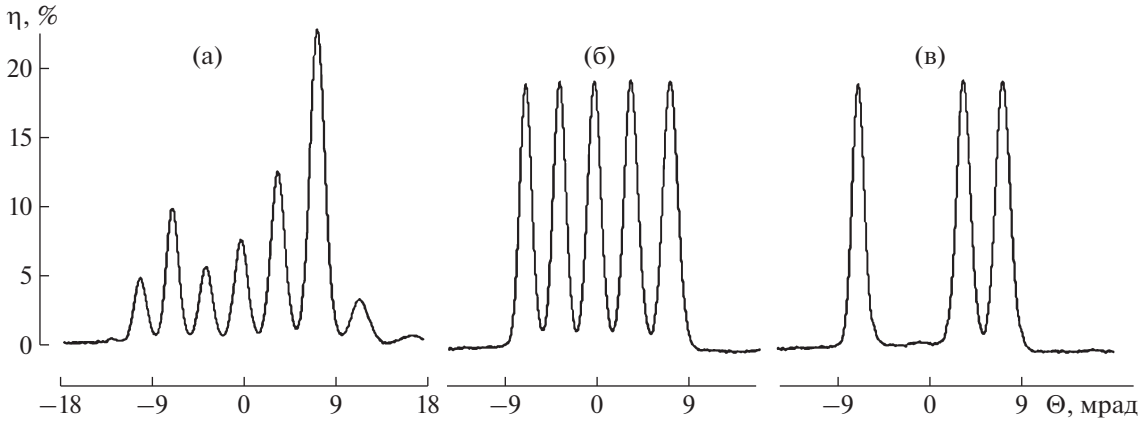


Рис. 5. Экспериментальные зависимости распределения дифракционного поля для случая: **а** – соотношение фаз между частотами случайное; **б** – соотношение фаз подобрано для максимальной эффективности пяти лучей; **в** – соотношение фаз для трех дифрагированных лучей.

тогональную [26–28]. Чередование ортогонально поляризованных лучей от каждого а.о.д. обеспечивает:

– отсутствие интерференционных эффектов вблизи соседних пикселей на обрабатываемом материале;

– снижение ограничений, связанных с разрешающей способностью а.о.д., – угловое расстояние между лучами для каждого дефлектора равно трем расходимостям входного света.

Параллельная многоканальная запись изображения существенно повышает производительность гравера.

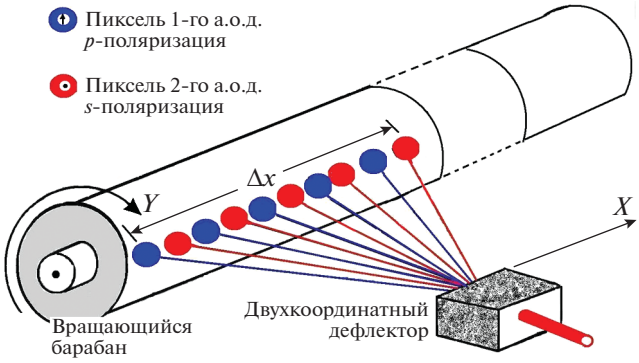


Рис. 6. Схема гравера.

4.2. Коммутатор-мультиплексор волоконно-оптических каналов

Многолучевой а.о.д. является основой системы коммутатор-мультиплексор волоконно-оптических каналов с алгоритмом переключения каналов $1 \times N$ [29–33].

По сравнению с однокоординатной схемой число выходных каналов возрастает в квадрате при использовании двухкоординатного а.о.д. (рис. 7).

Свет выходного световода коллимируется оптикой $Л_1$ и поступает на двухккоординатную систему дефлекторов а.о.д.1 и а.о.д.2, после чего оптикой $Л_2$ фокусируется на выходную матрицу световодов.

Примеры возможных двумерных распределений интенсивности света в плоскости матрицы выходных световодов представлены на рис. 8.

Варианты мультиплицирования:

а) во все входные каналы матрицы одновременно;

б) в произвольную прямоугольную область матрицы;

в) в любой набор одной строки или одного столбца матрицы;

г) в пересечение набора строк с набором столбцов матрицы.

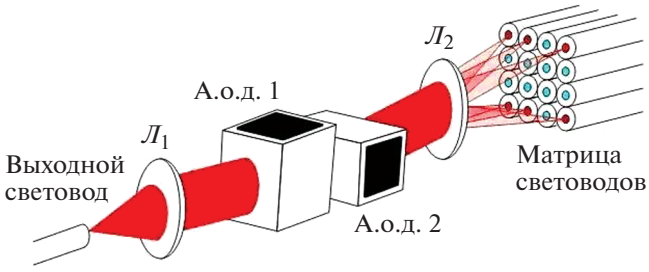


Рис. 7. Схема двухкоординатного переключателя каналов. $Л_1$, $Л_2$ – линзы.

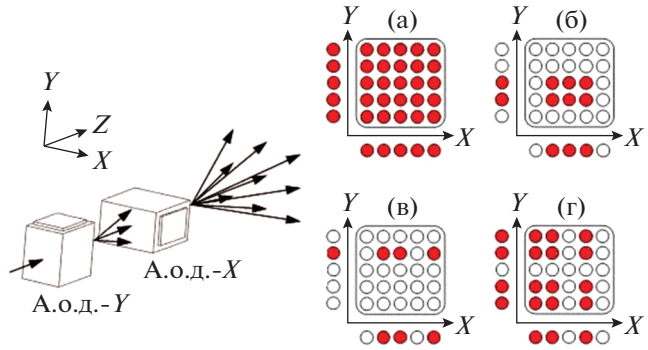


Рис. 8. Примеры некоторых комбинаций работы переключателя: **а** – все элементы матрицы "освещены" лазерным излучением равномерно; **б–г** – лазерный свет в равных энергетических пропорциях подается на определенные элементы матрицы. А.о.д.-*Y*, а.о.д.-*X* – дефлекторы с отклонением по *Y*- и *X*-координатам соответственно. Направляемые на матрицу лучи закрашены.

4.3. Управление энергетическим профилем лазерного излучения

В системах лазерной обработки материалов нормальное (гауссово) угловое распределение интенсивности лазерного излучения не является оптимальным. На рис. 9 представлено нормированное гауссово угловое распределение.

Примем, что энергетический порог воздействия на обрабатываемый материал равен уровню $I_0 = 0.9$, тогда отношение полезно используемой мощности к полной мощности для гауссова луча составляет ≈35%. Для эффективного использования мощности лазера целесообразен свет с профилем, близким к П-образному, а в ряде случаев – и к более сложному.

Промышленность выпускает оптические линзовые системы, трансформирующие исходно гауссов лазерный луч в излучение с неизменяемым профилем, близким к прямоугольному, – шейпер (shaper). Акустооптические методы позволяют быстропере-

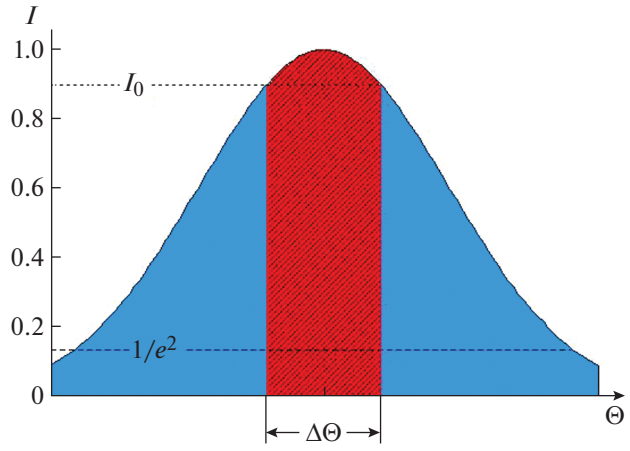


Рис. 9. Гауссово угловое распределение лазерного света: Θ – нормированные углы, I – относительная интенсивность. Используемая энергетическая угловая часть ΔΘ по уровню $I_0 = 0.9$.

менно модифицировать профиль лазерного луча [34, 35], в том числе и многолучевым методом [36].

Как было указано в разд. 2, отношение периода модуляции T к времени пересечения звуком апертуры света τ определяет степень перекрытия лучей. В данном случае используется режим, когда $T > \tau$, и соседние лучи перекрываются с образованием единого луча (см. рис. 3 и 2б). Число, соотношения амплитуд и фаз управляющих сигналов определяют форму итогового профиля луча, в частности прямоугольность. Отметим, что термин “единый луч” корректен, если не учитывать интерференцию (биения), возникающую в областях перекрытия лучей; частота биений равна разности частот ближайших электрических сигналов (0.3 МГц в условиях эксперимента). В большинстве практических случаев, связанных с лазерной обработкой материалов, смещение луча “от точки к точке” не превышает десятков миллисекунд. При таком усреднении термин “единый луч” вполне правомерен.

На рис. 10 представлены зависимости относительной интенсивности η лазерного излучения от угловых характеристик света на выходе а.о.д., полученные при измерениях на экспериментальной установке, описанной в разд. 3. Профиль на рис. 10б прямоугольный, а профиль на рис. 10в предпочтителен в системах, когда лазерный нагрев в центре луча чрезмерен, а по периметру недостаточен, например при наплаве металлов в 3D-принтерах.

По результатам можно резюмировать, что эффект многолучевой а.о.-дифракции позволяет формировать распределения лазерного излучения как П-образной, так и другой формы при суммарной эффективности ≥85–90%. Принципиальное достоинство метода – возможность

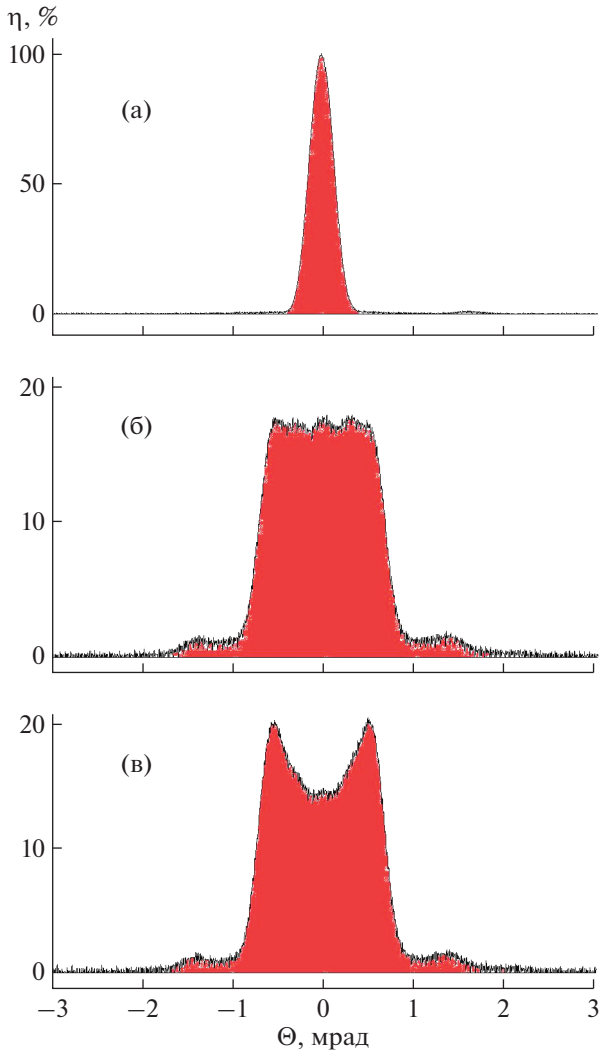


Рис. 10. Профиль дифрагированного поля: **а** – при одной управляющей частоте 41 МГц; **б** – П-образный профиль при пяти управляющих частотах – центральной 41 МГц и четырех симметрично расположенных боковых ±0.3 и ±0.6 МГц; **в** – с провалом в центре, полученным изменением соотношения амплитуд сигнала для П-образного профиля.

быстрого изменения энергетической формы выходного луча. Быстродействие определяется скоростью звука в а.о.-кристалле и апертурой света и достигает в эксперименте около 10 мкс.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретически и экспериментально изучен эффект многолучевой акустооптической дифракции – деление лазерного излучения на несколько независимо управляемых лучей (каналов) без принципиальных потерь световой мощности. Показано, что для ее реализации необходимо, чтобы акустический сигнал имел угловую (частотную, фазовую) модуляцию. Разработан алго-

ритм цифрового синтеза управляющего сигнала, обеспечивающего максимальную суммарную эффективность дифракции. Выполнен расчет необходимых параметров акустического сигнала. Экспериментально изучен данный тип дифракции, подтверждены теоретические положения. Приведены примеры использования а.о.-устройств, реализующих режим многолучевой акустооптической дифракции в системах: лазерный гравер, лазерный маркер, коммутатор-мультиплексор волоконно-оптических каналов, а.о.-формирователь энергетического профиля лазерного излучения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Warner A.W., White D.L., Bonner W.A.* // J. Appl. Phys. 1972. V. 43. P. 4489. https://doi.org/10.1063/1.1660950
2. *Yano T., Kawabuichi M., Fukumoto A., Watanabe A.* // Appl. Phys. Lett. 1975. V. 26. P. 689. https://doi.org/10.1063/1.88037
3. *Dixon R.W.* // IEEE J. Quant. Electron. 1067. V. 3. P. 85. https://doi.org/10.1109/JQE.1967.1074447
4. *Lean E.G.H., Quate C.F., Shaw H.J.* // Appl. Phys. Lett. 1967. V. 10. P. 48. https://doi.org/10.1063/1.1754841
5. *Korpel A.* Acousto-optics. N.Y.: Marcel Dekker, 1988.
6. *Магдич Л.Н., Молчанов В.Я.* Акустооптические устройства и их применение. М.: Сов. радио, 1978.
7. *Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е.* Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985.
8. *Turunen J., Tervonen E., Friberg A.T.* // J. Appl. Phys. 1990. V. 67. P. 49. https://doi.org/10.1063/1.345232
9. Акустические кристаллы. Справочник / Под ред. М.П. Шаскольской. М.: Наука, 1982.
10. *Voloshinov V.B.* // Ultrasonics. 1993. V. 31. P. 333. https://doi.org/10.1016/0041-624X(93)90066-9
11. *Kastelik J.C., Pommeray M., Kab A., Gazalet M.G.* // Pure Appl. Opt. 1998. V. 7. P. 467. https://doi.org/10.1088/0963-9659/7/3/008
12. *Гуляев Ю.В., Казарян М.А., Мокрушин Ю.М., Шакин О.В.* // Квантовая электрон. 2015. Т. 45. № 4. С. 283.
13. *Kastelik J.-C., Dupont S., Yushkov K.B., Gazalet J.* // Ultrasonics. 2013. V. 53. P. 219. https://doi.org/10.1016/j.ultras.2012.06.003
14. *Hecht D.* // IEEE Trans. Sonics Ultrason. 1977. V. 24. P. 7. https://doi.org/10.1109/T-SU.1977.30905
15. *Gazalet M.G., Carlier S., Picault J.P., Waxin G., Bruneel C.* // Appl. Opt. 1985. V. 24. P. 4435. https://doi.org/10.1364/AO.24.004435
16. *Tao Yongchuan, Xu Jieping* // J. Opt. Soc. Am. A. 1992. V. 9. P. 2223. https://doi.org/10.1364/JOSAA.9.002223
17. *Gazalet M.G., Kastelik J.C., Bruneel C., Bazzi O., Bridoux E.* // Appl. Opt. 1993. V. 32. P. 2455. https://doi.org/10.1364/AO.32.002455
18. *Балакший В.И., Сливиньски А., Толпин К.А.* // Оптика и спектроскопия. 1999. Т. 87. Вып. 6. С. 1010.
19. *Антонов С.Н.* // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 4. С. 122.
20. *Антонов С.Н., Резвов Ю.Г.* // Радиотехника и электроника. 2005. Т. 50. № 4. С. 472.
21. *Антонов С.Н., Резвов Ю.Г.* // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 8. С. 93.
22. *Антонов С.Н., Вайнер А.В., Проклов В.В., Резвов Ю.Г.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 6. С. 79.
23. *Антонов С.Н., Вайнер А.В., Проклов В.В., Резвов Ю.Г.* // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53. № 4. С. 478.
24. *Антонов С.Н.* // Акустический журнал. 2017. Т. 63. Вып. 4. С. 364. https://doi.org/10.7868/S0320791917030017
25. *Антонов С.Н.* // Акустический журнал. 2018. Т. 64. Вып. 4. С. 432.
26. *Антонов С.Н.* // ПТЭ. 2019. № 3. С. 89. https://doi.org/10.1134/S0032816219020174
27. *Антонов С.Н.* // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 1. С. 132.
28. *Антонов С.Н.* // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 1. С. 136.
29. *Aubin G., Sapriel J., Molchanov V., Gabet R., Grosso P., Gosselin S., Jaouen Y.*// Electronics Letters. 2004. V. 40. P. 448. https://doi.org/10.1049/el:20040280
30. *Зайченко К.В., Гуревич Б.С.* // Оптический журнал. 2017. Т. 84. Вып. 2. С. 95.
31. *Proklov V.V., Antonov S.N., Vainer A.V., Rezvov Yu.G.* // IEEE Ultrasonics Symposium Proc. 2007. P. 825. https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2007.211
32. *Antonov S.N., Vainer A.V., Proklov V.V., Rezvov Yu.G.* // Applied Optics. 2009. V. 48. C171. https://doi.org/10.1364/AO.48.00C171
33. *Антонов С.Н.* // Оптика и спектроскопия. 2018. Т. 125. Вып. 3. С. 383. https://doi.org/10.21883/OS.2018.09.46555.3-18
34. *Akemann W., Leger J.-F., Ventalon C., Mathieu B., Dieudonne S., Bourdieu S.* // Opt. Express. 2015. V. 23. P. 28191. https://doi.org/10.1364/OE.23.028191
35. *Grinenko A., MacDonald M.P., Courtney C.R.P., Wilcox P.D., Demore C.E.M., Cochran S., Drinkwater B.W.* // Opt. Express. 2015. V. 23. P. 26. https://doi.org/10.1364/OE.23.000026
36. *Антонов С.Н., Филатов А.Л.* // ЖТФ. 2018. Т. 87. Вып. 1. С. 93. https://doi.org/10.21883/JTF.2018.01.45489.2266

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 6, с. 53–56

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 535+621.373

ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРА ОТРАЖЕНИЯ В ОДНОЛУЧЕВОЙ СХЕМЕ

© 2020 г. А. А. Ковалёв*

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13
**e-mail kovalev@isp.nsc.ru*

Поступила в редакцию 20.05.2020 г.
После доработки 03.06.2020 г.
Принята к публикации 05.06.2020 г.

Разработана схема измерения спектра отражения с точностью на уровне 10^{-3} для широкой спектральной области. Для иллюстрации получены спектры отражения подложки GaAs с просветляющим покрытием и слоя квантовых ям InGaAsP/InP на подложке InP.

DOI: 10.31857/S0032816220060129

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на большое количество коммерчески доступных рефлектометров, в исследованиях требуются все более совершенные измерительные схемы таких приборов, ориентированные на решение конкретной задачи. Так, в [1] сообщается об оптоволоконном фурье-спектрометре, легком и малогабаритном, допускающем измерение спектров различных веществ на удалении от спектрометра. В [2] описаны результаты разработки быстродействующего и обладающего высокой чувствительностью спектрометра, предназначенного для исследования спектров отражения природных объектов в видимой области спектра. В [3] представлен рефрактометр, позволяющий определять показатель преломления прозрачных жидких и твердых сред в широком спектральном диапазоне – от ультрафиолетового до ближнего инфракрасного излучения.

В процессе разработки полупроводниковых зеркал с насыщающимся поглощением на основе слоя квантовых ям [4] исследователи сталкиваются со следующей проблемой. Наноразмерные полупроводниковые структуры могут быть изготовлены на подложках, поглощающих рабочее излучение, с последующим удалением подложки. На промежуточном этапе необходимо получить сведения о том, насколько поглощение квантовых ям соответствует заданному спектральному диапазону и какова кинетика насыщения и восстановления поглощения слоя квантовых ям. В этом случае единственный метод исследования – спектроскопия отражения.

Для исследования кинетики отражения создана высокочувствительная схема “накачка–зондирование” с острой фокусировкой излучения фемтосекундного лазера [5]. Острая фокусировка излучения необходима как для достижения насыщения поглощения, так и в связи с тем, что опытные образцы характеризуются малыми размерами в силу латеральной неоднородности, характерной для процесса изготовления структур методом молекулярно-пучковой эпитаксии [6].

Для получения ненасыщенных спектров отражения таких образцов (от некогерентного источника света) также необходимо использовать световые пучки с поперечным размером порядка 1 мм и менее. Для измерений спектров отражения используются однолучевые схемы. Так, в [7] коэффициент отражения определяется отношением сигналов фотодетектора с образцом в оптическом пути и без него; при этом важна идентичность условий прохождения лучей в приборе для этих двух измерений. В [7] идентичность достигается применением двух одинаковых зеркал; в варианте однолучевой схемы [8] используется поворот барабана в той же схеме и работает то же зеркало.

В данной работе предложен и проверен экспериментально относительно простой и точный метод регистрации спектра отражения в однолучевой схеме.

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА

Измерение коэффициента отражения является необходимой процедурой при исследовании пленочных образцов на подложках, имеющих поглощение в рассматриваемой спектральной области, а также в случае малых коэффициентов отражения, для которых при измерении пропускания

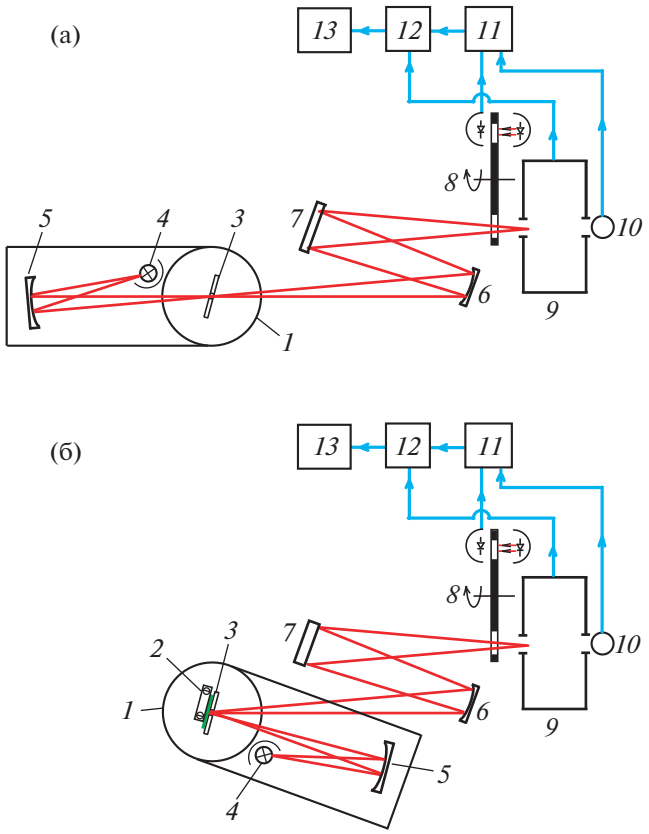


Рис. 1. Схема получения опорного сигнала от потока излучения: **а** – падающего на образец; **б** – отраженного от образца. *1* – поворотный столик; *2* – крепление образца; *3* – диафрагма, ограничивающая пучок света; *4* – источник излучения; *5* – сферическое зеркало, формирующее пучок, падающий на диафрагму; *6* – зеркало, формирующее пучок, падающий на щель монохроматора; *7* – поворотное зеркало; *8* – прерыватель пучка с оптронной парой, образующей опорный сигнал для синхронного детектирования; *9* – монохроматор МДР-2; *10* – фотодетектор ФД-9; *11* – синхронный детектор; *12* – аналого-цифровой преобразователь; *13* – компьютер.

необходимо пользоваться различными компенсационными схемами. Измерение коэффициента отражения в двухлучевых оптических схемах наталкивается на трудность обеспечения в опорном канале сигнала 100%-ного отражения в необходимом спектральном диапазоне, что означает также установку в нем дополнительных оптических элементов.

Принцип действия предлагаемого устройства заключается в последовательном измерении сигнала от пучка излучения, прошедшего через центр поворотного столика (рис. 1а), и сигнала от того же пучка излучения, но отраженного от образца, помещенного в центр столика (рис. 1б).

Оптической схеме на рис. 1а соответствует установка, фотография которой представлена на рис. 2, а схеме на рис. 1б – установка, фотография которой приведена на рис. 3.

Оптическая часть установки (см. рис. 1) состоит из поворотного столика *1*, в центр которого помещена диафрагма *3* диаметром 1.4 мм, не имеющая отражения и механически не связанная с поворотным столиком, т.е. ее положение не меняется при повороте столика.

Осветитель образован галогеновой лампой *4* и алюминиевым зеркалом *5* с радиусом кривизны 150 мм. Осветитель жестко закреплен на поворотном столике *1*, и пучок излучения от зеркала *5* направлен в область диафрагмы *3* строго по радиусу поворотного столика. При повороте столика с осветителем, т.е. при переходе от измерения с проходящим пучком (см. рис. 1а) к измерению с отраженным от образца пучком (см. рис. 1б), величина светового потока в области диафрагмы не меняется.

В случае измерения с образцом (см. рис. 1б) последний плотно прижимается к диафрагме креплением *2*. Пучок, прошедший через диафрагму (см. рис. 1а) или отраженный от образца (см. рис. 1б), фокусируется при помощи алюминиевого зеркала *6* с радиусом кривизны 260 мм и плоского зеркала *7* через прерыватель *8* на щель решеточного монохроматора *9*, а затем регистрируется подходящим фотодетектором.

Электронная часть установки содержит синхронный детектор, регистрирующий сигнал фотодетектора, аналого-цифровой преобразователь, на который поступают сигналы с фотодетектора, и устройства управления монохроматором и компьютером, обеспечивающим обработку полученной информации.

РЕЗУЛЬТАТЫ, ИЛЛЮСТРИРУЮЩИЕ МЕТОД

В качестве иллюстрации работы оптической схемы на рис. 4а приведены спектры отражения от просветленной подложки GaAs (просветляющий слой окиси европия), а на рис. 4б – спектры отражения от полупроводниковой структуры с квантовыми ямами, согласованными с барьерами по параметру решетки.

В спектре на рис. 4а увеличение отражения в коротковолновой области (для длин волн <875 нм), соответствующего границе фундаментального поглощения, обусловлено поглощением, а в длинноволновой области – недостаточным просветлением одиночным слоем окиси европия.

В спектре на рис. 4б видна граница фундаментального поглощения материала подложки InP, легированного железом, в области 950 нм, а также наблюдается область 980–1030 нм, соответствующая поглощению слоем квантовых ям из кватернарного соединения InGaAsP, согласованного по параметру решетки с материалом барьеров InP. В данном случае выбраны толстые барьеры (10 нм)

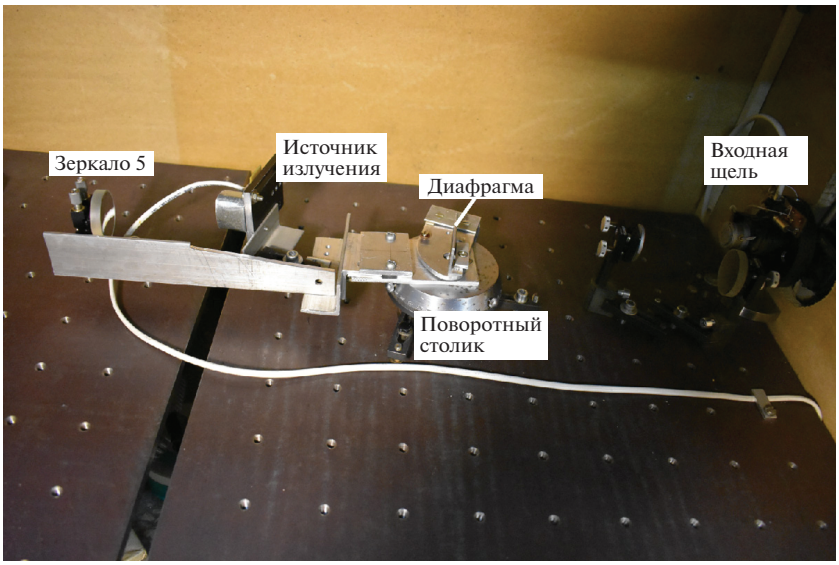


Рис. 2. Фотография экспериментальной установки с оптической схемой на рис. 1а.

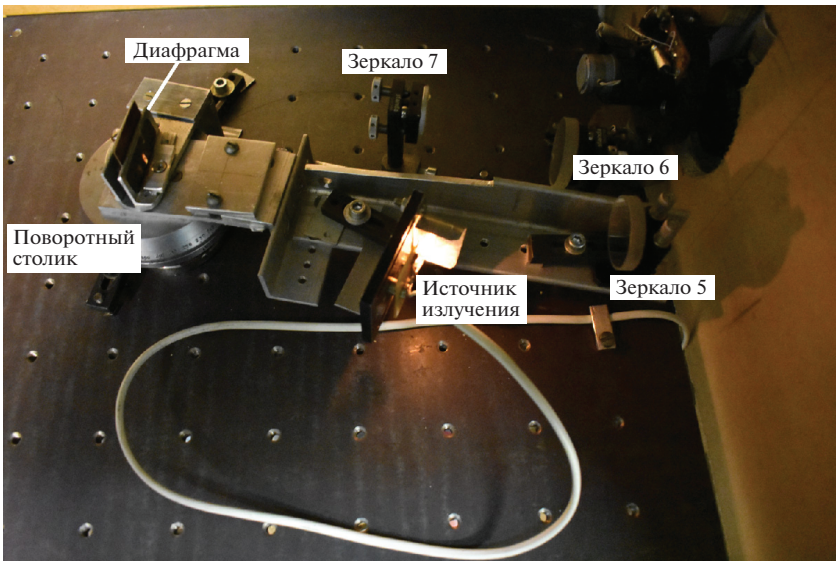


Рис. 3. Фотография экспериментальной установки с оптической схемой на рис. 1б.

для более уверенного определения спектральной области поглощения квантовых ям.

ОБСУЖДЕНИЕ

В предлагаемой схеме измерения спектров отражения используется минимальное количество зеркал, в отличие от работы [8]. Еще одно отличие от работ [7, 8] состоит в том, что используется поворот осветительного устройства. В данной схеме идентичность оптических путей светового луча при двух измерениях (на просвет через диафрагму и на отражение от исследуемого образца) довольно велика. Она определяется тем, насколько положение пятна от источника света в плоскости диафрагмы без образца совпадает с положением пятна на поверхности образца.

В качестве источников ошибки могут выступать отклонение от плоскостности поверхности диафрагмы, к которой прижимается образец, неплоская поверхность самого образца, наконец, неточное совпадение положений пятен от источника света в двух измерениях, которые контролируются визуально.

Учет суммарного действия всех факторов позволяет оценить точность измерений как 10^{-3}, что совпадает с результатом работы [8]. В примерах

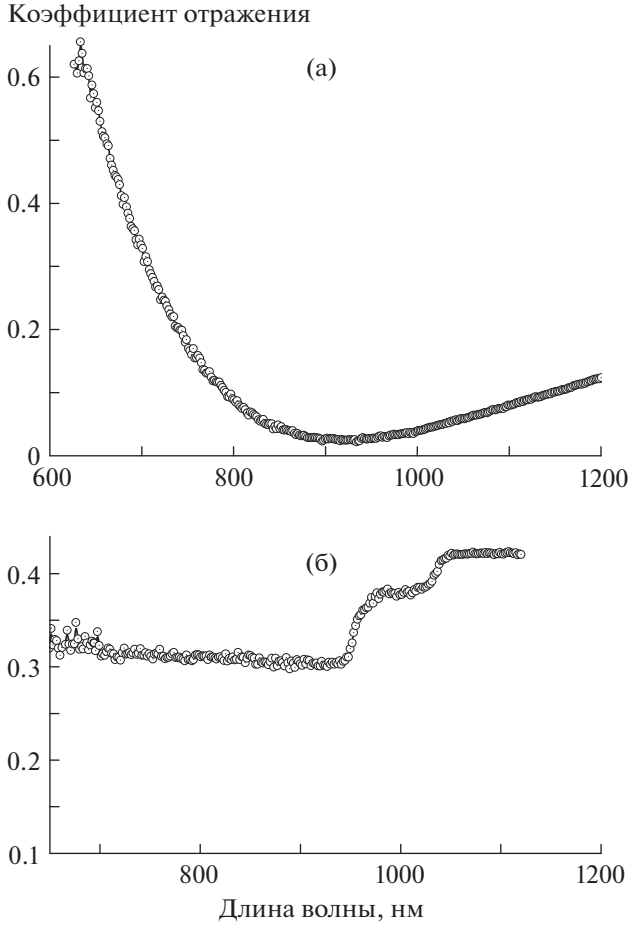


Рис. 4. Спектр отражения: **а** – подложки GaAs, просветленной слоем Eu_2O_3; **б** – слоя квантовых ям InGaAsP, согласованных по параметру решетки с барьерами InP и выращенных на подложке InP/Fe.

записей спектров отражения на рис. 4 уровень шума превышает уровень электронных шумов детектора и регистрирующей аппаратуры. При необходимости пятно фокусировки излучения в области диафрагмы может быть уменьшено; предел фокусировки будет определяться насыщением поглощения излучением осветителя, к чему полупроводниковые структуры весьма чувствительны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Достоинством предложенного метода измерения спектров отражения является простота оптической схемы, включающей минимум элементов и позволяющей выделить на поверхности образца минимальные размеры исследуемой области.

Приведенные результаты измерений спектров отражения соответствуют области ближнего инфракрасного излучения, согласно задаче разработки полупроводниковых затворов для лазеров ближнего инфракрасного диапазона спектра. Так как оптическая схема данного рефлектометра не содержит оптических элементов, работающих на пропускание излучения, при необходимости спектральная область может быть расширена применением других фотодетекторов и источников излучения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 18-29-20007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Балашов А.А., Вагин В.А., Мошкин Б.Е., Хорохорин А.И., Хитров О.В.* // ПТЭ. 2009. № 6. С. 143.
2. *Кувалдин Э.В., Сурин В.Г.* // ПТЭ. 1994. № 4. С. 154.
3. *Соколов В.И., Китай В.С., Мишаков Г.В., Молчанова С.И., Панченко В.Я., Соколова И.В.* // ПТЭ. 2011. № 1. С. 157.
4. *Keller U., Weingarten K. J., Kärtner F. X., Kopf D., Braun B., Jung I.D., Fluck R., Hönninger C., Matuschek N., Aus der Au J.* // IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics (JSTQE). 1996. V. 2. P. 435.
5. *Борисов Г.М., Гольдорт В.Г., Ковалёв А.А., Ледовских Д.В., Рубцова Н.Н.* // ПТЭ. 2018. № 1. С. 87. https://doi.org/10.1134/S0020441218010025
6. *Rubtsova N.N., Kovalyov A.A., Ledovskikh D.V., Preobrazhenskii V.V., Putyato M.A., Semyagin B.R., Kuznetsov S.A., Pivtsov V.S., Semenko A.V.* // Laser Physics. 2020. V. 30. P. 025001. https://doi.org/10.1088/1555-6611/ab5946
7. *Strong J.* // Procedures in Experimental Physics. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, Inc., 1938. P. 376.
8. *Bennett H.E., Koehler W.F.* // J. Opt. Soc. Am. 1960. V. 50. P. 1 https://doi.org/10.1063/1.1145344

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 6, с. 57–63

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 53.082.56

ГЕНЕРАТОР СУПЕРКОНТИНУУМА С НАКАЧКОЙ ИМПУЛЬСАМИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА НА ХРОМ-ФОРСТЕРИТЕ В ПРОЗРАЧНЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ

© 2020 г. И. В. Крюков[a,b,*], Н. Х. Петров[a], М. В. Алфимов[a]

[a] *Центр фотохимии РАН Федерального научно-исследовательского центра "Кристаллография и фотоника" РАН Россия, 119421, Москва, ул. Новаторов, 7А-1*

[b] *Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН Россия, 119991, Москва, ул. Косыгина, 4-1*

**e-mail: igor.v.kryukov@gmail.com*

Поступила в редакцию 17.03.2020 г.
После доработки 27.04.2020 г.
Принята к публикации 29.04.2020 г.

Описана установка для генерации суперконтинуума в кристаллах Al_2O_3 и CaF_2 при помощи фемтосекундного лазера на кристалле хром-форстерита (Cr:F). Определены спектры суперконтинуума с накачкой на четырех длинах волн: 310, 413, 620 и 1240 нм. В видимой области получен непрерывный спектр суперконтинуума от 324 до 1000 нм, что позволяет исследовать различные образцы с использованием системы pump-probe ("накачка–зондирование"). В ультрафиолетовой области спектра на кристалле CaF_2 получена наименьшая длина волны суперконтинуума 225 нм при накачке импульсами на длине волны 310 нм.

DOI: 10.31857/S0032816220050316

ВВЕДЕНИЕ

При фокусировке высокоинтенсивного фемтосекундного импульса в прозрачной среде генерируется белый свет от ультрафиолетового до инфракрасного – так называемый широкополосный суперконтинуум. Генерация суперконтинуума наблюдалась в разнообразных прозрачных материалах, включая газы, жидкости и твердые тела. Первыми описали явление уширения спектра Альфано и Шапиро в 1970 г. [1]. Они использовали мощный пикосекундный лазер с длиной волны 530 нм и длительностью импульса 5 пс. Генерацию континуума исследовали в боросиликатном стекле БК-7 и зарегистрировали уширение спектра с 400 до 700 нм. Первый фемтосекундный суперконтинуум наблюдали в 1983 г. Fork и его соавторы [2]. Они сообщили о гигантском уширении спектра от глубокого ультрафиолета, 190 нм, до ближнего инфракрасного, 1600 нм, при фокусировке мощных фемтосекундных импульсов.

Генерация ультракоротких импульсов с высокой частотой повторения, которые полностью перестраиваются в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном (NIR) диапазонах, по-прежнему является важной задачей. Генерация континуума используется в нестационарной спектроскопии – методе pump-probe ("накачка–зондирование") [3, 4]. Широко применяется генерация континуума в оптическом параметрическом усилителе света [5] и в системе неколлинеарного оптического параметрического усилителя (NOPA) [6].

Физическая картина генерации суперконтинуума в прозрачных конденсированных средах может быть пояснена в рамках фемтосекундной филаментации. Фемтосекундная филаментация формируется в результате взаимодействия между керровской самофокусировкой, фазовой самомодуляцией и дефокусирующей лазерной плазмой, что приводит к появлению динамической структуры с интенсивным ядром, которая способна распространяться на расстояния, гораздо большие, чем типичная дифракционная длина, сохраняя при этом узкий размер пучка без помощи какого-либо внешнего направляющего механизма. Наиболее очевидным проявлением формирования филамента является генерация сверхширокополосного, пространственно и временно когерентного излучения с низкой угловой расходимостью, т.е. генерация суперконтинуума.

Начальная стадия формирования филамента определяется керровской нелинейностью. Рассмотрим фемтосекундный пучок, распространяющийся в среде с кубичной (керровской) нелинейностью, в этом случае показатель преломления будет зависеть от интенсивности как:

$$n = n_0 + n_2 I,$$

где I – интенсивность пучка, n_0 – линейный показатель преломления, n_2 – нелинейный показатель преломления, связанный с оптической восприимчивостью материала кривой третьего порядка (кубической), положительный в области прозрачности диэлектрических сред.

Индуцированное изменение показателя преломления пропорционально локальной интенсивности и, таким образом, выше в центре пучка и ниже по краям. Поэтому диэлектрическая среда действует как линза, которая фокусирует луч. Для цилиндрически симметричного гауссова пучка порог самофокусировки определяется мощностью пучка [7]:

$$P_{cr} = 3.72\lambda^2/(8\pi n_0 n_2),$$

где λ – длина волны лазера; P_{cr} – критическая мощность самофокусировки, при которой эффект самофокусировки точно уравновешивает дифракционное распространение луча. Если мощность пучка превышает P_{cr}, то гауссов пучок будет самофокусироваться на расстоянии [7]

$$Z_{sf} = \frac{0.367k\alpha^2}{\{[(P/P_{cr})^{1/2} - 0.852]^2 - 0.0219\}^{1/2}},$$

где Z_{sf} – нелинейный фокус; α – радиус пучка по уровню e^{-1} от интенсивности; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

Рассмотрим процесс, который непосредственно отвечает за спектральное уширение импульса. При распространении сверхкороткого импульса гауссовой формы с частотой ω_0 в диэлектрике его интенсивность как функцию времени можно представить в виде

$$I(t) = I_0 \exp(-t^2/t_p^2),$$

где I_0 – максимальная интенсивность, а t_p – длительность импульса.

Вследствие эффекта Керра во время распространения импульса коэффициент преломления в каждой точке среды будет функцией интенсивности в этой точке:

$$n(I) = n_0 + n_2 I(t).$$

Далее рассмотрим случай $n_2 > 0$, соответствующий самофокусировке. В каждой точке вещества интенсивность вначале будет нарастать, а затем спадать. Это приведет к модуляции показателя преломления во времени:

$$\frac{dn(I)}{dt} = -\frac{2t}{t_p^2} n_2 I_0 \exp(-t^2/t_p^2).$$

Изменяющийся во времени показатель преломления вносит нелинейное изменение в фазу импульса:

$$\varphi_{nl}(t) = -\frac{\omega_0}{c} n_2 I(t) z,$$

где ω_0 – несущая частота, а z – расстояние, пройденное импульсом.

Тогда изменение частоты определяется выражением

$$\delta\omega(t) = \frac{d}{dt}\varphi_{nl}(t).$$

Зависимость мгновенной частоты от времени имеет вид

$$\omega(t) = \omega_0 + \delta\omega(t).$$

Изменение частоты приводит к спектральному уширению импульса. Для гауссова лазерного импульса с длительностью t_p изменение мгновенной частоты определяется выражением [8]:

$$\delta\omega(t) = 2\frac{\omega_0}{ct_p^2} n_2 I_0 \exp(-t^2/t_p^2) t z.$$

Эффект называется фазовой самомодуляцией и приводит к уширению спектра за счет индуцирования отрицательного сдвига мгновенной частоты на восходящем фронте импульса и положительного сдвига мгновенной частоты на спаде импульса. Другими словами, импульс приобретает частотную модуляцию, которая создает спектральные компоненты красного смещения на фронте импульса и синего смещения – на хвосте импульса.

Однако пучок не может фокусироваться до бесконечности: постоянное сжатие пучка в нелинейном фокусе сдерживается многофотонным поглощением и ионизацией, что приводит к потере энергии и генерации плазмы свободных электронов, которая далее поглощает и расфокусирует пучок. Комбинированное действие этих эффектов ограничивает интенсивность до определенного уровня.

Взаимодействие фемтосекундного излучения со средой определяется керровской нелинейностью и нелинейностью лазерной плазмы, возникающей при фотоионизации в сильном световом поле филамента. Нелинейное приращение Δn_k показателя преломления n_0, вызванное керровской нелинейностью, положительно и пропорционально интенсивности поля I:

$$\Delta n_k = n_2 I,$$

где n_2 – коэффициент кубической нелинейности среды.

С другой стороны, приращение Δn_p показателя преломления в плазме отрицательно, и в простейшем случае выражение для него имеет вид

$$\Delta n_p = -\omega_p^2/(2\omega^2),$$

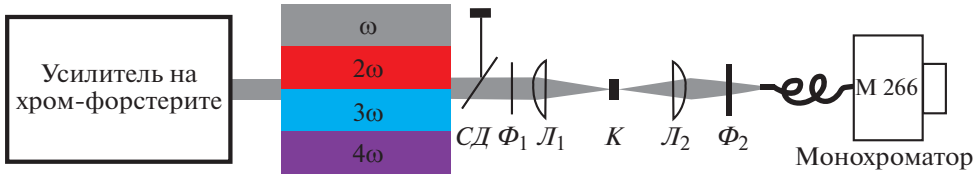


Рис. 1. Генератор суперконтинуума. *СД* – светоделитель; $Ф_1$, $Ф_2$ – нейтральные фильтры с переменной оптической плотностью; $Л_1$, $Л_2$ – линзы с фокусным расстоянием 80 ($Л_1$) и 60 мм ($Л_2$); *К* – кристалл CaF_2 или Al_2O_3.

где $\omega_p = (4\pi e^2 N_e/m_e)^{1/2}$ – плазменная частота; e, m_e и N_e – соответственно заряд, масса и концентрация электронов; ω – частота светового поля.

В конденсированных средах генерация лазерной плазмы происходит в результате перехода электронов в зону проводимости под действием лазерного излучения и лавинной ионизации, при которой концентрация электронов в плазме нарастает во времени по экспоненциальному закону.

В импульсе, пиковая мощность которого превышает критическую мощность самофокусировки, интенсивность нарастает с приближением к нелинейному фокусу. При увеличении мощности до порога фотоионизации образуется лазерная плазма, дефокусировка в которой ограничивает дальнейший рост интенсивности в нелинейном фокусе. Динамический баланс керровской самофокусировки и плазменной дефокусировки приводит к стабильности параметров в протяженном филаменте фемтосекундного импульса [9].

В данной работе описан генератор суперконтинуума с накачкой импульсами фемтосекундного лазера на кристалле хром-форстерита в прозрачных конденсированных средах. Были измерены спектры континуума на четырех длинах волн накачки: 310, 413, 620 и 1240 нм. В качестве конденсированных сред использовались кристаллы Al_2O_3 и CaF_2. Генератор суперконтинуума был разработан для системы pump-probe, созданной на хром-форстерите [3]. (Авторам не известны работы по генерации суперконтинуума в кристаллах Al_2O_3 и CaF_2 с накачкой излучением лазера на хром-форстерите.)

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В качестве усилителя использовался фемтосекундный регенеративный усилитель на кристалле хром-форстерита (Cr:F), который состоит из генератора фемтосекундных импульсов, лазера накачки и регенеративного усилителя фемтосекундных импульсов. Задающий лазер генерирует импульсы длительностью 95 фс, средней мощностью 500 мВт, частотой повторения 85 МГц. В качестве накачки используется импульсный Nd:YAG-лазер (модель LQ629-100 фирмы Солар ЛС). Энергия в импульсе 10 Дж, частота повторения 100 Гц. Центральная длина волны усиленного фемтосекундного импульса составляет 1240 нм, ширина спектра на полувысоте 17 нм. Энергия в импульсе 440 мкДж, диаметр пучка на выходе из усилителя 8 мм. Излучение на выходе из усилителя горизонтально поляризовано.

Задающий лазер генерирует фемтосекундные импульсы с шириной спектра на полувысоте 22 нм и длительностью 95 фс. После усиления ширина спектра на полувысоте уменьшается до 17 нм. Длительность усиленного импульса, измеренная с помощью коррелятора, составляет 134 фс.

Рассмотрим схему генератора суперконтинуума (рис. 1). После усилителя на хром-форстерите установлен блок генераторов гармоник: генераторы второй, третьей и четвертой гармоник. Все эти гармоники применяются в качестве накачки в генераторе континуума. Для выделения нужной длины волны накачки использовались различные оптические зеркала. После оптического делителя *СД* расположен нейтральный фильтр $Ф_1$ с переменной оптической плотностью. Перемещая этот фильтр, можно плавно менять энергию в пучке излучения накачки. Для генерации континуума фемтосекундными импульсами длительностью ≈100 фс необходима энергия в несколько микроджоулей.

Короткофокусной линзой $Л_1$ с фокусным расстоянием 80 мм излучение гармоник фокусировалось в кристалле (*К*) Al_2O_3 или CaF_2. Интенсивность накачки в перетяжке достигала ~10^{13} Вт/см^2. Толщина кристаллов CaF_2 и Al_2O_3 составляла 3 мм. В процессе эксперимента кристалл CaF_2 медленно перемещали ортогонально направлению пучка накачки во избежание деградации материала. Излучение континуума собиралось и фокусировалось короткофокусной линзой $Л_2$ с фокусным расстоянием 60 мм в оптическое волокно диаметром 200 мкм. По оптическому волокну излучение попадало в монохроматор. Использован монохроматор модели М266 (Солар ЛС, Минск) с входной щелью 200 мкм.

Для регистрации сигналов в широком спектральном диапазоне использовалась CMOS-ли-

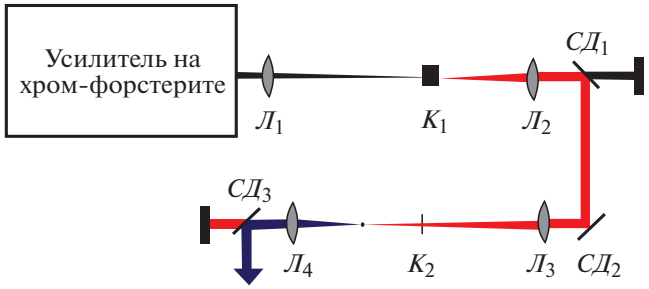


Рис. 2. Оптическая схема генерации четвертой гармоники. $Л_1$–$Л_4$ – линзы с фокусным расстоянием 50 ($Л_1$), 30 ($Л_2$), 25 ($Л_3$), 20 см ($Л_4$); K_1 – кристалл LBO длиной 5 мм; $СД_1$–$СД_3$ – светоделители; K_2 – кристалл BBO длиной 0.5 мм.

нейка Hamamatsu (1024 пикселя), которая работает в спектральном диапазоне от 200 до 1000 нм.

Рассмотрим оптические схемы генераторов гармоник для фемтосекундного регенеративного усилителя на хром-форстерите (Cr:F). Оптические схемы генераторов второй и третьей гармоник описаны в работе [3].

Генератор четвертой гармоники состоит из генератора второй гармоники и собственно генератора четвертой гармоники (рис. 2). Для генерации второй гармоники используется кристалл LBO (K_1) длиной 5 мм с просветляющим покрытием на длине волны 1240 нм, тип синхронизации – *ooe*. Угол $\varphi = 0°$, угол $\theta = 87°$. Выбор кристалла LBO обусловлен наличием некритичного синхронизма на частоте излучения лазера, что позволяет использовать длинный кристалл без потерь в спектре и соответственно без существенного увеличения длительности импульса.

Излучение усилителя фокусировалось в кристалле K_1 длиннофокусной линзой $Л_1$ с фокусным расстоянием 50 см (см. рис. 2). Нелинейный кристалл расположен перед фокальной точкой (не в фокусе). Коэффициент преобразования во вторую гармонику, равный 50%, достигался при интенсивности ~50 ГВт/см^2 для основной длины волны 1240 нм. Максимальная мощность второй гармоники составляла 220 мВт, что соответствовало энергии в импульсе 220 мкДж.

Можно получить и более высокий коэффициент преобразования, ≥60%, но из-за самофокусировки при этом сильно ухудшается поперечное распределение интенсивности второй гармоники. После кристалла излучение на основной частоте и частоте второй гармоники собиралось линзой $Л_2$ с фокусным расстоянием 30 см. Светоделитель $СД_1$ отражал излучение второй гармоники и пропускал излучение основной гармоники, которое блокировалось защитным экраном.

Излучение второй гармоники после делителей $СД_1$ и $СД_2$ при помощи линзы $Л_3$ с фокусным расстоянием 25 см фокусировалось в кристалле BBO (K_2) длиной 0.5 мм для генерации четвертой гармоники. Нелинейный кристалл K_2 размещен перед фокальной точкой. Тип синхронизма – *ooe*, угол $\theta = 28°$, угол $\varphi = 90°$. После кристалла K_2 излучение второй и четвертой гармоник собиралось линзой $Л_4$ с фокусным расстоянием 20 см. Светоделитель $СД_3$ отражал излучение четвертой гармоники и пропускал излучение второй гармоники, которое блокировалось защитным экраном. Поляризация излучения четвертой гармоники – горизонтальная, длина волны 310 нм.

Максимальная мощность четвертой гармоники составляет 40 мВт, что соответствует энергии в импульсе 40 мкДж.

ГЕНЕРАТОР СУПЕРКОНТИНУУМА С НАКАЧКОЙ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 1240 нм

На рис. 3а и 3б представлены спектры суперконтинуума в кристаллах CaF_2 и Al_2O_3 соответственно с накачкой на длине волны 1240 нм.

Согласно рисунку, спектр суперконтинуума в антистоксовой области является существенно немонотонным. В видимой части спектра наблюдается пик, смещенный в синюю область спектра. Центральная длина волны антистоксового пика для кристалла Al_2O_3 составила 580 нм, а для кристалла CaF_2 – 600 нм. В экспериментах Saliminia [10] граница коротковолновой области спектра суперконтинуума составила 400 нм. В наших опытах для кристалла CaF_2 граница коротковолновой области спектра суперконтинуума была равна 324 нм. Это связано с тем, что ширина запрещенной зоны у кристалла CaF_2 (10.2 эВ [11]) больше, чем у плавленого кварца (7.5 эВ [11]), а антистоксово уширение спектра суперконтинуума пропорционально отношению ширины запрещенной зоны к энергии фотона $h\omega$ излучения [12].

Представленные на рис. 3 спектры суперконтинуума очень интересны в практическом применении. Спектр суперконтинуума для кристалла CaF_2 простирается от 324 до 1000 нм. Этот вариант очень удобен для работы в системе pump-probe, так как дает возможность исследовать образцы в широкой области спектра.

В нашем случае генератор суперконтинуума с использованием в качестве накачки фемтосекундного усилителя на хром-форстерите (Cr:F) имеет преимущество по сравнению генератором суперконтинуума с накачкой фемтосекундным усилителем на титан-сапфире, который в настоящее время наиболее часто используется. Центральная длина волны титан-сапфирового лазера $\lambda = 800$ нм. При накачке титановым лазером кри-

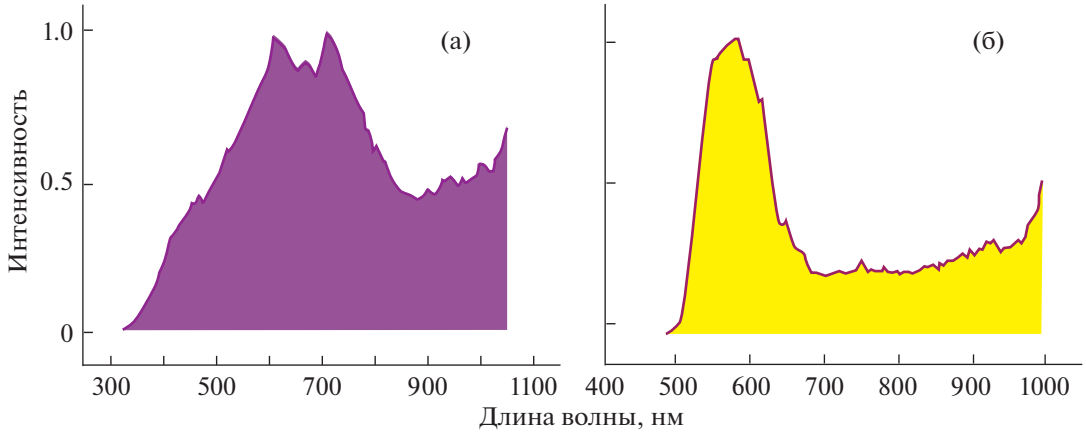


Рис. 3. Спектры суперконтинуума, генерируемого в кристаллах CaF_2 (**а**) и Al_2O_3 (**б**) с накачкой на длине волны 1240 нм.

сталла Al_2O_3 получается спектр суперконтинуума от 400 до 1600 нм, но в области спектра 800 нм присутствует пик накачки шириной от 770 до 830 нм. Для исследования образцов в этой области спектра необходимо обрезать пик накачки специально подобранными фильтрами, что является непростой задачей. В случае использования хромфорстерита, как следует из рис. 3а, получают широкий непрерывный спектр суперконтинуума от 324 до 1000 нм без присутствия накачки, что позволяет использовать этот спектр без дополнительных фильтров.

ГЕНЕРАТОР СУПЕРКОНТИНУУМА С НАКАЧКОЙ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 620 И 413 нм

Наиболее популярным кристаллом для генерации континуума, по-видимому, является кристалл Al_2O_3 (сапфир). Этот кристалл часто используется для генерации суперконтинуума с фемтосекундными лазерами на титан-сапфире, поскольку обладает высокой нелинейностью и высоким оптическим порогом пробоя. Это обеспечивает высокое качество затравочного сигнала, что способствует развитию современных фемтосекундных оптических параметрических усилителей [13, 14]. Недаром известная фирма Light Conversion в своем оптическом параметрическом усилителе TOPAS в генераторе континуума использует именно кристалл Al_2O_3.

На рис. 4а, 4б представлены спектры суперконтинуума, полученные соответственно на кристаллах CaF_2 и Al_2O_3 с накачкой на длине волны 620 нм. Для кристалла CaF_2 получен наиболее широкий спектр суперконтинуума – от 282 до 1000 нм, для Al_2O_3 ширина спектра суперконтинуума охватывает диапазон длин волн от 380 до 1000 нм

На рис. 4в, 4г представлены спектры суперконтинуума, полученные соответственно на кристаллах CaF_2 и Al_2O_3 с накачкой на длине волны 413 нм. Ширина спектра суперконтинуума для кристалла CaF_2 охватывает диапазон длин волн 248–745 нм, а для кристалла Al_2O_3 – 310–565 нм.

С практической точки зрения, при применении генераторов суперконтинуума с накачками на длинах волн 620 и 413 нм в системах pump-probe необходимо использовать специально подобранные оптические фильтры, отрезающие спектральную область, где присутствует накачка.

ГЕНЕРАТОР СУПЕРКОНТИНУУМА С НАКАЧКОЙ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 310 нм

Для фемтосекундной спектроскопии нестационарного поглощения в видимом спектральном диапазоне необходим источник белого света (континуума) для зондирования динамики изменения поглощения в широком спектральном диапазоне. Наибольший интерес представляет возможность генерации континуума ближнего у.ф.-диапазона, поскольку большое количество органических соединений имеет поглощение в этой области спектра.

Фториды щелочных металлов являются перспективными материалами для генерации суперконтинуума. Особое место среди них занимает кристалл LiF, обладающий наиболее широкими областью прозрачности и запрещенной зоной (11.8 эВ) [11]. Именно в этом материале при фемтосекундной филаментации наблюдается наиболее значительное уширение спектров суперконтинуума в у.ф.-диапазон. Особенностью кристалла LiF является то, что под действием мощного лазерного излучения в нем образуются центры окраски, вызывающие изменение показателя преломления в области от у.ф.- до среднего и.к.-диапазона и появление полос поглощения.

В работе [15] было исследовано влияние центров окраски на спектральные характеристики

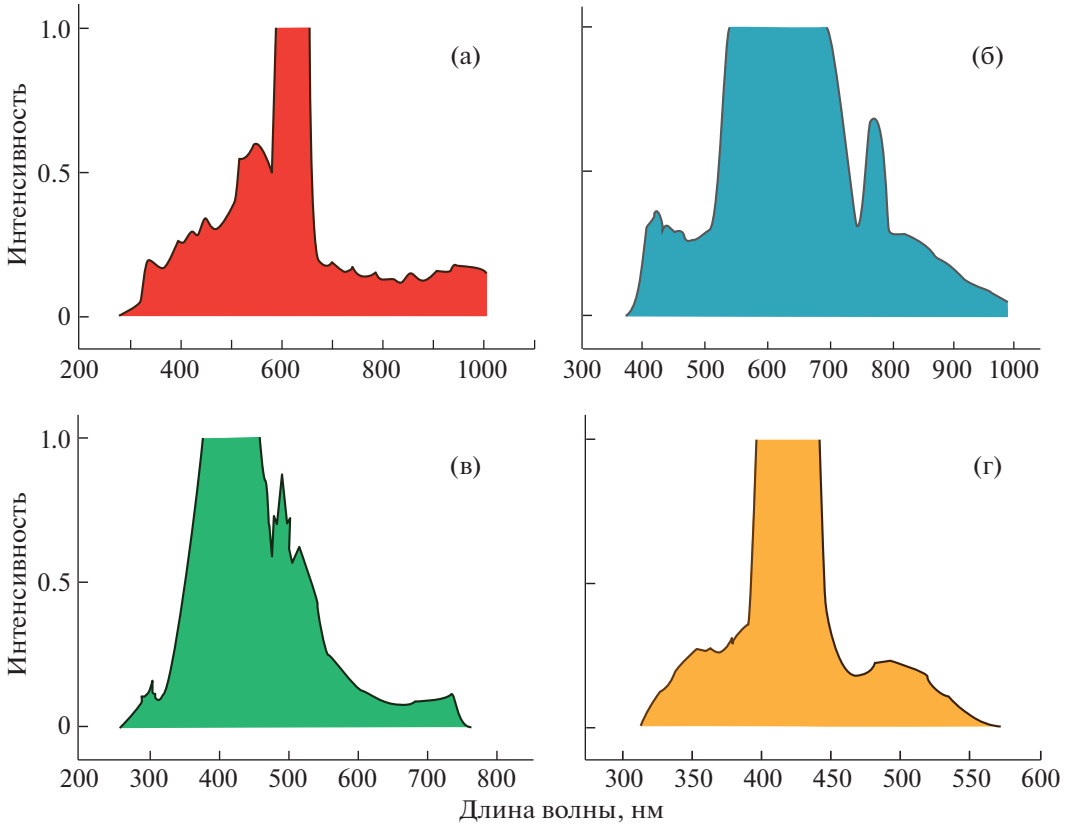


Рис. 4. Спектры суперконтинуума, генерируемого в кристаллах CaF_2 (**а**, **в**) и Al_2O_3 (**б**, **г**) с накачкой на длине волны 620 нм (**а, б**) и 413 нм (**в, г**).

суперконтинуума. Экспериментально показано, что при длительном облучении кристалла LiF и возникновении центров окраски появляется полоса поглощения с центром на длине волны 250 нм, что уменьшает ширину спектра суперконтинуума.

Кристаллы LiF и CaF_2 являются рекордсменами по генерации суперконтинуума в у.ф.-области спектра, с ними получены самые короткие длины волн.

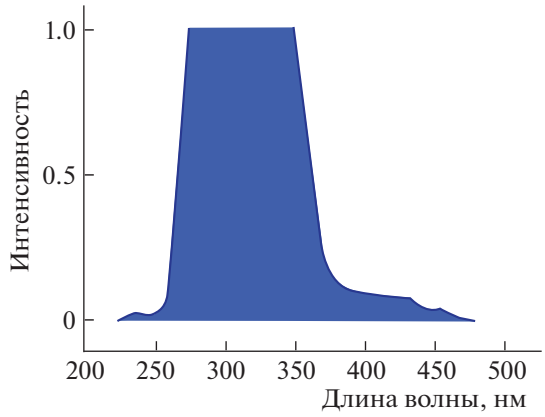


Рис. 5. Спектр суперконтинуума, генерируемый в кристалле CaF_2 с накачкой на длине волны 310 нм.

В работе [15] проводилось сравнение ширины спектра суперконтинуума, генерируемого в кристаллах LiF и CaF_2 с накачкой на длине волны 775 нм. В у.ф.-области спектра в кристалле CaF_2 наименьшая длина волны суперконтинуума составила 287 нм, а в кристалле LiF – 270 нм, что на 17 нм меньше, чем в CaF_2.

Нами была исследована генерация суперконтинуума в кристалле CaF_2 с накачкой на длине волны 310 нм, получен спектр суперконтинуума от 225 до 480 нм (рис. 5). Наименьшая длина волны спектра континуума составила 225 нм.

На рис. 6 представлены объединенные экспериментальные результаты уширения спектров суперконтинуума для кристаллов CaF_2 и Al_2O_3. Наибольшая величина антистоксова уширения достигнута при длине волны накачки 1240 нм с кристаллом CaF_2. При этом минимальная длина волны спектра суперконтинуума составила 324 нм. Самая короткая длина волны спектра суперконтинуума 225 нм была достигнута при длине волны накачки 310 нм.

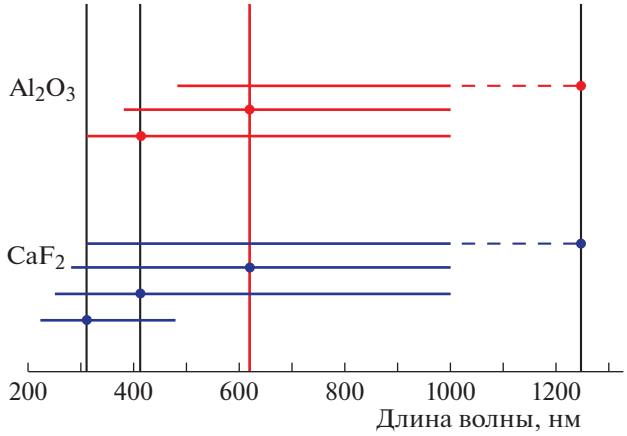


Рис. 6. Спектры суперконтинуума.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан генератор суперконтинуума с накачкой импульсами фемтосекундного лазера на хром-форстерите. Проведено исследование генерации суперконтинуума в различных конденсированных средах для четырех длин волн накачки: 310, 413, 620 и 1240 нм – с целью применения полученных данных в системе pump-probe. Перспективной является генерация суперконтинуума в кристалле CaF_2 с накачкой на длине волны 1240 нм. Ширина генерируемого спектра суперконтинуума составила от 324 до 1000 нм (без присутствия накачки), что позволяет исследовать образцы в широком диапазоне длин волн. Измерения в у.ф.-области спектра показали, что с усилителем на хром-форстерите возможна генерация суперконтинуума в коротковолновой части у.ф.-области спектра. В кристалле CaF_2 получена наименьшая длина волны 225 нм при накачке импульсами на длине волны 310 нм.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по государственному заданию ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Alfano R., Shapiro L.* // Phys. Rev. Lett. 1970. V. 24. P. 584. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.24.584
2. *Fork R., Shank C., Hirlimann C., Yen R., Tomlinson W.* // Opt. Lett. 1983. V. 8. P. 1. https://doi.org/10.1364/OL.8.000001
3. *Крюков И.В., Петров Н.Х., Иванов А.А., Алфимов М.В.* // ПТЭ. 2019. № 4. С. 95. https://doi.org/10.1134/S0032816219040104
4. *Kovalenko S.A., Ernsting N.P., Ruthmann J.* // Chem. Phys. Lett. 1996. V. 258. P. 445. https://doi.org/10.1016/0009-2614(96)00647-1
5. *Cerullo G., De Silvestria S.* // Rev. of Sci. Inst. 2003. V. 74. P. 1. https://doi.org/10.1063/1.1523642
6. *Bradler M., Riedle E.* // Opt. Lett. 2014. V. 39. P. 2588. https://doi.org/10.1364/OL.39.002588
7. *Marburger J.H.* // Prog. Quantum Electr. 1975. V. 4. P. 35. https://doi.org/10.1016/0079-6727(75)90003-8
8. *Dubietis A., Tamošauskas G., Šuminas R., Jukna V., Couairon A.* // Lithuanian Jour. of Phys. 2017. V. 57. P. 113. https://doi.org/10.3952/physics.v57i3.3541
9. *Кандидов В.П., Шленов С.А., Косарева О.Г.* // Квантовая электрон. 2009. Т. 39. № 3. С. 205.
10. *Saliminia A., Chin S.L., Vallée R.* // Opt. Exp. 2005. V. 13. P. 5731.
11. *Brodeur A., Chin S.L.* // J. Opt. Soc. Am. B. 1999. V. 16. P. 637. https://doi.org/10.1364/JOSAB.16.000637
12. *Nagura C., Suda A., Kawano H., Obara M., Midorikawa K.* // Appl. Opt. 2002. V. 41. P. 3735. https://doi.org/10.1364/AO.41.003735
13. *Brida D., Manzoni C., Cirmi G., Marangoni M., Bonora S., Villoresi P., De Silvestri S., Cerullo G.* // J. Opt. 2010. V. 12. P. 1. https://doi.org/10.1364/OL.33.000741
14. *Manzoni C., Cerullo G.* // J. Opt. 2016. V. 18. P. 1. https://doi.org/10.1088/2040-8978/18/10/103501
15. *Kohl-Landgraf J., Nimsch J., Wachtveitl J.* // Opt. Express. 2013. V. 21. P. 17060. https://doi.org/10.1364/OE.21.017060

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 6, с. 64–70

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 535.343.32+504.4.054

СПЕКТРОФОТОМЕРИЯ ВОД В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ И ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ КАК ЭЛЕМЕНТ ЭКОАНАЛИТИКИ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

© 2020 г. Н. Л. Алукер[a],*, M. E. Herrmann[b],, Я. М. Суздальцева[c],*****

[a] *Кемеровский государственный университет*
Россия, 650000, Кемерово, ул. Красная, 6

[b] *Department of Meteorology and Atmospheric Science, The Pennsylvania State University, PA, USA*

[c] *Институт экологии человека Федерального исследовательского центра "Институт углехимии и химического материаловедения СО РАН"*
Россия, 650065, Кемерово, просп. Ленинградский, 10

**e-mail: naluker@gmail.com*

***e-mail: maria.herrmann@psu.edu*

****e-mail: y-komarova@mail.ru*

Поступила в редакцию 17.04.2020 г.
После доработки 01.05.2020 г.
Принята к публикации 04.05.2020 г.

Обосновано использование электронных спектров поглощения природных и питьевых вод в ультрафиолетовой (у.ф.) области спектра для первичной оценки качества исходных проб воды. Это позволяет в ряде случаев определять на количественном уровне содержание некоторых истинно растворенных примесей или хромофорных групп в воде. Прямая спектрофотомерия в у.ф.-области исходных водных проб предлагается в качестве дешевого и экспрессного метода для текущего мониторинга в экоаналитике водных ресурсов.

DOI: 10.31857/S0032816220050249

1. ВВЕДЕНИЕ

Вода представляет собой универсальный растворитель, необходимый для протекания жизненно важных биохимических реакций. Большинство солей хорошо растворяются в воде, образуя истинные растворы. Ряд веществ при взаимодействии с водой подвергаются гидролизу, т.е. происходит разложение и вещества, и воды с образованием новых соединений [1, 2].

Растворенные неорганические и органические вещества присутствуют во всех без исключения типах природных вод.

В подавляющем большинстве случаев солевой состав вод определяется катионами Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+} и анионами Cl^{-}, SO_4^{2-}, NO_3^{-} и HCO_3^{-}. Щелочность вод в основном определяется наличием гидрокарбонатов и карбонатов, сухой остаток – суммой массовой концентрации анионов (гидрокарбонатов и карбонатов, хлоридов и сульфатов) и катионов (кальция, магния, натрия и калия) [1, 2], а общая жесткость воды – содержанием растворимых солей кальция и магния [1, 2]. Мутность воды обусловлена присутствием в ней взвешенных частиц минерального и органического происхождения [1, 2]. Состав органических веществ довольно сложен и может быть представлен всеми классами органических соединений, что затрудняет идентификацию химического состава воды.

Для оценки качества питьевых вод, являющихся основным продуктом питания и источником ряда необходимых элементов, поступающих в организм человека, во всем мире применяются немногим отличающиеся, но, в принципе, очень близкие нормативы. Анализ воды проводится аккредитованными лабораториями, имеющими права проведения анализа по определенной номенклатуре показателей, которых, в принципе, более 100 [3]. Это газы, неорганические примеси катионной и анионной природы, органические соединения, микроорганизмы, радионуклиды, что делает полный анализ воды чрезвычайно дорогостоящим и трудоемким процессом. В связи с этим зачастую проводится анализ по сокращенной номенклатуре, включающей в себя простейшие комплексные показатели, зачастую не характеризующие достаточно адекватно качество воды [4].

Актуальность внедрения методов, позволяющих анализировать воды разного происхождения и примесного состава, не требующих сложного аппаратурного обеспечения и нетрудоемких, не

вызывает сомнения. К таким методам можно отнести оптические методы исследования, позволяющие, в принципе, не только определить присутствующую примесь, но зачастую и степень ее окисления (валентность), отслеживая химические превращения по изменению спектров. Однако прямые спектральные измерения, широко применяемые в научных исследованиях, практически не реализуются в лабораториях, контролирующих качество вод, несмотря на то что практически все современные лаборатории снабжены спектрофотометрами и люминесцентными спектрометрами, которые применяются при реализации методов мокрой “химии” (превращение исходного продукта специальными реактивами в “аналит” с выраженными характерными свойствами с его последующим анализом) [5].

В данной работе спектрофотометрический метод исследования применяется для первичного анализа исходных неизмененных проб воды, что позволяет оценить качество вод по их спектру поглощения в ультрафиолетовой (у.ф.) и видимой области и на количественном уровне определить содержание в воде ряда истинно растворенных примесей или хромофорных групп.

В работе обосновано применение метода для оценки качества природных и питьевых вод.

2. ВОЗМОЖНОСТИ СПЕКТРОФОТОМЕТРИИ В У.Ф.- И ВИДИМОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА ДЛЯ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА ИСХОДНЫХ ПРОБ ВОДЫ

Чистая вода в у.ф.- и видимой области спектра прозрачна. Слабое поглощение воды в коротковолновой у.ф.-области может быть обусловлено собственным поглощением воды (167 нм, 1480 л/(моль · см)) за счет электронного перехода $n \rightarrow \sigma^*$ и поглощением OH^- (187 нм, 50000 л/(моль · см)) [6]. Коротковолновое поглощение дистиллированной воды может быть обусловлено также содержащимися в ней на уровне сотен миллиграмм на литр хлоридами, сульфатами, гидрокарбонатами и нитратами металлов. В ближней инфракрасной (и.к.) области у воды наблюдаются полосы с максимумом 980 нм и более коротковолновые слабые полосы. Эти полосы являются проявлением обертонов гармоник основных частот и.к.-колебаний и их интерференцией.

При отсутствии в воде микроорганизмов и примесей в диапазоне 205–720 нм свежая дистиллированная вода является прозрачной на уровне коэффициента поглощения ≤ 0.01 см$^{-1}$.

Однако в природе чистой воды, состоящей только из молекул H_2O, не существует. Она всегда содержит растворенные в ней вещества, кроме того, в воде могут присутствовать малые коллоидные частицы и кластеры металлов. Поглощение вод в у.ф.-области может быть хорошим индикатором наличия в ней растворенных соединений, а бесструктурное повышение поглощения в видимой области – показателем наличия взвешенных (нерастворенных) частиц.

Способность к поглощению зависит от электронного строения молекул, и обычно ее связывают с наличием в молекуле хромофорных групп. При загрязнении воды определенными хромофорами в спектрах оптического поглощения будут наблюдаться определенные полосы поглощения. Ряд растворенных соединений, например азота в виде нитратов и нитритов металлов, хорошо поглощают свет и надежно проявляются в спектрах поглощения вод [7]. При больших концентрациях в видимой части спектра может проявляться поглощение, обусловленное ионами (комплексами) металлов.

Наличие взвешенных частиц (газовых пузырьков) микронного размера в воде будет приводить к увеличению поглощения (рассеяния) по всей области изучаемого спектра. Более мелкие (коллоидные) частицы могут обусловливать рассеяние, спадающее от у.ф.- в длинноволновую область, накладывающееся на поглощение.

Исходя из возможностей метода, такие показатели, как мутность, цветность и прозрачность воды, априори можно определять по поглощению, так как это сугубо оптические показатели, которые можно нормировать по коэффициенту поглощения и рассеивания. Более того, по виду спектра поглощения для рассеивающих сред можно определить размер рассеивающих частиц. Таким образом, анализ измеренного спектра поглощения в широком диапазоне длин волн позволяет сделать ряд важных выводов о качестве воды.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

3.1. Аппаратура

Исследование спектров поглощения проводилось на спектрофотометре SHIMADZY UV-1700, работающем в диапазоне длин волн 190–1100 нм. Модель имеет двулучевую оптику, оптическая ширина щели может принимать значения: 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2 и 5 нм. Оптическая плотность A измеряется в диапазоне 0–4 с точностью 0.001. При измерениях использовались кварцевые кюветы разных толщин и рассчитывался коэффициент поглощения в обратных сантиметрах. При обработке из спектров растворов вычитался спектр поглощения дистиллированной воды. В качестве источников сканирующего излучения в у.ф.-области спектра использовались дейтериевые, а в видимой области – галогеновые лампы.

3.2. Оценка пределов обнаружения растворенных в воде примесей методом прямой спектрофотомерии проб

В связи с тем что в большинстве небольших населенных пунктов питьевую воду чаще всего получают из персональных скважин, централизованный контроль этой воды не осуществляется. Оценка ее безопасности для населения непомерно дорога, поэтому поиск простых и дешевых методов экспрессной оценки качества используемой воды, несомненно, актуален. Значимость этой проблемы возрастает в связи с истощением ресурсов, а также с нарастающим антропогенным загрязнением окружающей среды, приводящим к ухудшению качества подземных и поверхностных вод [1, 2].

На основании теоретических предпосылок и предварительных исследований можно предложить метод прямой спектрофотомерии проб воды в у.ф.- и видимой области в качестве первичного метода анализа качества воды, потребляемой населением для питьевых и бытовых целей.

Установить структуру молекул или ионов, содержащихся в воде, основываясь на изучении только спектров поглощения, удается далеко не всегда [7]. Зачастую для дополнительного изучения физико-химических свойств сложных молекулярных систем применяются люминесцентные методы анализа, обладающие чувствительностью, во много раз превышающей чувствительность спектрофотометрических методов [8]. Однако спектр поглощения воды в случае значительного его отличия от характерного для воды со средними показателями загрязнения может являться сигналом для проведения более подробного анализа.

Для большинства катионов металлов (без пробоподготовки) поглощение в воде может наблюдаться в области 300–1000 нм с коэффициентами молярной экстинкции, не превышающими 10 л/(моль · см), поэтому прямое спектрофотометрическое определение их концентрации на уровне предельно допустимой концентрации (п.д.к.) не представляется возможным. Из металлических примесей только шестивалентный хром и семивалентный марганец могут быть определены в воде на уровне п.д.к. по спектру поглощения их характерных хромофорных групп.

Иная ситуация с определением анионов или анионных групп, которые являются оптически активными в у.ф.-области и обладают высокими коэффициентами молярной экстинкции, что позволяет регистрировать их с высокой степенью надежности и хорошей чувствительностью.

Практически все анионы при содержании их в воде на уровне, не превышающем п.д.к., проявляются в спектре поглощения, и содержание некоторых из них можно определить прямым измерением поглощения анализируемых проб воды в у.ф.-области.

Оценим пределы обнаружения растворенных в воде анионов с использованием модельных систем на основе приготовленных в лабораторных условиях растворов с изменяющимися анионными группами. В качестве основного катиона был выбран калий, так как его присутствие не влияет на спектр поглощения в рассматриваемой области спектра.

Наиболее хорошо в у.ф.-области из анионов поглощают свет йодид-ионы, бромид-ионы, нитрат-ионы, нитрит-ионы. Их определение возможно на уровне концентрации десятки микрограмм на литр при существенно разных п.д.к.: для йода и брома это сотни микрограмм на литр, а для нитратов и нитритов – миллиграммы на литр. Предельно допустимая концентрация, естественно, отражает распространенность данных анионов в водах. Таким образом, именно нитрат-ион, имеющий наиболее высокое значение п.д.к. (45 мг/л) и низкий предел обнаружения, наиболее вероятно будет определять поглощение вод в у.ф.-области [7].

Сульфаты имеют полосу поглощения с максимумом в области 215 нм с коэффициентом молярной экстинкции порядка 2300 л/(моль · см).

Хлориды, гидрокарбонаты и дигидрофосфаты надежно определить прямым спектрофотометрическим методом нельзя, так как максимумы их полос поглощения не находятся в анализируемой области спектра, а коэффициенты молярной экстинкции в десятки раз ниже нитратов и сульфатов. Данные анионные группы при содержании на допустимых уровнях повышают поглощение воды в области ≤190 нм, слабо влияя на спектр поглощения ≥210 нм.

Ряд катионов с переменной валентностью, таких как шестивалентный хром, образуя анионные хромофорные группы с максимумами поглощения на длинах волн 270, 370 нм, могут в сантиметровой толщине слоя определяться на уровне двух п.д.к., и, следовательно, их определение на уровне п.д.к. технически возможно при увеличении толщины слоя. Семивалентный марганец надежно определяется на уровне п.д.к. по характерному структурируемому поглощению в диапазоне длин волн 525–545 нм. Фенол, имея поглощение при 211 и 270 нм, может быть определен на уровне фенольного индекса 0.25 мг/л.

Поглощение, схожее с характерным поглощением фенола в области 270 нм по форме полосы, но с небольшим сдвигом в длинноволновую область, может наблюдаться для аминокислот, особенно тирозина и триптофана, которые входят в состав практически каждой белковой молекулы. Однако учет положения максимумов (сдвиг в длинноволновую область) и соотношений интенсивностей полос поглощения, характерных для этих аминокислот, не приведут к завышению концентрации фенола, определяемой по у.ф.-спектру

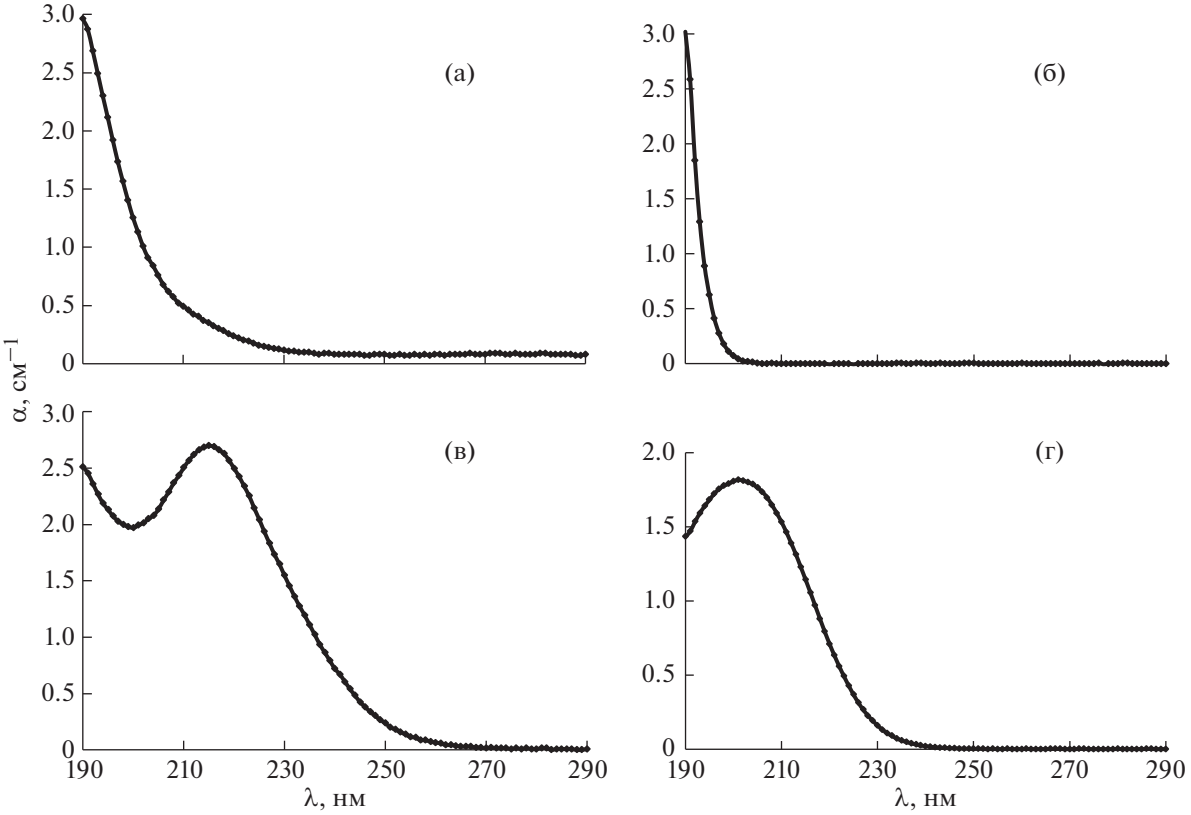


Рис. 1. Общий вид спектров поглощения вод с преимущественными типами анионов: **а** – карбонатные воды, концентрация CO_3^{2-} 100 мг/л; **б** – хлоридные воды, концентрация Cl^- 100 мг/л; **в** – сульфатные воды, концентрация SO_4^{2-} 50 мг/л; **г** – нитратные воды, концентрация NO_3^- 12 мг/л.

поглощения. И фенол, и аминокислоты (тирозин и триптофан) лучше диагностируются по их спектрам фотолюминесценции при возбуждении в области полос поглощения.

Спектры поглощения бензинов обладают определенной информативностью, однако определить загрязнение воды нефтепродуктами на уровне п.д.к. невозможно без привлечения люминесцентных исследований, имеющих большую чувствительность.

Таким образом, спектрофотометрия в у.ф.- и видимой области может стать простым и экспрессным методом первичного анализа качества воды, не требующим подготовки проб, экстракции или введения дополнительных химических реактивов в отобранные анализируемые пробы. В ряде случаев метод позволяет провести количественную оценку следующих растворенных в воде примесей:

• йодид-ионов, начиная с 50 мкг/л при п.д.к. 125 мкг/л;

• бромид-ионов, начиная с 30 мкг/л при п.д.к. 200 мкг/л;

• нитрат-ионов, начиная с 40 мкг/л при п.д.к. 45 мг/л;

• нитрит-ионов, начиная с 30 мкг/л при п.д.к. 3 мг/л;

• хрома (6) – на уровне 0.1 мг/л при п.д.к. 0.05 мг/л;

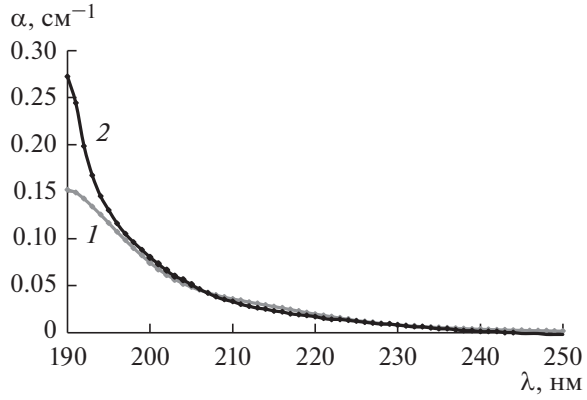


Рис. 2. Расчетный (*1*) и регистрируемый в кварцевой кювете (*2*) спектры поглощения дистиллированной воды.

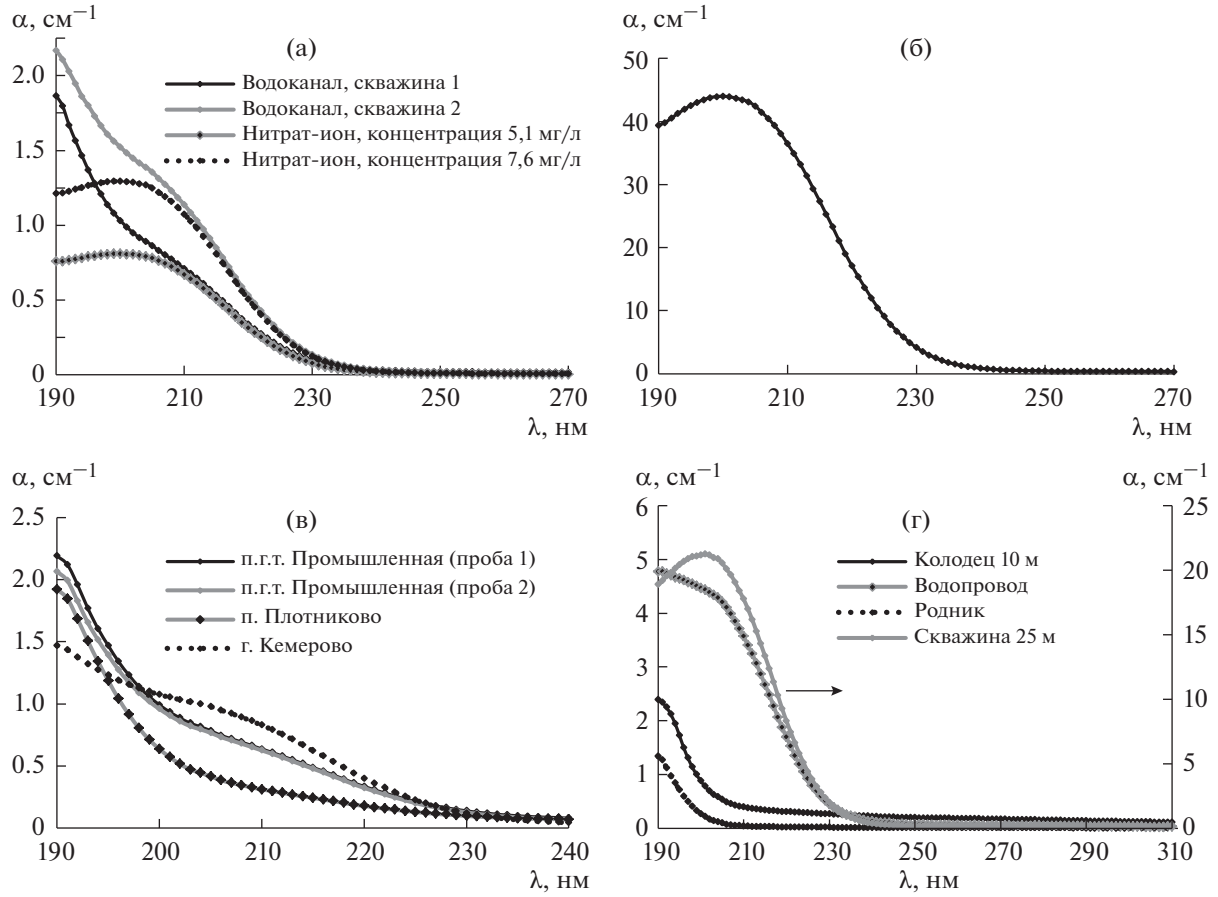


Рис. 3. Спектры поглощения питьевых вод, отобранных в населенных пунктах Кемеровской области: **а** – в п. Березовский (скважины № 1 и № 2), здесь же сравнительные спектры поглощения NO_3^- для определения концентраций нитрат-иона в скважинах; **б** – в п. Ариничево (водопровод), концентрация NO_3^- 270 мг/л; **в** – спектры поглощения водопроводных вод в п.г.т. Промышленная, п. Плотниково и г. Кемерово; **г** – в п. Бархатово из различных источников.

• марганца (7) – на уровне 0.1 мг/л при п.д.к. 0.1 мг/л;

• фенола – на уровне 0.2 мг/л при п.д.к. 0.25 мг/л.

Во всех проведенных нами экспериментах не применялось ни дополнительной подготовки проб, ни введения катализаторов, скорость выполнения анализа была существенно выше существующих методов анализа водных проб.

3.3. Моделирование спектров поглощения проб вод с допустимыми показателями загрязнения

На основании проведенных исследований на модельных системах и данных о характерных содержаниях примесей в водах разного генезиса мы смоделировали спектры поглощения дистиллированной воды с допустимым содержанием анионов для преимущественно карбонатных, сульфатных, хлоридных и нитратных вод (рис. 1).

На рис. 2 приведен как рассчитанный на основании стандартных содержаний анионов, так и реально измеренный спектр поглощения дистиллированной воды.

3.4. Поглощение реальных проб природных и питьевых вод

На рис. 3 приведены спектры поглощения вод, используемых населением в качестве питьевых. Основное поглощение в области 202 нм обусловлено нитрат-ионом [7], а в области ~190 нм – хлоридами и гидрокарбонатами.

Поглощение при длине волны 202 нм колеблется для разных проб воды в диапазоне от 0.5 до 45 см$^{-1}$, т.е. в изменяется 90 раз, достигая значения 270 мг/л по NO_3^- (шестикратное превышение п.д.к.). При этом вода абсолютно прозрачна на вид и не имеет запаха.

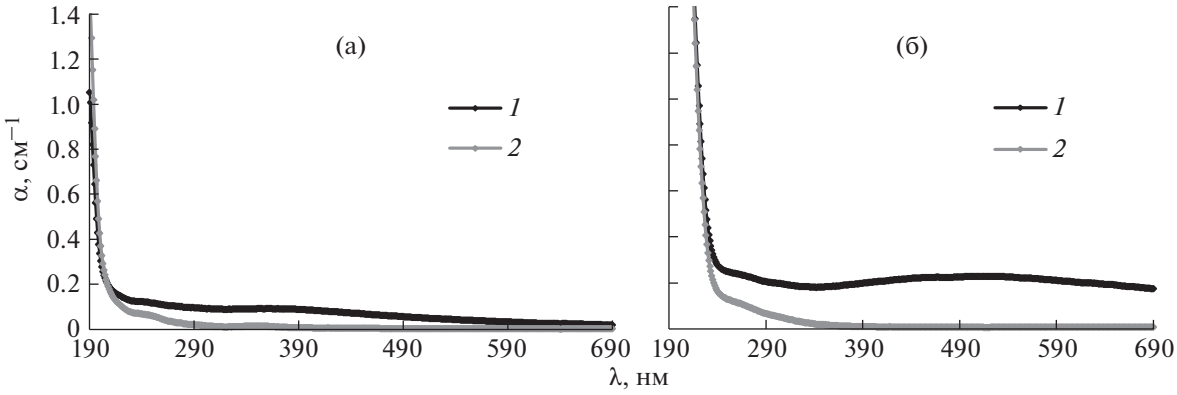


Рис. 4. Спектры поглощения вод, загрязненных железом и марганцем выше уровня п.д.к.: **а** – из скважины в шт. Пенсильвания, США до (*1*) и после очистки системой фильтров (*2*); **б** – в Кемеровской области до (*3*) и после отстаивания (*4*).

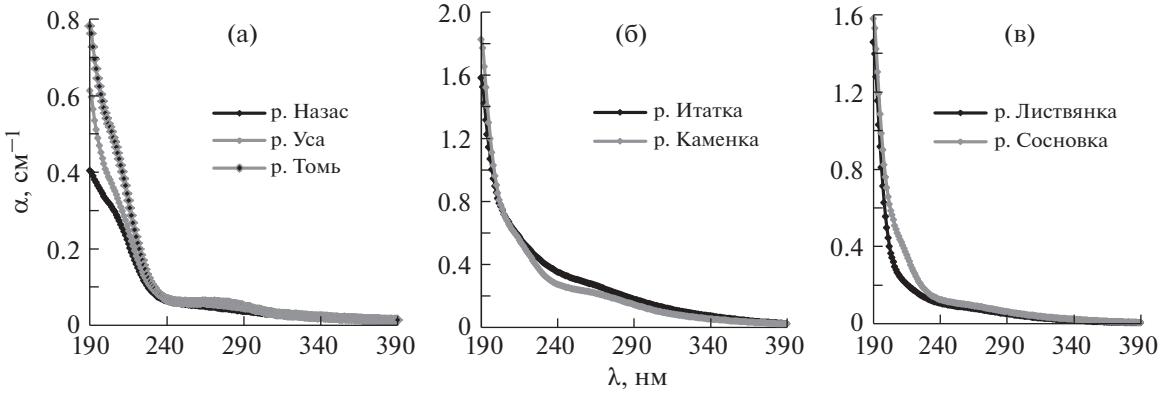


Рис. 5. Спектры поглощения поверхностных вод Кемеровской области, отобранных в окрестностях г. Междуреченска (**а**); п. Итатского (**б**); п. Бархатово (**в**).

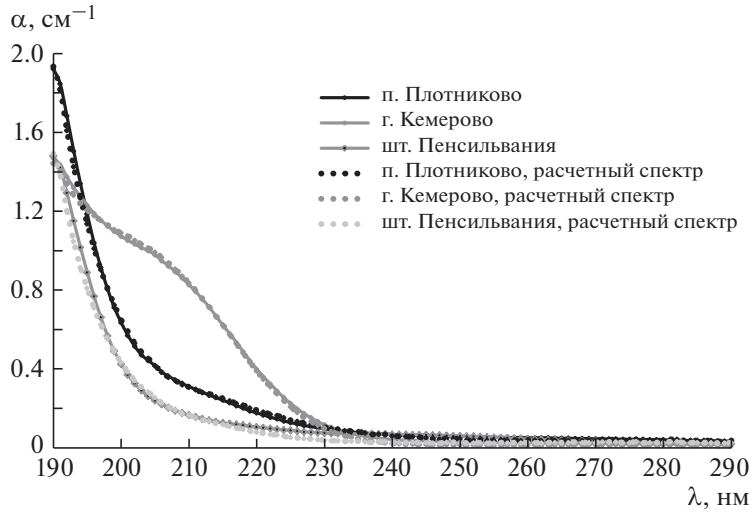


Рис. 6. Расчетные и регистрируемые спектры поглощения реальных питьевых вод.

В централизованно подготовленной питьевой воде нитраты также наблюдаются в спектре поглощения на уровне 5–7 мг/л (на рис. 3а в скважине 1 на уровне 5.7 мг/л; в скважине 2 – 7.6 мг/л). В п. Бархатово более высокие концентрации нитратиона обнаружены в воде из 25-метровой скважины, а в родниковой воде и воде из колодца глубиной 10 м нитратов немного (см. рис. 3г).

На рис. 4 приведены спектры поглощения вод из частной скважины (шт. Пенсильвания, США) до очистки, показавшие превышение по железу и марганцу, и после их очистки, а также спектры поглощения вод из Кемеровской области до и после отстаивания.

На рис. 5 приведен ряд спектров поглощения поверхностных вод (воды, отобранные в реках в окрестностях г. Междуреченска, п. Итатского и п. Бархатово Кемеровской области). Наилучшие характеристики поглощения имеет вода из р. Назас (рис. 5а). Эта река сопоставима по размерам с реками в окрестностях п. Итатского и п. Бархатово, протекающими по более антропогенно загрязненным территориям (рис. 5б и 5в). Воды таких крупных рек, как Томь и Уса, в своих верховьях также имеют характеристики лучше, чем питьевые водопроводные воды (рис. 5а).

На рис. 6 приведены расчетные и реально измеренные спектры питьевых вод.

Программная обработка реально измеренных спектров на основании модельных спектров с преимущественными типами анионов позволяет оценить концентрации растворенных в воде анионных групп. Лучшие совпадения реальных и расчетных спектров получены при следующих концентрациях: Cl^- – 16.7 мг/л, CO_3^{2-} – 45.5 мг/л, SO_4^{2-} – 1.67 мг/л (п. Плотниково); Cl^- – 10 мг/л, CO_3^{2-} – 14.3 мг/л, NO_3^- – 6 мг/л (г. Кемерово); Cl^- – 16.7 мг/л, CO_3^{2-} – 33 мг/л (шт. Пенсильвания).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе обоснован вывод о возможности проведения первичной оценки исходных проб воды (без пробоподготовки) спектрофотометрическим методом и проведена количественная оценка содержания ряда анионных примесей, растворенных в воде. Следует отметить, что спектрофотометрический метод позволяет проводить оценку именно истинно растворенных в воде примесей и, зачастую, их присутствия в разных формах окисления.

Загрязнение нитратами подземных вод, являющееся в настоящее время одной из серьезных экологических проблем, легко выявляется по спектру поглощения воды. Это позволяет рекомендовать метод для текущего мониторинга как элемент экоаналитики водных ресурсов. В настоящее время ни одна из действующих методик исследования вод не связана с прямым исследованием спектров поглощения воды в у.ф.-области, позволяющим определять растворенные в воде примеси без дополнительных процедур подготовки проб или введения химических реагентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СанПиН 2.1.4.1175-02. Гигиенические требования к качеству воды нецентрализованного водоснабжения. Санитарная охрана источников. Москва. 2003.
2. СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения (с изменениями на 2 апреля 2018 года). 2001.
3. *Грудинкина Н.П.* // Оптика и спектроскопия. 1956. Т. 1. Вып. 5. С. 658.
4. *Шмидт В.* Оптическая спектроскопия для химиков и биологов. М.: Техносфера, 2007.
5. *Танасюк Д.А., Ермаков В.И.* // Успехи в химии и химической технологии. 2013. Т. 27. № 6. С. 55.
6. *Клюбин В.В., Клюбина К.А., Маковецкая К.Н.* // Журнал физической химии. 2017. Т. 91. № 6. С. 973. https://doi.org/10.7868/S0044453717060140
7. ГОСТ 18826-73. Вода питьевая. Методы определения содержания нитратов.
8. ГОСТ 4192-82. Вода питьевая. Методы определения минеральных азотсодержащих веществ.

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 6, с. 71–75

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 53.07

КОМПАКТНЫЙ МЮОННЫЙ ТЕЛЕСКОП ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПОТОКОВ ВТОРИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

© 2020 г. Ю. В. Балабин[a], Б. Б. Гвоздевский[a], А. В. Германенко[a], Е. А. Михалко[a], Е. А. Маурчев[a,*], Л. И. Щур[a]

[a] *Полярный геофизический институт*
Россия, 184209, Апатиты, Академгородок, 26а
**e-mail: maurchev1987@gmail.com*

Поступила в редакцию 25.03.2020 г.
После доработки 19.05.2020 г.
Принята к публикации 06.06.2020 г.

В лаборатории космических лучей Полярного геофизического института создан простой и компактный благодаря модульной конструкции телескоп, предназначенный для регистрации ионизирующих частиц в диапазоне энергий от 1 МэВ до 100 ГэВ. Телескоп состоит из двух пластин сцинтилляторов, разделенных слоем свинца и расположенных друг над другом. Электронная схема создает канал счета верхнего детектора и канал совпадений с нижним. Площадь каждого детектора – 0.25 м^2, средний темп счета верхнего детектора – 3000 импульсов/мин.

DOI: 10.31857/S0032816220060038

ВВЕДЕНИЕ

Стандартный мюонный телескоп (м.т.) является массивным и дорогостоящим устройством. Площадь его детекторов превышает несколько квадратных метров. Например, стандартный кубический телескоп имеет площадь 4 м^2 [1]. Его назначение – одновременное измерение потоков мюонов, достигающих поверхности земли, в различных направлениях (измерения ведутся по нескольким зенитным и азимутальным углам), определение анизотропии космических лучей. Есть и более сложные приборы, например, в Якутске несколько мюонных телескопов расположено под землей на разной глубине. Они проводят мониторинг космических лучей в заданных энергетических диапазонах.

Назначение разработанного телескопа – измерение потоков энергичных частиц (прежде всего мюонов, но также электронов, позитронов и γ-квантов), возникающих в атмосфере от космических лучей.

В приборе применен детектор мюонов в телескопической конфигурации на основе сцинтилляторов. Простота конструкции прибора обусловлена как использованием готовых модулей, так и не слишком большой эффективной площадью детекторов. Однако выбранный размер детекторов достаточен, чтобы обеспечить хорошую точность измерений при 5-минутном усреднении.

КОНСТРУКЦИЯ

Созданный м.т. состоит из двух пластиковых сцинтилляторов, разделенных слоем свинца. Использованы готовые сцинтилляционные модули, изготовленные в Институте физики высоких энергий (г. Протвино), содержащие пластиковый сцинтиллятор, полупроводниковый фотоприемник SiPM и предварительный усилитель. Размер одного сцинтиллятора 500 × 500 × 50 мм (площадь 0.25 м^2). Они установлены один над другим на расстоянии 50 см. Между ними посредине размещен слой свинца толщиной 10 см, составленный из стандартных свинцовых кирпичей (200 × 100 × 50 мм). Размер свинцового слоя 750 × 750 мм.

М.т. закреплен на поворотной платформе, имеющей три оси вращения. С помощью этой платформы можно сориентировать ось телескопа в любом направлении в пределах верхней полусферы.

Телескопическое размещение детекторов позволяет сузить телесный угол приема до 45°. Выходными сигналами являются выход верхнего сцинтиллятора и выход схемы совпадений верхнего и нижнего. Верхний сцинтиллятор детектирует все приходящие с верхней полусферы заряженные частицы, в том числе легкие (электроны и позитроны), а также γ-кванты. Нижний энергетический порог определен исходя из расчета количества вещества, находящегося непосредственно над детектором (корпус, крепление) и составляет 2–3 МэВ. Схема совпадений ограничивает

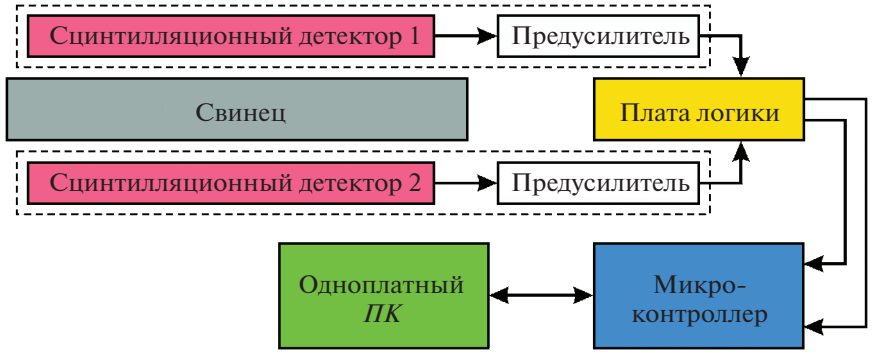


Рис. 1. Блок-схема мюонного телескопа.

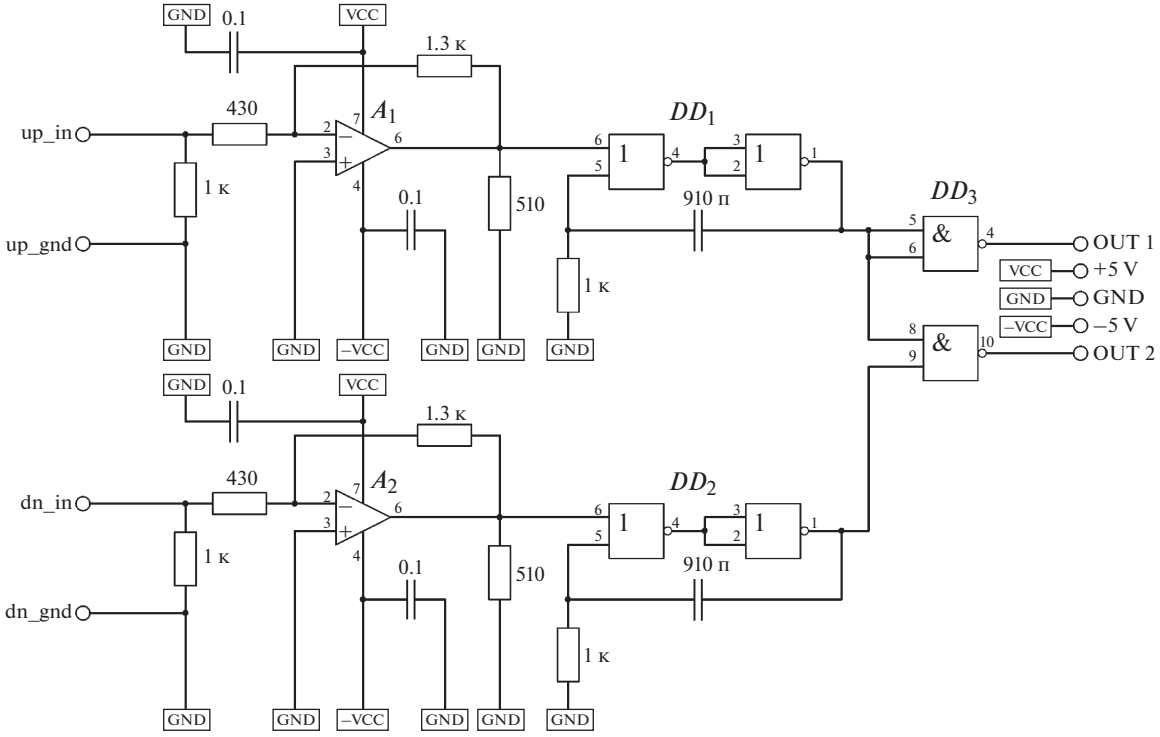


Рис. 2. Принципиальная схема платы логики. A_1, A_2 – AD825; DD_1, DD_2 – 74ALS28, DD_3 – SN74LS37.

поле зрения телескопа и выделяет только мюоны с энергиями >250 МэВ.

Таким образом, данная конструкция детектора заряженных частиц совмещает всенаправленный детектор мягких заряженных частиц и γ-квантов и простой мюонный телескоп.

ЭЛЕКТРОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Блок-схема мюонного телескопа представлена на рис. 1.

Встроенный в модуль сцинтиллятора предварительный усилитель обеспечивает выходной сигнал на уровне единиц милливольт (стандарт NIM). Длительность импульса около 100 нс, фронты имеют длительность единицы наносекунд. Выход предварительного усилителя рассчитан на нагрузку до 50 Ом, хотя оптимальной оказалась нагрузка 400 Ом. Предусилитель калибруется производителем для каждой пластины детектора отдельно для обеспечения однородности счета.

Плата логики служит для первичной обработки сигналов от детекторов, и ее схема приведена на рис. 2.

Операционные усилители A_1 и A_2 преобразуют сигналы из стандарта NIM до уровня, обеспечивающего работу TTL-логики. На микросхемах DD_1 и DD_2 собраны два формирователя импуль-

сов, которые служат для увеличения длительности импульсов от сцинтилляционных детекторов до ~1 мкс, что обеспечивает стабильность работы последующей системы регистрации. Поскольку предполагается использовать м.т. для мониторинга потоков космических лучей, где средний счет детектора составляет 3000 импульсов/мин, то такое уширение рабочих импульсов несущественно [2]. Вероятность появления второго импульса в течение $t = 1$ мкс после первого составит всего 1/20000. Такой долей пропущенных импульсов можно пренебречь, следовательно, применение формирователя импульсов допустимо.

Микросхема DD_3 выполняет функцию схемы совпадений импульсов от верхнего и нижнего детекторов. Созданы два выходных канала (TTL-уровни): импульсы от верхней пластины (Выход 1) и совпадения импульсов от двух пластин (Выход 2). Использованы быстродействующие операционные усилители, включенные по типовой схеме [3, 4].

Плата микроконтроллера служит основой системы регистрации. Она построена на микроконтроллере ATmega 2560, который обеспечивает непосредственно счет импульсов по двум каналам, а также работу цифрового датчика давления и температуры Bosch BMP280, подключенного по шине I^2C. Микроконтроллер может обеспечивать прямую запись данных на флэш-накопитель (SD-карту по шине SPI), однако в текущей стационарной конфигурации эта возможность не используется, поскольку имеется возможность подключить м.т. в локальную сеть. Вместо этого микроконтроллер по запросу от персонального компьютера *ПК* формирует пакет данных, содержащий текущий счет детекторов, атмосферное давление и температуру, и отсылает его в *ПК*. Прошивка микроконтроллера написана на языке Си с использованием ряда стандартных библиотек [5], часть из которых была модифицирована для получения необходимой функциональности.

Одноплатный *ПК* служит для первичной обработки и хранения данных системы регистрации. В данной конфигурации используется микрокомпьютер Orange Pi PC PLUS с операционной системой Armbian Ubuntu Bionic. На *ПК* запущена служба, ежеминутно опрашивающая микроконтроллер и сохраняющая приходящие от него данные в базу данных. Периодичность опроса и, соответственно, получения данных от системы сбора определяется *ПК* и может быть легко изменена.

Точность периодов зависит от точности хода часов *ПК*. Поскольку одноплатные микрокомпьютеры не имеют встроенных часов реального времени (RTC), к данному *ПК* был дополнительно подключен внешний модуль RTC на базе микросхемы DS3231, обеспечивающий высокую точность хода часов, а также настроены службы периодической синхронизации часов через интернет (NTP).

На *ПК* запущены службы, обеспечивающие построение предварительных графиков на основе данных детекторов, для быстрого анализа работы системы и просмотра данных на локальном web-сайте. Сохраненная база данных счета детекторов регулярно отправляется (синхронизируется) на общий сервер данных лаборатории.

Для питания м.т. использован блок питания MEAN WELL RQ-50B на четыре выхода, выдающий напряжения ±5 и ±12 В. Выходы ±5 В используются для непосредственного питания системы. Выход +12 В был использован для создания напряжения +30 В при помощи DC-DC-модуля на микросхеме XL6009. Последний оставшийся выход −12 В использован для питания системы охлаждения. Для повышения качества питающих напряжений на всех выходах были установлены дополнительные фильтры питания. Полная потребляемая мощность м.т. составляет <20 Вт.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ПРИБОРА

С целью проведения исследований мюонов вторичных космических лучей в области высоких широт, определения их потока и угловых характеристик, м.т. был установлен в Апатитах (координаты 33.4° в.д. и 67.6° с.ш., жесткость геомагнитного обрезания ~0.6 ГВ) и запущен в режиме непрерывной регистрации данных. На рис. 3 представлены типичные результаты записи вариаций скорости счета, а также профиль атмосферного давления.

Поток мюонов, достигающий поверхности земли, также зависит от состояния атмосферы [1]. Это означает, что часть наблюдаемых на детекторе вариаций не имеет отношения к изменению потока космических лучей, а обусловлена атмосферными эффектами. Наиболее значимыми из них являются барометрический и температурный эффекты. При повышении атмосферного давления количество вещества (масса столба воздуха) возрастает, а поток мюонов при этом падает. Связь между потоком мюонов и давлением экспоненциальная.

Для устранения вариаций, связанных с давлением, используется методика, описанная в [1]. Для нее требуется знать барометрический коэффициент (б.к.). Несмотря на не слишком большую базу данных (около трех месяцев), б.к. был определен и составил -0.00174 мб$^{-1}$. Для мюонов принято значение б.к. $-0.0016...-0.0018$ мб$^{-1}$ [1]. Для других частиц он имеет иные значения. Таким образом, можно достоверно говорить о том, что м.т. регистрирует нужную компоненту (мюонную). В дальнейшем, по мере накопления данных, б.к. будет уточнен.

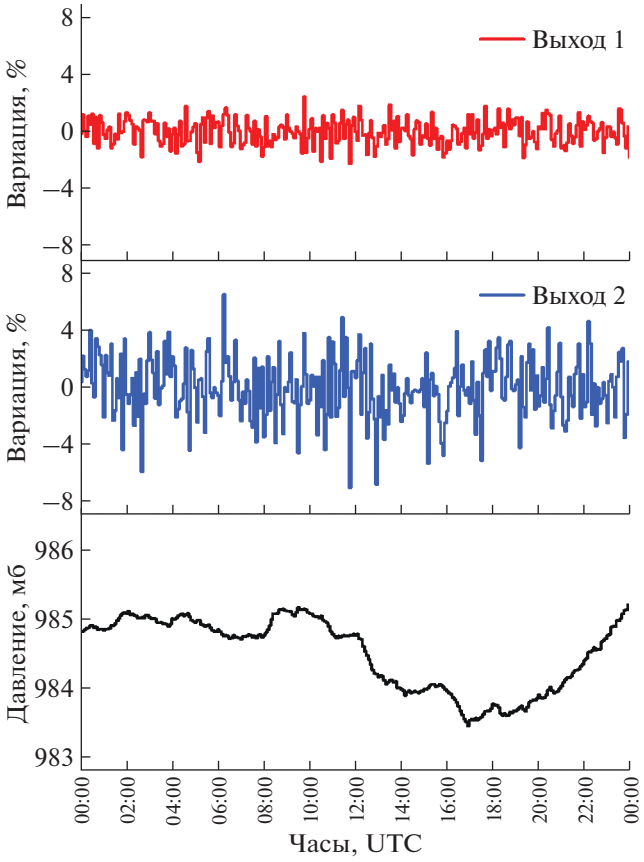


Рис. 3. Запись вариаций скорости счета м.т. и изменений атмосферного давления 09.05.2020. Использованы исходные 5-минутные данные. Поток мюонов зависит от атмосферного давления; для устранения вариаций, связанных с давлением, используется специальная методика, описанная в [1].

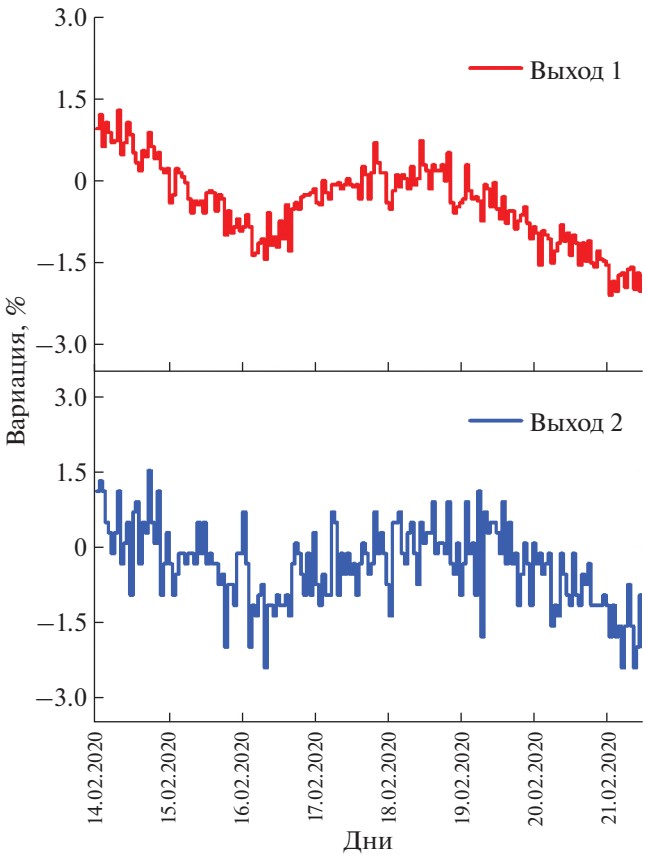


Рис. 4. Обнаруженная вариация потока мюонов. Использовано часовое усреднение, поправка на вариации давления сделана. Предположительно, наблюдаемая вариация связана с метеоусловиями [6].

На рис. 4 представлены вариации потока мюонов и других заряженных частиц на протяжении нескольких дней. Временное разрешение составляет 1 ч (часовое усреднение исходных 5-минутных данных). Данные исправлены: вариации, связанные с изменениями атмосферного давления, устранены. Оставшиеся вариации связаны с температурными эффектами в атмосфере [1]. Возможно также, что некоторые вариации связаны и с метеоусловиями [6], наблюдавшимися в этот период. Для отслеживания скорости изменения тренда по ординате указана не абсолютная величина, а процентное соотношение относительно базового уровня, в качестве которого выступает арифметическое среднее, вычисленное за указанный промежуток времени. Интересно отметить, что значительная вариация наблюдается в данных, поступающих от верхней пластины (Выход 1). Верхний сцинтиллятор, не имеющий свинцовой защиты, регистрирует все заряженные частицы, в том числе электроны и позитроны с энергиями от 2–3 МэВ. С Выхода 2 поступают данные о потоке мюонов, он остается примерно постоянным на протяжении всего периода наблюдений. Подобный эффект (влияние метеоусловий в нижней атмосфере на поток низкоэнергичных γ-квантов) описан в [6]. Таким образом, м.т. позволил выделить из общего изменения потока вторичных космических лучей вариации, происходящие только в их мягкой компоненте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан простой мюонный телескоп для мониторинга потоков заряженных частиц – вторичных космических лучей. Наличие двух слоев детектора, разделенных слоем поглотителя, позволяет измерять как мягкую компоненту вторичных космических лучей (электроны, позитроны), так и жесткую – мюоны. Телескоп включен в систему мониторинга космических лучей. Анализ полученных данных показал, что мюонный телескоп регистрирует поток мюонов, отмечены вариации

потока мюонов, связанные с процессами в атмосфере.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда 18-77-10018.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дорман Л.И.* Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. М.: Наука, 1975.
2. *Гольданский В.И., Куценко А.В., Подгорецкий М.И.* Статистика отсчетов при регистрации ядерных частиц. М.: Физматлит, 1959.
3. *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники. М.: Мир, 2003.
4. *Шило В.Л.* Популярные цифровые микросхемы. М.: Радио и связь, 1989.
5. Arduino Libraries. https://github.com/arduino-libraries
6. *Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б., Вашенюк Э.В.* // Изв. РАН. Серия физическая. 2013. Т. 77. № 5. С. 639.

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 6, с. 76–82

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 520.274.3

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ ПРОТОТИПА МОБИЛЬНОЙ РСДБ-СТАНЦИИ

© 2020 г. М. Б. Зотов[a,*], Д. В. Иванов[a], В. Ю. Быков[a], С. А. Гренков[a], И. А. Поздняков[a], И. А. Рахимов [a], В. Г. Стэмпковский[a], А. А. Царук[a], В. К. Чернов[a], И. В. Шахнабиев[a], А. М. Шишикин[a]

[a] *Институт прикладной астрономии РАН*
Россия, 191187, Санкт-Петербург, наб. Кутузова, 10
**e-mail: zmb@iaaras.ru*

Поступила в редакцию 13.05.2020 г.
После доработки 09.06.2020 г.
Принята к публикации 10.06.2020 г.

В обсерватории “Светлое” Института прикладной астрономии РАН создан прототип мобильной РСДБ-станции (РСДБ – радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами) на основе механической части антенны спутниковой системы связи TESLA. Представлены основные решения по трансформации антенной системы станции спутниковой связи в антенную систему РСДБ-радиотелескопа, постоянно меняющую ориентацию в пространстве в соответствии с принципами РСДБ-наблюдений. Описан процесс настройки, подготовки к РСДБ-наблюдениям и представлены результаты измерения основных характеристик.

DOI: 10.31857/S0032816220060178

ВВЕДЕНИЕ

Актуальной проблемой улучшения наземной поддержки отечественной навигационной системы ГЛОНАСС является необходимость существенного уточнения опорной системы геоцентрических координат, опирающейся на пункты космической геодезической сети. Одним из наиболее эффективных способов решения этой задачи является определение разности координат пунктов этой сети и пунктов РСДБ-комплекса “Квазар-КВО” с помощью мобильной РСДБ-станции (РСДБ – радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами). Однако возможности комплекса этим не ограничиваются. Имеется возможность прямых измерений координат и показаний часов в любой точке на территории Российской Федерации и за ее пределами с помощью мобильной РСДБ-станции. Зарубежный опыт выполнения таких измерений показывает, что они могут выполняться с точностью порядка 1 см по координатам и 0.1 нс по времени за сутки [1].

Концепция мобильной РСДБ-станции с радиотелескопом ∅1–5 м для решения задач координатно-временного и навигационного обеспечения была предложена в 2017 году [2]. Для проверки реализуемости концепции был использован прототип передвижного РСДБ-радиотелескопа в составе радиоинтерферометрического комплекса “Квазар-КВО” [3, 4].

В качестве основы для такого прототипа послужила выведенная из эксплуатации наземная спутниковая станция (н.с.с.) TESLA S11 DD 424 (Чехословакия) (рис. 1). Скорость движения антенной системы станции по азимуту и углу места обеспечивает сопровождение источников радиосигнала в РСДБ-наблюдениях. Качество поверхности зеркальной системы удовлетворяет частотному диапазону 8.0–12.0 ГГц (*X*-диапазон). Н.с.с. снабжена двухзеркальной антенной системой с диаметром основного зеркала 4.3 м.

На основе такой станции в обсерватории “Светлое” был создан радиотелескоп РТ-4, являющийся основным инструментом прототипа мобильной РСДБ-станции для совместных наблюдений с радиотелескопами сети “Квазар-КВО”. Для этого была модернизирована система наведения антенной системы и доработана конструкция антенны для монтажа приемной аппаратуры.

Разработана приемная система диапазона частот 8.2–9.1 ГГц, способная осуществлять одновременный прием сигналов правой и левой круговых поляризаций. Прототип мобильной станции также оснащен системами регистрации и частотно-временной синхронизации.

В данной статье описаны основные технические решения, примененные в данной разработке.

Рис. 1. Наземная спутниковая станция TESLA S11 DD 424.

АНТЕННАЯ СИСТЕМА

Оценка текущего состояния н.с.с. TESLA в обсерватории “Светлое” дала основания для использования механической части (зеркальной системы, опорно-поворотного устройства с электродвигателями привода). Однако инкрементные датчики положения и управление электроприводом не подходят для радиотелескопа в силу различий в алгоритме наведения и сопровождения источника радиосигнала. Существенным ограничением для использования н.с.с. является малая скорость перемещения от одного источника к другому (2'/с), а также ограниченный диапазон перемещения по азимуту (±40°). Тем не менее, для создания прототипа данные ограничения допустимы при наличии соответствующей процедуры планирования РСДБ-наблюдений.

Оснащение датчиками положения на основе вращающегося трансформатора 5БВТ с устройствами передачи угла поворота обеспечили систему наведения абсолютными координатами азимута и угла места с разрешением в 20". Преобразование выходного напряжения 5БВТ в 16-разрядный код осуществляет модернизированное устройство преобразования координат [5].

Для двигателей привода антенной системы применено частотное управление с использованием преобразователей частоты, обеспечивающих изменение управляющей частоты в диапазоне 0–400 Гц с дополнительным указанием направления вращения двигателя. Предварительные испытания системы управления электроприводом показали, что для собственных двигателей н.с.с. управляющая частота должна быть ограничена значениями 0–200 Гц для азимутального привода и 0–150 Гц для угломестного. Кроме управления по скорости применение частотных преобразователей позволило повысить скорость перемещения антенны до 3'/с.

Аппаратная часть системы управления электроприводом содержит управляющий компьютер, датчики положения с устройством преобразования координат и преобразователи частоты для управления электродвигателями. Наведение на источник радиосигнала и дальнейшее его сопровождение осуществляется по командам центральной системы управления радиотелескопом (*ЦСУР*). Компьютер, управляющий электроприводом, обеспечивает максимально быстрое перемещение к источнику и работу алгоритма слежения за расчетной траекторией источника радиосигнала. Эти задачи решает программное обеспечение управляющего компьютера. За основу взята программная часть рабочей станции контроля и управления РТ-32 [6].

Для достижения наилучшей точности алгоритм сопровождения был доработан настройкой параметров. Настройка осуществлялась в два этапа. На первом этапе использовалась имитационная математическая модель привода антенной системы, на которой отрабатывались все режимы использования привода (переброс, сопровождение, поиск поправок и сканирование источника). Математическая модель добавляет зашумленность сигналов обратной связи, приближая поведение модели к поведению моделируемого объекта [7].

Перенос результатов имитационного моделирования на действующую антенную систему показал, что точность сопровождения в пределах 1' достигнута с сохранением хороших динамических показателей, таких как время выхода на сопровождение после переброса, возвращение на заданную траекторию при поиске поправок и

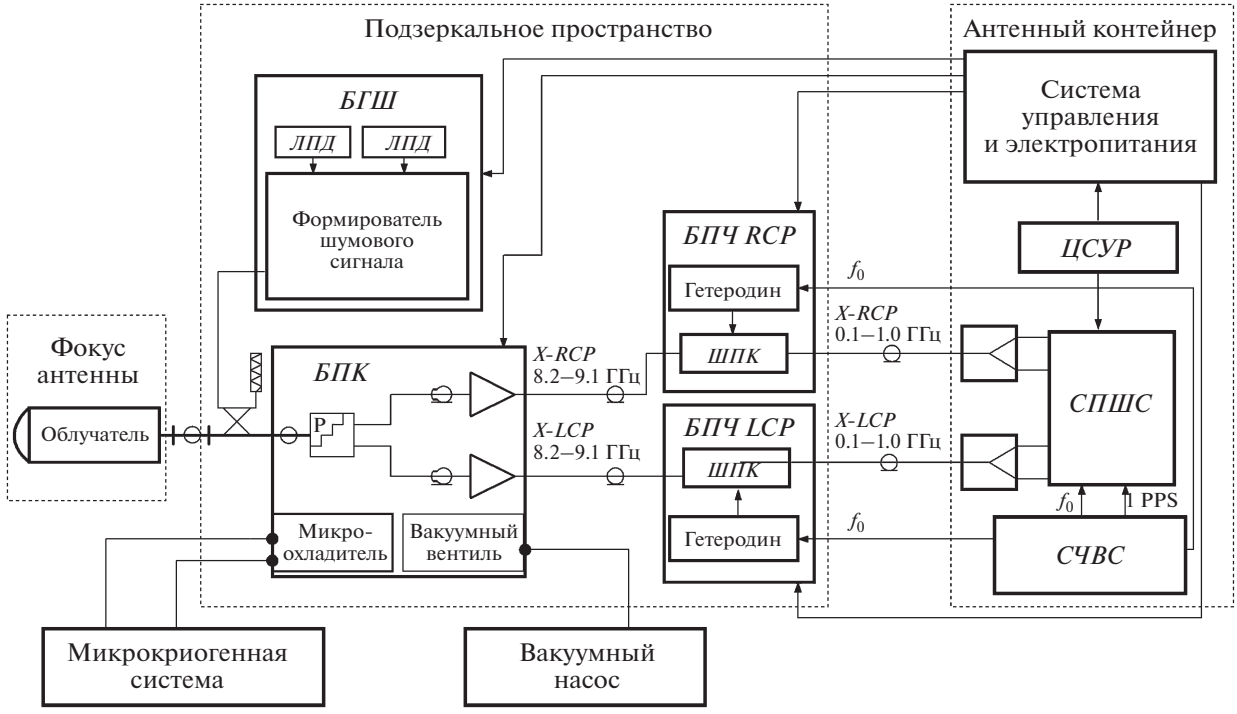


Рис. 2. Структура прототипа мобильной РСДБ-станции. *БГШ* – блок генераторов шума, *ЛПД* – лавинно-пролетный диод, *БПК* – приемный криостатируемый блок, *БПЧ* – блок преобразования частоты, *СПШС* – система преобразования широкополосных сигналов, *ШПК* – широкополосный преобразовательный канал, *СЧВС* – система частотно-временной синхронизации, *ЦСУР* – центральная система управления радиотелескопом, *RCP* и *LCP* – правая и левая круговые поляризации.

следование траектории сканирования в окрестности источника радиосигнала.

Оснащение н.с.с. новыми датчиками положения и замена аппаратной части системы управления электроприводом позволили получить необходимую точность сопровождения в совокупности с динамическими характеристиками антенны. Данные результаты позволяют говорить о возможности использования механической части н.с.с. TESLA в качестве основы для радиотелескопа РТ-4 прототипа мобильной РСДБ-станции. РТ-4 может быть использован в РСДБ-наблюдениях при соответствующем планировании наблюдений с учетом особенностей полученных характеристик радиотелескопа.

ПРИЕМНАЯ СИСТЕМА

Прототип мобильной РСДБ-станции состоит из радиотелескопа РТ-4 с размещенной на нем приемной системой и антенного контейнера с размещенной в нем аппаратурой систем регистрации и частотно-временной синхронизации. Антенный контейнер распложен в непосредственной близости от радиотелескопа. Для сопряжения волновода облучателя с входом радиоприемника предусмотрена регулировка положения приемного криостатируемого блока (*БПК*).

На рис. 2 представлена функциональная схема разработанной приемной системы, основными элементами которой являются: *БПК*, осуществляющий первоначальное усиление и разделение принимаемого сигнала на сигналы правой и левой круговой поляризации (*RCP* и *LCP)*, два блока преобразования частоты (*БПЧ*), выполняющие окончательное усиление, фильтрацию и преобразование с.в.ч.-сигнала в сигнал промежуточной частоты, один блок генераторов шума (*БГШ*), обеспечивающий амплитудную и фазовую калибровку тракта приемной системы, блоки связи и управления, микрокриогенная система [8].

Разработанный для прототипа радиотелескопа РТ-4 облучатель *X*-диапазона представляет собой конический скалярный рупор, фазовый центр которого совмещен с вторичным фокусом антенной системы РТ-4. Ширина диаграммы направленности облучателя по уровню –11 дБ составляет 50–52° (рис. 3). Облучатель помещен в цилиндрический контейнер ∅112 мм.

Волноводный тракт круглого сечения длиной 1 м имеет внутренний диаметр 25 мм, что обеспечивает передачу волн типа TE_{11} двух ортогональных поляризаций с малыми потерями и препятствует распространению волн высших типов во всем рабочем диапазоне частот приемной систе-

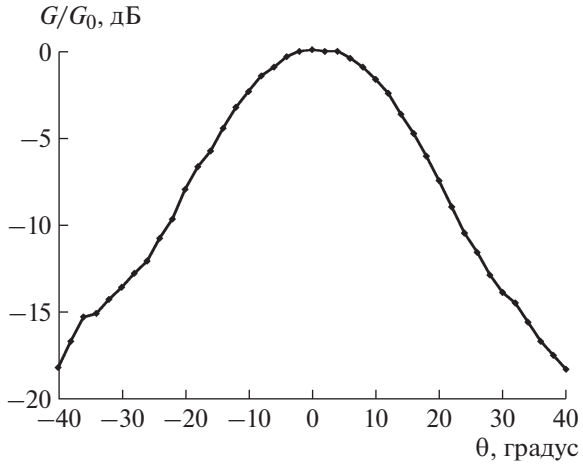


Рис. 3. Измеренная диаграмма направленности облучателя радиотелескопа РТ-4.

мы. Тракт и облучатель имеют серебряное покрытие толщиной 9 мкм. Расчетные потери в волноводном тракте составляют не более 0.2 дБ.

Одним из важных параметров входных цепей приемной системы, работающей на круговой поляризации, является осевой коэффициент эллиптичности. Его величина главным образом определяется разделителем поляризаций, находящимся внутри *БПК*, но зависит также и от качества изготовления облучателя и волноводного тракта. Измерения коэффициента эллиптичности проводились методом вращающейся передающей антенны, расположенной на оси входного тракта приемной системы в дальней зоне для данного облучателя. Измерения показали, что осевой коэффициент эллиптичности входных с.в.ч.-цепей приемной системы радиотелескопа РТ-4 во всем рабочем диапазоне частот не превышает 1 дБ, что является хорошим показателем.

В *БПК* сигнал с выхода разделителя поляризаций подается на охлаждаемые малошумящие усилители на полевых транзисторах HEMT. Для охлаждения разделителя поляризаций и малошумящих усилителей до водородных уровней температур (15 K) используется микрокриогенная система МСМР-110Н-3.2/20 замкнутого цикла охлаждения на базе двухступенчатого микроохладителя (15/77 K) и компрессора с воздушным охлаждением. Для обеспечения криостатирования до нужных температур проводится вакуумирование полости *БПК* с помощью двухступенчатого пластинчато-роторного вакуумного насоса со степенью разрежения 1 Па.

Непосредственно перед *БПК* расположен направленный ответвитель для ввода сигналов амплитудной во входной с.в.ч.-тракт от блока генераторов шума (*БГШ*) и фазовой калибровки от генератора пикосекундных импульсов (*ГПИ*). Источником сигнала амплитудной калибровки в *БГШ* являются малогабаритные широкополосные генераторы шума на лавинно-пролетных диодах (*ЛПД*). С выхода *БПК* сигналы поступают в блок преобразования частоты (*БПЧ*), по одному для каждой поляризации.

БПЧ включает в себя микросборку широкополосного преобразовательного канала (*ШПК*) [9], микросборку гетеродина, систему термостабилизации и платы вторичных источников питания. В нем высокочастотный сигнал усиливается и преобразуется в диапазон промежуточных частот (100–1000 МГц). Блоки *БПК*, *БГШ* и *БПЧ* располагаются в подзеркальном пространстве антенны.

Сигналы с выходов соответствующих *БПЧ* по радиочастотным кабелям поступают на делители мощности и соответствующие входы широкополосной системы преобразования и регистрации сигналов (*СПШС*). Система управления и электропитания, *СПШС* и часть блоков системы частотно-временной синхронизации (*СЧВС*) располагаются в антенном контейнере вблизи радиотелескопа РТ-4. Приемная система смонтирована на макете РТ-4 в обсерватории “Светлое”. По своим основным характеристикам она соответствует характеристикам приемных систем комплекса “Квазар-КВО” [10].

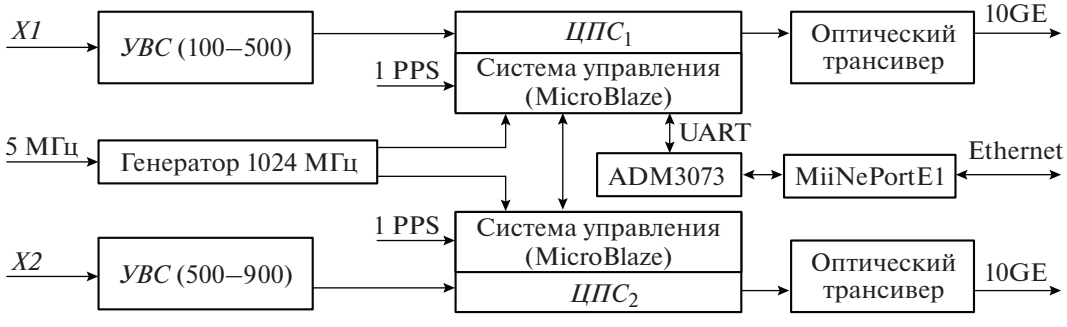


Рис. 4. Структурная схема модуля системы преобразования широкополосных сигналов. *УВС* – усилитель входных сигналов, *ЦПС* – цифровой преобразователь сигналов; 10GE – 10 Gigabit Ethernet.

СИСТЕМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

В качестве системы регистрации на прототипе мобильной РСДБ-станции использована цифровая система преобразования широкополосных сигналов *СПШС*, которая состоит из двух одинаковых модулей (рис. 4) [11], каждый из которых содержит по два канала цифрового преобразования сигналов, подключаемых к широкополосным выходам промежуточных частот радиоастрономической приемной системы. *СПШС* предназначена для усиления, фильтрации и двухбитного квантования принимаемых антенной шумовых сигналов в заданных полосах частот с формированием на выходе цифровых информационных потоков, которые по оптоволокну поступают в систему буферизации или регистрации данных наблюдений радиотелескопа. Каждый канал преобразования сигналов управляется специальным контроллером MicroBlaze, который сформирован в программируемой логической интегральной схеме, и через интерфейс UART, а также преобразователь UART-Ethernet связан с управляющим компьютером радиотелескопа. С устройством и принципом работы каналов цифрового преобразования сигналов можно ознакомиться в [12]. Основные параметры *СПШС*:

Число каналов	4
Полоса пропускания канала	512 МГц
Тактовая частота считывания выборок сигнала	1024 МГц
Вид квантования, бит	2
Суммарная скорость потока данных на выходе каждого канала	2.048 Гбит/с
Суммарная скорость потока данных на выходе системы	8.192 Гбит/с
Формат данных на выходе системы	VDIF
Тип интерфейса на выходе	10 Gigabit Ethernet (10GE)
Интерфейс управления	10/100 Ethernet
Сигналы внешней синхронизации	5/10/100 МГц, 1 Гц (1 PPS)
Автоматическая регулировка усиления	0–31 дБ

СИСТЕМА ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

Система частотно-временной синхронизации *СЧВС* (рис. 5) на основе водородного стандарта времени и частоты формирует сигналы опорной частоты 5 МГц и 1 Гц, когерентные с сигналами для других радиотелескопов. Сформированные опорные сигналы по длинным радиочастотным кабелям передаются в антенный контейнер радиотелескопа РТ-4 мобильной РСДБ-станции. Сигналы 5 МГц и 1 Гц принимаются распределительными усилителями и синхронизуют приемно-регистрирующую аппаратуру радиотелескопа.

Поскольку расстояние от помещения хранителя времени и частоты до радиотелескопа РТ-4 составляет более 100 м, особое внимание уделено фазовой стабильности кабелей передачи опорных сигналов, а именно, снижению влияния суточных колебаний температуры. Стандартный коаксиальный кабель РК-50-7-11 имеет температурный коэффициент задержки порядка 800 пс/(км · К) [13], что при суточном изменении температуры 15°С может привести к высоким потерям когерентности при проведении длительных РСДБ-наблюдений. Для уменьшения влияния температуры кабели проложены в подземных коммуникациях на глубине 1 м. Снижение суточных колебаний температуры в глубине грунта связано с тем, что тепловая волна с суточным циклом ослабляется с ростом глубины экспоненциально [14], и на метровой глубине колебание температуры воздуха ослабляется на два порядка. Малая амплитуда температурной суточной волны у кабеля при таком подземном заложении дает возможность обеспечения суточных колебаний фазы в кабеле менее 20 пс.

Для распределения сигнала до потребителей использованы импульсные распределительные усилители, обеспечивающие джиттер сигнала <50 пс, и малошумящие распределительные усилители гармонических сигналов, имеющие низкую вносимую нестабильность частоты (среднее квадратическое относительное случайное двухвыборочное отклонение на интервале усреднения 1 ч $<5 \cdot 10^{-15}$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ИПА РАН разработан прототип мобильной РСДБ-станции, основным инструментом которой является радиотелескоп РТ-4, созданный на основе антенной системы н.с.с. TESLA с диаметром основного зеркала 4.3 м. Для этого была модернизирована система наведения антенной системы и доработана конструкция антенны для монтажа приемной системы. В ходе работы специально для данной антенны были разработаны приемная система *X*-диапазона частот с коническим скалярным рупором и криогенным охлаждением входных усилительных каскадов, а также цифровая система преобразования широкополосных сигналов. Для осуществления возможности РСДБ-наблюдений была создана система частотно-временной синхронизации РТ-4.

В обсерватории “Светлое” проведены радиометрические измерения параметров приемной системы в составе макета радиотелескопа РТ-4, результаты которых приведены в работе [8]. Методом двух отсчетов с использованием охлаждаемой жид-

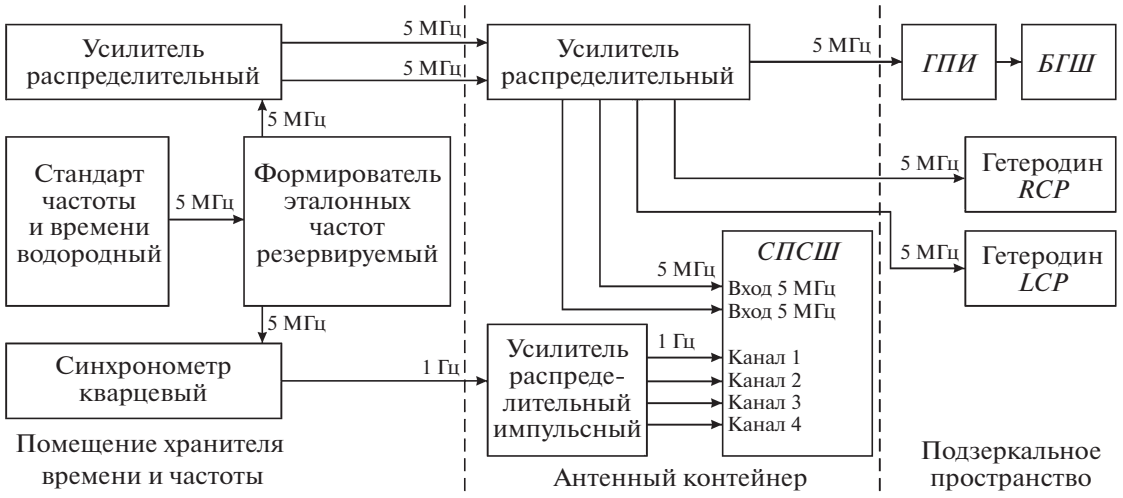


Рис. 5. Система частотно-временной синхронизации РТ-4. *БГШ* – блок генераторов шума, *ГПИ* – генератор пикосекундных импульсов, *СПШС* – система преобразования широкополосных сигналов, *RCP* и *LCP* – правая и левая круговые поляризации.

ким азотом согласованной нагрузки определены шумовая температура приемника и уровень сигнала амплитудной калибровки. Шумовая температура системы определялась сравнением выходного сигнала приемной системы при включенном и выключенном сигнале амплитудной калибровки. Для проверки совмещения фазового центра облучателя с вторичным фокусом антенны макета радиотелескопа РТ-4 проведено измерение коэффициента использования поверхности (*КИП*) и ширины диаграммы направленности радиотелескопа. Для определения *КИП* был измерен параметр *SEFD* (System Equivalent Flux Density) РТ-4. Измерения *SEFD* и РТ-4 проводились по космическому радиоисточнику CygnusA.

По известному выражению [11] отношение сигнал/шум $R_{s/n}$ при корреляционной обработке РСДБ-наблюдений может быть вычислено:

$$R_{s/n} = \eta S \sqrt{\frac{2Bt}{SEFD_1 SEFD_2}},$$

где η – коэффициент потерь из-за квантования принимаемого радиосигнала ($\eta = 0.88$ для двухбитного квантования), S – плотность потока излучения от источника, B – ширина полосы регистрируемого частотного диапазона, t – длительность наблюдения. Необходимое время для детектирования источника выбирается исходя из его яркости и требуемого $R_{s/n}$. При постпроцессорной обработке РСДБ-данных $R_{s/n} = 7$ считается минимально допустимым значением для достоверного обнаружения сигнала от радиоисточника. Значения $SEFD_x$ с учетом особенностей систем регистрации для РТ-13 – 1000 Ян, для РТ-32 – 350 Ян. Таким образом, источники с плотностью потока излучения 138 мЯн и 115 мЯн для баз РТ-4 с РТ-13 и РТ-32 являются минимально разрешимыми при времени наблюдения 1 мин.

Разработанная приемная система *X*-диапазона частот для прототипа мобильной РСДБ-станции совместима по своим основным параметрам с приемными системами радиотелескопов комплекса “Квазар-КВО”. Ниже приведены основные параметры прототипа радиотелескопа РТ-4 мобильной РСДБ-станции:

Диаметр основного зеркала	4.23 м	
Фокусное расстояние	1185.5 мм	
Перемещение по азимуту	±40°	
Перемещение по углу места	0–80°	
Погрешность наведения антенны	не более 20"	
Скорость перемещения антенны	не менее 3'/с	
Диапазон принимаемых частот	8.2–9.1 ГГц	
Диапазон выходных частот	0.1–1 ГГц	
Полоса пропускания одного канала системы регистрации	512 МГц	
Поляризация	*RCP*	*LCP*
Шумовая температура приемника	35 K	34 K
Уровень амплитудной калибровки	5.4 K	5 K
Шумовая температура системы	59 K	57 K
SEFD	17 кЯн	16 кЯн
КИП	0.7	
Ширина диаграммы направленности по уровню –3 дБ:		
по углу места	0.56°	
по азимуту	0.58°	

Данный прототип готов к проведению радиоинтерферометрических наблюдений в составе РСДБ-комплекса “Квазар-КВО”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ichikawa Ryuichi, Iishii Atsutoshi, Takiguchi Hiroshi, Takefuji Kazuhiro, Ujihara Hideki, Koyama Yasuhiro, Kondo Tetsuro, Kurihara Shinobu, Miura Yuji, Kawabata Ryoji, Kokado Kensuke, Machida Morito, Takashima Kazuhiro, Fujisaku Junichi, Tanimoto Daisuke, Nozawa Kentaro* // J. National Institute of Information and Communications Technology. 2010. V. 57.№.3/4. P. 241.
2. *Иванов Д.В., Ипатов А.В., Гаязов И.С., Зотов М.Б., Мельников А.Е., Стэмпковский В.Г., Суркис И.Ф., Чернов В.К.* // Тезисы докладов Седьмой Всероссийской конференции “Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО-2017)”. Санкт-Петербург, 17–21 апреля 2017. 2017. С. 131.
3. *Финкельштейн А.М., Ипатов А.В., Кайдановский М.Н., Кольцов Н.Е., Коркин Э.И., Малкин З.М., Рахимов И.А., Сальников А.И., Смоленцев С.Г.* // Труды ИПА РАН. 2005. Вып. 13. С. 104.
4. *Ипатов А.В., Гаязов И.С., Смоленцев С.Г., Варганов М.Е., Иванов Д.В., Шахнабиев И.В., Мардышкин В.В., Федотов Л.В., Кайдановский М.Н., Вытнов А.В., Сальников А.И., Михайлов А.Г.* // Труды ИПА РАН. 2013. Вып. 27. С. 216.
5. *Быков В.Ю., Ильин Г.Н.* // Труды ИПА РАН. 2010. Вып. 21. С. 294.
6. *Белоусов Н.Ю., Быков В.Ю., Ильин Г.Н., Кайдановский М.Н., Стэмпковский В.Г., Шишикин А.М.* // Труды ИПА РАН. 2012 .Вып. 25. С. 16.
7. *Стэмпковский В.Г.* // Труды ИПА РАН. 2012. Вып. 24. С. 87.
8. *Зотов М.Б., Иванов Д.В., Поздняков И.А., Хвостов Е.Ю., Чернов В.К.* // Труды ИПА РАН. 2019. Вып. 48. С. 50. https://doi.org/10.32876/ApplAstron.48.50-55
9. *Маршалов Д.А., Кольцов Н.Е.* // Труды ИПА РАН. 2007. Вып. 16. С. 245.
10. *Иванов Д.В., Ипатов А.В., Ипатова И.А., Мардышкин В.В., Михайлов А.Г.* // Труды ИПА РАН. 1997. Вып. 2. С. 242.
11. *Томпсон Р., Моран Дж., Свенсон Дж.* Интерферометрия и синтез в радиоастрономии. М.: Мир, 1989.
12. *Whitney A., Kettenis M., Phillips Ch., Sekido M.* // IVS 2010 General Meeting Proceeding. 2010. P. 192.
13. *Карпичев А.С.* // Труды ИПА РАН. 2010. Вып. 21. С. 80.
14. *Балаев Р.И., Шибаева Д.М., Малимон А.Н., Курчанов А.Ф.* // Альманах современной метрологии. 2015. № 2. С. 165.

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 6, с. 83–88

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 621.384.62

ЦИФРОВОЙ МОДУЛЬ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛА ДЛЯ ПЫЛЕУДАРНОГО МАСС-СПЕКТРОМЕТРА

© 2020 г. И. В. Пияков[a], М. П. Калаев[a], К. И. Сухачев[a], К. Е. Воронов[a], А. М. Телегин[a,*]

[a] *Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева Россия, 443086, Самара, ул. Московское шоссе, 34*

**e-mail: talex85@mail.ru*

Поступила в редакцию 13.05.2020 г.
После доработки 15.05.2020 г.
Принята к публикации 20.05.2020 г.

Описаны аппаратная и программная части модуля регистрации сигнала для пылеударного масс-спектрометра. Модуль позволяет записывать спектр ионного импульса с частотами от 100 до 400 МГц и реализован с использованием двух 14-битных аналого-цифровых преобразователей, подключенных к программируемой логической интегральной схеме. При этом используется временное чередование аналого-цифровых преобразователей. Приведены результаты испытаний пылеударного масс-спектрометра на ускорителе микрочастиц (уровень шума 0.6% от амплитуды измеряемого сигнала, частота дискретизации 200 МГц).

DOI: 10.31857/S0032816220060154

ВВЕДЕНИЕ

При конструировании научной аппаратуры одной из распространенных задач является высокоскоростная оцифровка аналоговых сигналов, поступающих от различных первичных преобразователей (фотоэлектронных и вторично-электронных умножителей и т.д.) [1–5]. При этом к аппаратуре могут предъявляться жесткие требования к массогабаритным показателям, энергопотреблению, возможности работы в расширенном диапазоне температур и давлений.

В данной статье приводится описание модуля, предназначенного для регистрации сигнала в составе пылеударного масс-спектрометра [6]. Модуль позволяет записывать и передавать в э.в.м. ионный спектр, регистрируемый на выходе вторично-электронного умножителя с частотой до 200 МГц и разрядностью 14 бит.

ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

Структурная схема модуля регистрации сигнала для пылеударного масс-спектрометра приведена на рис. 1.

В состав модуля входят: программируемая логическая интегральная схема *FPGA* (Field-Programmable Gate Array); микроконтроллер *MCU* (MicrocontrollerUnit); два аналого-цифровых преобразователя *ADC* (Analog-to-Digital Converter), работающих в режиме чередования; дифференциальный усилитель с программируемым коэффициентом усиления *PGA* (Programmable Gain Amplifiers), устройство связи с внешней э.в.м. по интерфейсу RS-485 с использованием гальванической развязки; схема формирования питающих напряжений *PSS* (Power Supply System).

Рассмотрим подробнее режим чередования *ADC*. В общем случае такая система может содержать несколько *ADC*, однако на практике обычно используется вариант с двумя или четырьмя каналами. Временное чередование (time interleaving) позволяет использовать несколько идентичных *ADC* [7] для обработки регулярных выборочных рядов данных с более высокой скоростью, чем рабочая частота дискретизации каждого отдельного преобразователя.

Временное чередование состоит из временного мультиплексирования параллельного массива из M идентичных *ADC*, как показано на рис. 2, для достижения более высокой суммарной частоты дискретизации f_s (с периодом дискретизации $T_s = 1/f_s$), даже если каждый *ADC* обладает более низкой скоростью – f_s/M. Так, например, путем чередования четырех *ADC* 14 бит/100 МГц можно в принципе реализовать *ADC* 14 бит/400 МГц.

Более подробно рассмотрим алгоритм работы программного обеспечения, реализованного в *FPGA*. Для обеспечения циклической записи в оперативное запоминающее устройство *RAM*

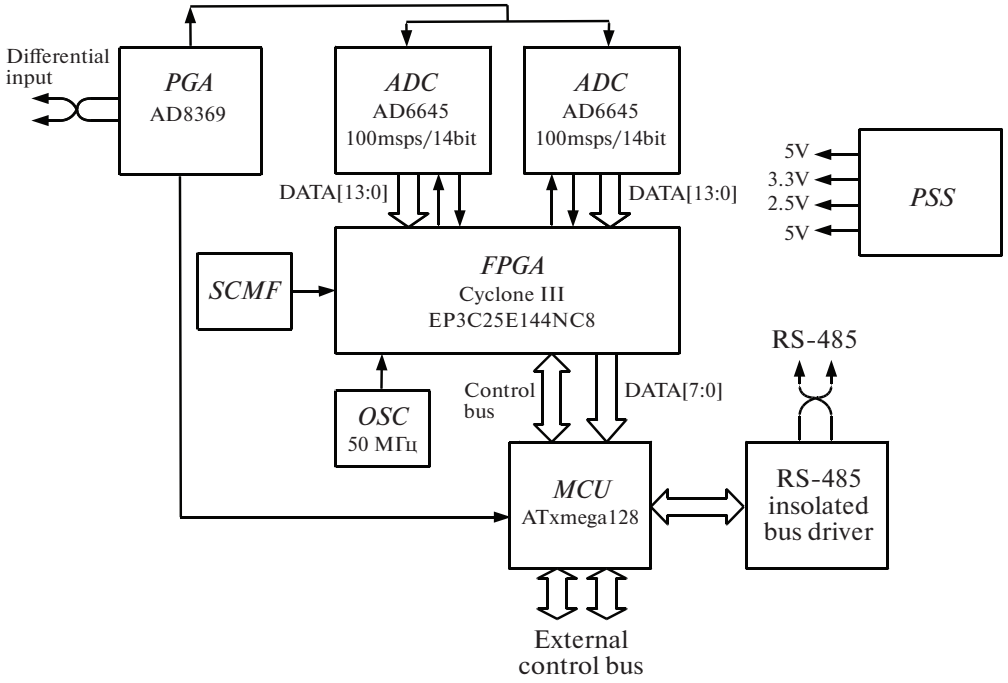


Рис. 1. Структурная схема модуля регистрации сигнала. *PGA* – программируемый усилитель; *ADC* – аналого-цифровой преобразователь; *FPGA* – программируемая логическая интегральная схема; *MCU* – микроконтроллер; *OSC* – кварцевый генератор; *SCMF* (Serial Configuration Memory Flash) – флэш-память для конфигурирования *FPGA*; *PSS* – схема формирования питающих напряжений.

(Random Access Memory), сохранения предыстории и обеспечения цифрового сравнения входного сигнала реализована схема на *FPGA* EP3C25 (рис. 3).

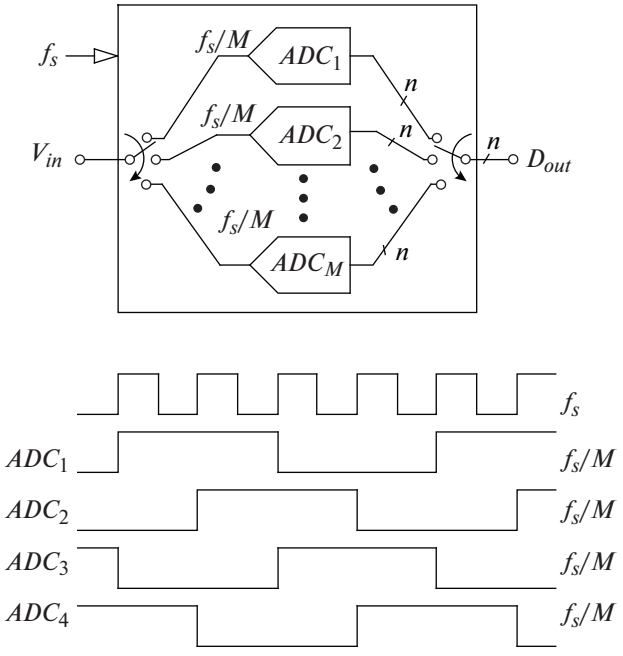


Рис. 2. Принцип временного чередования *ADC* [7].

К *FPGA* подключены две микросхемы *ADC*, которые тактируются в противофазе через дифференциальные выводы *FPGA* от глобальной тактовой линии на частоте 100 МГц. Модули, взаимодействующие с *ADC*, тактируются непосредственно от выводов синхронизации *DRY*. Модули внутренней логики и модули, отвечающие за связь с микроконтроллером, тактируются от модуля фазовой автоподстройки частоты *PLL* (phase-locked loop) пониженной частотой 50 МГц.

Модули CS6645 (control system ad6645), отвечающие за связь *RAM* и *ADC*, имеют параллельную входную шину настроек, значения на которой можно установить до начала измерений, иначе работа будет осуществляться на значениях по умолчанию. К настройкам модулей CS6645 относится величина кадра (frame), а также длительность записи после срабатывания компаратора (prolong).

Модуль работает следующим образом. По фронту сигнала *DRY* независимо для каждого *ADC* происходит запись в ячейку оперативной памяти *RAM* и инкрементирование счетчика адреса. Адрес может достигать максимального значения, равного величине кадра frame, после чего счетчик обнуляется и происходит циклическая перезапись массива *RAM*.

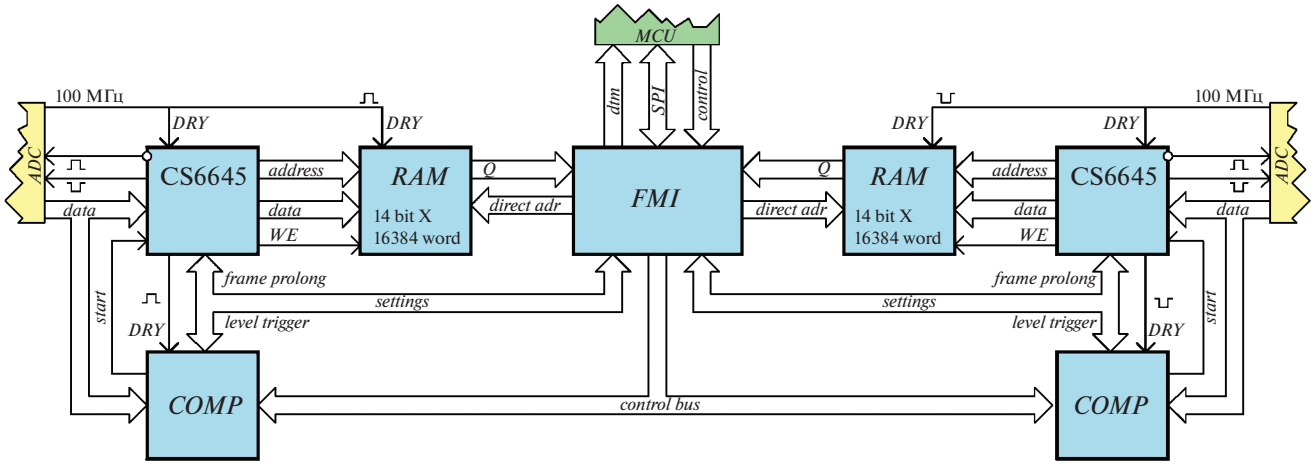


Рис. 3. Структурная схема модулей в *FPGA*. *RAM* – оперативное запоминающее устройство; *ADC* – аналого-цифровой преобразователь; *MCU* – микроконтроллер; *FMI* – модуль связи с микроконтроллером; *COMP* – цифровой компаратор.

При детектировании сигнала *start* происходит запись серии измерений, количество измерений равно заданным настройкам prolong. Далее запись в память приостанавливается, а в модуль связи с микроконтроллером *FMI* (Fast MCU interface) передаются последние записанные адреса и сигнал о готовности памяти к считыванию. Доступ к шине адреса *RAM* передается *FMI*.

В процессе разработки модуля CS6645 было испытано несколько вариантов организации доступа к памяти: через синхронизирующие домены, через промежуточные буферы и прямой доступ через мультиплексоры адреса. Максимально эффективным оказался последний вариант, который по симуляции позволяет работать с сигналом *DRY* на частоте до 176.21 МГц на канал, в то время как с использованием синхронизации и промежуточных буферов частота *DRY* не должна превышать 97 и 87 МГц соответственно. На рис. 4 приведено описание модуля CS6645 на языке описания аппаратуры Verilog.

Данная организация памяти для семейств EP3C позволяет использовать 28 M9K блоков памяти и минимум LUT, что положительно сказывается на скорости доступа к памяти. Независимость блоков для каждого *ADC* позволяет при синхронизации от *PLL* с необходимым фазовым сдвигом нарастить число каналов до четырех, что увеличит эквивалентную частоту оцифровки, а переход на *FPGA* с большей емкостью памяти дает возможность увеличить глубину кадра.

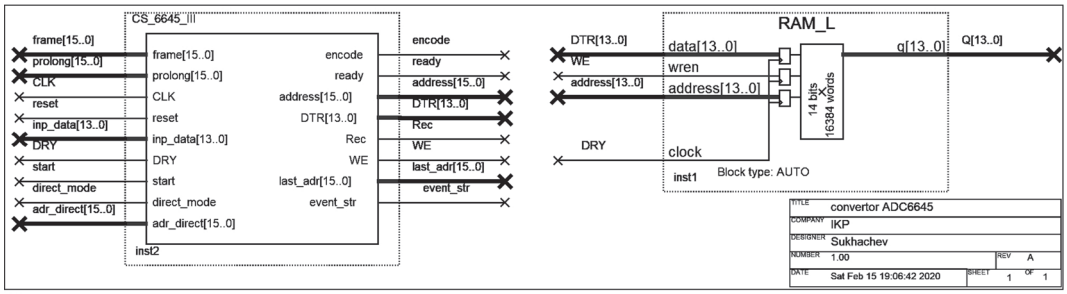
Выбор модели EP3C25T144 обусловлен тем, что она обладает максимальными объемом и скоростью из доступных в корпусе TQFP144. Это позволяет использовать двухслойную плату и ручной монтаж, однако накладывает ограничения на скорость, так как доступный уровень задержек равен C8, что предъявляет высокие требования к выравниванию сигналов, поступающих в память.

Модуль *FMI* после получения сигнала готовности буферов памяти к считыванию отправляет на микроконтроллер *MCU* сигнал готовности. При получении импульсов по тактовой линии *SPI* от *MCU* модуль поочередно соединяет выводы буферов *RAM* с шиной данных, идущей к контроллеру, после чего инкрементирует адрес памяти.

Счет адреса начинается с последнего значения, переданного от CS6645, и продолжается до заполнения всего кадра, объем которого задается микроконтроллером. Таким образом, одним проходом по активному адресному пространству памяти осуществляется считывание кадра и выстраивание его в нужном порядке. Модуль также служит для установки и считывания настроек. Настройки глубины кадра frame, длительности записи после срабатывания компаратора prolong и порог срабатывания компаратора передаются по однобитной линии *SPI* от *MCU*. Проверка настроек осуществляется ответной отправкой 8 байт настроек при начале тактирования в момент отправки в *MCU* записанного кадра.

С контроллера можно также задавать режимы работы: срабатывание по внешнему событию и срабатывание по компаратору. В первом случае *MCU* по шине управления control генерирует сигнал запуска формирования кадра (*start*). В случае работы по сигналу внутреннего компаратора этот сигнал является источником запуска. Модуль компаратора имеет два режима работы: анализ только положительной полуволны с *ADC* и анализ двухполярного сигнала.

Помимо выбора режима работы, необходимо задать уровень (trigger), с которым будут сравниваться данные с *ADC*, и глубину фильтрации (level).




```
assign address[15:0] = direct_mode? adr_direct[15:0]: adr[15:0];
assign DTR[13:0] = inp_data [13:0];
assign Rec = DRY;

always @(posedge DRY or posedge reset) begin
    if (reset) begin
        ...
    end // reset
    else begin
        if (adr==frame) begin
            adr<=0;
        end
        else begin
            adr<=adr+1'd1;
        end
        case (FSM)
            3'd0:   begin
                        if (start) begin
                            FSM<=FSM+1'd1;
                            start_adr<=adr;
                        end // start
                    end // FSM = 0
            3'd1:   begin
                        if (counter==prolong) begin
                            FSM<=FSM+1'd1;
                            WE<=0;
                        end // start
                        else begin
                            counter<=counter+1'd1;
                        end // NO start
                    end // FSM = 1
            3'd2:   begin
                        ready<=1'd1;
                        FSM<=FSM+1'd1;
                        last_adr<=adr;
                    end // FSM = 2
            3'd3:   begin
                        FSM<=FSM+1'd1;
                    end // FSM = 2
            3'd4:   begin
                        ready<=0;
                    end // FSM = 3
        default:;
        endcase // FSM
        if (direct_mode) begin
            ...
        end // direct mode
    end // CLK
```

Рис. 4. Описание модуля CS6645 на языке описания аппаратуры Verilog.

Модуль компаратора тактируется от сигнала *DRY*, что позволяет работать без задержек и сравнивать с пороговым значением каждое новое измерение с *ADC*. Настройка глубины фильтра позволяет отсеивать короткие импульсы, если это необходимо, максимальная длительность превышения сигналом порога составляет 1.27 мкс, а минимальная – 10 нс, что справедливо для каждого канала при частоте оцифровки 100 МГц на канал.

Настройки компаратора также задаются от *MCU* по *SPI* либо, если это не сделано, используются значения по умолчанию. Какой из каналов сработал первым, значения не имеет, так как компараторы синхронизируются по общей шине, а считывание всегда начинается с условно первого буфера *RAM*, что может вызвать пропадание максимум одного первого измерения.

Микроконтроллер по линии управления сигналом разрешения работы компаратора может мгновенно блокировать или разрешать работу устройства по превышению уровня. Также есть возможность осуществлять два вида синхронных сброса: полный сброс с остановкой *PLL* и переходом к настройкам по умолчанию, а также сброс, необходимый для начала работы после считывания кадра. При втором варианте сохраняются настройки и осуществляется сброс только модулей компаратора и CS6645.

Конфигурацию представленной системы удалось оптимизировать и уместить в 757 логических элементов. Это дает возможность, при необходимости, свободную логическую емкость *FPGA* задействовать для организации многоканальной измерительной системы (до четырех каналов) и использовать синтезируемое процессорное IP ядро, что позволяет уменьшить количество необходимых элементов до микросхем *ADC* с обвязкой и непосредственно *FPGA*. В качестве помехозащищенного интерфейса можно использовать IEEE 802.3. Кроме этого, свободная емкость позволяет реализовать цифровую обработку сигналов. Итоговые параметры системы приведены в табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЫВОДЫ

Проверка работоспособности модуля регистрации сигнала была проведена в составе пылеударного масс-спектрометра, схема которого приведена на рис. 5. Масс-спектрометр предназначен для решения одной из важных задач космических исследований – выяснение элементного состава микрометеороидов и космического мусора в околоземном пространстве [8–10].

В начальный момент пылевая частица ударяется о мишень и преобразуется в облако слабо ионизированного газа, состоящее из ионов материалов частицы и мишени. Запись кадра данных

Таблица 1. Параметры системы оцифровки для EP3C25 и AD6645

Характеристики	Значения		
	Один канал	Два канала	Четыре канала
Эквивалентная предельная частота оцифровки, МГц	100	200	400
Максимальная частота на канал для *FPGA/ADC*, МГц	170/105		
Глубина кадра (слов)	32000		
Разрядность, бит	14		

начинается по первой массовой линии спектра, регистрируемой описываемым в данной статье модулем, и содержит информацию с приемника ионов, включая предысторию сигнала. Под действием электрического поля, образованного разностью потенциалов мишени и экранирующей сетки, ионное облако ускоряется в направлении ионного зеркала. Последнее состоит из четырех сеток в форме параболоидов, фокус которых совпадает с приемником ионов, и пяти полевыравнивающих электродов в форме колец, расположенных между центральными сетками зеркала.

После разворота ионы попадают в приемник, и сигнал с усилителя приемника ионов поступает на микроконтроллерный модуль. Приемник ионов (ВЭУ-7) представляет собой сборку типа шеврон из двух микроканальных пластин, разделенных зазором. По сравнению с конструкцией, описанной в работе [10], исключено одно из ионных зеркал, что позволило повысить коэффициент сбора ионов. Для повышения разрешающей способности ускоряющее напряжение увеличено до 1125 В. Дополнительная сетка после параболического отражателя обеспечила гарантированное отражение всех ионов в сторону приемника. Схематичное расположение мишени, электродов и приемника, а также распределение потенциалов показано на рис. 5.

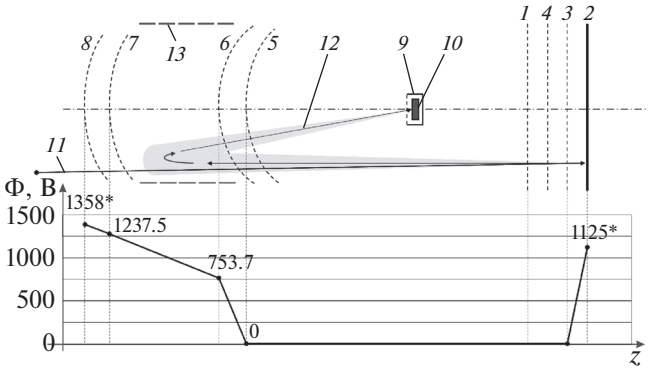


Рис. 5. Вверху – схема пылеударного масс-спектрометра с параболическим отражателем, внизу – распределение электрического потенциала вдоль оси масс-спектрометра. *1* – экранирующая сетка; *2* – мишень; *3* – заземленная сетка; *4* – сетка-детектор; *5*–*8* – сетки параболического ионного зеркала; *9* – кожух приемника, заземлен; *10* – приемник ионов; *11* – траектория пылевой частицы; *12* – траектория ионов; *13* – полевыравнивающие электроды. Звездочкой отмечено значение напряжения, которое подстраивается под конструкцию сборки.

Эксперимент с пылеударным масс-спектрометром был проведен на электростатическом ускорителе [11]. Использовались микрочастицы ПАП-1 с размерами от 1 до 5 мкм. Полученный спектр ионных импульсов, зафиксированный разработанным модулем в процессе низкоскоростного удара о стальную мишень, представлен на рис. 6.

В результате натурного испытания разработанный модуль показал, что уровень шума составил 0.6% от амплитуды измеряемого сигнала, а частота дискретизации – 200 МГц, что позволило выделить спектральные линии шириной от 0.05 мкс. Данный модуль обладает хорошей масштабируемостью, гибкостью к условиям срабатывания компаратора, возможностью цифровой фильтрации сигнала, компактностью.

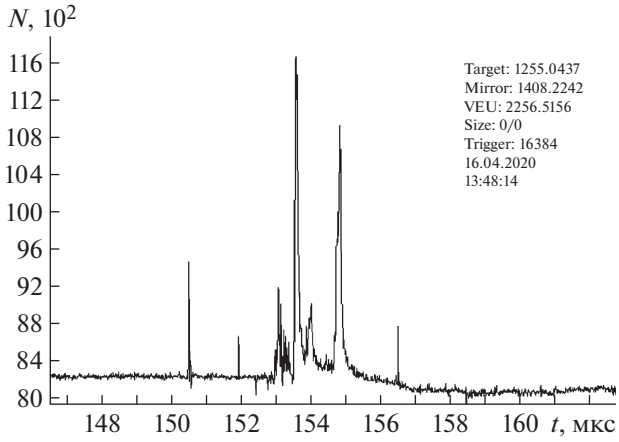


Рис. 6. Записанный ионный спектр. По оси ординат отложены отсчеты в абсолютных единицах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Horányi M., Sternovsky Z., Lankton M., Dumont C., Gagnard S., Gathright D., Grün E., Hansen D., James D., Kempf S., Lamprecht B., Srama R., Szalay J.R., Wright G.* // Space Sci. Rev. 2014. V. 185. P. 93. https://doi.org/10.1007/s11214-014-0118-7
2. *Goode W., Munsat T., James D., Ulibarri Z.* // Nucl. Instrum. and Methods in Physics Research. A. 2018. V. 908. P. 269. https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.08.075
3. *Воронов К.Е., Телегин А.М., Пияков А.В., Рязанов Д.М.* // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 1. С. 3.
4. *Воронов К.Е., Телегин А.М., Цзян Лисян, Цзяо Цзилун* // ПТЭ. 2019. № 5. С. 148. doi https://doi.org/10.1134/S0032816219050124
5. *Семкин Н.Д., Воронов К.Е., Новиков Л.С.* Регистрация пылевых и газовых частиц в лабораторных и космических условиях. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 2005.
6. *Пияков И.В., Родин Д.В., Родина М.А., Цзян Лисян* // Материалы V Всероссийской научно-технической конференции “Актуальные проблемы ракетно-космической техники” (V Козловские чтения) (11–15 сентября 2017 г., Самара) / Под общ. ред. А.Н. Кирилина. Самара: СамНЦРАН, 2017. С. 600.
7. *Manganaro G., Robertson D.* // Analog Dialogue. 2015. V. 49. № 7. https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/interleaving-adcs.html
8. *Моисеенко Д.А., Вайсберг О.Л., Глазкин Д.Н.* // ПТЭ. 2019. № 1. С. 75. https://doi.org/10.1134/s0032816218060113
9. *Семкин Н.Д., Родин Д.В., Пияков И.В., Помельников Р.А.* // Научное приборостроение. 2012. Т. 22. № 3. С. 13.
10. *Piyakov I.V., Rodin D.V., Rodina M.A., Telegin A.M.* // CEUR Workshop Proceedings. 2018. V. 2212. P. 152. https://doi.org/10.18287/1613-0073-2018-2212-152-157
11. *Семкин Н.Д., Пияков А.В., Воронов К.Е., Богоявленский Н.Л., Горюнов Д.В.* // ПТЭ. 2007. № 2. С. 140.

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 6, с. 89–94

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 53.087

ПРИЕМНЫЙ ДАТЧИК ДЛЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО МАЛОГАБАРИТНОГО МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОГО ТОМОГРАФА

© 2020 г. А. А. Баязитов[a],*, Я. В. Фаттахов[a], А. Р. Фахрутдинов[a], В. А. Шагалов[a]

[a] *Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского Федерального исследовательского центра "Казанский научный центр РАН"*
Россия, 420029, Казань, Сибирский тракт 10/7

**e-mail:bayazitov.alfis@kfti.knc.ru*

Поступила в редакцию 27.05.2020 г.
После доработки 31.05.2020 г.
Принята к публикации 10.06.2020 г.

Работа посвящена разработке приемного датчика для специализированного магнитно-резонансного томографа с индукцией магнитного поля 0.4 Тл на постоянном магните для получения томограмм суставов человека. В работе представлены результаты математического моделирования пространственного распределения магнитного поля в рабочей области датчика, определена его оптимальная конфигурация. С учетом моделирования изготовлен экспериментальный образец датчика, изучены его характеристики. С помощью данного датчика получены томограммы кисти руки на опытном образце магнитно-резонансного томографа.

DOI: 10.31857/S003281622006004X

ВВЕДЕНИЕ

Приемный радиочастотный датчик является важнейшим элементом всей приемной системы магнитно-резонансного томографа, поскольку от его характеристик во многом зависит качество получаемых изображений. Ключевыми параметрами являются соотношение сигнал/шум и однородность интенсивности сигнала в плоскости изображения. Кроме того, для удобства работы важно, чтобы при позиционировании исследуемого объекта в датчике, а особенно при обследовании пациентов, не происходило значительной перестройки резонансной частоты приемного контура датчика. Это требование обусловлено тем, что в томографе с постоянным магнитом индукция магнитного поля зафиксирована, а рабочая частота находится в строгом соответствии со значением индукции согласно условиям ядерного магнитного резонанса.

Для средних и высоких полей (например, для поля 1.5 Тл рабочая частота составляет около 60 МГц) наиболее распространен датчик типа "птичья клетка" [1]. Есть работы по развитию данного подхода, например [2]. Низкие поля магнитно-резонансной томографии ($0.1 < B_0 < 0.5$ Тл) соответствуют диапазону частот от единиц до десятков (примерно двадцати) мегагерц. В этом диапазоне применимы "классические" подходы в конструировании катушек резонансных контуров [3, 4].

Датчик с так называемой конформной соленоидальной катушкой и с параллельным соединением витков позволяет исследовать несколько областей: кисть руки, запястье и ногу [3]. Однако недостатком данного датчика является то, что равномерно распределенные проводники не могут создать однородное радиочастотное поле в большом объеме. Из-за этого при диагностике на магнитно-резонансном томографе может потребоваться многократное перемещение датчика. Неоднородное поле, кроме того, искажает изображение, вследствие чего ухудшается достоверность диагностики.

Также разработан датчик, предназначенный для магнитно-резонансной томографии одного сустава – голеностопа [4]. Данное решение позволяет проводить диагностику конкретных анатомических областей, но оказывается неприемлемым для диагностики других частей тела человека: кисть, локоть, колено.

Поэтому нами в данной работе предпринята попытка разработать датчик как с большей областью однородности, так и пригодный для обследования различных суставов.

На протяжении ряда лет в лаборатории Методов медицинской физики КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН велись работы по разработке низкополевых магнитно-резонансных томографов с резистивными магнитами [5]. В настоящее время коллектив лаборатории ведет разработку специализиро-

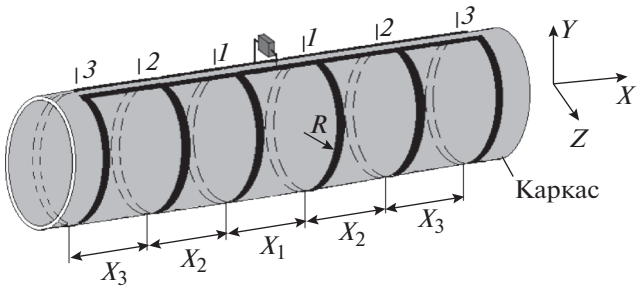


Рис. 1. Схематичный вид цилиндрической катушки приемного контура датчика с параллельно включенными шестью витками. Номерами *1*, *2*, *3* обозначены симметричные витки, X_1, X_2, X_3 – расстояния между центрами соответствующих витков.

ванного магнитно-резонансного томографа с постоянным магнитом с индукцией магнитного поля 0.4 Тл. Особенность данной разработки в том, что малогабаритный томограф имеет магнит с небольшим зазором (около 200 мм). Это накладывает определенные ограничения при разработке радиочастотных датчиков, поскольку в непосредственной близости от приемного контура оказываются передающий контур и полюса магнита с градиентными катушками.

Данная работа посвящена разработке цилиндрического приемного датчика для малогабаритного магнитно-резонансного томографа на постоянном магните с индукцией магнитного поля 0.4 Тл. Внешними ограничивающими параметрами являются размеры зазора магнита, длина датчика, требуемая зона однородности (рабочая зона), рабочая частота. На конструкцию датчика накладываются также ограничения, определяемые медицинскими требованиями.

Датчик выполнен на цилиндрическом каркасе, витки катушки – из медной ленты толщиной 200 мкм. Непосредственному макетированию датчика предшествует этап математического моделирования с целью определить оптимальное расположение витков катушки приемного контура с точки зрения наилучшей однородности поля в рабочей области датчика.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАТЧИКА

Ранее нами для моделирования конструкции катушек датчиков применялась программа, разработанная в среде “maple” [6], в которой для расчета индукции магнитного поля катушек датчиков использовался закон Био–Савар–Лапласа:

$$B = \frac{I\mu_0}{4\pi r^2},$$

где B – индукция магнитного поля, μ_0 – магнитная постоянная, I – ток в проводнике, r – длина радиус-вектора.

В работе [7] представлены результаты математического расчета датчика описанным выше методом. На основе выполненных расчетов разработана конструкция и изготовлен макет приемного датчика для специализированного магнитно-резонансного томографа. Измерение радиочастотных характеристик экспериментального образца датчика показало хорошее совпадение измеренных параметров с расчетными, полученными в ходе математического моделирования.

Однако математические модели катушек датчиков, применяемые для проведения расчетов описанным выше способом, имеют существенные упрощения по сравнению с реальными катушками датчиков. Основные упрощения, используемые в данном расчете, следующие:

– расчеты выполнялись в предположении бесконечно тонких проводников, из которых выполнены катушки;

– расчеты выполнялись для постоянного тока.

Реальные катушки изготавливаются из проводников, имеющих конечные геометрические размеры. Кроме того, реальные датчики должны работать на высоких частотах (в нашем случае на частоте 17.5 МГц). Поэтому для получения более достоверных результатов расчетов желательно использование программ, учитывающих отмеченные параметры катушек датчиков.

Одной из таких программ, которая использовалась нами в расчетах, является программный пакет CST Studio Suite Student Edition, разработанный компанией Computer Simulation Technology [8].

Моделирование проводилось для цилиндрической катушки с параллельно включенными шестью витками. Схематически катушка представлена на рис. 1. Шаг перебора значений положений витков составлял 5 мм. Расчет проводился для частоты 17.5 МГц при токе источника сигнала 1 А.

В качестве критерия однородности выбрана максимальная протяженность области однородности вдоль оси X при отклонении амплитуды сигнала не более 10% от максимального значения. По нашему предыдущему опыту проведения приемочных технических и клинических испытаний при сертификации разработанных ранее низкополевых томографов известно предъявляемое требование, чтобы неоднородность изображения однородного объекта была не хуже 20%. Неоднородность в 10% выбрана, чтобы гарантированно соответствовать этому условию при предстоящей сертификации специализированного томографа.

Параметры приемного контура: диаметр катушки 153 мм; толщина ленты $d = 200$ мкм; шири-

на витков *1* – 10 мм, витков *2* и *3* – 15 мм. Ширина витков *1* была уменьшена с целью снизить вклад сигнала в центральной области для выравнивания профиля поля во всей области наблюдения. Расположение витков отсчитывается от оси симметрии, перпендикулярной продольной оси цилиндра. В ходе расчетов варьировались расстояния между центрами витков (X_1, X_2 и X_3) для получения возможно большей зоны однородности. Оптимальные расстояния между витками, полученные в ходе расчетов: $X_1 = X_2 = 40$ мм, $X_3 = 20$ мм.

На рис. 2а представлен вариант наилучшего распределения поля с учетом накладываемых граничных условий для оптимизированного положения витков. Кривая *1* на графике соответствует распределению поля компоненты сигнала H_x в катушке вдоль оси X, т.е. вдоль продольной оси катушки. Кривая *2* соответствует компоненте сигнала H_x параллельно оси X со сдвигом на 50 мм в сторону по радиусу катушки. Для принятого нами условия отклонения амплитуды сигнала не более чем на 10% размер области однородности для кривой *1* составляет 116 мм, а для кривой *2* – 161 мм. Волнистый характер зависимости распределения магнитного поля (кривая *2*) обусловлен приближением к виткам катушки, хотя заявленное отклонение в 10% выдерживается даже в большей области, чем строго по оси.

Если рассчитать поле при большем смещении от оси, например на 60 мм, то амплитуда “волн” еще больше возрастет и перестанет выполняться критерий 10% в такой широкой области. Исходя из этого, мы заключаем, что область однородности в направлении, перпендикулярном оси X, составляет 100 мм.

При создании датчиков для малогабаритных томографов возникает проблема существенного уменьшения добротности контура при помещении его между полюсов магнита. Поэтому в ходе расчетов параметров датчиков в программе CST MICROWAVE STUDIO также моделировалось влияние электромагнитного экрана, располагаемого между датчиком и полюсами постоянного магнита. Основное назначение такого экрана уменьшить влияние полюсов магнита на поле рассеяния катушек датчика.

Моделируемый экран представлял собой замкнутый цилиндр диаметром 200 мм из меди толщиной 0.2 мм, расположенный поверх катушек датчика. Применение экрана из сплошной ленты или экрана с замкнутыми витками недопустимо, поскольку это приводит к существенному затягиванию поля градиентного импульса, что в свою очередь отрицательно сказывается на качестве получаемых изображений. Поэтому в экспериментах применялся экран, выполненный из медной сетки (толщина проволоки – 200 мкм).

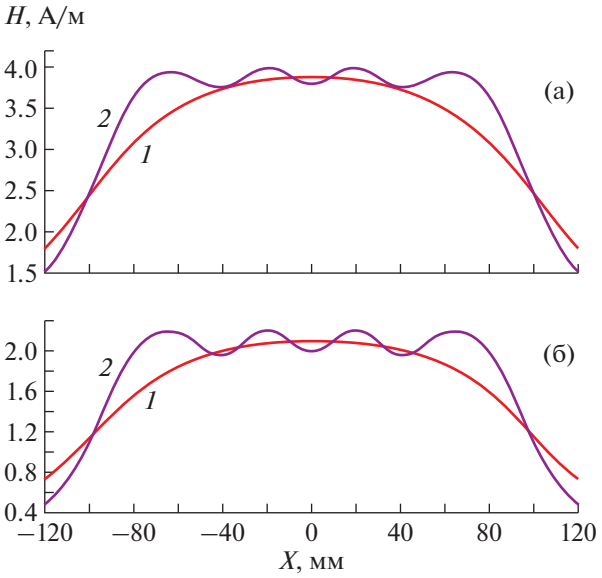


Рис. 2. Расчет пространственного распределения поля для цилиндрической катушки (**а** – без экрана; **б** – с экраном): *1* – распределение компоненты поля H_x вдоль оси X по центру катушки, *2* – распределение компоненты поля H_x вдоль оси X со сдвигом по оси Z на 50 мм.

На рис. 2б представлен результат наилучшего распределения поля для моделирования приемного контура с использованием электромагнитного экрана в виде цилиндра из меди.

Из сравнения рис. 2а и 2б видно, что применение экрана не уменьшает области однородности датчика, а ведет лишь к снижению амплитуды электромагнитного поля, что находится в согласии с литературными данными [9] и было подтверждено нами экспериментально при измерениях добротности (см. таблицу 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКА

По проведенным расчетам был изготовлен экспериментальный образец приемного датчика и получены некоторые характеристики. В частности, были проведены измерения пространственного распределения амплитуды радиочастотного поля внутри приемного контура (X-компоненты сигнала вдоль оси X) с помощью измерительного щупа, содержащего в качестве измерительного элемента катушку со средним диаметром 18 мм, толщиной 3.5 мм и числом витков, равным 100 [10], ось которой совпадает с направлением поляризации измеряемого поля.

Кривая *1* (рис. 3) соответствует распределению сигнала вдоль оси X (положение 0 мм). Кривая *2* соответствует распределению сигнала вдоль оси X со сдвигом от оси по радиусу на 50 мм. Под гра-

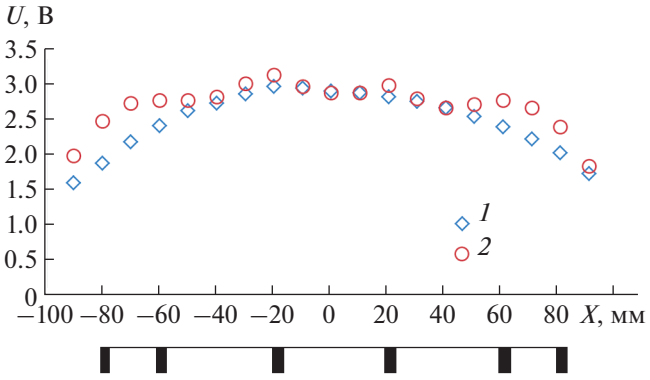


Рис. 3. Измеренное пространственное распределение радиочастотного сигнала внутри катушки экспериментального образца датчика: *1* – распределение *X*-компоненты сигнала вдоль оси *X* по центру катушки, *2* – распределение *X*-компоненты сигнала вдоль оси *X* со сдвигом по оси *Z* на 50 мм. В нижней части рисунка изображены положения центров витков датчика.

фиком отмечено расположение центров витков катушки.

Видно, что результаты экспериментальных измерений радиочастотного поля (рис. 3) находятся в хорошем согласии с модельными расчетами (рис. 2б). Для принятого нами условия отклонения амплитуды сигнала не более 10% размер области однородности для кривой *1* на рис. 3 составляет 105 мм, а для кривой *2* – 155 мм. Некоторую несимметричность кривых относительно центра можно объяснить влиянием выводов катушки и проводников близко расположенного передающего контура, который не был учтен в модельных расчетах.

Другой важнейшей характеристикой датчика является добротность приемного контура. В таблице 1 представлены результаты измерения добротности датчика вне магнита и при помещении его в магнит, без использования экрана и с экраном из медной сетки. Объектом служила реальная кисть руки. Напомним, что внешний диаметр датчика практически совпадает с величиной зазора магнита, и поле рассеяния катушки взаимодействует как с полюсами магнита, так и с градиентными катушками, закрепленными на них.

Из приведенных результатов в таблице 1 видно, что добротность приемного контура с экраном в магните сохраняется на том же уровне, что и вне магнита, а уменьшение добротности от близко расположенного экрана хорошо соотносится с результатами расчетов (рис. 2).

Следующей важной характеристикой датчика является сохранение его резонансной частоты при внесении в него исследуемого объекта – кисти руки. Измерения показали, что для экранированного датчика, помещенного в магнит, уход резонансной частоты составляет 7 кГц: с 17.626 до 17.619 МГц. Такая перестройка частоты контура при помещении объекта в рабочую область датчика происходит за счет внесения дополнительной паразитной емкости в контур, что вполне приемлемо и может быть оперативно скомпенсировано с помощью соответствующих аппаратных средств томографа.

Для получения томограмм на разрабатываемом в лаборатории томографе применялись отдельные передающий и приемный контура. Седловидная катушка передающего контура создает радиочастотное поле, направленное вдоль оси *Y*, ось приемной катушки направлена вдоль оси *X*.

Хотя приемная и передающая катушки создают магнитные поля в ортогональных направлениях, существует паразитная связь между контурами за счет неидеальности реальных экспериментальных образцов. Одной из причин возникновения паразитной связи между передающей и приемной катушек является наличие подводов: мест подключения конденсаторов и кабелей, вносящих асимметрию в систему двух катушек. Другой причиной может быть некоторое несовпадение осей каркасов, на которых размещены указанные катушки. Из-за указанной неидеальности возникает компонента поля, соосная с вектором поля от передающей катушки, что объясняет появление связи между катушками. Эту паразитную связь можно минимизировать путем вращения внешней (передающей) катушки относительно внутренней (приемной) на небольшие углы (рис. 4). В эксперименте для настройки развязки сигнал подавался на один контур, а снимался с другого. В поло-

Таблица 1. Влияние магнита на добротность датчика без экрана и в присутствии экрана (объект – кисть руки человека)

Датчик	Датчик вне магнита		Датчик в магните	
	Без объекта	С объектом	Без объекта	С объектом
Датчик без экрана	344	204	73	65
Датчик с экраном	167	156	157	147

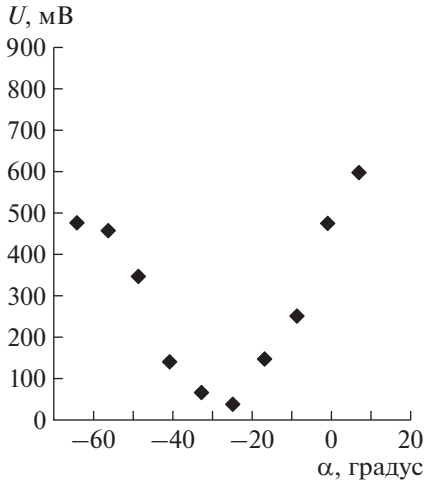


Рис. 4. Развязка приемного и передающего контуров путем вращения внешней (передающей) катушки относительно внутренней (приемной) на угол α. За условные 0° оси *X* выбрано положение контуров, при котором совпадают их контактные линии.

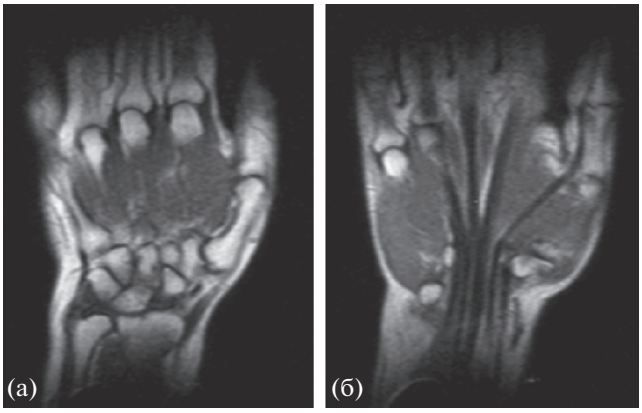


Рис. 5. Томограммы кисти руки в корональном сечении в режиме T1-взвешенных изображений **(а** – срединный срез, **б** – срез ближе к ладони). Время повтора TR = 500 мс, время образования эха TE = 20 мс, толщина среза 5 мм.

жении минимального наведенного сигнала считается, что развязка оптимальна [11].

На настроенном таким образом датчике получены экспериментальные томограммы кисти руки волонтера. На рис. 5 приведены томограммы в корональном сечении (параллельно плоскости стола) в режиме T1-взвешенных изображений. Параметры, при которых получены изображения: время повтора TR = 500 мс, время образования эха TE = 20 мс, толщина среза 5 мм.

Видно, что на рис. 5а хорошо визуализируются пястные кости, на рис. 5б хорошо видны сухожилия в виде темных тонких структур, проходящих через запястную область к пальцам.

Таким образом, разработанный экспериментальный образец датчика проявил себя как высококачественное средство для получения я.м.р.-томограмм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы была рассчитана конфигурация приемной катушки датчика для магнитно-резонансного томографа. Моделирование было проведено как для свободного контура, так и для контура в присутствии электромагнитного экрана. Показано, что наличие экрана не уменьшает размеры области однородного сигнала, определенной нами на уровне изменений амплитуды в 10%.

По результатам расчетов был изготовлен экспериментальный образец датчика и изучены его характеристики. Получено хорошее соответствие между расчетным и экспериментально измеренным пространственным распределением поля внутри катушки приемного датчика.

Показано позитивное влияние электромагнитного экрана на такие параметры датчика, как добротность и изменение резонансной частоты контура при помещении внутрь катушки объекта исследований.

С помощью макета датчика получены томограммы на специализированном магнитно-резонансном томографе с индукцией магнитного поля 0.4 Тл и отмечено их высокое качество для проведения диагностических мероприятий.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Авторы подтверждают, что от всех людей, ставших объектами исследования, было получено письменное информированное согласие, и что в отношении людей были соблюдены применимые стандарты и нормы исследований.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Д.И. Абдулганиевой, О.Ш. Даутову, В.Е. Хундирякову, В.Л. Одиванову за полезное обсуждение отдельных положений статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hayes C.E., Edelstein W.A., Schenck J.F., Otward M.M., Eash M.* // J. Magnetic Resonance. 1985. V. 63. P. 622.
2. *Темников А.Н.* // ПТЭ. 2005. № 5. С. 81.
3. *Jones R.W.* US Patent 5,543,710 A. https://patents.google.com/patent/US5543710A
4. *Коткин А.Л., Лыков В.В.* Патент на изобретение 2192165 РФ // Опубл. 10.11.2002. Бюл. № 31. https://patents.google.com/patent/RU2192165C1

5. *Салихов К.М., Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Анашкин В.Н., Шагалов В.А., Биктимиров Э.Ф., Муртазина Е.М., Колесникова Н.В.* // Медицинская техника. 2007. № 5. С. 39. https://doi.org/10.1007/s10527-007-0059-5
6. *Баязитов А.А., Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Хабипов Р.Ш., Шагалов В.А., Чумаров П.И.* Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2019618088 РФ // Опубл. 26.06.2019.
7. *Баязитов А.А., Фаттахов Я.В., Хундиряков В.Е.* // Научное приборостроение. 2019. Т. 29. № 1. С. 92. https://doi.org/10.18358/np-29-1-i9298
8. https://academy.3ds.com/en/software/cst-studio-suite-student-edition
9. *Полонский Н.Б.* Конструирование электромагнитных экранов для радиоэлектронной аппаратуры. М.: Сов. радио, 1979.
10. *Ред Э.* Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике: схемы, блоки, 50-омная техника. М.: Мир, 1990.
11. *Баязитов А.А., Фаттахов Я.В., Чумаров П.И.* // ПТЭ. 2018 № 4. С. 125. https://doi.org/10.1134/S0032816218040031

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 6, с. 95–99

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 534.143

АВТОНОМНАЯ НИЗКОЧАСТОТНАЯ ШИРОКОПОЛОСНАЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ ИЗЛУЧАЮЩАЯ СТАНЦИЯ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

© 2020 г. А. А. Пивоваров[a],*, И. О. Ярощук[a], А. Н. Швырев[a], А. Н. Самченко[a]

[a] Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
Россия, 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43
**e-mail: pivovarov@poi.dvo.ru*

Поступила в редакцию 24.03.2020 г.
После доработки 26.04.2020 г.
Принята к публикации 27.04.2020 г.

Гидроакустическая излучающая станция с электромагнитным преобразователем развивает акустическое давление до 2400 Па (188 дБ), приведенное к расстоянию 1 м от оси излучателя, в диапазоне частот 420–520 Гц (по уровню –3 дБ) и обладает рабочей глубиной погружения до 500 м. Примененные технические решения позволяют использовать станцию для широкого круга океанологических исследований, а также при построении систем навигации подводных аппаратов и передачи данных по гидроакустическому каналу.

DOI: 10.31857/S0032816220050341

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных методов для решения задач акустической томографии в океане является зондирование водной среды с помощью широкополосных когерентных (частотно-модулированных, фазоманипулированных) гидроакустических сигналов на стационарных исследовательских трассах. Для излучения сигналов различных типов наиболее удобным и практичным является применение автономных донных гидроакустических излучающих станций [1]. Постановка излучателя на якоре или на дно дает возможность стабилизировать измерительные трассы распространения сигнала, а автономность излучателя позволяет проводить работы в произвольной акватории, не привязываясь к береговой инфраструктуре.

Для проведения натурных экспериментов по решению исследовательских задач в области океанологии и акустической томографии сотрудниками лаборатории "Статистического моделирования" Тихоокеанского океанологического института была сконструирована и изготовлена автономная низкочастотная широкополосная гидроакустическая станция.

В данной статье рассматриваются конструктивные решения и применение автономной низкочастотной широкополосной гидроакустической станции с электромагнитным преобразователем, создающей акустическое давление до 2400 Па в диапазоне частот 420–520 Гц [2], а также представлены некоторые результаты океанологических исследований с использованием этой станции, проведенных на шельфе Японского моря в октябре 2019 года.

Основными требованиями к станции являлись: минимизация массогабаритных характеристик (общий вес не более 100 кг), автономность не менее 3-х суток, рабочий частотный диапазон 420–520 Гц, акустическое давление в рабочем диапазоне, приведенное к 1 м, не менее 2000 Па, возможность синхронизации с другими устройствами и наличие приемного гидрофона для записи акустических сигналов. Дополнительной опцией является возможность использовать автономную излучающую станцию в качестве ретранслятора гидроакустических сигналов и маяка для позиционирования подводных аппаратов.

В качестве электроакустического преобразователя, исходя из требований к срокам автономности, массогабаритным характеристикам и излучаемой акустической мощности станции, был выбран оптимальным преобразователь электромагнитного типа. Электромагнитные преобразователи в данном частотном диапазоне обладают рядом преимуществ: они просты в изготовлении и обслуживании, обладают наиболее высокими удельной мощностью и электроакустическим к.п.д. по сравнению с пьезоэлектрическими и электродинамическими преобразователями [3, 4]. Кроме того, для задач подводного позиционирования и ретрансляции гидроакустических сигналов, а также обработки и интерпретации полученных в океанологических

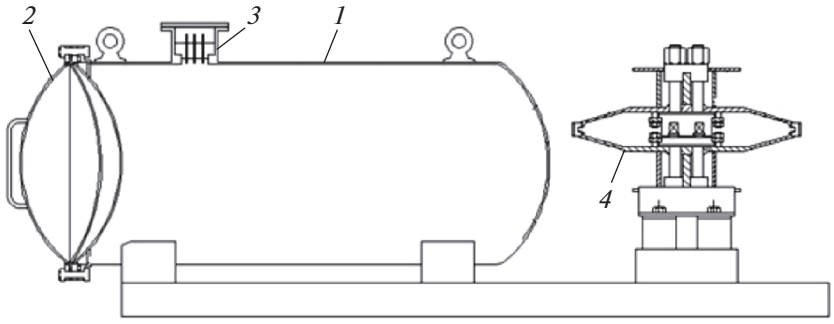


Рис. 1. Конструктивный вид автономной станции. *1* – герметичный корпус; *2* – компенсатор гидростатического давления; *3* – приемный гидрофон; *4* – электромагнитный гидроакустический преобразователь.

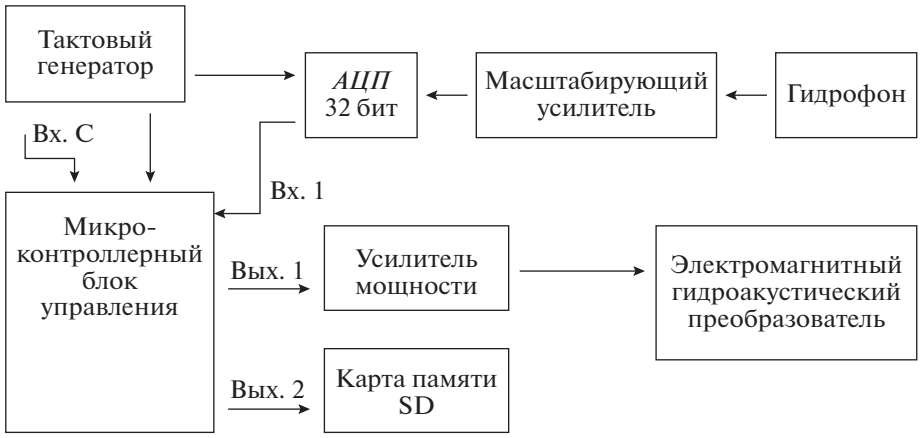


Рис. 2. Функциональная схема автономной станции.

исследованиях натурных данных, существует необходимость в наличии канала синхронизации с различными устройствами и регистрации гидроакустических сигналов.

ПРИМЕНЯЕМЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

Автономная низкочастотная широкополосная гидроакустическая станция (рис. 1) состоит из следующих элементов: стального герметичного контейнера *1* и электромагнитного гидроакустического преобразователя *4*, закрепленных на металлической раме через виброизолирующие демпферные крепежные элементы. На контейнере расположен компенсатор гидростатического давления в акустически жестком корпусе *2* и приемный гидрофон *3*.

Во внутренней полости герметичного контейнера находятся аккумуляторная батарея, термостатированный высокостабильный кварцевый генератор тактовой частоты (см. рис. 2, где приведена функциональная схема станции), микроконтроллерный блок управления, соединенный последовательным синхронным интерфейсом с блоком энергонезависимой твердотельной SD-памяти, подключенный к блоку управления канал регистрации гидроакустического поля в составе гидрофона, масштабирующего усилителя и аналого-цифрового преобразователя (*АЦП*), а также подключенный к выходу микроконтроллерного блока управления усилитель мощности, соединенный с электромагнитным гидроакустическим преобразователем.

Автономная низкочастотная широкополосная гидроакустическая станция работает следующим образом. Во время подготовки излучающей станции к работе накачивается воздухом компенсатор гидростатического давления для электромагнитного преобразователя и устанавливается аккумуляторная батарея питания. При включении питания усилитель мощности переходит в режим ожидания сигнала с микроконтроллерного блока управления.

Микроконтроллерный блок управления, изготовленный на базе микроконтроллера PIC32MM0064GPL036, коммутирует “Вх. 1” приемного тракта опорного гидрофона и переходит в режим ожидания внешнего синхросигнала запуска работы системы, подаваемого на “Вх. С”.

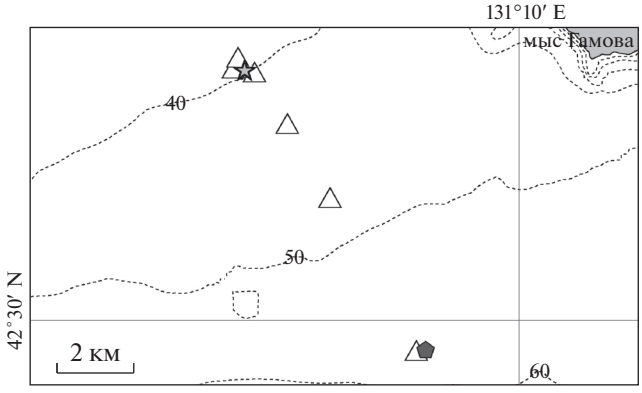


Рис. 3. Схема натурного эксперимента. Звездочкой отмечено место постановки автономной излучающей станции, пятиугольником – точка установки вертикальной приемной 8-элементной антенны, треугольниками обозначены места установки автономных термогирлянд.

Это может быть сигнал с устройства точного времени (Глонасс, GPS) или внешний синхронизирующий импульс. В дальнейшем синхронизация поддерживается с помощью высокостабильного тактового генератора.

Тактовая частота для микроконтроллерного блока управления и *АЦП* приемного гидрофона подается с высокостабильного термостатированного тактового генератора МХО37/8Р. При поступлении на “Вх. С” микроконтроллерного блока управления внешнего сигнала запускается программа формирования и передачи на усилитель мощности излучаемого сигнала, а также преобразования и записи гидроакустического сигнала, поступающего на “Вх. 1”.

Сигнал с гидрофона ЭПБА (*3*, рис. 1) проходит через масштабирующий усилитель с фильтром низкой частоты и поступает на 32-битный *АЦП* (рис. 2), а далее по SPI-протоколу на цифровой вход (Вх. 1) микроконтроллерного блока управления. Данные накапливаются в буфере памяти блока управления и затем блоками выдаются на цифровой выход (Вых. 2) для записи на энергонезависимую SD-карту памяти емкостью128 Гбайт, что позволяет обеспечить непрерывность записи на срок до трех месяцев.

Сигнал, формируемый по заданной программе, с микроконтроллерного блока управления подается через аналоговый выход (Вых. 1) на усилитель мощности и далее на электромагнитный гидроакустический преобразователь, и происходит излучение гидроакустического сигнала в водную среду. Формирование типов и продолжительности сигналов определяется программой и выбирается из условий и задач применения излучающей станции.

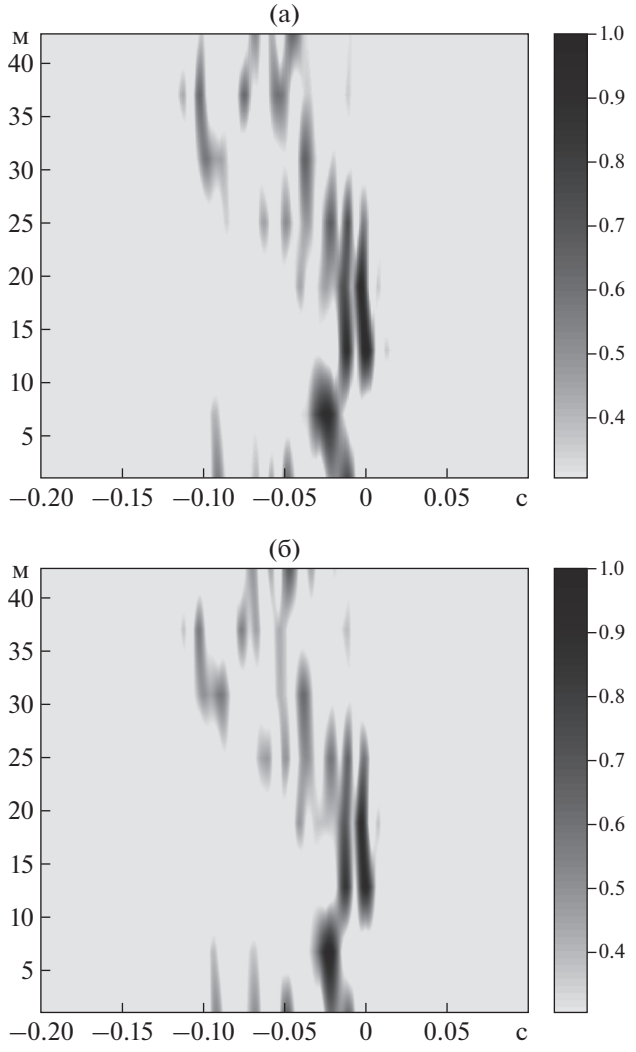


Рис. 4. Распределение максимумов корреляционной функции для линейного свип-сигнала 400–560 Гц продолжительностью 2 с (**а**), 10 с (**б**).

Использование фазоманипулированного, частотно-модулированного зондирующего сигнала и наличие синхронизации с другими устройствами позволяет расширить область применения автономной низкочастотной широкополосной гидроакустической излучающей станции в направлении построения системы передачи данных по гидроакустическому каналу и позиционирования для подводных аппаратов в произвольной акватории, а также расширения возможностей в области акустической томографии водной среды.

В режиме подводного маяка для позиционирования подводных аппаратов несколько таких станций устанавливаются на дно в районе использования подводных аппаратов и периодически излучают фазоманипулированные сигналы на различных несущих частотах в границах рабочего диапазона. На подводных аппаратах устанав-

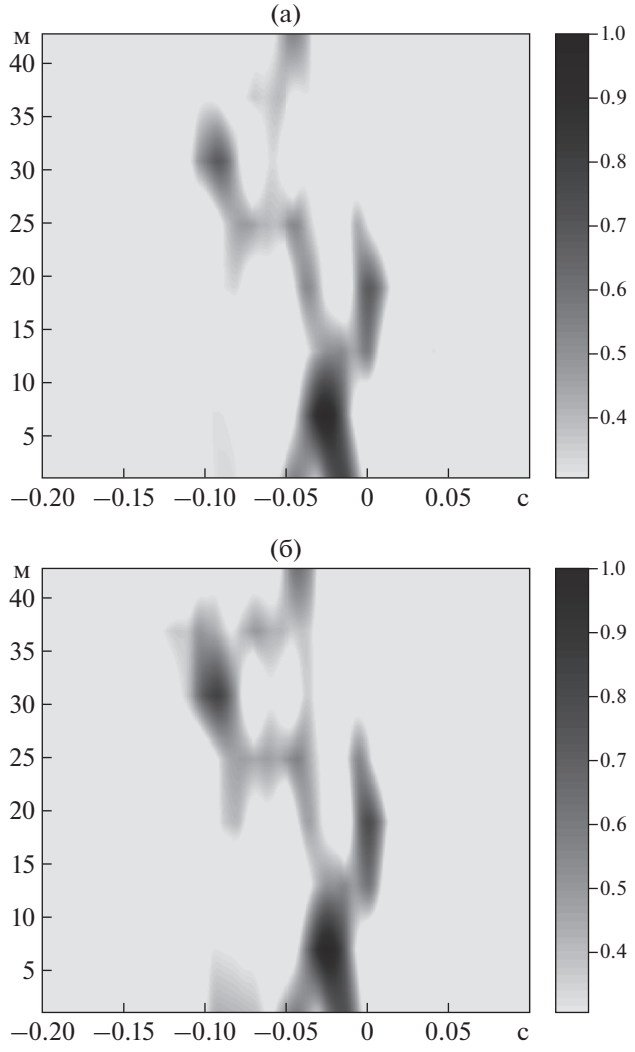


Рис. 5. Распределение максимумов корреляционной функции для фазоманипулированного сигнала длиной 63 символа (**а**) и 255 символа (**б**) на несущей 480 Гц.

ливаются приемный гидрофон и специальный блок обработки данных. В памяти блока находятся точные координаты постановки автономных излучателей и опорные сигналы соответствующих им частот, а также точное синхронизированное время их излучения.

Затем в блоке обработки проводится операция свертки полученного с приемного гидрофона сигнала с опорными сигналами, в результате которой получаются времена прохождения сигнала от маяков до подводного аппарата и, зная среднюю скорость звука в данной акватории, методом триангуляции определяется текущее положение аппарата.

Благодаря использованию микроконтроллерного блока управления и наличию канала приемного гидрофона, с помощью соответствующей модификации управляющей программы также существует возможность передачи телеметрической информации и ретрансляции сигналов других станций с целью построения распределенной информационной системы для выбранной акватории. И хотя гидроакустический канал в пределах частотного диапазона станций обладает сравнительно низкой пропускной способностью, но для широкого класса задач по передаче команд и данных телеметрии этого вполне достаточно.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОНОМНОЙ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ СТАНЦИИ

В октябре 2019 года в Японском море в акватории залива Посьета был проведен натурный эксперимент с применением автономной низкочастотной широкополосной гидроакустической излучающей станции, вертикальной приемной гидроакустической антенны и автономных термогирлянд [5]. Эксперимент проводился с целью верификации модели расчета интерференционной структуры низкочастотного гидроакустического поля в условиях мелкого моря, оптимизации методики применения и параметров сложных широкополосных гидроакустических сигналов, а также изучения взаимодействия низкочастотного гидроакустического поля с полем внутренних волн.

Схема эксперимента представлена на рис. 3. В узловой точке находилась автономная излучающая станция на глубине 38 м. В ходе эксперимента от автономной излучающей станции в течение полутора суток шло излучение последовательности из нескольких широкополосных сигналов с периодом 300 с. В состав сигналов входили линейные свип-сигналы в полосе 400–560 Гц продолжительностью 10 и 2 с, а также два фазоманипулированных сигнала в виде псевдослучайных последовательностей длиной 63 и 255 символов по 10 периодов на символ на несущей частоте 480 Гц.

Прием осуществлялся на 8-элементную вертикальную приемную антенну, расположенную на расстоянии 8 км от излучающей станции в направлении свала глубин в точке с глубиной места 56 м, составленную из синхронизированных регистраторов гидроакустического поля [6]. Регистраторы расположены в следующем порядке – первый на высоте 1 м от дна, следующие семь с периодом 6 м друг от друга.

Также на время эксперимента было установлено 6 многоэлементных автономных термогирлянд. Три термогирлянды стояли треугольником стороной 500 м вблизи точки постановки донной станции – для определения направления распространения фронта внутренних волн. Одна термогирлянда находилась в непосредственной близости от приемной вертикальной антенны и две термогирлянды располагались по трассе распространения гидроакустического сигнала.

На рис. 4 и 5 проиллюстрированы результаты натурного эксперимента в виде корреляционных функций для разных типов сигналов, полученных в результате свертки принятого сигнала с его маской. Интерпретировать максимумы корреляционной функции можно как волновые пакеты (моды), распространяющиеся с некоторой групповой скоростью. На графиках по оси *Y* приведено расстояние от дна в метрах, по оси *X* указано время в секундах относительно прихода сигнала с максимальной амплитудой корреляционной функции, а интенсивностью цвета отмечено значение нормированной корреляционной функции. На рисунках можно наглядно оценить скорость распространения мод и распределение их интенсивности по глубине.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проектировании излучающей станции были полностью удовлетворены требования к срокам автономности, массогабаритным характеристикам и излучаемой мощности. Предлагаемые технические решения, в том числе за счет установки электромагнитного гидроакустического преобразователя, позволяют станции излучать с высоким качеством и к.п.д. в пределах рабочего диапазона гармонические, частотно-модулированные и фазоманипулированные сигналы. Кроме того, включение в состав оборудования излучающей станции высокоточного тактового генератора, канала синхронизации с другими устройствами и канала записи с гидрофона, расширяет перечень используемых методик для задач акустической томографии, дает возможность использования станции в качестве подводных маяков для позиционирования подводных аппаратов, а также передачи ретрансляции данных по гидроакустическому каналу.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Автономная станция создана в рамках реализации государственных заданий: АААА-А17-117030110031-6 “Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей в условиях глубокого и мелкого моря”, АААА-А20-120021990003-3 “Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей Мирового океана” и программы “Дальний Восток” 18-I-004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рутенко А.Н.* // Акустический журнал. 2010. Т. 56. № 5. С. 662.
2. *Пивоваров А.А., Ярощук И.О., Швырев А.Н., Самченко А.Н.* Патент на полезную модель 176198 РФ // Опубл. 12.01.2018. Бюл. № 2.
3. *Стробыкин Д.С., Безответных В.В., Моргунов Ю.Н., Тагильцеа А.А.* // ПТЭ. 2018. № 2. С. 124. https://doi.org/10.1134/ S0032816219020277
4. *Долгих Г.И., Чупин В.А., Долгих С.Г., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Швырев А.Н., Яковенко С.В., Ярощук И.О.* // ПТЭ. 2017. № 4. С. 137. https://doi.org/10.7868/ S0032816217030181
5. *Леонтьев А.П., Ярощук И.О., Смирнов С.В., Кошелева А.В., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Швырев А.Н.* // ПТЭ. 2017. № 1. С. 128. https://doi.org/10.7868/S0032816216060227
6. *Леонтьев А.П., Пивоваров А.А., Ярощук И.О., Швырев А.Н.* Патент на полезную модель 171967 РФ // Опубл. 20.03.2017. Бюл. № 18.

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 6, с. 100–104

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 504.064.38

СПЕКТРОРАДИОМЕТР 5-МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

© 2020 г. А. А. Швецов[a,*], М. В. Беликович[a], А. А. Красильников[a], М. Ю. Куликов[a], Л. М. Кукин[a], В. Г. Рыскин[a], О. С. Большаков[a], И. В. Леснов[a], А. М. Щитов[b], А. М. Фейгин[a], В. Б. Хайкин[c], И. В. Петров[d,e]

[a] *Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН*
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46
[b] *НФ АО "НПФ ТЕХНОЯКС"*
Россия, 603152, Нижний Новгород, ул. Кащенко, 6
[c] *Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН*
Россия, 196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, 65, к. 2
[d] *АО "НИИ полупроводниковых приборов",*
Россия, 634034, Томск, ул. Красноармейская, 99а
[e] *Национальный исследовательский Томский государственный университет,*
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 36
**e-mail: shvetsov@ipfran.ru*

Поступила в редакцию 12.12.2019 г.
После доработки 07.04.2020 г.
Принята к публикации 30.04.2020 г.

Представлены результаты разработки мобильного твердотельного микроволнового спектрорадиометра, работающего в 5-миллиметровой полосе поглощения молекулярного кислорода. Спектрорадиометр состоит из супергетеродинного приемника с малошумящим усилителем на входе и 8-канального анализатора спектра. Шумовая температура прибора 1000–1300 K. Для обеспечения автоматической внутренней калибровки интенсивности принимаемого радиоизлучения используется твердотельной модулятор-калибратор на основе GaAs-диодов с барьером Шоттки. Конструкция антенной системы спектрорадиометра представляет собой тефлоновую просветленную линзу с коническим гофрированным облучателем. Прибор оснащен автоматизированной цифровой системой управления процессом измерения, калибровки и предварительной обработки данных. Приводятся примеры результатов измерений спектров излучения атмосферы и излучательных характеристик земной поверхности, полученных с помощью прибора. Спектрорадиометр предназначен для дистанционных исследований атмосферы и подстилающей поверхности.

DOI: 10.31857/S0032816220050377

ВВЕДЕНИЕ

Дистанционные методы являются одними из важнейших инструментов исследования окружающей среды, они позволяют получать ценную информацию об атмосферных процессах, характеристиках поверхности суши и океана. Развитию методов дистанционного зондирования способствует использование различных диапазонов электромагнитных излучений как активных, так и пассивных. В частности, микроволновый диапазон широко используется для восстановления профиля температуры и влажности атмосферы, температуры и уровня волнения морской поверхности и т.п.

Особое место в этих исследованиях занимает диапазон миллиметровых волн. Это связано с тем, что в нем находятся линии и полосы излучения молекул газов, составляющих земную атмосферу, таких как молекулярный кислород и водяной пар, а также малых газовых составляющих, таких как озон, окись углерода, окислы азота и др.

Излучение атмосферы в линиях и полосах газов в этом диапазоне используется для дистанционного мониторинга температуры, влажности и содержания малых газовых составляющих [1, 2]. В то же время для зондирования земной поверхности, как правило, применяются радиометры, работающие в диапазонах микроволн с малым атмосферным поглощением – в так называемых

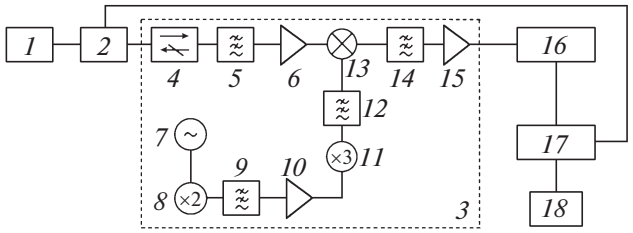


Рис. 1. Структурная схема спектрорадиометра. *1* – антенная система; *2* – модулятор-калибратор; *3* – приемник радиоизлучения миллиметрового диапазона; *4* – вентиль; *5* – режекторный фильтр зеркального канала; *6* – усилитель высокой частоты; *7* – синтезатор; *8* – удвоитель частоты; *9*, *12* – полосовые фильтры; *10* – усилитель; *11* – утроитель частоты; *13* – смеситель; *14* – фильтр низких частот; *15* – усилитель промежуточной частоты; *16* – анализатор спектра; *17* – цифровой модуль для предварительной обработки результатов измерений и управления процессом измерения; *18* – персональный компьютер.

“окнах прозрачности”. Однако области спектра со значительным поглощением в атмосфере также могут использоваться для получения информации о подстилающей поверхности [3]. При этом нисходящее тепловое излучение атмосферы используется в качестве подсветки поверхности.

Как показано в работе [4], сравнение спектров нисходящего атмосферного излучения в областях с сильной частотной зависимостью поглощения (на склонах линий и полос атмосферных газов) со спектрами излучения земной поверхности может дать уникальную информацию о физических свойствах покрова и его тепловом режиме. В частности, зондирование поверхности в диапазонах длин волн, лежащих на склонах 5-мм полосы или 2.5-мм линии молекулярного кислорода, позволяет получать информацию одновременно о физической температуре и о коэффициенте излучения верхнего слоя покрова [4].

Идея метода заключается в следующем. Яркостная температура поверхности $T_я$ связана с яркостной температурой нисходящего излучения атмосферы $T_а$ соотношением

$$T_я = (1 - A)T_{пов} + AT_а, \quad (1)$$

где $T_{пов}$ – физическая температура скин-слоя покрова, A – его альбедо (коэффициент отражения). Выполнив измерения $T_я$ и $T_а$ на ряде частот с различной интенсивностью нисходящего излучения, из полученной системы уравнений (1) можно определить как величину A, так и $T_{пов}$.

Условием применимости этого метода является постоянство альбедо для этих частот, что выполняется для большинства естественных земных покровов в относительно узких диапазонах частот на склонах полосы или линии O_2. Для реализации метода в принципе достаточно измерений на двух частотах. Однако увеличение числа частотных каналов дает повышение чувствительности и помехозащищенности измерений.

ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

Для решения комплекса задач дистанционного зондирования атмосферы и поверхности с использованием спектральных особенностей миллиметрового диапазона в ИПФ РАН разработан мобильный автоматизированный спектрорадиометр 5-мм диапазона длин волн.

Структурная схема спектрорадиометра приведена на рис. 1. Спектрорадиометр имеет 8 частотных каналов, расположенных на низкочастотном склоне 5-мм полосы поглощения молекулярного кислорода. Полная полоса приема 50–55 ГГц. Каналы расположены между узкими, разрешаемыми при наблюдении с поверхности Земли линиями O_2, которые могут использоваться для дистанционного зондирования температуры стратосферы [2].

Антенная система *1* спектрорадиометра представляет собой тефлоновую линзу, просветленную с помощью концентрических канавок [5] и облучаемую коническим гофрированным рупором-облучателем. Расчет облучателя проводился по методике, аналогичной описанной в работе [6]. Антенна обеспечивает осесимметричную диаграмму направленности шириной ~2.5° по половинному уровню мощности и уровень боковых лепестков менее –25 дБ. Суммарные потери в антенной системе составляют ~0.8 дБ.

Принимаемое антенной излучение поступает в волноводное устройство, реализующее функции модулятора и источника шумовых калибровочных сигналов, – модулятор-калибратор *2* [7, 8]. Модулятор-калибратор представляет собой отрезок волновода основного сечения 4.4 × 2.2 мм, в который вмонтирована монолитная интегральная микросхема, состоящая из ряда цепочек диодов с барьером Шоттки. При попеременной подаче на них одного из трех уровней постоянного тока смещения модулятор-калибратор переключает устройство в одно из трех состояний:

1) при нулевом токе модулятор-калибратор открыт, и измеряемый антенный сигнал поступает в приемник, потери в открытом состоянии в модуляторе-калибраторе составляют ~ 0.5 дБ;

2) при подаче управляющего тока антенный вход запирается и на вход приемника подается шумовой калибровочный сигнал, генерируемый модулятором-калибратором; при токе 2 мА уровень калибровочного шумового сигнала, поступающего на вход приемника, составляет ~160 K (холодная нагрузка);

3) при управляющем токе ~25 мА (теплая нагрузка) уровень достигает ~300 K.

Стабильность калибровочных сигналов обеспечивается использованием стабилизатора управляющего тока и термостатированием модулятора-калибратора. Коэффициенты передачи и шумовые параметры модулятора-калибратора определяются путем проведения процедуры первичной калибровки, описанной ниже.

Далее сигналы через развязывающий ферритовый вентиль *4* с прямыми потерями 0.6 дБ и развязкой не менее 20 дБ подаются в высокочастотный малошумящий усилитель *6* с шумовой температурой ~540 K и коэффициентом передачи ~35 дБ. С помощью балансного диодного смесителя *13*, работающего на первой гармонике сигнала гетеродина, спектр сигнала преобразуется в полосу промежуточных частот 2–7 ГГц. На входе смесителя установлен полосовой фильтр *5*, ослабляющий прием по зеркальному каналу на величину ≥20 дБ.

Гетеродинный сигнал смесителя с частотой 48 ГГц в свою очередь формируется из сигнала синтезатора с частотой 8 ГГц и мощностью 50 мВт цепочкой из последовательно включенных с.в.ч.-устройств: удвоителя частоты *8*, полосового фильтра *9* и усилителя, выполненных в едином корпусе, а также утроителя частоты и волноводного полосового фильтра *12* с центральной частотой 48 ГГц. На входе смесителя уровень мощности гетеродинного сигнала составляет не менее 10 мВт с подавлением побочных частот синтезатора не менее 50 дБн. Относительная нестабильность частоты гетеродина составляет $\leq 10^{-7}$.

Сигнал промежуточной частоты со смесителя поступает на усилитель *15*, а затем – в анализатор спектра *16*, представляющий собой банк из восьми полосовых фильтров с шириной полос от 150 до 500 МГц. Таким образом, на входе спектрорадиометра в полосе 50–55 ГГц формируются 8 частотных каналов, расположенных на склоне 5-мм полосы поглощения O_2.

Центральные частоты и ширины каналов оптимизированы исходя из условия, что величина допустимых систематических ошибок измерения спектра излучения атмосферы не должна превышать 0.1 K. Шумовая температура спектрорадиометра, приведенная к апертуре антенны, варьируется по каналам от 1000 до 1300 K, что обеспечивает флуктуационную чувствительность с учетом калибровочной процедуры 0.1–0.2 K при времени интегрирования 1 с.

Управление процессом измерения выполняется с помощью персонального компьютера *18* через цифровой модуль, встроенный в спектрорадиометр и подключенный к компьютеру посредством COM-порта. С помощью модуля осуществляется периодическое переключение состояний модулятора-калибратора с частотой ~0.1 с, оцифровка и временное усреднение выходных сигналов для каждого состояния модулятора-калибратора, а также управление процессом термостабилизации прибора. Дальнейшая обработка сигналов, включающая в себя пересчет спектра в антенные температуры, временное усреднение спектра и его графическое отображение, осуществляется в реальном времени в персональном компьютере. Прибор оснащен акселерометром, позволяющим автоматически определять угловые координаты направления приема. Данные измерений сохраняются в выходных файлах персонального компьютера.

Рис. 2. Внешний вид спектрорадиометра.

Потребляемая прибором мощность без расхода на термостатирование составляет 25 Вт. При работе в полевых условиях за счет работы термостата общее потребление может достигать 60 Вт. Спектрорадиометр помещен в термостатированный (с точностью не хуже 0.2 K) корпус, защищенный от неблагоприятных погодных условий.

Внешний вид спектрорадиометра, размещенного на поворотном устройстве, приведен на рис. 2.

Предусмотрена процедура первичной абсолютной калибровки модулятора-калибратора, реализуемая с помощью последовательного измерения излучения двух эталонов черного тела, перекрывающих входную апертуру антенны, при трех состояниях модулятора-калибратора. В качестве эталонов используются два поглотителя: один – с температурой окружающего воздуха, а второй – с температурой кипения жидкого азота. Первичная калибровка позволяет осуществить привязку уровней калибровочных сигналов конкретного экземпляра модулятора-калибратора к абсолютным значениям антенных температур с учетом потерь в антенне и входных цепях, а также дает возможность учесть влияние неполного запирания антенного

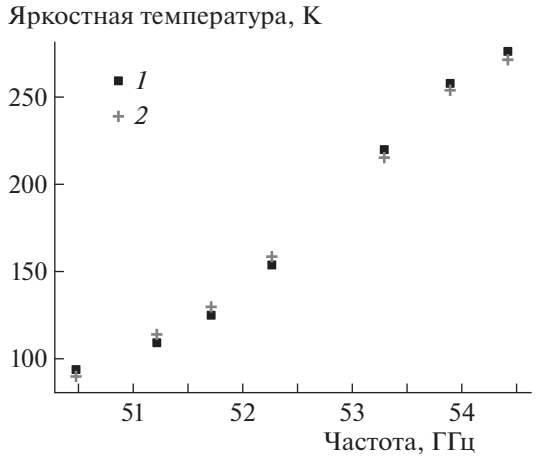


Рис. 3. Спектр яркостной температуры атмосферы. *1* – результаты эксперимента, *2* – значения яркостной температуры, рассчитанные по высотному профилю температуры и влажности.

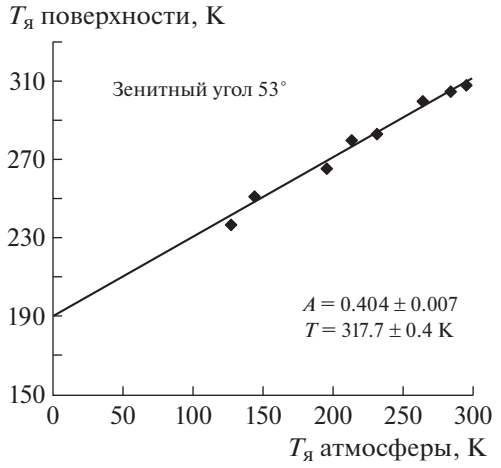


Рис. 4. Результаты измерений излучательных характеристик речного песка (точки), прямая – аппроксимация по методу наименьших квадратов.

входа модулятора-калибратора во время калибровочного цикла. В процессе первичной калибровки определяются эффективные температуры излучения модулятора-калибратора, приведенные к входу антенны, и коэффициенты его запирания. Данные первичной калибровки сохраняются в файле калибровки и используются при измерениях спектра антенного сигнала в реальном времени. Стабильность параметров модулятора-калибратора при условии термостатирования позволяет повторять абсолютную первичную калибровку не чаще одного раза в полгода.

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Спектрорадиометр предназначен для дистанционных измерений излучения атмосферы на низкочастотном склоне 5-мм полосы поглощения молекулярного кислорода. Результаты измерений в дальнейшем могут использоваться для восстановления температурного профиля тропосферы от поверхности Земли до тропопаузы [8] и исследования других атмосферных процессов. Пример спектра атмосферного излучения, зарегистрированного с помощью прибора, приведен на рис. 3. Здесь же изображен спектр, рассчитанный по среднесезонному высотному профилю температуры и влажности и модели распространения Liebe [9]. Флуктуационная ошибка измерения яркостной температуры во всех каналах не превышает 0.05 K. Отличие результатов эксперимента от расчетных данных связано, по-видимому, с использованием в оценке не текущего, а среднесезонного профиля метеопараметров.

Другое возможное применение прибора – дистанционное измерение излучательных и рассеивающих характеристик земных покровов по оригинальной методике, предложенной в работе [3] и использующей нисходящее излучение атмосферы в качестве подсветки. При этом измерения должны проводиться в области спектра с сильной частотной зависимостью интенсивности атмосферного излучения. С помощью описанного спектрорадиометра выполняются измерения спектра нисходящего атмосферного излучения и спектра излучения поверхности в восьми частотных каналах на склонах 5-мм полосы молекулярного кислорода.

Процедуру нахождения физической температуры и альбедо поверхности поясняет рис. 4, где в качестве примера приведены результаты измерений интенсивности излучения сухого речного песка в зависимости от яркостной температуры атмосферы $T_я$ под зеркальным углом 53° (точки) для восьми спектральных каналов. Параметры аппроксимирующей по методу наименьших квадратов прямой дают излучательные характеристики покрова. Тангенс угла наклона прямой определяет микроволновое альбедо A исследуемой поверхности. Физическая температура эффективно излучающего слоя T определяется из (1) как:

$$T = \frac{T_0}{1 - A},$$

где T_0 – отсекаемое на оси абсцисс значение яркостной температуры. Измерения проводились в жаркий солнечный день.

Как показали результаты эксперимента, температура поверхностного слоя песка (T = 317 K) существенно выше температуры приземного слоя воздуха, составляющей в это время 300 K, и несколько выше показаний контактного термометра (313 K), погруженного в песок на глубину 2 см. Эти различия объясняются сильным нагревом поверхности прямым солнечным излучением и

разницей температур в скин-слое зондирующего излучения и на глубине контактного измерения.

Таким образом, в отличие от одночастотных радиометров, обычно применяемых для зондирования земной поверхности, описанный спектрорадиометр позволяет существенно повысить информативность зондирования, а именно: измерять термодинамическую температуру покрова без априорных данных о его коэффициенте отражения и, наоборот, получать данные о коэффициенте отражения без дополнительной информации о температуре. Кроме того, использование больше двух каналов дает принципиальную возможность оценивать также и некоторые параметры индикатрисы рассеяния земного покрова [10].

Данный спектрорадиометр планируется применять для дистанционных исследований излучательных и рассеивающих характеристик земных покровов и водной поверхности в миллиметровом диапазоне длин волн [11, 12], а также для мониторинга атмосферных процессов, в том числе термического зондирования тропосферы с поверхности Земли [13]. Одновременно получаемые данные о температурном профиле тропосферы и состоянии подстилающей поверхности дают дополнительные возможности исследования механизма взаимодействия атмосферы и поверхности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-72-10113.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Waters J.W.* // Nature. 1973. V. 242. P. 506. https://doi.org/10.1038/242506a0
2. *Швецов А.А., Федосеев Л.И., Каратштин Д.А., Большаков О.С., Мухин Д.Н., Скалыга Н.К., Фейгин А.М.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53. № 5–6. С. 356.
3. *Швецов А.А.* A.c. SU 1670649. A1 // БИ. 1991. № 30.
4. *Швецов А.А., Коротаев Д.В., Федосеев Л.И.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48. № 10–11. С. 905.
5. *Копосова Е.В., Власов С.Н.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46. № 5–6. С. 482.
6. *Thomas B., Mac A.* // IEEE Trans. Antennas Prop. 1978. № 2. P. 367. https://doi.org/10.1109/TAP.1978.1141842
7. *Федосеев Л.И., Божков В.Г., Геннеберг В.А., Петров И.В.* Патент 2488941 РФ // БИ. 2013. № 21. http://allpatent/2488941.html
8. *Федосеев Л.И., Божков В.Г., Геннеберг В.А., Петров И.В., Шкаев А.П.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50. № 10–11. С. 948.
9. *Liebe H.J.* //Int. J. IR & MM Waves. 1989. V. 10. № 6. P. 631.
10. *Швецов А.А.* // Журнал радиоэлектроники. 2012. № 5. С. 2.
11. *Швецов А.А., Беликович М.В., Большаков О.С., Рыскин В.Г., Фейгин А.М., Аверченко А.В., Korabovsky A.* // Известия вузов. Радиофизика. 2017. Т. 60. № 3. С. 231.
12. *Бубукин И.Т.* // Известия вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46. № 4. С. 261.
13. *Наумов А.П., Ошарина Н.Н., Троицкий А.В.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42. № 1. С. 45.

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 6, с. 105–108

ЛАБОРАТОРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 53.072.8+54.116+53.06

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТРЕХМЕРНОЙ КРИОПЕЧАТИ

© 2020 г. А. В. Миронов[a,*], П. Ю. Алгебраистова[c], В. С. Комлев[a,b], О. А. Миронова[a], В. К. Попов[a]

[a] *Институт фотонных технологий ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН Россия, 108840, Москва, Троицк, ул. Пионерская, 2*

[b] *Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН Россия, 119334, Москва, Ленинский просп., 49*

[c] *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1*

**e-mail: scftlab@gmail.com*

Поступила в редакцию 19.04.2020 г.
После доработки 08.05.2020 г.
Принята к публикации 11.05.2020 г.

Описана установка, позволяющая изучать физико-химические процессы структурообразования, протекающие при температурно-индуцированных агрегатных переходах жидких и гелеобразных композиций в ходе трехмерной печати в условиях значительных температурных градиентов. Основу установки составляют трехмерная координатная система с обогреваемым пневматическим дозатором вязкотекучих композиций и подложка, охлаждаемая до –190°С. Для охлаждения подложки предусмотрено использование жидкого азота, твердого диоксида углерода или встроенной системы охлаждения на элементе Пельтье. Установка оснащена средствами контактного температурного контроля и видеофиксации.

DOI: 10.31857/S0032816220050328

Для большинства видов трехмерной (3D) печати ключевым звеном технологического процесса является метод понижения текучести материала от значений, позволяющих дозировать его с необходимой точностью, до значений, обеспечивающих сохранение формы изготавливаемого объекта. В той или иной форме этот процесс реализуется практически во всех базовых технологиях аддитивного производства. При печати гидрогелями [1, 2] или термоэкструзионной печати [3] кинетика отверждения материала критически важна для получения заданной геометрии изделия, тогда как для стереолитографии [4, 5], струйной печати [6, 7] или селективного лазерного спекания [8, 9] форма и структура образца поддерживаются за счет неизрасходованного исходного материала.

Быстрый переход текучих материалов в твердое агрегатное состояние может быть обеспечен быстрым охлаждением материала в условиях значительного локального градиента температуры от положительных значений у инжекционного сопла до отрицательных – у рабочей подложки. Такой процесс носит название криопечати [10, 11] и используется для формирования структур из материалов, для которых невозможна смена агрегатного состояния иным путем, например, химической сшивкой. Традиционным подходом является комбинирование криопечати с последующей сублимационной сушкой, что позволяет получать объекты произвольной формы и с высокопористой структурой.

Для расширения области возможных применений вышеописанного подхода нами разработана на современной элементной базе установка, позволяющая в лабораторных условиях проводить исследования различных физико-химических процессов в ходе трехмерной печати в условиях градиентов температуры до 200°С/мм (рис. 1).

Принцип работы установки основан на формировании трехмерного объекта путем нанесения водных растворов или коллоидов через сопла *5* различного диаметра (100–1000 мкм) на охлаждаемую до –190°С подложку. Дозирование материалов осуществляется с помощью обогреваемого пневматического экструдера *4*, в качестве резервуара в котором используются одноразовые полимерные шприцы объемом 2–10 мл. Заполненный материалом резервуар герметично закрывается пробкой, которая одновременно является поршнем, что позволяет заранее готовить,

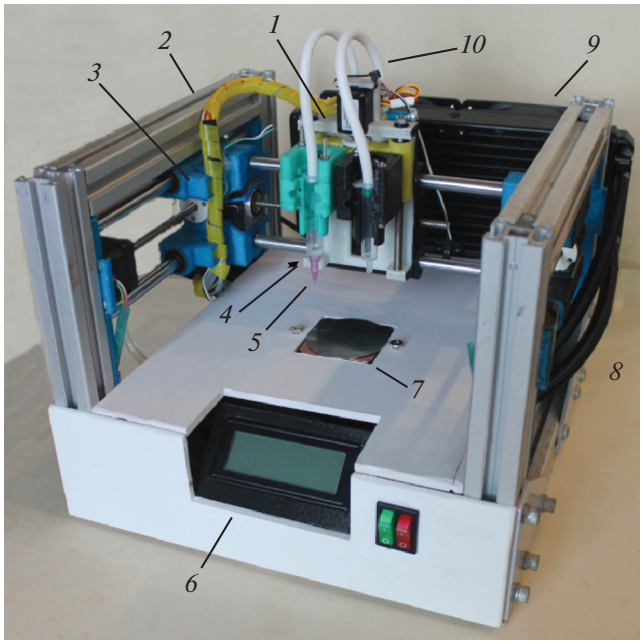


Рис. 1. Установка для трехмерной криопечати. *1* – привод вертикального позиционирования; *2* – рама установки; *3* – приводы горизонтального позиционирования; *4* – печатающее устройство; *5* – резервуар с соплом; *6* – жидкокристаллический экран; *7* – охлаждаемый столик с камерой охлаждения; *8* – гидролинии охлаждающей жидкости; *9* – радиатор жидкостного охлаждения; *10* – пневмолинии системы дозирования.

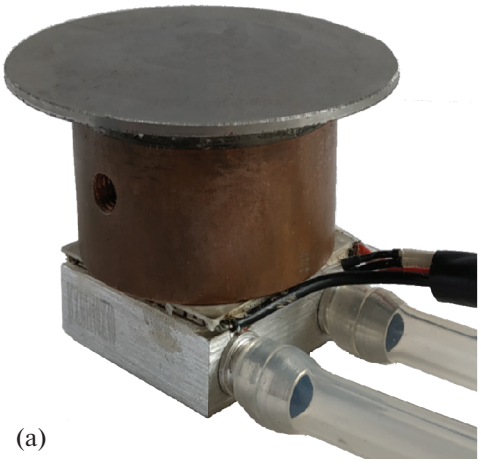
стерилизовать и осуществлять быструю смену резервуара в процессе печати.

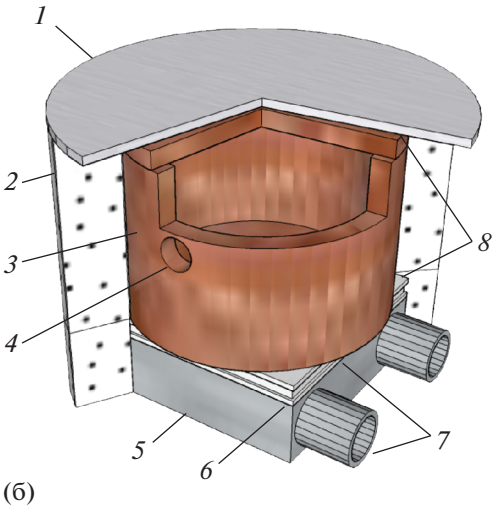
После установки в принтер резервуара поршень перемещается в нем под действием сжатого воздуха, давление которого регулируется в пределах 0.01–0.60 МПа. На резервуар устанавливается электрорезистивный обогреватель мощностью 12 Вт, температура измеряется с помощью двух терморезисторов Epcos 100k, установленных: один – под обогревателем, а второй – на сопле экструдера.

Позиционирование экструдера по заданным в компьютерной модели координатам осуществляется трехкоординатной системой перемещений, состоящей из алюминиевого шасси *2* и парных несущих цилиндрических направляющих с линейными шариковыми подшипниками, а также шаговых двигателей с винтовыми передачами *1*, *3*, обеспечивающих перемещение печатной головки массой 150 г с ускорениями до 100 мм/с при минимальном шаге 2.5 мкм и точности позиционирования ~25 мкм.

Рабочий столик (рис. 2), обеспечивающий быструю заморозку печатаемой структуры, состоит из подложки из нержавеющей стали *1* и камеры для жидкого азота или твердого диоксида углерода в медной “рубашке” *3*, охлаждаемой одноканальным элементом Пельтье TEC1-12709 (*6*) с холодопроизводительностью 80 Вт и перепадом температур до 65°C. Для предотвращения обмерзания подложки на установку может быть установлена система поддува сухого азота от внешнего источника.

Контроль температурного режима печати обеспечивается набором основных и вспомогательных термометров на основе терморезисторов, подключенных к микроконтроллеру установки. Для измерений криогенных температур в конструкции столика использованы терморезисторы


(а)



(б)

Рис. 2. Общий вид (**а**) и устройство (**б**) охлаждаемого столика установки для трехмерной криопечати. *1* – рабочая поверхность; *2* – термоизоляционный кожух; *3* – камера-“рубашка” для хладагента; *4* – штуцер компенсатора давления; *5* – жидкостный теплообменник элемента Пельтье; *6* – элемент Пельтье; *7* – точки установки вспомогательных терморезисторов Epcos 100k; *8* – точки установки низкотемпературных терморезисторов Rotronic RMS-T10-0001.

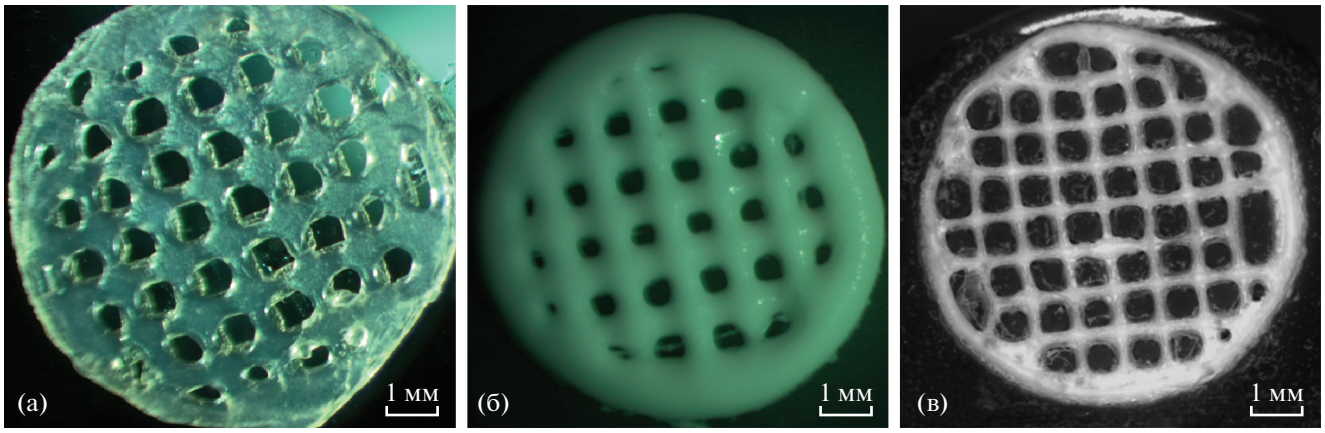


Рис. 3. Образцы биосовместимых матриксов, изготовленных с помощью разработанной установки 3D-печати: **а** – из водных растворов альгината натрия; **б** – из водных растворов альгината с содержанием мелкодисперсного фосфата кальция; **в** – из водных растворов альгината натрия после сублимационной сушки.

Rotronic RMS-T10-0001 (*8*) с диапазоном измерений от –196 до 25°C. Для нормального функционирования установки ряд вспомогательных терморезисторов (Epcos 100k) обеспечивает измерение температур в системе теплоотвода *5* элемента Пельтье.

Все терморезисторы подключены через делители напряжения к 10-битным аналогово-цифровым преобразователям основного модуля управления установки, выполненного на микроконтроллере Atmel ATMega 2560. Точность измерения температуры не хуже 1.0°C для терморезисторов Rotronic и 0.5°C для Epcos 100k. Этот же модуль осуществляет управление пятью электромеханическими приводами установки через дополнительную плату RAMPS 1.4.

Управление установкой обеспечивается компьютером с помощью свободно распространяемого программного обеспечения фирмы Repetier Host (Hot-World GmbH & Co. KG, Германия) или собственной разработки. Используемое программное обеспечение позволяет подготовить управляющую программу по данным компьютерной трехмерной модели, что дает возможность в автоматическом режиме осуществлять послойную печать требуемого объекта, а также обеспечивает режим ручного управления и отображение текущих рабочих параметров установки.

Для удобства оператора и осуществления функций обратной связи при печати установка оснащена цифровой камерой. В случае использования программного обеспечения собственной разработки с помощью этой камеры можно контролировать геометрию потока в зоне экструзии.

На рис. 3 приведены изображения экспериментальных образцов биосовместимых матричных структур, напечатанных на разработанной установке. Представленные образцы в виде решетчатых дисков диаметром 7–10 мм предназначены для первичных клеточных испытаний трехмерных матриксов, полученных из вязкотекучих композиций на основе водных растворов альгината натрия. В качестве исходных материалов для печати использовались гидрогели на основе альгинатов натрия (Fluka, Химмед), а также композиции на их основе, содержащие мелкодисперсный трикальцийфосфат.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по государственному заданию ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН в части разработки процессов трехмерной печати и РФФИ (18-29-11081_мк) в части получения и исследования свойств гидрогелевых композиций и мелкодисперсных наполнителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lee J.M., Yeong W.Y.* // Adv. Healthc. Mater. 2016. V. 5. № 22. P. 2856. https://doi.org/10.1002/adhm.201600435
2. *Li J., Wu C., Chu P.K., Gelinsky M.* // Mater. Sci. Eng.: R: Reports. 2020. V. 140. https://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100543
3. *Long J., Gholizadeh H., Lu J., Bunt C., Seyfoddin A.* // Curr. Pharm. Des. 2016. V. 23. Issue 3. P. 433. https://doi.org/10.2174/1381612822666161026162707
4. *Dudova D.S., Bardakova K.N., Kholkhoev B.C., Ochirov B.D., Gorenskaia E.N., Farion I.A., Burdukovskii V.F., Timashev P.S., Minaev N.V., Kupriyanova O.S.* // J. Appl. Polym. Sci. 2018. V. 135. Issue 27. https://doi.org/10.1002/app.46463

5. *Manapat J.Z., Chen Q., Ye P., Advincula R.C.* // Macromol. Mater. Eng. 2017. V. 302. Issue 9. https://doi.org/10.1002/mame.201600553
6. *Ke D., Bose S.* // Addit. Manuf. 2018. V. 22. P. 111. https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.020
7. *Dini F., Ghaffari S.A., Jafar J., Hamidreza R., Marjan S.* // Met. Powder Rep. 2020. V. 75. Issue 2. P. 95. https://doi.org/10.1016/j.mprp.2019.05.001
8. *Koo J.H., Ortiz R., Ong B., Wu H.* // Laser Addit. Manuf.: Mater. Des. Technol. Appl. / Ed by Milan Brandt. Woodhead Publishing, 2017. P. 205. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100433-3.00008-7
9. *Минаев Н.В., Миронов А.В., Минаева С.А., Миронова О.А., Сячина М.А., Krumins E., Howdle S., Попов В.К.* // ПТЭ. 2020. № 2. С. 153. https://doi.org/10.31857/S0032816220020135
10. *Munir N., Larsen R.S., Callanan A.* // Bioprinting. 2018. V. 10. https://doi.org/10.1016/j.bprint.2018.e00033
11. *Kam D., Chasnitsky M., Nowogrodski C., Braslavsky I., Abitbol T., Magdassi S., Shoseyov O.* // Colloids and Interfaces. 2019. V. 3. № 2. P. 46. https://doi.org/10.3390/colloids3020046

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 6, с. 109–114

ЛАБОРАТОРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 533.599

ИЗУЧЕНИЕ ГАЗОПОГЛОЩАЮЩИХ СВОЙСТВ ГЕТТЕРНЫХ НАСОСОВ ПО РАЗЛИЧНЫМ ГАЗАМ

© 2020 г. В. В. Анашин[a], А. А. Краснов[a,b], А. М. Семенов[a,c,*]

[a] *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН*
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

[b] *Новосибирский государственный университет*
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

[c] *Новосибирский государственный технический университет*
Россия, 630073, Новосибирск, просп. Карла Маркса, 20

**e-mail: A.M.Semenov@inp.nsk.su*

Поступила в редакцию 23.03.2020 г.
После доработки 28.04.2020 г.
Принята к публикации 30.04.2020 г.

Представлены результаты измерения газопоглощающих характеристик по H_2 и CO геттерных насосов на основе Ti-Zr-Al с внешним и внутренним нагревателем. Проведено сравнение полученных данных с результатами измерений таких же характеристик комбинированного насоса NEXTorr D 100-05 фирмы SAES Getters, а также титановой пленки при температурах 300 и 77 K, полученной методом сублимации титана.

DOI: 10.31857/S0032816220050250

ВВЕДЕНИЕ

В Новосибирске строится источник синхротронного излучения “4+”-поколения ЦКП “СКИФ” (Центр коллективного пользования “Сибирский кольцевой источник фотонов”) [1]. К источнику предъявляются требования малого эмиттанса пучка (75 пм·рад), для достижения которого необходим сверхвысокий вакуум. В последнее время для получения высокого и сверхвысокого вакуума все чаще используются комбинированные насосы, состоящие из нераспыляемых геттеров и последовательно к ним присоединенного магниторазрядного насоса, размещенных в одном корпусе, например насосы NEXTorr фирмы SAES Getters [2]. Сочетание насосов разного типа позволяет значительно улучшить массогабаритные показатели и существенно снизить предельное давление вакуумного насоса.

Несмотря на успехи ряда производителей в конструировании комбинированных высоковакуумных насосов, представляет интерес создание специализированного малогабаритного насоса, оптимизированного для использования в вакуумной системе СКИФ и спроектированного на основе отечественных геттерных материалов. С этой целью в качестве первого шага были сконструированы прототипы насосов с различным геометрическим расположением геттерных таблеток производства фирмы АО “Полема” и изучены их вакуумные свойства.

В данной статье представлены результаты измерения газопоглощающих характеристик по водороду и монооксиду углерода геттерных насосов на основе спеченных таблеток из мелкодисперсного порошка состава Ti-Zr-Al, активируемых с помощью либо внешнего, либо внутреннего нагревателя. Также приводится сравнение полученных результатов с измерениями таких же характеристик комбинированного насоса NEXTorr D 100-05 фирмы SAES Getters, а также титановой пленки при температурах 300 и 77 K, полученной методом сублимации титана.

ОПИСАНИЕ ТЕСТИРУЕМЫХ НАСОСОВ

Для получения сверхвысокого вакуума в ускорителях использовались и продолжают использоваться титановые сублиматоры в отдельности или в комбинации с ионно-геттерными насосами. Размещение ионно-геттерного насоса и титанового сублиматора в одном корпусе дает ряд преимуществ: высокую быстроту действия сублиматора по отношению к активным газам (азоту, водороду, CO) и поглощение инертных газов (аргона и метана) ионно-геттерным насосом.

Однако, помимо преимуществ, есть ряд существенных недостатков: малая сорбционная ем-

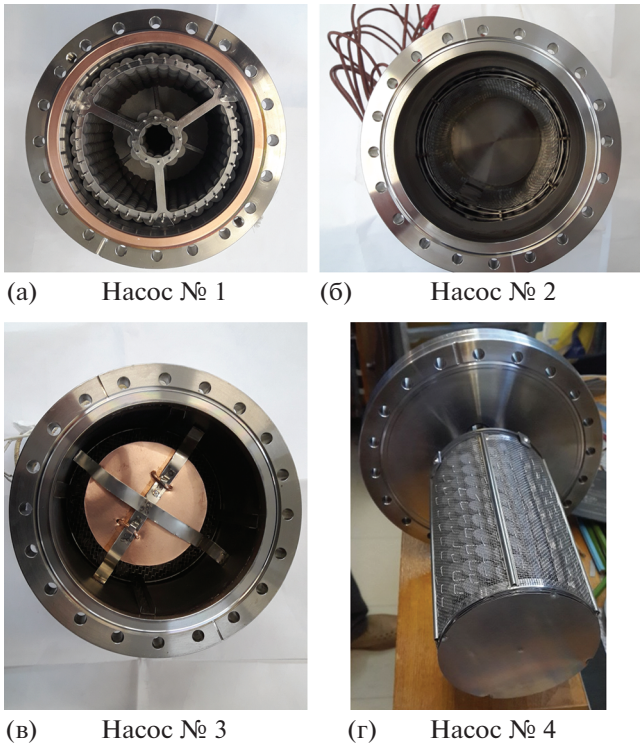


Рис. 1. Фотографии насосов, созданных на основе геттерных таблеток.

кость по сравнению с нераспыляемыми геттерами, а также необходимость использования сильноточных электрических вводов, которые являются критичными элементами с точки зрения обеспечения герметичности.

В данной работе проведены измерения быстроты откачки и сорбционной емкости насосов по водороду и монооксиду углерода при комнатной температуре и при температуре жидкого азота. Полученные данные хорошо согласуются с паспортными данными титанового сублимационного насоса фирмы Agilent [3].

Начиная с 70-х годов прошлого века все большую популярность приобретают насосы на основе нераспыляемых геттеров. Фирма SAES Getters (Италия), обладающая передовыми технологиями и богатыми традициями по исследованию и успешному внедрению нераспыляемых геттеров, последовательно соединила насос на основе нераспыляемого геттера с ионно-геттерным насосом, разместив их в одном корпусе [2].

С целью создания малогабаритных насосов, оптимизированных для использования в вакуумной системе СКИФ, были закуплены геттерные таблетки фирмы АО “Полема” [4] состава Ti-Zr-Al и изготовлены три насоса различной конструкции на основе нераспыляемых геттеров, которые активировались нагревателем, расположенным снаружи. Еще один насос, с внутренним нагревателем, был изготовлен и протестирован в 2016 г. [5], однако было важно проверить, как геттерные таблетки себя ведут после длительного нахождения в атмосфере.

Температура активации геттерных таблеток из Ti-Zr-Al рекомендована в диапазоне 623–673 K. Максимальная сорбционная емкость по водороду, равная 54.4 л · Торр/г, достигается при температуре 473 K и давлении 10^{-5} Торр, скорость откачки по водороду при той же температуре равна 6.6 л/(с · г). Конструкции всех геттерных насосов, созданных в ИЯФ СО РАН на основе Ti-Zr-Al-таблеток диаметром 12 ± 2 мм и толщиной $2.5^{+1}_{-0.5}$ мм, показаны на рис. 1.

Насосы с внешним нагревателем изготавливались из цилиндрической трубы с внутренним диаметром 150 мм, заглушенной с одной стороны и имеющей с другой стороны присоединительный фланец Ду 150 типа Conflat. В насосе № 1 (см. рис. 1а) таблетки (1300 штук) расположены на каркасе по радиусам 75 и 20 мм.

В насосе № 2 (см. рис. 1б) таблетки прижаты широкой стороной к стенке цилиндрической трубы по всей ее поверхности и плотно примыкают друг к другу. В насосе № 3 (см. рис. 1в) таблетки (1300 штук) насыпаны в цилиндр произвольным образом и прижаты к его поверхности металлической сеткой. Медный диск служит экраном для отражения тепла на геттер, тем самым обеспечивая лучшую активацию таблеток.

Для активации насосов использовался внешний нагреватель мощностью 1.5 кВт. Температура во время активации контролировалась термопарой типа хромель-копель.

Насос № 4 (см. рис. 1г) представляет собой цилиндр с внешним диаметром 90 мм, длиной 140 мм, в котором размещены около 300 таблеток общей массой 450 г. Таблетки расположены с зазором 1–1.5 мм между цилиндрическими сетками и для активации геттера нагреваются встроенным резистивным нагревателем мощностью 150 Вт. Геометрическая активная площадь геттера – внешняя стенка цилиндра (поскольку торцы картриджа были закрыты для обеспечения равномерного прогрева таблеток) – равна 395 см^2. Нагреватель расположен внутри, по центру картриджа, и прикреплен к фланцу Con-Flat Ду 150, на котором находится картридж. Температура во время активации контролируется термопарой типа хромель-копель.

В табл. 1 приведены основные параметры геттерных насосов каждого типа.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Активационные и сорбционные характеристики геттерных насосов измерялись на установ-

Таблица 1. Основные параметры геттерных насосов

Насос	Производитель	Геттер	Размеры, мм	Количество, шт.	Масса, г	Площадь, см^2
№ 1	ИЯФ СО РАН	Ti-Zr-Al	Таблетка диаметром 12.5 и толщиной 2.5	1300	1800	4200
№ 2	ИЯФ СО РАН	Ti-Zr-Al	То же	430	600	1400
№ 3	ИЯФ СО РАН	Ti-Zr-Al	То же	1300	1800	4200
№ 4	ИЯФ СО РАН	Ti-Zr-Al	Таблетка диаметром 13.7 и толщиной 3.5	300	450	395
NEXTorr D 100-5	SAES Getters	Zr-V-Fe	Диски	–	13.5	114
Ti-сублиматор с LN_2- экраном	Agilent	Ti	Нить	3	1.1 (3.3*)	826

* масса трех нитей

ке, два варианта схемы которой приведены на рис. 2. Отличие между схемами установки заключается в том, что в первом варианте (рис. 2а) геттерный насос активируется при помощи нагревателя, расположенного снаружи насоса, а во втором (рис. 2б) – пропусканием тока через резистивный нагреватель. Предварительная откачка системы проводилась турбомолекулярной станцией, включающей в себя турбомолекулярный насос TMP_1 и безмасляный мембранный насос *MP*. Высоковакуумная откачка осуществлялась турбомолекулярным насосом TMP_2. От прорыва атмосферы со стороны TMP_1 + *MP* был установлен аварийный электрический клапан VR_3. Форвакуум и высокий вакуум измерялись широкодиапазонным датчиком давления фирмы Pfieffer, состоящим из датчика Pirani и датчика давления с холодным катодом.

Напуск газа в систему выполнялся через игольчатый натекатель *VF* и капилляр *C* (молекулярная проводимость по водороду $3 \cdot 10^{-3}$ л/с). Откачка системы инжекции проводилась турбомолекулярной станцией через вакуумные клапаны VR_4 и VR_5. Для контроля давления напускаемого газа использовались стрелочный манометр и емкостный датчик давления “Baratron”.

Давление в системе измерялось датчиком давления с горячим катодом IG_1. Парциальные давления газов измерялись квадрупольным масс-спектрометром *RGA* фирмы SRS (Стэнфорд, США). Датчик давления с горячим катодом IG_2 предназначен для контроля потока газа, откачиваемого турбомолекулярным насосом TPM_2.

Геттерные насосы на основе Ti-Zr-Al № 1–№ 3 тестировались на установке, показанной на рис. 2а, а насос № 4 – на установке, схема которой приведена на рис. 2б.

До проведения экспериментов были измерены эффективная быстрота откачки турбомолекулярного насоса TMP_2, молекулярная проводимость капилляра и коэффициенты чувствительности

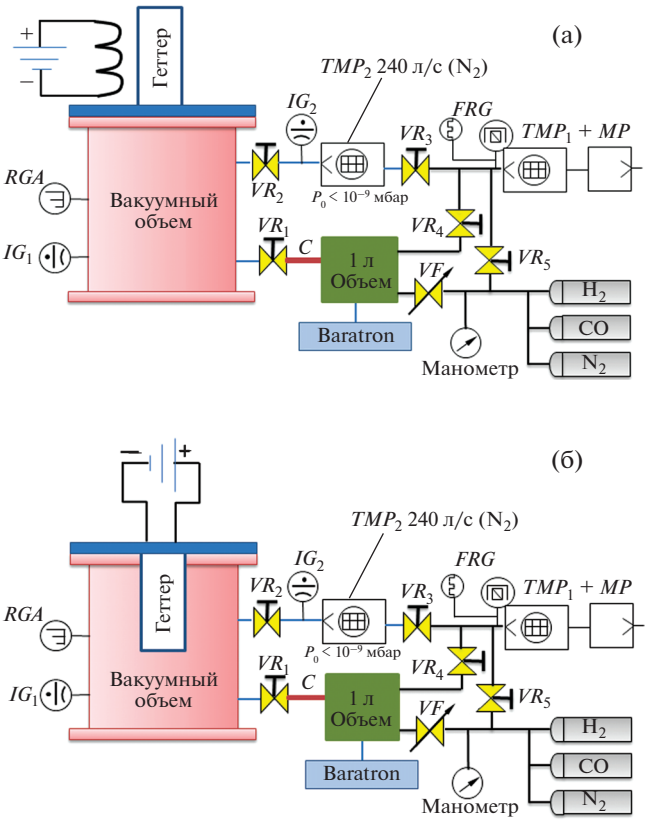


Рис. 2. Упрощенная схема вакуумного стенда при активации геттерного насоса: а - нагревателем, расположенным снаружи насоса; б - пропусканием тока через резистивный нагреватель.. *RGA* – масс-спектрометр; $IG_{1,2}$ – датчики давления с горячим катодом; *FRG* – широкодиапазонный датчик; Геттер – тестируемый насос; *C* – капиллярный канал с молекулярной проводимостью; TMP_1+*MP* – турбомолекулярная станция откачки; TMP_2 – турбомолекулярный насос; Baratron – емкостной датчик давления; *VF* – щелевой натекатель; VR_1–VR_5 – цельнометаллические угловые клапаны; VR_3 – аварийный электрический клапан.

Таблица 2. Характеристики датчиков давления с горячим катодом для разных газов

Газ	Молекулекулярная проводимость C, л/с	Эффективная быстрота откачки, $S_{эфф}$, л/с	Коэффициент чувствительности	
			K_{IG_1}	K_{IG_2}
Водород	$2.8 \cdot 10^{-3}$	28	2.3	2.3
CO	$7.6 \cdot 10^{-4}$	8.4	1	1
Аргон	$6 \cdot 10^{-4}$	7	0.77	0.74

датчиков давления с горячим катодом по каждому газу (H_2, CO, Ar). В табл. 2 приведены результаты измерений по каждому газу. После каждого вскрытия на атмосферу проводилась калибровка всех измерителей вакуума.

В начале экспериментов клапан VR_1 был закрыт. После его открытия инжектируемый газ поступал в тест-камеру через капилляр. Газовый поток в тест-камеру определяется выражением:

$$Q = C(P_{\text{in}} - P_{\text{out}}),$$

где C, л/с – канал с калиброванной проводимостью; P_{in}, P_{out}, Торр – давление на входе и выходе капилляра с калиброванной проводимостью.

Быстрота откачки геттера S_{NEG} может быть определена в процессе напуска газа как:

$$S_{NEG} = \frac{Q - S_{\text{eff}}\left(K_{IG_1}\Delta P_{IG_1} - K_{IG_2}\Delta P_{IG_2}\right)}{K_{IG_1}\Delta P_{IG_1}},$$

где S_{eff} – эффективная быстрота откачки турбомолекулярного насоса TMP_2; K_{IG_1} и K_{IG_2} – коэффициенты чувствительности для датчиков давления с горячим катодом IG_1 и IG_2 соответственно; динамическое давление $\Delta P = P_{\text{напуск}} - P_{\text{фон}}$ определялось как разность между давлением, измеренным в процессе напуска газа, и “фоновым” давлением без инжектируемого газа в начале эксперимента. Сорбционная емкость определялась как число молекул, при поглощении которых быстрота откачки насоса снижается до 10% от первоначального уровня.

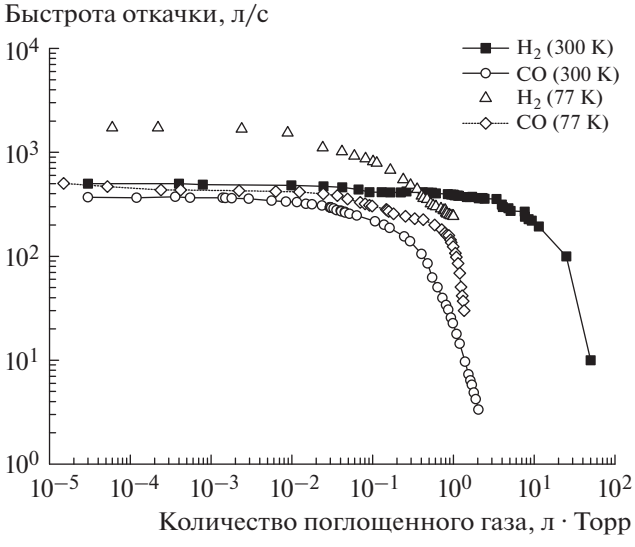


Рис. 3. Сорбционная емкость титанового сублиматора по водороду и монооксиду углерода при комнатной температуре и температуре жидкого азота.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

После каждого эксперимента титановая пленка насыщалась водородом, чтобы исключить его диффузию в предыдущий напыленный слой. Поскольку стенд проектировался в предположении, что вакуумная система ЦКП “СКИФ” не будет прогреваться на месте, то, для того чтобы получить приемлемый вакуум на уровне 10^{-9} Торр, необходимо распылять не меньше $1.5 \cdot 10^{21}$ атомов титана. При этом скорость откачки получена на уровне 50–60% от максимально заявленной по паспорту для титанового сублиматора.

Согласно рис. 3, при температуре жидкого азота скорость откачки по монооксиду углерода увеличивается на 30%, а сорбционная емкость остается неизменной и равной одному монослою. По водороду при азотной температуре скорость откачки увеличивается в 2 раза, сорбционная емкость равна одному монослою, в то время как при комнатной температуре сорбционная емкость больше в 10 раз за счет лучшей диффузии водорода внутрь геттера.

Измеренные сорбционные характеристики геттерного насоса NEXTorr D 100-05 фирмы SAES Getters хорошо согласуются с паспортными данными [2]. Так как время жизни пучка заряженных частиц зависит от состава остаточного газа, то было важно понять, как ведет себя магниторазрядная часть насоса NEXTorr при нарушении герметичности на атмосферу и после нарушения.

Несмотря на то что в атмосфере воздуха содержится только один процент аргона, при одинаковых давлениях время жизни пучка по аргону будет в 400 раз меньше, чем по водороду, и в 8 раз меньше, чем по монооксиду углерода, так как сечение рассеяния на аргоне в 5 раз больше, чем на монооксиде углерода, и в 100 раз больше, чем на H_2.

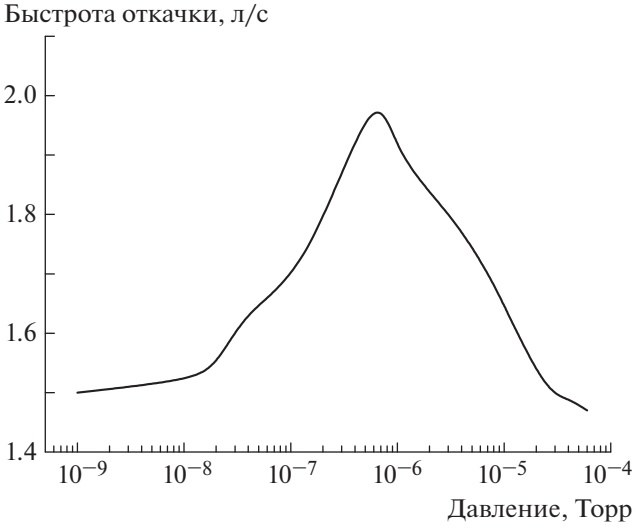


Рис. 4. Изменение быстроты откачки по аргону для насоса NEXTorr D 100-05 после накопления дозы, равной $5 \cdot 10^{-3}$ л · Торр.

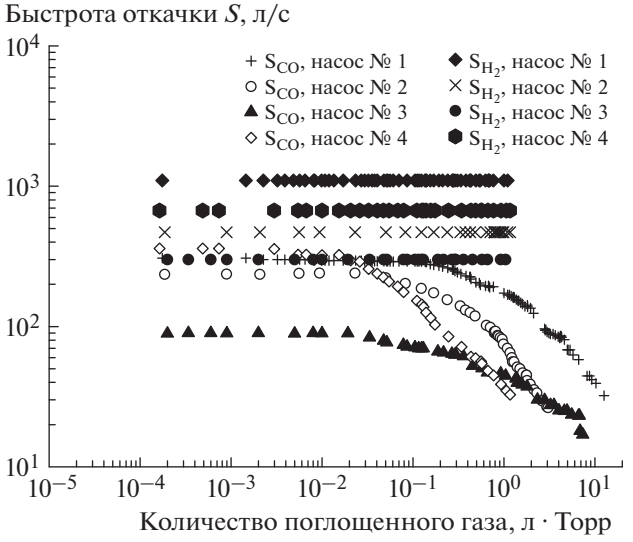


Рис. 5. Зависимость быстроты откачки S геттерных насосов на основе Ti-Zr-Al по водороду и монооксиду углерода от количества поглощенного газа.

Для проверки состава остаточного газа через натекатель напускался поток воздуха (имитация нарушения герметичности), равный $4.5 \cdot 10^{-7}$ л · Торр/с, в течение 3 ч. В течение часа по квадрупольному масс-спектрометру контролировалось, на сколько изменился уровень аргона. Через каждый час поток газа перекрывался на 1–2 ч, чтобы убедиться, что уровень аргона вернулся к первоначальному значению до напуска.

Как и ожидалось, во время напуска воздуха уровень аргона непрерывно возрастал, но возвращался в первоначальное состояние с закрытием напуска. Тем не менее, измерение быстроты откачки насоса по аргону после накопления дозы, равной $5 \cdot 10^{-3}$ л · Торр, показало, что максимальная быстрота откачки уменьшилась на треть и составила 2 л/с при давлении $5 \cdot 10^{-7}$ Торр (рис. 4).

На рис. 5 и в табл. 3 представлены результаты испытаний геттерных насосов на основе Ti-Zr-Al, изготовленных в ИЯФ СО РАН. Согласно табл. 3, насос № 4 с внутренним нагревателем обладает лучшими газопоглощающими параметрами по сравнению с насосами, которые активируются при помощи внешнего нагревателя. Это объясняется тем, что внутренний нагреватель более равномерно прогревает геттерные таблетки по сравнению с внешним, при работе которого часть таблеток остаются неактивированными. Это особенно хорошо видно на примере насосов № 1 и № 2. В насосе № 2 активация проходит более эффективно благодаря тому, что все таблетки плотно прилегают широкой стороной к стенке цилиндра, которая нагревается, в отличие от насоса № 1, у которого центральная часть остается непрогретой.

Таблица 3. Результаты испытаний геттерных насосов

Насос	Быстрота откачки по H_2, л/с/см^2		Сорбционная емкость, л · Торр/см^2			
			по H_2		по CO	
№ 1	0.24		Не измерялась*		0.0024	
№ 2	0.34		Не измерялась*		0.0021	
№ 3	0.071		Не измерялась*		0.0014	
№ 4	1.7		Не измерялась*		0.0029	
NEXTorr D 100-05	0.9		Не измерялась*		0.0053	
Титан	300 K	77 K	300 K	77 K	300 K	77 K
	1.5	2.1	0.036	0.0012	0.0012	0.0018

* После регенерации геттер снова готов к сорбции водорода

ВЫВОДЫ

Изучено влияние напуска воздуха на газопоглощающие свойства насоса NEXTorr по аргону после накопления дозы $5 \cdot 10^{-3}$ л · Торр.

Сравнительный анализ газопоглощающих характеристик нераспыляемых геттеров на основе Ti-Zr-Al и Zr-V-Fe и пленки, полученной при распылении титана из сублиматора, показал, что распыленная пленка титана по сорбционной емкости по водороду и моноксиду углерода значительно уступает нераспыляемым геттерам.

Хотя геттеры на основе Ti-Zr-Al по своим газопоглощающим характеристикам уступают зарубежным аналогам, связано это в первую очередь с неэффективным расположением геттерных таблеток, в результате чего часть таблеток оказались неактивированными. Тем не менее, полученные результаты свидетельствуют о том, что данные геттеры можно использовать при разработке комбинированных насосов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю благодарность всем сотрудникам вакуумной лаборатории ИЯФ СО РАН за помощь в проведении экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ЦКП “СКИФ”. https://srf-skif.ru/
2. Насос NEXTorr D 100-05. https://www.saesgetters.com/
3. Каталог фирмы Agilent. https://www.agilent.com/en/products/vacuum-technologies/high-vacuum-pumps/ion-pumps/combination-vacion-plus-pumps#close
4. http://www.polema.net/gazopoglotiteli-ti-Ti–Zr–Al.html
5. *Драничников А.Н., Краснов А.А., Семенов А.М.* // Прикладная физика. 2017. № 2. С. 73.

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 6, с. 115–119

ЛАБОРАТОРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 533.1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСТВОРИМОСТИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В УГЛЕВОДОРОДАХ В ШИРОКОМ ИНТЕРВАЛЕ РАБОЧИХ ТЕМПЕРАТУР И ДАВЛЕНИЙ

© 2020 г. А. В. Радаев[a,*], А. А. Мухамадиев[a], А. Н. Сабирзянов[a]

[a] Казанский национальный исследовательский технологический университет
Россия, 420015, Казань, ул. К. Маркса, 68
**e-mail: radaev_neftianik@mail.ru*

Поступила в редакцию 20.04.2020 г.
После доработки 11.05.2020 г.
Принята к публикации 13.05.2020 г.

Стенд разработан для измерений растворимости диоксида углерода в углеводородах в интервале температур до 473 K, давлений до 25 МПа и дает возможность исследования растворимости CO_2 при сверхкритических для CO_2 параметрах состояния при наличии и отсутствии пористой среды в модели нефтяного пласта. Результаты опытов по измерению растворимости диоксида углерода в керосине описаны с использованием уравнения состояния Пенга–Робинсона. Разработанная методика измерения растворимости CO_2 в углеводороде и углеводорода в CO_2 в динамическом режиме фильтрации в пористой среде может быть применена в энергетике и машиностроении для исследования изменения теплофизических и физико-химических свойств углеводородов.

DOI: 10.31857/S0032816220050353

ВВЕДЕНИЕ

Растворение диоксида углерода в углеводородах оказывает значительное влияние на их теплофизические свойства, особенно при высоких температурах и давлениях, так как оба фактора действуют в противоположных направлениях: повышение температуры уменьшает растворимость CO_2 в углеводороде, а повышение давления, наоборот, повышает. Особенно велика его растворимость при сверхкритических параметрах состояния (выше 31.5°C и выше 7.5 МПа).

Свойства CO_2 в сверхкритическом состоянии являются промежуточными между его свойствами в газовой и жидкой фазе: он обладает высокой плотностью, близкой к плотности жидкости, и низкой кинематической вязкостью, а также высоким коэффициентом диффузии, что отражается на изменении свойства углеводородов – значительно снижается динамическая вязкость углеводорода и увеличивается коэффициент объемного расширения. При этом, чем выше начальная вязкость углеводорода, тем значительнее она снижается при растворении в нем CO_2.

Надежных расчетных методов определения растворимости газов в углеводородах в настоящее время не существует. Вследствие этого для расчета растворимости CO_2 в нефти, трансформаторном или машинном масле по известным уравнениям состояния (А.И. Брусиловского, Пенга–Робинсона и др.) [1] требуются надежные экспериментальные данные по растворимости. Для некоторых типов углеводородов и интервала параметров существуют только температурные зависимости коэффициента растворимости газов в углеводородах [2, 3], не учитывающие влияние на коэффициент растворимости давления в системе “углеводород–CO_2”, что приводит к значительным погрешностям расчета динамической вязкости систем “углеводород–сверхкритический CO_2”.

Данные по коэффициентам растворимости газов в углеводородах, получаемых в динамическом режиме, исключительно важны не только в процессах добычи нефти, но и для анализа работы промышленного оборудования, прежде всего, маслонаполненного.

С целью получения экспериментальных данных по растворимости диоксида углерода в углеводородах в широком диапазоне температур и давлений при наличии и отсутствии пористой среды создан экспериментальный стенд.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Схема экспериментального стенда, позволяющего проводить исследования коэффициента растворимости диоксида углерода в углеводородах в динамическом режиме фильтрации потока

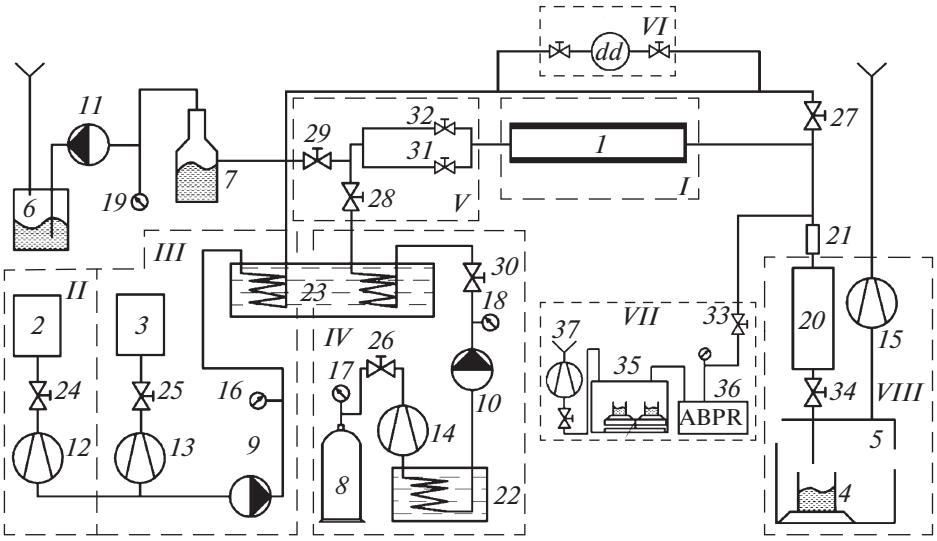


Рис. 1. Экспериментальный стенд для проведения исследования растворимости диоксида углерода в углеводородах в динамическом режиме. *I* – модель пласта, *II*–*VIII* – системы: *II* – насыщения модели пласта водой, *III* – насыщения модели пласта нефтью, *IV* – закачки CO_2 в модель пласта, *V* – узел создания оторочек (порций) сверхкритического углекислого газа и воды, *VI* – измерения градиента давления, *VII* – газожидкостного равновесия; *VIII* – растворения нефти в газе; *1* – модель пласта (кернодержатель); *2*, *3* – питательные баки с водой (*2*) и с нефтью (*3*); *4* – сосуд отбора пробы нефти; *5* – приемная емкость газов/приемный баллон; *6* – приемная емкость масла; *7* – колба Бунзена; *8* – баллон с газом; *9*, *10* – насосы высокого давления для закачки воды или нефти (*9*), жидкого диоксида углерода (*10*); *11* – вакуумный насос; *12* – расходомер воды; *13* – расходомер нефти; *14*, *15* – CO_2-расходомеры; *16*–*19* – манометры; *20* – сепаратор; *21* – фильтр; *22* – криотермостат; *23* – нагревающий термостат; *24*–*34* – запорные вентили; *35* – сосуд газожидкостного равновесия; *36* – автоматический регулятор противодавления ABPR-200; *37* – сосуд отбора пробы газа.

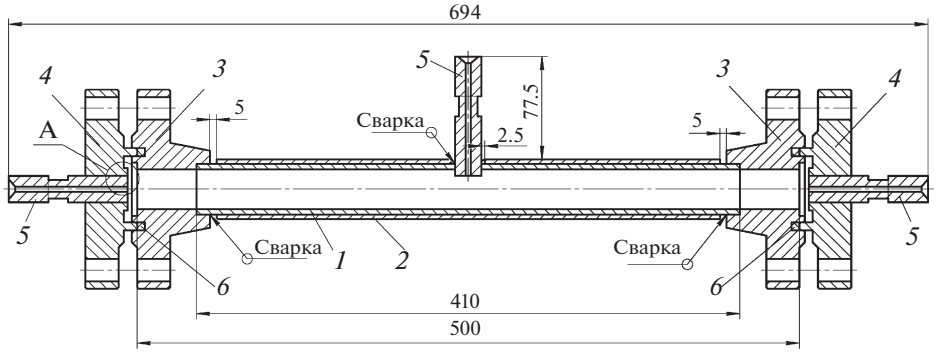


Рис. 2. Схема кернодержателя для углеводородонасыщенной пористой среды. *1* – внутренняя труба; *2* – наружная труба; *3*, *4* – фланец; 5 – штуцер; *6* – прокладка.

“нефть–диоксид углерода” в интервале температур до 743 K и давлений до 25 МПа при наличии в потоке пористой среды, приведена на рис. 1, а схема кернодержателя (сосуда высокого давления) для моделирования углеводородонасыщенной пористой среды – на рис. 2.

Основной конструктивной частью модели пласта является кернодержатель. Модель нефтяного однородного пласта в данной работе изготовлена в соответствии с требованиями, предъявляемыми к сосудам высокого давления [4], и представляет собой сосуд (кернодержатель) из нержавеющей стали 12Х18Н10Т длиной 700 и внутренним диаметром 28 мм, набиваемый кварцевым песком одной фракции, насыщаемый нефтью и насыщаемый водой под вакуумом.

В начале эксперимента открываются вентили (*26*, *28*–*32*, рис. 1), и диоксид углерода посредством насоса высокого давления (*10*) через фильтр-осушитель начинает поступать в модель пласта *1*, из которой вытесняется нефть. В проведенных экспериментах модельной нефтью был осветительный керосин, динамическая вязкость которого составляла 1.2 мПа · с.

Из модели пласта смесь нефти и диоксида углерода поступает в сепаратор *20*, откуда нефть с растворенным газом поступает в систему разделения газов и жидкостей в газе (*VII*), при этом нефть накапливается в сосуде газожидкостного равновесия *35*, а газ, растворенный в нефти, поступает в сосуд отбора пробы газа (*37*). Накапливаемая в сосуде газожидкостного равновесия нефть выливается в мерные цилиндры, взвешиваемые на аналитических весах с погрешностью ±0.05 г, а сосуд отбора пробы газа также взвешивается на электронных весах с погрешностью ±0.05 г.

Методика проведения эксперимента по измерению растворимости CO_2 в нефти основана на использовании материального баланса по нефти и CO_2 в сосудах газожидкостного равновесия (*36*) и отбора пробы газа (*37*).

Материальный баланс по CO_2 в сосуде газожидкостного равновесия:

$$m_{CO_2}^{\text{н сб}} = \sum m_p, \qquad (1)$$

где $m_{CO_2}^{\text{н сб}}$ – количество CO_2 в сосуде газожидкостного равновесия; $\sum m_p$ – масса CO_2, сливаемого из сосуда газожидкостного равновесия в резиновые колбы.

Материальный баланс по нефти в сосуде газожидкостного равновесия:

$$m_{\text{н}}^{\text{с рав}} = \sum m_k + m_{\text{колб}}, \qquad (2)$$

где $\sum m_k$ – масса нефти, сливаемой из сосуда сбора нефти в резиновые колбы, $\sum m_{\text{колб}}$ – масса нефти, выходящей вместе с CO_2 в резиновую колбу (определяется по массе резиновой колбы с нефтью после измерения массы CO_2 в резиновой колбе).

Материальный баланс по CO_2 в сосуде отбора пробы газа:

$$m_{CO_2}^{\text{с газ}} = \sum m_i + m_{CO_2}^{\text{ост}}, \qquad (3)$$

где $\sum m_i$ – сумма масс углекислого газа в резиновых колбах, определяемая весовым методом; $m_{CO_2}^{\text{ост}}$ – масса оставшегося в сосуде отбора пробы газа, определяемая по уравнению состояния идеального газа.

Материальный баланс по нефти в сосуде отбора пробы газа:

$$m_{\text{н}}^{\text{пр б}} = \sum m_j, \qquad (4)$$

где $\sum m_j$ – масса нефти, сливаемой из сосуда отбора пробы газа в мерные цилиндры.

Растворимость углекислого газа в нефти и нефти в углекислом газе по уравнениям соответственно:

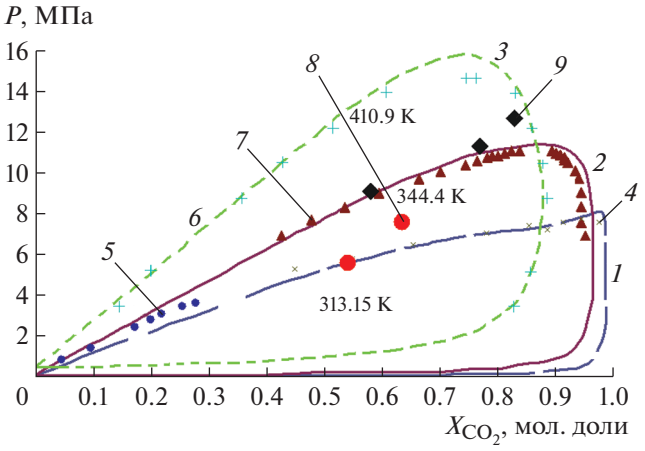


Рис. 3. Результаты пробных измерений коэффициента растворимости CO_2 в керосине. *1–3* – расчеты; *4–7* – эксперименты; *8*, *9* – настоящие опыты 310 K (*8*), 333 K (*9*).

$$x = \frac{m_{CO_2}/M_{CO_2}}{(m_{\text{н}}/M_{\text{н}}) + (m_{CO_2}/M_{CO_2})}, \qquad (5)$$

$$y = \frac{m_{\text{н}}^I/M_{\text{н}}}{(m_{CO_2}^I/M_{CO_2}) + (m_{\text{н}}^I/M_{\text{н}})}, \qquad (6)$$

где m_{CO_2} – масса диоксида углерода, находящегося в сосуде газожидкостного равновесия; $m_{\text{н}}$ – масса нефти, находящегося в сосуде газожидкостного равновесия; M_{CO_2} – молярная масса CO_2; $M_{\text{н}}$ – молярная масса нефти; $m_{\text{н}}^I$ – масса нефти в сосуде отбора пробы газа; $m_{CO_2}^I$ – масса CO_2 в сосуде отбора пробы газа.

На экспериментальном стенде проведены пробные измерения растворимости CO_2 в керосине. Результаты пробных опытов приведены на рис. 3.

Полученные данные по растворимости диоксида углерода в углеводороде хорошо согласуются с литературными данными в пределах погрешности эксперимента, которая оценивается авторами не более 14.4%. Экспериментальные результаты описаны с использованием уравнения состояния Пенга–Робинсона, построены фазовые диаграммы системы “керосин–диоксид углерода” при различных температурах. Уравнение состояния Пенга–Робинсона позволяет описать растворимость CO_2 в углеводороде и углеводорода в CO_2 в интервале давлений до 30 МПа, температурах до 473 K.

Методика проведения исследований процесса вытеснения нефти диоксидом углерода в диапазоне давлений до 25 МПа, температур до 473 K заключается в следующем.

Подготовка эксперимента начинается с вывода экспериментальной установки на рабочий

температурный режим. Контроль за постоянством температуры по длине кернодержателя ведется с помощью термопар, вводимых в поток через штуцер *5* (рис. 2), подключенных через переключатель типа ПМТ к цифровому милливольтметру В7-35. Температура углекислого газа, подаваемого в модель пласта, поддерживается постоянной с помощью криотермостата *22* (рис. 1).

Перед началом эксперимента насос высокого давления *10*, служащий для закачки жидкого диоксида углерода в модель пласта, и обратный регулятор давления *36* настраиваются на рабочее давление опыта 7.5–14 МПа. До начала опытов вентили *24–34* закрыты.

Проведение эксперимента начинается с открытия вентилей *27*, *33*, *34*, затем открываются вентили *26–32* и установка переводится в режим непрерывной фильтрации, в ходе которой происходит растворение углекислого газа в нефти, снижение ее вязкости и увеличение коэффициента объемного расширения.

При этом измеряются давление и температура по длине модели пласта с помощью образцовых манометров и хромель-алюмелевых термопар соответственно. После выхода из модели пласта смесь углеводорода с насыщенным газом попадает в сепаратор *20*, затем через регулятор *36* поступает в систему газожидкостного равновесия *VII* и систему растворения нефти в газе *VIII*, в которых происходит измерение растворимости углекислого газа в углеводороде и углеводорода в углекислом газе.

В случае, если по условиям проведения эксперимента требуется выполнить только фильтрационные опыты, т.е. без измерения взаимной растворимости фаз, обратный регулятор давления отключается, а к выходу из модели пласта (*1*) подключаются термостатируемые дроссельные вентили, в которых происходит понижение давления и температуры газа до субкритических значений.

Для использования уравнений материального баланса выходящая из кернодержателя *1* смесь углеводорода с углекислым газом поступает в приемный баллон *5*, устанавливаемый на электронные весы, и он взвешивается с погрешностью измерения ±50 г. Приемный баллон *5* при проведении экспериментов только по фильтрации подключается к экспериментальной установке вместо приемной емкости газов.

По окончании взвешивания CO_2, находящийся в баллоне, выпускается в атмосферу либо поступает на рецикл, и повторно взвешивается уже пустой приемный баллон. Для более точного определения массы диоксида углерода, находившегося в приемном баллоне, определяется масса газа, оставшегося в приемном баллоне после стравливания его по уравнению состояния идеального газа. Вытесняемая нефть накапливается в сосуде газожидкостного равновесия *35*, откуда сливается в мерную мензурку для определения объема и массы.

По завершении эксперимента закрываются вентили *24–34*, отключается термостатирование кернодержателя *1*, останавливается криотермостат *22* и сбрасывается давление в модели пласта ослаблением одного из резьбовых соединений. На основании данных по расходу CO_2 во время проведения эксперимента, массе приемного баллона до и после проведения эксперимента, массе пористой среды (кварцевого песка), углеводорода и углекислого газа в кернодержателе составляется материальный баланс по углеводороду и углекислому газу.

Из материального баланса определяется коэффициент вытеснения нефти углекислым газом по уравнению:

$$\eta = g_1/g_2,$$

где g_1 – исходная масса нефти в модели пласта нефти, g_2 – масса нефти в сосуде газожидкостного равновесия.

ПРОВЕДЕНИЕ ПРОБНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ ДИОКСИДОМ УГЛЕРОДА

На экспериментальной установке проведены пробные опыты по определению зависимости η от объема нагнетаемого в пласт CO_2, на изотерме 32°C при давлении 5.5 МПа, пористости 36.4%, проницаемости пласта 530 мкм^2. Результаты пробных опытов представлены на рис. 4. Максимальное отклонение опытных данных, полученных в данной работе, от приведенных в работе [5] не превышает 12%. Наблюдаемое согласие указывает на надежность выбранной методики проведения эксперимента и корректность выбора модели нефти.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны экспериментальный стенд и методики проведения исследования коэффициента растворимости газов в углеводородах различного назначения, позволяющие исследовать растворимость в интервале температур до 473 K, давлений до 25 МПа, проводить исследования процесса вытеснения нефти диоксидом углерода в интервале температур до 473 K, давлений до 25 МПа.

2. В работе проведены пробные измерения коэффициента растворимости CO_2 в углеводороде и коэффициента вытеснения нефти диоксидом углерода, рассчитаны погрешности измерения коэффициента растворимости CO_2 в углеводороде, которые показали надежность выбранных методик исследования и надежность получаемых результатов, а также описаны методы растворимо-

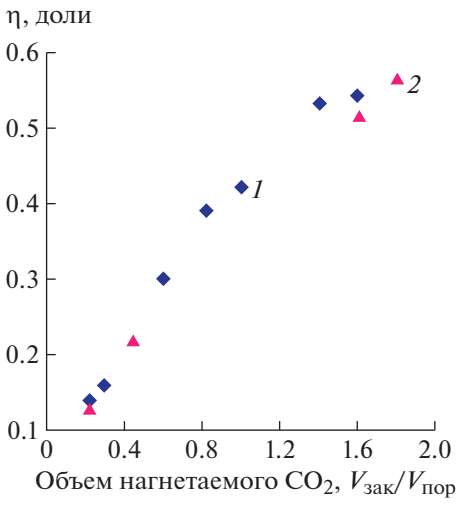


Рис. 4. Зависимость коэффициента вытеснения нефти η от объема нагнетаемого диоксида углерода на изотерме 32°C при давлении 5.5 МПа. *1* – [4]; *2* – данная работа. $V_{зак}$ – объем нагнетаемого диоксида углерода, $V_{пор}$ – объем всех пор модели пласта нефти.

сти по уравнениям состояния систем “углеводород–углекислый газ” в диапазоне температур до 473 K, давлений до 25 МПа.

3. Разработанная методика измерения растворимости CO_2 в углеводороде и углеводорода в CO_2 в динамическом режиме фильтрации в пористой среде может быть применена в широких областях промышленности, в частности в энергетике и машиностроении для исследования изменения теплофизических и физико-химических свойств углеводородов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Брусиловский А.И.* Фазовые превращения при разработке месторождений нефти и газа. М.: Грааль, 2002.
2. *Бузаев В.В., Дарьян Л.А., Сапожников Ю.М.* Электрические станции. 2006. № 12. С. 58.
3. *Давиденко И.В., Кузина Т.С.* // Конференция молодых ученых – 2017. Уральский энергетический институт УрФУ. 2017. С. 269.
4. ГОСТ 14249–89. Сосуды и аппараты высокого давления. Нормы и методы расчета на прочность. Государственный комитет СССР по стандартам. 1990.
5. *Orr F.M., Heller J.P., Tuber J.J.* // J. American Oil Chemists Society. 1982. № 10. V. 59. P. 810.

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 6, с. 120–124

ЛАБОРАТОРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 533.599

ИСТОЧНИК ПРИМЕСНОГО СВЕРХЗВУКОВОГО ПУЧКА МОЛЕКУЛ ЩЕЛОЧНО-ГАЛОИДНЫХ СОЛЕЙ

© 2020 г. В. М. Азриель[a], В. М. Акимов[a,*], Е. В. Ермолова[a], Д. Б. Кабанов[a], Л. И. Колесникова[a], Л. Ю. Русин[a], М. Б. Севрюк[a]

[a] Институт энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН Россия, 119334, Москва, Ленинский просп., 38, корп. 2

**e-mail: rusin@chph.ras.ru*

Поступила в редакцию 15.05.2020 г.
После доработки 05.06.2020 г.
Принята к публикации 10.06.2020 г.

Описана конструкция источника примесного сверхзвукового пучка щелочно-галоидных молекул или других испаряемых твердых веществ. При давлении торможения газа-носителя (водорода или гелия) 0.5–5 атм, температуре торможения 1000 K и парциальном давлении примеси 10^{-2} Торр интенсивность пучка соли составила 10^{14} ср$^{-1} \cdot$ с$^{-1}$ и энергия молекул в пучке изменялась от 5.5 до 7.5 эВ для смеси с гелием и от 7.5 до 15.5 эВ для смеси с водородом. Модульная конструкция источника позволяет обеспечить легкую замену его функциональных узлов.

DOI: 10.31857/S0032816220060026

ВВЕДЕНИЕ

Практика использования молекулярных пучков в научных исследованиях и технике показывает, что успех работы сильно зависит от качества применяемых методов генерирования пучков и детектирования результатов их взаимодействия. Примесные сверхзвуковые молекулярные пучки нейтральных частиц – атомов, молекул, кластеров – широко используются для изучения упругого, неупругого и реакционного рассеяния атомов и молекул, процессов релаксации в струях, определения поверхности потенциальной энергии, исследования рассеяния атомов и молекул на твердых поверхностях и во многих других экспериментах, а также технологических процессах.

Широкое применение эти пучки нашли благодаря значительному диапазону реализуемых энергий (от единиц до десятков электронвольт) для тяжелых атомов и молекул, а также узкому распределению частиц пучка по скоростям. Такие характеристики достигаются при газодинамическом ускорении при истечении из зоны высокого давления в вакуум из сопла (с диаметром больше длины свободного пробега в зоне высокого давления) небольшой примеси тяжелой компоненты смеси в легком газе-носителе (как правило, молекулярном водороде или гелии) [1].

В предельном случае скорость тяжелой компоненты смеси возрастает до скорости газа-носителя с соответствующим увеличением энергии в M_h/M_l раз, согласно формуле

$$E = [\gamma kT/(\gamma - 1)]M_h/M_l,$$

где E – энергия молекулы тяжелой компоненты; $\gamma = c_p/c_V$ – отношение теплоемкостей газа-носителя ($\gamma = 7/5$ для водорода и $\gamma = 5/3$ для гелия); $k = 1.04 \cdot 10^{-19}$ Торр $\cdot$ см$^3 \cdot$ K^{-1} – постоянная Больцмана; T – температура сопла; M_h и M_l – массы молекул тяжелой и легкой компоненты пучка соответственно.

Энергия пучка может изменяться за счет варьирования давления торможения, температуры и состава смеси. Пучок далее формируется скиммером и коллиматором, которые расположены в дифференциально откачиваемых вакуумных камерах.

Примесные источники пучков конденсирующихся веществ, твердых при комнатной температуре, представляют собой, как правило, двухкамерные печи с раздельным нагревом газовой смеси испаряемого вещества и газа-носителя и сопла [2, 3].

В настоящей статье приводится описание оптимизированной конструкции источника примесного сверхзвукового пучка молекул галоидной соли щелочного металла. Прототип источника использовался для исследования процессов диссоциативной ионизации молекул солей, а так-

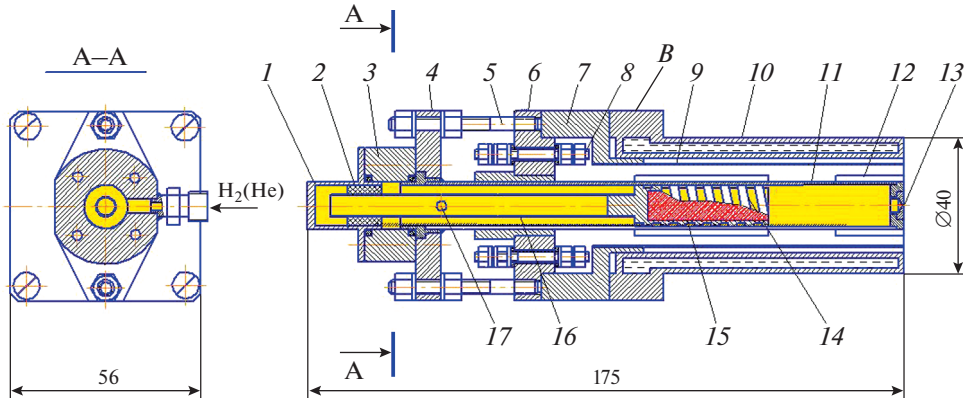


Рис. 1. Схема конструкции источника. *1* – задний фланец; *2* – фторопластовый держатель; *3* – переходная втулка; *4* – установочный фланец; *5* – шпилька; *6* – фланец; *7* – медный фланец; *8* – контактная шпилька; *9* – тепловой экран; *10* – рубашка водяного охлаждения; *11* – трубка камеры нагрева; *12* – керамическая трубка; *13* – сопло; *14* – контейнер; *15* – соль; *16* – танталовая трубка; *17* – отверстие для откачки.

же в экспериментах по взаимодействию пучка иодида калия с поверхностью алмаза [4, 5].

Особое внимание в конструкции источника уделено обеспечению возможности загрузки источника и замены соли, а также профилактики нагревателей и термопар с сохранением положения оси источника. Другое требование заключалось в том, чтобы обеспечить как можно более точную оптическую юстировку сопла, скиммера, коллиматора и других элементов, расположенных на оси пучка. Концепция легко удаляемого тигля использовалась ранее в конструкциях высокотемпературных источников пучков металлов [6].

КОНСТРУКЦИЯ ИСТОЧНИКА

На рис. 1 показана конструкция источника, который состоит из трех функциональных узлов в модульном исполнении: узла загрузки и замены соли, узла крепления и нагрева камеры источника и сопла, узла охлаждения.

Узел загрузки содержит цилиндрический контейнер *14* с солью *15*. Контейнер выполнен из нержавеющей стали и имеет наружный диаметр 12 мм, внутренний – 8 мм, длину 40 мм, полезный объем 1.8 см^3. Контейнер соединен с камерой нагрева тонкостенной танталовой трубкой *16* с размерами 6 × 0.12 мм, плотно вставленной в фторопластовый держатель *2* для фиксации положения контейнера. Трубка имеет дополнительное отверстие *17* для предварительной откачки внутренних полостей источника.

По наружной поверхности контейнера выполнена винтовая канавка шириной 2.5 мм, шагом 2.5 мм и глубиной 1 мм, по которой газ-носитель поступает в пространство “контейнер–сопло”. Зазор между наружной стенкой контейнера и внутренней стенкой трубки *11* камеры нагрева выполнен минимальным для уменьшения диффузии пара соли в заднее пространство камеры.

Узел нагрева камеры источника и сопла включает в себя трубку из нержавеющей стали *11* с размерами 14 × 1 мм, два установочных фланца *4* и *6* и два нагревателя. В передний конец трубки вварена втулка с соплом *13*. Сопло изготовлено с помощью лазера и представляет собой канал длиной 0.5 мм и диаметром 50 мкм. Задний конец трубки уплотнен резиновой прокладкой и через переходную втулку *3* соединен с линией подачи газа. При необходимости замены сопла, например вследствие увеличения его диаметра после длительной работы или неустранимой его закупорки, надо передвинуть задний фланец с трубкой на двух шпильках *5* вперед в новую позицию.

Нагреватели камеры источника и сопла выполнены из танталовой проволоки диаметром 0.5 мм, заключенной в керамические трубки *12*, плотно уложенные вдоль камеры нагрева. Температура сопла и контейнера измеряется термопарами, приваренными к торцу сопла и к трубке *11*. Концы нагревателей и термопар выведены через контактные шпильки *8*, расположенные на фланце *6*.

Узел охлаждения состоит из рубашки водяного охлаждения *10*, теплового экрана *9*, промежуточного медного фланца *7* и соединен по плоскости *B* с юстировочным столиком (на рис. 1 не показан), который обеспечивает необходимые перемещения источника относительно скиммера. Вводы движения выведены наружу камеры источника. При замене соли и нагревателей узел охлаждения и связанный с ним столик и верхний фланец источника не требуют демонтажа.

ПАРАМЕТРЫ ИСТОЧНИКА И ПУЧКА

Источник работал с примесными пучками молекул CsCl и KI. При практически равных моле-

кулярных массах этих солей и сходных температурных зависимостях давления пара энергия пучков и их интенсивности практически совпадали. Температура торможения составляла $T_0 = 1000$ K, диаметр сопла равен $d_0 = 50$ мкм. Энергия пучка варьировалась путем изменения давления торможения P_0 в интервале 0.5–5 атм, в качестве газаносителя использовался гелий или водород. Мощность нагревателя сопла составляла 120 Вт, а нагревателя контейнера – 20 Вт. При этом температура контейнера была равна 820 K, что соответствовало давлению пара соли около 0.01 Торр. Максимальный расчетный поток газа из сопла определялся по формуле, приведенной в [7]:

$$N = f(\gamma) n_0 \alpha_0 \pi R_0^2 \ [\text{с}^{-1}],$$

где $f(\gamma) = 0.513$ для гелия и 0.484 для водорода; $n_0 = P_0/(kT_0)$ – концентрация газа в источнике; $\alpha_0 = (2kT_0/m)^{1/2}$; m – масса атома гелия или молекулы водорода; R_0 – радиус сопла.

Для водорода при $P_0 = 5$ атм максимальный расчетный поток из сопла составил 10^{20} с^{-1}. Этот поток скачивался двумя масляными бустерными насосами с производительностью по воздуху около 300 л/с при давлении 10^{-2} Торр, что соответствовало режиму работы источника типа Кампарга [8].

Интенсивность пучка соли I_s измерялась детектором с поверхностной ионизацией, расположенным на расстоянии 70 мм от сопла. При площади падения пучка на вольфрамовую нить детектора, равной $4.7 \cdot 10^{-3}$ см^2, ток положительных ионов на коллекторе детектора при $P_0 = 760$ Торр был равен 5.4 нА, что соответствует потоку $3.5 \cdot 10^{14}$ $\text{ср}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$.

Следует отметить, что эта величина, возможно, несколько занижена, так как калибровка детектора с поверхностной ионизацией не проводилась и указанная интенсивность соответствует случаю стопроцентной эффективности ионизации молекул соли на нити и сборе ионов коллектором. В реальных условиях пучок ослабляется за счет влияния плотности фонового газа в пространстве “сопло–скиммер” и взаимодействия потока со скиммером [9]. Это подтверждается падением измеренной зависимости интенсивности пучка от давления P_0, приведенной на рис. 2.

Распределение молекул пучка соли по скоростям и наиболее вероятная скорость частиц в пучке были определены стандартным времяпролетным способом при прерывании пучка вращающимся диском с щелями с последующей регистрацией пучка детектором на известной базе пролета. В качестве детектора использовался вторичный канальный электронный умножитель, регистрирующий ионы после диссоциативной ионизации энергетических молекул пучка на ксеноне. Детали метода приведены в [10], здесь мы отметим только его преимущества:

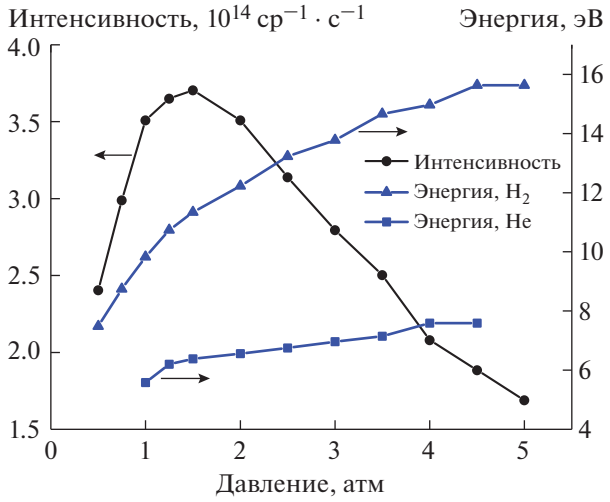


Рис. 2. Зависимости интенсивности и энергии пучка соли от давления торможения.

1) селективную ионизацию только молекул пучка;

2) отсутствие необходимости в высоком вакууме в камере регистрации;

3) отсутствие масс-спектрометра для детектирования пучка, что исключает влияние на времяпролетные спектры ионизирующей и анализирующей системы детектора.

Измеренные времяпролетные спектры аппроксимировались выражением

$$F(t) \propto (1/t^4) \exp[-(m/(2kT_\parallel))(L/t - L/t_m)^2],$$

где $T_\parallel$ – параллельная температура; L – база пролета; t_m – положение максимума измеренного спектра.

Полученные спектры корректировались на величину аппаратных задержек, и скоростные распределения были восстановлены с учетом влияния искажающих распределение факторов. В результате были определены наиболее вероятные скорости молекул в пучке $U = L/t_m$ и скоростное отношение $S = U/(2kT_\parallel/m)^{1/2}$.

На рис. 2 приведены кинетические энергии пучка соли, соответствующие пику скоростных распределений, как функции давления торможения при $T_0 = 1000$ K и $d_0 = 50$ мкм. Как видно из рис. 2, использование водорода и гелия для ускорения смеси позволяет получить регулируемую энергию пучка от 5.5 до 15.5 эВ. Очевидно, что рост энергии с увеличением P_0 не связан с изменением средней массы смеси, так как концентрация тяжелой компоненты в смеси слишком мала ($3 \cdot 10^{-4}$–$3.6 \cdot 10^{-6}$).

Таблица 1. Экспериментальные условия

Параметры источника		Параметры пучка	
Давление торможения P_0	0.5–5 атм	Интенсивность пучка соли I_s	$3 \cdot 10^{14}$ с$^{-1} \cdot$ ср$^{-1}$
Температура сопла T_0	1000 K	Энергия пучка E	5.5–15.5 эВ
Температура контейнера T_1	820 K	Времяпролетная система	
Давление пара соли P_1	0.01 Торр	База пролета L	390 мм
Диаметр сопла d_0	0.05 мм	Ширина щели a	1 мм
Поток из сопла N	10^{19}–10^{20} с$^{-1}$	Диаметр прерывателя D	100 мм
Диаметр скиммера d_s	0.5 мм	Частота вращения n	240 с$^{-1}$
Расстояние “сопло – скиммер” X_{ns}	5–16 мм	Число щелей m	8

В ранних экспериментальных и теоретических исследованиях смесей атомов и молекул с гелием и водородом было введено понятие эффекта проскальзывания (см., например, обзор [11]), который заключается в неравенстве скоростей молекул газа-носителя и примеси. С ростом P_0 увеличивается число столкновений между частицами потока в пространстве “сопло–скиммер”, что уменьшает проскальзывание, увеличивая скорость примеси. Приведенные на рис. 2 зависимости подтверждают существование большего эффекта проскальзывания для водорода и в области меньших давлений торможения. Максимальная измеренная скорость пучка составила $4.2 \cdot 10^5$ см/с для водорода и $3 \cdot 10^5$ см/с для гелия, что соответствует 0.8 и 0.93 от максимальной расчетной. Разброс молекул пучка соли по энергии был равен 5%.

В табл. 1 приведены экспериментальные условия работы источника, параметры пучка и времяпролетной системы.

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ИСТОЧНИКА

Опыт работы с источником показал следующее.

1. Температура контейнера с солью должна быть всегда меньше (по крайней мере, на 100°C) температуры сопла для исключения конденсации молекул примеси в сопле. Для этой же цели при разогреве и охлаждении источника всегда должен быть поток газа-носителя. Эти условия характерны для всех примесных пучков конденсирующихся паров.

2. Первоначальный нагрев только сопла нагревателем мощностью 120 Вт дает температуру $T_0 =$ = 1000 K и температуру в районе контейнера 820 K. Дополнительный нагрев контейнера вторым нагревателем небольшой мощности (10 Вт) повышает температуру контейнера на 20°C, что приводит к пятикратному увеличению сигнала, регистрируемого детектором соли с поверхностной ионизацией. Это не согласуется с расчетным двукратным увеличением давления пара соли. Кроме того, при неизменных показаниях термопар в начальный период разогрева наблюдался постепенный рост интенсивности пучка, который стабилизировался примерно через 2 ч. Очевидно, что температура самой соли не определяется однозначно температурой контейнера.

ВЫВОДЫ

Конструкция источника позволяет существенно упростить монтаж и демонтаж контейнера с солью, нагревателей, камеры нагрева с соплом с сохранением отъюстированного положения оси пучка. При удалении контейнера ось источника свободна для проведения оптической юстировки в случае необходимости. Параметры пучка: максимальная энергия 15.5 эВ с разбросом по энергии 5% при интенсивности 10^{14} ср$^{-1} \cdot$ с$^{-1}$ – позволяют использовать его для исследования процессов рассеяния, химических реакций, передачи энергии, протекающих в диапазоне энергий в несколько электронвольт.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг., тема “Фундаментальные физико-химические процессы воздействия энергетических объектов на окружающую среду и живые системы”. Номер регистрации темы в ЦИТиС АААА-А20-120011390097-9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abuaf N., Anderson J.B., Andres R.P., Fenn J.B., Marsden D.G.H.* // Science. 1967. V. 155. № 3765. P. 997. https://doi.org/10.1126/science.155.3765.997
2. *Lübbert A., Rotzoll G., Viard R., Schügerl K.* // Rev. Sci. Instrum. 1975. V. 46. № 12. P. 1656. https://doi.org/10.1063/1.1134133
3. *Mariella R.P., Neoh S.K., Herschbach D.R., Klemperer W.* // J. Chem. Phys. 1977. V. 67. № 7. P. 2981. https://doi.org/10.1063/1.435263

4. *Азриель В.М., Акимов В.М., Русин Л.Ю.* // Хим. физ. 1996. Т. 15. № 3. С. 3. Идентификационный номер: WOS:A1996UK48800001
5. *Азриель В.М., Акимов В.М., Русин Л.Ю., Севрюк М.Б.* // Хим. физ. 2019. Т. 38. № 10. С. 58. https://doi.org/10.1134/S0207401X19100029
6. *Ross K.J., Sonntag B.* // Rev. Sci. Instrum. 1995. V. 66. № 9. P. 4409. https://doi.org/10.1063/1.1145337
7. *Beijerinck H.C.W., Verster N.F.* // Physica B+C. 1981. V. 111. № 2–3. P. 327. https://doi.org/10.1016/0378-4363(81)90112-1
8. *Campargue R.* // Rev. Sci. Instrum. 1964. V. 35. № 1. P. 111. https://doi.org/10.1063/1.1718676
9. *Beijerinck H.C.W., van Gerwen R.J.F., Kerstel E.R.T., Martens J.F.M., van Vliembergen E.J.W., Smits M.R.Th., Kaashoek G.H.* // Chem. Phys. 1985. V. 96. № 1. P. 153. https://doi.org/10.1016/0301-0104(85)80201-9
10. *Азриель В.М., Акимов В.М., Русин Л.Ю.* // ПТЭ. 2007. № 3. С. 88.
11. *Raith W.* // Adv. At. Mol. Phys. 1976. V. 12. P. 281. https://doi.org/10.1016/S0065-2199(08)60046-9

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 6, с. 125–126

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ В ЛАБОРАТОРИЯХ

УДК 621.383:535.373.3

МОДУЛЬ УСИЛЕНИЯ И ВРЕМЕННОЙ ФИКСАЦИИ ОДНОЭЛЕКТРОННЫХ СИГНАЛОВ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ

© 2020 г. Ф. А. Ермалицкий, А. Е. Радько, М. П. Самцов

Поступила в редакцию 01.06.2020 г.
После доработки 09.06.2020 г.
Принята к публикации 11.06.2020 г.

DOI: 10.31857/S0032816220060051

Модуль предназначен для временных измерений световых процессов в режиме времякоррелированного счета фотонов. Модуль обеспечивает полный цикл первичной обработки флуктуирующих по амплитуде аналоговых одноэлектронных импульсов фотоумножителей: усиление, фиксацию их временного положения и выдачу цифровых сигналов для многоканальных регистраторов “старт-стоп” и других устройств. Также модуль может быть использован для измерения кинетики люминесценции и динамики свечения разного рода световых объектов (лазеров, гетероструктур и т.п.).

Модуль может быть выполнен в двух версиях: без корпуса – отдельная плата для монтажа в корпусе фотоприемного устройства, а также в корпусе – в виде малогабаритного блока. Модуль содержит малошумящий широкополосный усилитель, схему фиксации временного положения (временной привязки) одноэлектронных импульсов и выходные разветвляющие каскады.

В зависимости от распределения амплитуд одноэлектронных импульсов фотоэлектронных умножителей (ф.э.у.) применяются усилители двух видов.

1. Для фотодетекторов с ярко выраженной одноэлектронной компонентой сигнала используется усилитель типа “каскодная пара” на биполярных транзисторах КТ363Б, для которого характерна малая входная емкость (из-за компенсации эффекта Миллера), повышенная устойчивость, высокое входное сопротивление и низкий уровень шума. За счет местной комплексной обратной связи расширена полоса усиления, длительность переходной характеристики составляет 0.4 нс при коэффициенте усиления 6.

2. Для ф.э.у. с наложенными друг на друга экспоненциальными распределениями одноэлектронной и шумовой компонент предпочтительным является использование широкополосных операционных усилителей. В нашем случае усилитель выполнен на быстродействующей микросхеме AD 8000 по схеме преобразователя ток–напряжение с токовой обратной связью. В данном усилителе уменьшено влияние паразитных емкостей на входной сигнал и достигнуты высокая помехоустойчивость и надежность за счет его простоты. Полоса усиления составляет 300 МГц при коэффициенте преобразования 0.5 мВ/мкА.

Схема временной привязки флуктуирующих по амплитуде одноэлектронных импульсов ф.э.у. выполнена по широко распространенному методу привязки к постоянной части импульса, суть которого состоит в сравнении на дифференциальном компараторе мгновенных значений ослабленного и задержанного сигналов. Линии задержки выполнены на коаксиальных кабелях для повышения помехозащищенности модуля.

Предусмотрена регулировка порога дискриминации в диапазоне 0.02–1 В для выбора оптимального как разрешения по времени, так и отношения сигнал/шум фотодетектирования.

Разветвляющие каскады обеспечивают выдачу сервисных сигналов для различных устройств

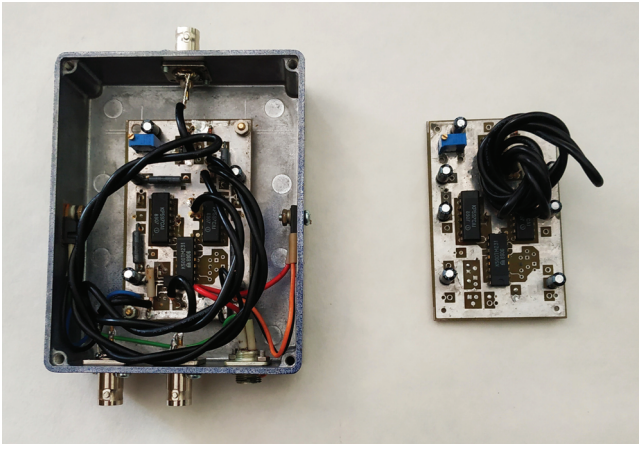


Рис. 1. Общий вид модуля: слева – в корпусе, справа – без корпуса.

контроля и регистрации. Имеются сервисный выход усилителя и 2 выхода схемы временной привязки.

Основные технические характеристики блока. Динамический диапазон входных отрицательных сигналов 1 : 250; минимальная амплитуда входного сигнала 2 мВ; диапазон регулировки порога дискриминации 0.02–1 В; максимальная частота входных сигналов 100 МГц. Размеры модуля: бескорпусная версия – 50 × 80 × 20 мм; корпусная версия – 80 × 120 × 40 мм. Питание: для варианта № 1 с усилителем “каскодная пара”: +15 В, 70 мА; –15 В, 200 мА; для варианта № 2 с операционным усилителем: +5 В, 100 мА; –5 В, 200 мА. Масса: бескорпусная версия – 0.1 кг; корпусная версия – 0.2 кг.

Общий вид обеих версий модуля приведен на рис. 1.

Адрес для справок: Республика Беларусь, 220045, Минск, ул. Курчатова, 7, Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко (НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ), тел. +375-29-1113183, факс: +375-17-398-03-31, e-mail:f.ermalitski@gmail.com

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 6, с. 127–129

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ В ЛАБОРАТОРИЯХ

УДК 543.51+543.574

МОБИЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТР НА ОСНОВЕ КОММЕРЧЕСКОГО АНАЛИЗАТОРА ОСТАТОЧНЫХ ГАЗОВ CIS-300

© 2020 г. М. Л. Кусков, И. О. Лейпунский, А. Н. Горбачев, А. Н. Жигач, Б. В. Кудров

Поступила в редакцию 22.05.2020 г.
После доработки 31.05.2020 г.
Принята к публикации 11.06.2020 г.

DOI: 10.31857/S0032816220060130

Мобильный лабораторный масс-спектрометр (л.м.с.) предназначен для анализа газов в химико-физических экспериментах, исследованиях наноразмерных и субмикронных материалов методом термостимулированной программируемой десорбции (т.п.д.) с масс-спектральным анализом десорбируемых газов, а также для изучения кинетики гетерогенных реакций методом температурно-программируемой реакции (т.п.р.) [1, 2].

В составе комплекса имеется реактор для проведения т.п.д. при давлении <1 Па и т.п.р. в диапазоне давлений $10–10^5$ Па.

Лабораторный масс-спектрометр смонтирован на раме с колесами и имеет габариты 120 × 60 × × 100 см (Д × Ш × В) при массе ~180 кг, включая форвакуумные насосы (2 штуки), что позволяет свободно перемещать его в пределах этажа силами двух сотрудников. Комплекс подключается к трехфазной электрической сети (потребляемая мощность ~1.5 кВт, включая системы прогрева), к охлаждающей воде (расход ~0.2 м^3/ч), точке подключения к газовой схеме обслуживаемой установки и магистрали выброса откачиваемых газов.

Газовая схема л.м.с. представлена на рис. 1, а его внешний вид – на рис. 2. В качестве анализатора газов служит квадрупольный масс-спектрометр с источником ионов закрытого типа с электронным ударом, квадрупольным фильтром масс, детекторами ионов двух типов (вторично-электронным умножителем и цилиндром Фарадея) CIS300 фирмы Stanford Research Systems (https://www.thinksrs.com). Масс-спектрометр имеет размеры 45 × 11 × 10 см и следующие аналитические характеристики: диапазон масс 1–300 а.е.м., разрешающая способность 0.5 а.е.м. на 10% от высоты пика во всем диапазоне масс, чувствительность 1 ppm для вторично-электронного умножителя и 10 ppm для цилиндра Фарадея, максимальное рабочее давление на входе в масс-спектрометр (вентиль K_1) 1.3 Па для цилиндра Фарадея и 0.2 Па при использовании вторично-электронного умножителя.

Высоковакуумная часть прибора собрана с использованием элементов вакуумной системы масс-спектрометра МИ-1201 (высоковакуумный диффузионный ртутный насос Н50Р с азотной ловушкой и высоковакуумным вентилем, магнитоионизационные датчики давления, форвакуумный бачок, сорбционные ловушки, дозирующие и запорные вентили) со стандартными соединениями на медных прокладках.

Газ из высоковакуумной камеры л.м.с. поступает в масс-анализатор через вентиль K_1. Через вентиль K_4 и капиллярный натекатель в первую камеру может поступать фиксированный поток эталонного газа (аргона или смеси аргона с ксеноном), который используется для компенсации возможных изменений чувствительности л.м.с. в ходе измерений и контроля абсолютной чувствительности. Ко второй части высоковакуумной камеры через вентиль K_7 подключается ячейка для проведения т.п.д./т.п.р. Высоковакуумная часть прибора и масс-анализатор прогреваются до температуры 100–150°C. Для предварительной форвакуумной откачки второй камеры, например после смены ампулы т.п.д./т.п.р.-ячейки, используется вентиль K_5.

Для анализа газов в каком-либо объеме к высоковакуумной камере подсоединяются два натекателя DV_1 и DV_2 через вентиль K_6. При необходимости к DV_1 или DV_2 через вильсоновское уплотнение подключается фторопластовый капилляр длиной до 2 м с внешним диаметром 2 мм и диаметром канала 0.9 мм. Время отклика на изменение состава газа на входе капилляра не превышает 40 с.

Ячейка т.п.д./т.п.р. представляет собой кварцевую ампулу, на дно которой помещен исследуемый образец. Через охлаждаемое вильсоновское уплотнение с витоновыми прокладками ампула подсоединяется к высоковакуумному вентилю K_7. Для нагрева ампулы используется съемная трубчатая печь, управляемая программатором темпе-

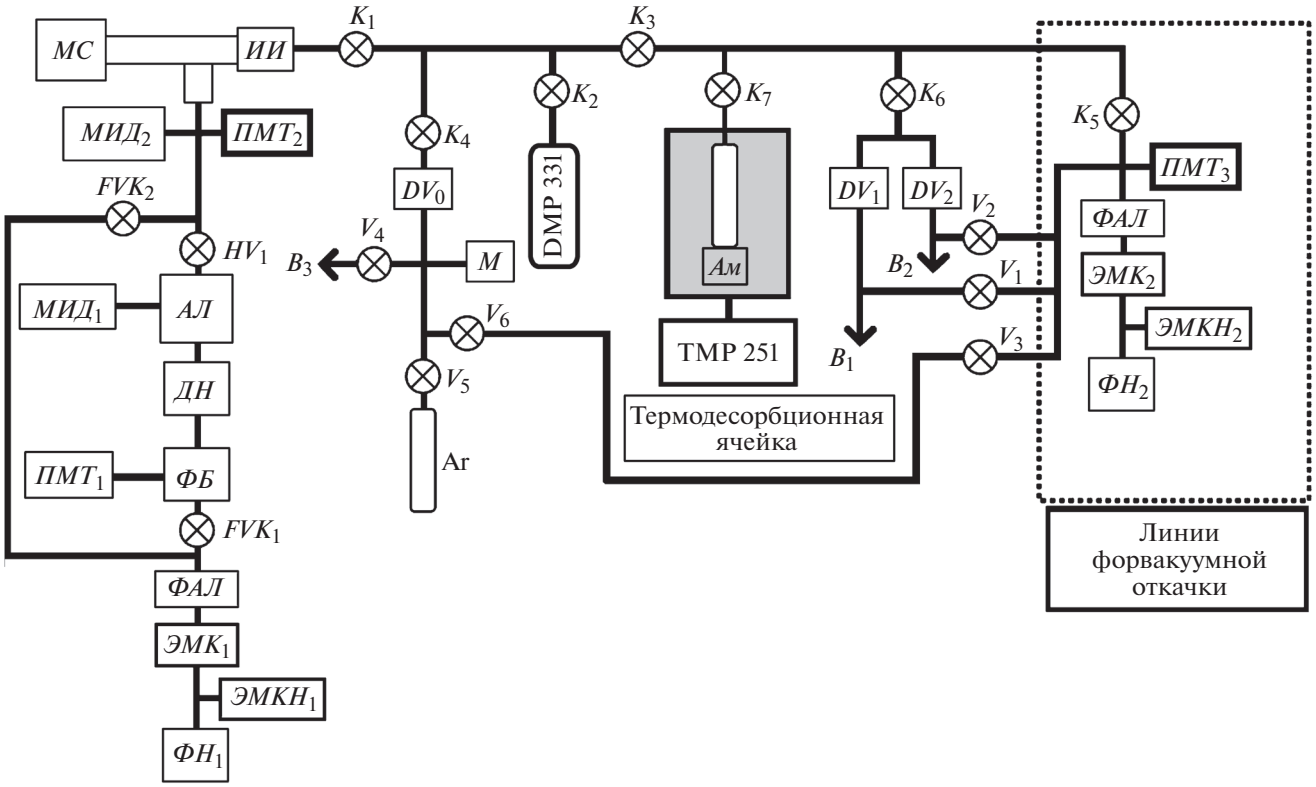


Рис. 1. Газовая схема лабораторного масс-спектрометра. *МС* – масс-спектрометр CIS300; *ИИ* – источник ионов; *АЛ* – азотная ловушка; *ФАЛ* – форвакуумная азотная ловушка; *ДН* – диффузионный насос Н50Р; *ФБ* – форвакуумный баллон; *ФН* – форвакуумный насос 2НВР5Д; *ЭМК* – электромагнитный клапан; *ЭМКН* – электромагнитный клапан напуска; *Ам* – ампула т.п.д.; $ПМТ_1$–$ПМТ_3$ – датчики низкого вакуума ПМТ-4; $МИД_1$–$МИД_2$ – магнитно-ионизационные датчики высокого вакуума; *М* – манометр; B_1–B_3 – фланцы для внешних линий; DV_0–DV_2 – дозирующие вентили; *K*, *V*, *FVK*, *HV* – вакуумные ручные вентили.

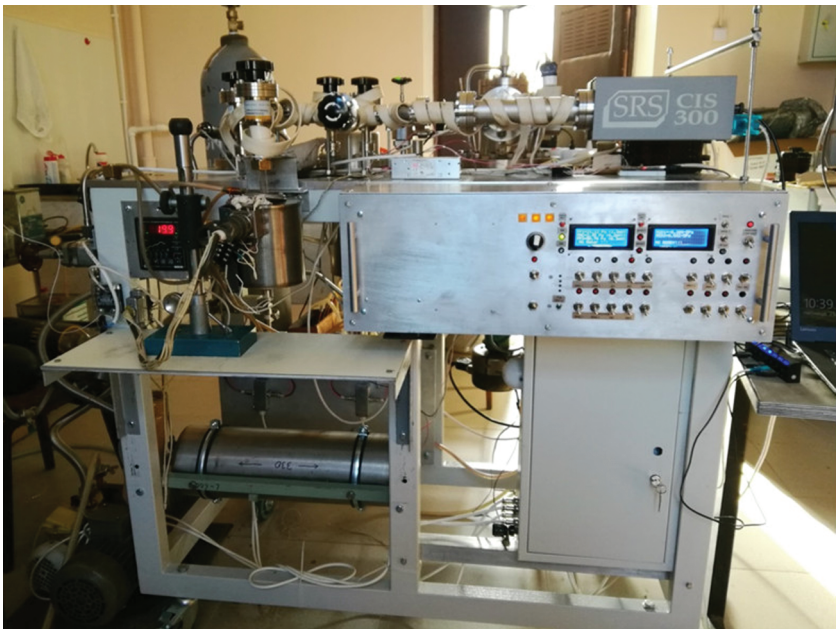


Рис. 2. Внешний вид лабораторного масс-спектрометра.

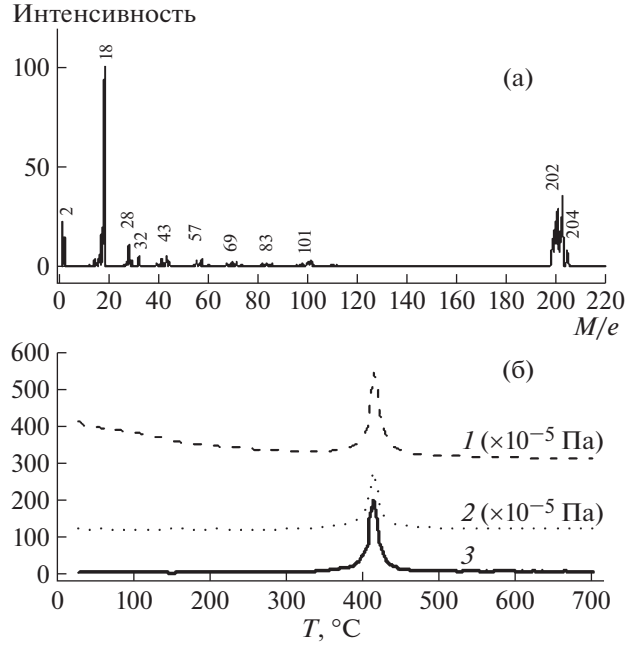


Рис. 3. а – масс-спектр фона прибора при прогреве; **б** – изменения показаний магнитно-ионизационных датчиков давления $МИД_1$ (*1*), $МИД_2$ (*2*) и интенсивности масс-спектральной линии $M/e = 2$ (*3*) при линейном нагреве со скоростью 5°С/мин 10 мг нанопорошка, полученного в реакции метана с нативными наночастицами титана [1]. При 414°С происходит выделение водорода из гидридной оболочки частиц.

ратуры ТМР-251 (Овен, Россия). Максимальная температура прогрева ампулы 1100°С, скорость нагрева образца устанавливается в диапазоне 1–10°С /мин.

При исследовании термостимулированной реакции газа с пробой, размещенной внутри ампулы, реакционный газ подается в камеру через натекатель DV_1, вентили K_1 и K_4 закрываются и изменение давления реакционного газа за счет реакции с пробой измеряется датчиком DMP331. Для предотвращения выброса мелких частиц из ампулы при форвакуумной откачке вход в ампулу закрывается пробкой из сетки из нержавеющей стали с размером отверстий 38 мкм.

Блок управления л.м.с. включает в себя 4 микроконтроллера, связь с которыми управляющий персональный компьютер осуществляет по протоколу RS232.

Для сбора и первичной обработки данных л.м.с. разработана программа на VB6, использующая команды масс-анализатора CIS300 и обеспечивающая управление квадрупольным масс-анализатором, а также контроль, вывод на экран и регистрацию в файлы следующих параметров л.м.с.:

– данных масс-спектров и рабочих параметров CIS-300;

– давления на азотной ловушке высоковакуумного насоса, измеряемого магнитно-ионизационным датчиком $МИД_1$;

– давления в камере масс-спектрометра, измеряемого магнитно-ионизационным датчиком $МИД_2$;

– давления, измеряемого датчиком DMP331;

– фактической температуры дна ампулы ячейки т.п.д./т.п.р.

На рис. 3 приведены примеры масс-спектров, полученных на л.м.с. и термодесорбционная кривая выделения водорода при нагреве наночастиц карбида титана с покрытием из гидрида титана [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Leipunsky I.O., Zhigach A.N., Kuskov M.L., Berezkina N.G., Afanasenkova E.S., Kudrov B.V., Lopez G.W., Vorobjeva G.A., Naumkin A.V.* // Journal of Alloys and Compounds. 2019. V. 778. P. 271. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.11.088
2. *Zhigach A.N., Leipunsky I.O., Kuskov M.L., Verzhbitskaya T.M.* // Rapid Communications in Mass Spectrometry. 1999. V. 13. P. 2109. https://doi.org/10.1002/(sici)1097-0231(19991115)13:21<2109::aid-rcm761>3.0.co;2-d

Адрес для справок: Россия, 119334, Москва, Ленинский просп., 38, корп. 2, Институт энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе Федерального исследовательского центра химической физики РАН; Кусков Михаил Леонидович, e-mail: mkuskov72@yandex.ru

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 6, с. 130–132

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ В ЛАБОРАТОРИЯХ

УДК 531.714.7

УСТРОЙСТВО ДЛЯ СОВМЕЩЕНИЯ МИКРОСТРУКТУР НА ДВУХ ПОДЛОЖКАХ С МИКРОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТЬЮ

© 2020 г. А. Р. Гейвандов, И. В. Касьянова

Поступила в редакцию 13.04.2020 г.
После доработки 22.05.2020 г.
Принята к публикации 23.05.2020 г.

DOI: 10.31857/S0032816220060075

Новые перспективные исследования физики микро- и наноструктур требуют создания прототипов с высокой точностью сборки. Готовые решения в данной экспериментальной области, обеспечивающие высокую точность позиционирования, не учитывают всех потребностей экспериментаторов, оказываются громоздкими, затрудняют манипуляции с совмещенными структурами, а некоторые исследования делают невозможными. Например, для измерения дифракционных свойств в широком диапазоне углов необходимо обеспечить соответствующую апертуру.

С необходимостью создания описываемого ниже устройства авторы столкнулись в ходе исследований новых устройств на основе жидких кристаллов (ж.к.). Электрооптические свойства ж.к. определяют использование этих материалов как в производстве дисплеев, так и для создания перспективных фотонных устройств с возможностью переключения, таких как управляемые дифракционные решетки, делители луча, плоские линзы с перестраиваемым фокусным расстоянием и многое другое.

Для лабораторного прототипирования ж.к.-устройств используются так называемые ж.к.-ячейки, которые представляют собой две плоские подложки, изготовленные из дисплейного стекла, с зазором фиксированной толщины порядка нескольких микрометров, заполненным ж.к.-материалом. На внутренней поверхности каждой подложки располагается электрод (как правило, это слой ITO (Indium Tin Oxide) толщиной 100–200 нм), покрытый тонкой полимерной пленкой, задающей ориентацию ж.к.

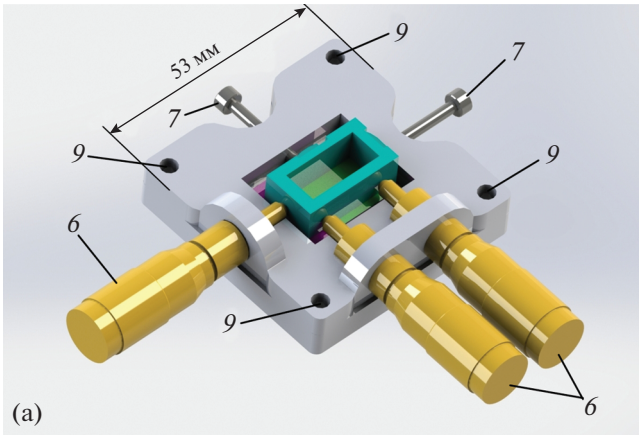
При сборке ячеек со сплошными электродами и однородными ориентирующими покрытиями экспериментатор не встречает особенных проблем и может использовать стандартную методику, отработанную десятилетиями. Однако в некоторых исследованиях возникает необходимость точного взаимного позиционирования микроструктур, расположенных на подложках.

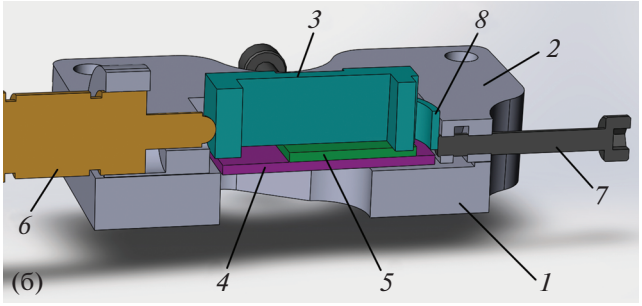
Подобная задача встретилась авторам в ходе разработки ж.к.-ячейки, в которой для управления электрическим полем применяются встречно-штыревые электроды микронного периода [1, 2]. Для достижения быстрого переключения вместе с сохранением максимальной апертуры требуется параллельное совмещение электродов на верхней и нижней подложках. Другой пример – разработка мягких фотонных ж.к.-метаповерхностей. Создание на ориентирующих покрытиях полосчатых текстур с периодом в несколько микрометров приводит к образованию в слое ж.к. пространственно-периодических структур с выраженными дифракционными свойствами [3]. Расчеты показывают, что при создании текстур на обеих подложках эффективность дифракции значительно возрастает [4].

В обоих представленных случаях для создания действующих прототипов необходимо устройство, позволяющее с высокой точностью совмещать поверхностные структуры на верхней и нижней подложках. Помимо этого, устройство должно обеспечивать возможность задавать микрозазор между подложками, заполняемый жидким кристаллом, а после фиксации краев ячейки клеем, возможность извлекать ее из рамки для дальнейших исследований, в частности для измерения дифракционных характеристик в широком диапазоне углов.

За основу юстировочного узла взят микрометрический винт с шаровой головкой модели SM13 производства Newport (Франция) [5]. Этот винт оснащен шкалой с точностью 1 мкм и обладает диапазоном перемещения 13 мм.

Изометрическая модель и сечение юстировочного устройства показаны на рис. 1а, 1б. Устройство состоит из держателя нижней подложки *1*, юстировочного узла *2* и держателя *3* верхней подложки *5*. Нижняя подложка *4* фиксируется в держателе *1*, например, при помощи двустороннего





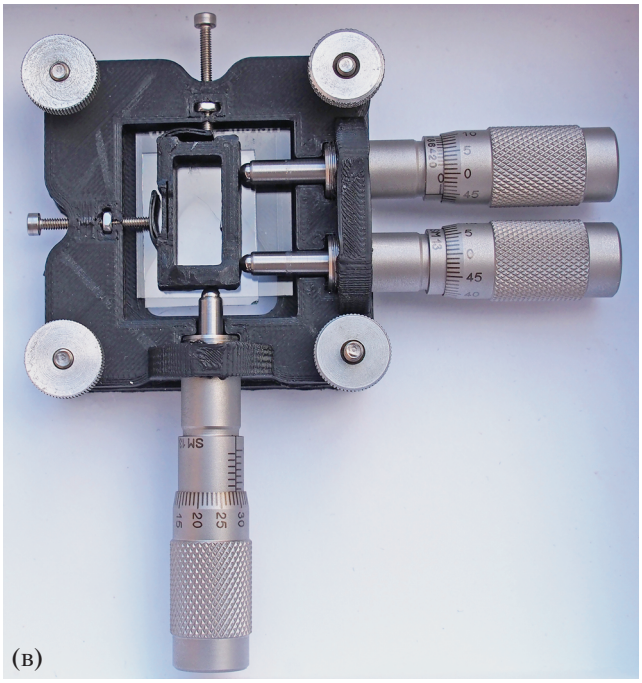


Рис. 1. Устройство для совмещения микроструктур: **а** – общий вид 3D-модели, **б** – сечение, **в** – внешний вид модели. *1* – держатель нижней подложки *4*; *2* – юстировочный узел; *3* – держатель верхней подложки *5*; *6* – микрометрический винт; *7* – контрвинт; *8* – лепестковая пружина; *9* – отверстия под фиксирующие винты.

скотча. Верхняя подложка *5* закрепляется на держателе *3* так, чтобы края подложки выступали за его периметр.

После этого на нижнюю подложку напыляются пластиковые шарики, задающие между верхней и нижней подложками постоянный зазор в несколько микрометров. Сверху устанавливается верхняя подложка с держателем *3*, затем юстировочный узел *2*.

Держатель *3* имеет на стороне, обращенной к контрвинту *7*, лепестковую пружину *8*, которая позволяет плавно перемещать держатель в оба направления подачи винта *6*. Поджим верхней подложки к нижней для обеспечения точного зазора осуществляется двумя неодимовыми магнитами, размещенными сверху и снизу от подложек.

Размеры юстировочного узла, держателя *3* и самих подложек подобраны таким образом, что ячейка может быть заполнена жидким кристаллом непосредственно в устройстве, затем зафиксирована по периметру эпоксидным клеем и извлечена из устройства для дальнейших исследований. Внешний вид устройства в сборе показан на рис. 1в.

Корпус юстировочного узла (детали *1*–*3* на рис. 1б) выполнен из пластика PLA (полилактид) методом экструзионной печати на 3D-принтере Picaso 3D Designer [6]. Стальной контрвинт М3 × 20 мм (*7*) вкручивается в гайку (не показана на рисунке) и упирается в пружину держателя верхней подложки *8*. Таким образом, держатель верхней подложки зажат с помощью винтов *6* и контрвинтов *7* и может перемещаться в плоскости конструкции при их настройке, в то время как юстировочный узел жестко фиксируется на держателе *1* нижней подложки при помощи гаек, которые навинчиваются на четыре винта, устанавливаемых в отверстия *9*.

Для тестирования юстировочного устройства были изготовлены две стеклянные подложки, на которые были нанесены металлические метки: симметричный крест размером 25 × 25 мкм на одной (рис. 2а) и четыре квадрата размером 5 мкм на второй (рис. 2б).

Подложки были помещены в устройство, которое закреплялось на столике микроскопа ПОЛАМ-113, укомплектованного объективами 4-кратного и 10-кратного увеличения. Далее метки “крест” и “4 квадрата” были обнаружены и совмещены. Результат совмещения показан на рис. 2в, 2г.

Таким образом, устройство для сборки и юстировки ж.к.-ячейки позволяет проводить плавную юстировку с точностью до 1 мкм.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения

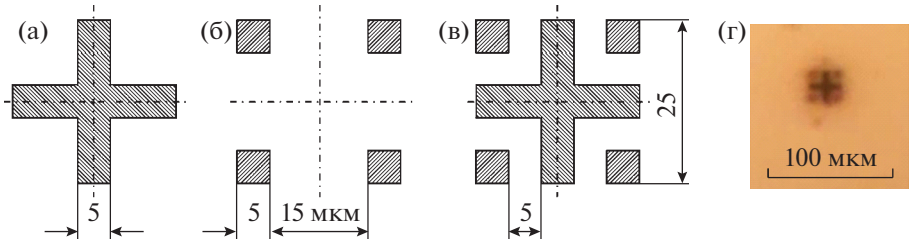


Рис. 2. Метки: **а –** “крест”, **б** – “4 квадрата”, **в** – схема их совмещения; **г** – вид совмещенных меток “крест” и “4 квадрата” в микроскопе (объектив $10^{\times}$ с рабочим расстоянием 6 мм).

работ по Государственному заданию ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Palto S.P., Barnik M.I., Geivandov A.R., Kasyanova I.V., Palto V.S.* // J. Display Tech. 2016. V. 12. Issue 10. P. 992. https://doi.org/10.1109/JDT.2016.2574929
2. *Гейвандов А.Р., Барник М.И., Палто В.С., Симдянкин И.В., Палто С.П.* // Кристаллография. 2018. Т. 63. Вып. 6. С. 928. https://doi.org/10.1134/S0023476118050132
3. *Kasyanova I.V., Gorkunov M.V., Artemov V.V., Geivandov A.R., Mamonova A.V., Palto S.P.* // Optics Express. 2018. V. 26. Issue 16. P. 20258. https://doi.org/10.1364/OE.26.020258
4. *Gorkunov M.V., Kondratov A.V., Kasyanova I.V., Artemov V.V., Mamonova A.V., Ezhov A.A., Palto S.P.* // Proc. META. 2019. P. 331.
5. https://www.newport.com/p/SM-13
6. https://www.picaso-3d.com

Адрес для справок: Россия, 119333, Москва, Ленинский просп. 59, Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН. Тел.: +74953307847. E -mail: ageivandov@yandex.ru

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 6, с. 133–134

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ В ЛАБОРАТОРИЯХ

УДК 53.082

УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОНТРОЛИРУЕМОГО ИМПУЛЬСНОГО ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВЕЩЕСТВО

© 2020 г. А. Н. Котов[a], К. В. Лукьянов[a], В. Н. Сафонов[b], А. А. Старостин[a], В. В. Шангин[a]

Поступила в редакцию 29.05.2020 г.
После доработки 08.06.2020 г.
Принята к публикации 11.06.2020 г.

DOI: 10.31857/S0032816220060117

Устройство предназначено для импульсного теплового тестирования состава и свойств веществ [1, 2]. Тепловое воздействие на исследуемое вещество осуществляется путем импульсного разогрева проволоки из платины или никеля диаметром 20–30 мкм, длиной от 3 до 10 мм.

Нагреватель сопротивлением от 1 до 6 Ом размещен в отверстии на печатной плате размером 15 × 7 × 3 мм. Печатная плата является зондом, погружаемым в исследуемую среду. Время остывания нагревателя в масле составляет несколько миллисекунд. На плате зонда дополнительно размещена микросхема для определения температуры среды с цифровым выходом (рис. 1).

Режим управления нагревом программируется оператором на компьютере и передается по интерфейсу USB в микропроцессорное устройство. Последнее задает ток нагрева и обеспечивает считывание сигнала отклика от проволочного терморезистора, который совмещает функции нагревателя и датчика своей температуры, а также считывание с датчика температуры образца.

Структурная схема микропроцессорного устройства с зондом показана на рис. 2.

Генератор тока *ГТ* построен на основе линейного стабилизатора на полевом транзисторе и операционном усилителе *ОУ*, сигналом обратной связи которого служит падение напряжения на токоизмерительном резисторе $R_т$. Управление блоком *ГТ* аналоговое, ток пропорционален входному напряжению управления, которое формируется аналоговым мультиплексором *AMUX* и цифроаналоговыми преобразователями $ЦАП_1$, $ЦАП_2$.

Комбинацией логических состояний на адресных линиях *AMUX* задается выбор между тремя напряжениями управления: выход $ЦАП_1$, выход $ЦАП_2$, нулевое напряжение. Подача нулевого напряжения выключает *ГТ* и позволяет избежать переходных процессов на этапе загрузки новых значений *ЦАП*.

Для выполнения двухимпульсного нагрева [3] требуется обеспечить снижение тока в момент достижения заданной температуры нагревателя на первом импульсе нагрева. С этой целью на выходе $ЦАП_3$ формируется опорное напряжение, соответствующее значению напряжения на выходе $ОУ_2$ в момент переключения. Блок компаратора *К* с защелкой сравнивает уровни напряжений с $ЦАП_3$ и с выхода $ОУ_2$ и формирует сигнал управления *D2 AMUX* для переключения напряжения управления *ГТ*. Микроконтроллер *МК* осуществляет предварительную обработку данных, полученных от *АЦП*: вычисляет начальное сопротивление нагревателя и рассчитывает кривые изменения сопротивления от времени для первого и второго импульсов.

Исследования веществ с различными теплофизическими свойствами требуют различных режимов нагрева. Для образцов с низкими темпера-

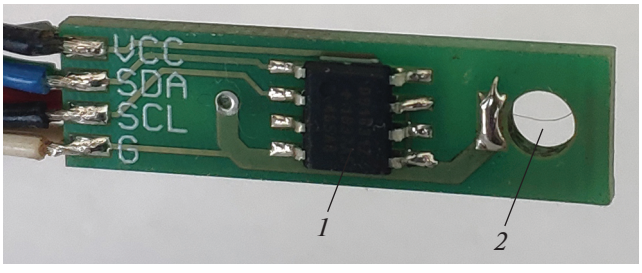


Рис. 1. Внешний вид печатной платы зонда. *1* – датчик средней температуры образца, *2* – проволочный нагреватель $R_н$.

[a] ФГБУН Институт теплофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

[b] ООО НВФ "ТермоЭкспрессКонтроль", г. Екатеринбург, Россия

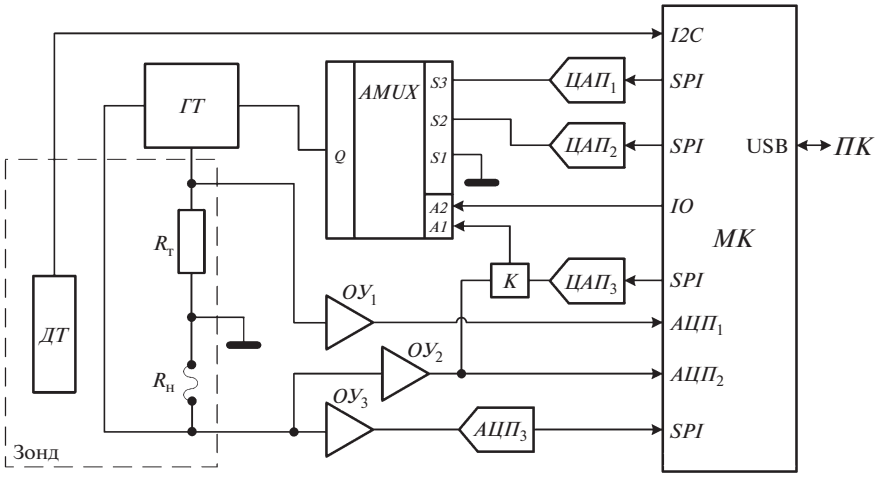


Рис. 2. Микропроцессорное устройство нагрева с зондом. *МК* – микроконтроллер STM32F205; *АЦП* – аналого-цифровой преобразователь; *ЦАП* – цифроаналоговый преобразователь; *AMUX* – аналоговый мультиплексор; *ГТ* – генератор тока; $R_т$ – токоизмерительное сопротивление; $R_н$ – терморезистор-нагреватель; *ОУ* – операционный усилитель; *К* – компаратор; *ДТ* – датчик температуры; *ПК* – персональный компьютер.

турой кипения и теплопроводностью применяются низкие напряжения на нагревателе, что требует от измерительного канала высокой чувствительности. Напротив, для образцов с высокими температурой кипения и теплопроводностью, а также при применении проволочных нагревателей с повышенным сопротивлением необходимо иметь достаточный динамический диапазон измерительного тракта.

В связи с этим выбрана двухканальная схема измерения падения напряжения на сопротивлении нагревателя $R_н$ через усилители $ОУ_2$ и $ОУ_3$ с разными коэффициентами передачи [4].

Канал $ОУ_2 + АЦП_2$ служит для записи процесса разогрева нагревателя токами до 5 А с длительностью порядка сотен микросекунд. Применен 12-разрядный *АЦП*, встроенный в *МК*, с временем выборки 500 нс, что образует “грубый” быстродействующий канал с широким динамическим диапазоном. Связка $ОУ_3 + АЦП_3$ образует “точный” канал, построенный на 16-разрядном *АЦП* AD7685, с временем выборки 4 мкс. Данный канал используется для записи миллисекундных процессов второго импульса нагрева на токах до 0.7 А.

На время подачи импульсов тока и в процессе цикла измерений питание схемы осуществляется от емкостных накопителей, импульсные преобразователи питания в устройстве временно отключаются.

Основные технические характеристики. Устройство позволяет в заданном режиме управлять процессом нагрева с микросекундным разрешением при длительности импульса 0.1–100 мс. Зонд подключается с помощью кабеля длиной до 2 м. Средний уровень шума измерительного канала второго импульса в частотном диапазоне до 200 кГц составляет около 0.3 мВ, что обеспечивает разрешение 0.5 K для температуры нагревателя. На основе представленного устройства разработан прибор определения влагосодержания в индустриальных маслах в диапазоне 5–100 ppm [5].

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа поддержана Российским научным фондом, проект 19-19-00115.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Skripov P.V., Starostin A.A., Volosnikov D.V., Zhelezny V.P.* // Int. J. Refrigeration. 2003. V. 26. № 6. P. 721.
2. *Васильев С.П., Волосников Д.В., Скрипов П.В., Старостин А.А., Шишкин А.В.* // ПТЭ. 2004. № 4. С. 130.
3. *Lukynov K.V., Starostin A.A., Skripov P.V.* // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. V. 106. P. 657.
4. *Старостин А.А., Сафонов В.Н., Скрипов П.В., Лукьянов К.В., Котов А.Н.* Патент РФ RU 2699241 C1 // Бюл. № 25. Опубл. 04.09.2019.
5. *Старостин А.А., Шангин В.В., Бухман В.Г., Волосников Д.В., Скрипов П.В.* // Теплоэнергетика. 2016. № 8. С. 18.

Адреса для справок:

1. *Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а, Институт теплофизики УрО РАН, Котов Артем Николаевич, e-mail: artem625@mail.ru, astar2006@mail.ru*

2. *Россия, 620142, Екатеринбург, ул. Белинского, 132-265, ООО НВФ “ТермоЭкспрессКонтроль”, Сафонов Виктор Николаевич, e-mail: termoek@mail.ru*

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 6, с. 135–147

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ ЖУРНАЛА “ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА” ЗА 2020 ГОД

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

DOI: 10.31857/S0032816220060269

Bannasch R. см. Аврорин А.В.

Bardáčová Z. см. Аврорин А.В.

Dvornický R. см. Аврорин А.В.

Eckerová E. см. Аврорин А.В.

Fajt L. см. Аврорин А.В.

Herrmann M.E. см. Алукер Н.Л.

Howdle S. см. Минаев Н.В.

Kim S. см. Губарев Ф.А.

Krumins E. см. Минаев Н.В.

Li L. см. Губарев Ф.А.

López-Mercado C.A. см. Спирин В.В.

Nazari V. см. Аврорин А.В.

Raulin J.-P. см. Филиппов М.В.

Šimkovic F. см. Аврорин А.В.

Štekl I. см. Аврорин А.В.

Tacza J. см. Филиппов М.В.

Wuilpart M. см. Спирин В.В.

Авакян А.К., Дергачева И.Л., Еланчик А.А., Коровкин Д.Ю., Крылова Т.А., Лобжанидзе Т.К., Полихов С.А., Смирнов В.П. Экспериментальная установка конусно-лучевого компьютерного томографа для медицинских систем рентгеновской визуализации. № 1, 159.

Авдеев С.М., Бураченко А.Г., Панарин В.А., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. Эксилампы барьерного разряда с выходным окном малого диаметра и их применение. № 4, 156.

Аврорин А.В., Аврорин А.Д., Айнутдинов В.М., Bannasch R., Bardáčová Z., Белолаптиков И.А., Бруданин В.Б., Буднев Н.М., Гафаров А.Р., Голубков К.В., Горшков Н.С., Гресь Т.И., Dvornický R., Домогацкий Г.В., Дорошенко А.А., Джилкибаев Ж.-А.М., Дик В.Я., Диячок А.Н., Eckerová E., Заборов Д.Н., Иванов Р.А., Катулин М.С., Кебкал К.Г., Кебкал О.Г., Кожин В.А., Колбин М.М., Конищев К.В., Коробченко А.В., Кошечкин А.П., Круглов М.В., Крюков М.К., Кулепов В.Ф., Миленин М.В., Миргазов Р.А., Nazari V., Наумов Д.В., Панфилов А.И., Петухов Д.П., Плисковский Е.Н., Розанов М.И., Рушай В.Д., Рябов Е.В., Сафронов Г.Б., Šimkovic F., Скурихин А.В., Соловьев А.Г., Сороковиков М.Н., Štekl I., Суворова О.В., Сушенок Е.О., Таболенко В.А., Таращанский Б.А., Fajt L., Фиалковский С.В., Храмов Е.В., Шайбонов Б.А., Шелепов М.Д., Яковлев С.А. Калибровка измерительных каналов нейтринного телескопа Baikal-GVD. № 4, 120.

Аврорин А.Д. см. Аврорин А.В.

Агаев Э.А. см. Гасанов А.Р.

Агроскин В.Я., Бравый Б.Г., Васильев Г.К., Гурьев В.И., Каштанов С.А., Макаров Е.Ф., Сотниченко С.А., Чернышев Ю.А. Юстировка и определение направления оси телескопического резонатора. № 3, 83.

Азаров Д.А. см. Шумихин В.В.

Азриель В.М., Акимов В.М., Ермолова Е.В., Кабанов Д.Б., Колесникова Л.И., Русин Л.Ю., Севрюк М.Б. Источник примесного сверхзвукового пучка молекул щелочно-галоидных солей. № 6, 120.

Айнутдинов В.М. см. Аврорин А.В.

Акимов В.М. см. Азриель В.М.

Алабин К.А., Воробьев Н.С., Заровский А.И., Пелипенко В.И., Чиковани Н.З. Электронно-оптическая камера для исследования процессов в нано- и микросекундном диапазоне. № 3, 86.

Алгебраистова П.Ю. см. Миронов А.В.

Алейник А.С. см. Власов А.А

Алексеев А.С. см. Трегубов А.В.

Алексеев А.Э. см. Таранов М.А.

Алексеев В.И., Басков В.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кольцов А.В., Кречетов Ю.Ф., Полянский В.В. Определение энергетических характеристик электронного пучка с помощью легкого сцинтиллятора. № 5, 10.

Алексеев В.И., Басков В.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кольцов А.В., Кречетов Ю.Ф., Полянский В.В., Сидорин С.С. Мониторирование фотонного пучка. № 6, 11.

Алексеев С.Б. см. Тарасенко В.Ф.

Алукер Н.Л., Herrmann M.E., Суздальцева Я.М. Спектрофотометрия вод в ультрафиолетовом и видимом диапазоне как элемент экоаналитики водных ресурсов. № 6, 64.

Алферов В.Н., Васильев Д.А. Акустический газоанализатор. № 5, 148.

Алфимов М.В. см. Крюков И.В.

Анашин В.В., Краснов А.А., Семенов А.М. Изучение газопоглощающих свойств геттерных насосов по различным газам. № 6, 109.

Андреев В.А., Гвелесиани Т.А., Глушкова Т.И., Колхидашвили М.Р., Крившич А.Г., Леонова Е.Н., Майсузенко Д.А., Соловей В.А., Федорова О.П., Фетисов А.А. Разработка двухкоординатного детектора тепловых нейтронов с входным окном 600 × 600 мм. № 5, 16.

Андреев С.В., Воробьев Н.С., Дорохов В.Л., Заровский А.И., Комельков А.С., Куркин Г.Я., Мешков О.И., Смирнов А.В. Пикосекундный электронно-оптический диссектор со скрещенной разверткой. № 1, 96.

Андрющенко Л.А. см. Шпилинская А.Л.

Антонов С.Н., Резвов Ю.Г. Акустооптические устройства на основе многолучевой дифракции. № 6, 46.

Анциферов П.С., Дорохин Л.А., Павлов А.А. Временная зависимость сопротивления плазменно-эрозионного размыкателя для цепей быстрого разряда. № 3, 69.

Ардашев Е.Н., Головня С.Н., Горохов С.А., Киряков А.А., Петров В.С., Сенько В.А., Солдатов М.М., Цюпа Ю.П., Якимчук В.И. Электроника считывания вершинного детектора установки СВД- 2. № 5, 38.

Арефьев В.А. см. Павлинский М.Н.

Аристов Ю.В. см. Коротков С.В.

Асадчиков В.Е., Рощин Б.С., Федоров В.А., Нуждин А.Д., Шишков В.А. Измерение концентрации активаторов рентгенофлуресцентным методом на примере ионов Cr в кристаллах Al_2O_3. № 3, 137.

Аткин Э.В. см. Шумихин В.В.

Афанасьев В.И. см. Мельник А.Д.

Ахмедов Р.А. см. Гасанов А.Р.

Аширов А.Н. см. Власов А.А.

Базлов Н.В., Бахланов С.В., Дербин А.В., Драчнев И.С., Изегов Г.А., Котина И.М., Муратова В.Н., Ниязова Н.В., Семенов Д.А., Трушин М.В., Унжаков Е.В., Чмель Е.А. Изменение параметров Si(Li)-детекторов под действием α-частиц. № 1, 30.

Бакшт Е.Х. см. Тарасенко В.Ф.

Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б., Германенко А.В., Михалко Е.А., Маурчев Е.А., Щур Л.И. Компактный мюонный телескоп для мониторинга потоков вторичных космических лучей. № 6, 71.

Балданов Б.Б. см. Семенов А.П.

Балякова А.А. см. Шелепин К.Ю.

Баранник М.Б. см. Колобов В.В.

Баранов Г.А., Гурашвили В.А., Джигайло И.Д., Комаров О.В., Косогоров С.Л., Кузьмин В.Н., Немчинов В.С., Сень В.И., Успенский Н.А., Шведюк В.Я. Сравнение широкоапертурных низкоэнергетичных ускорителей электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда с ускорителями на основе протяженных термоэмиттеров. № 2, 102.

Барков Ф.Л., Константинов Ю.А., Бурдин В.В., Кривошеев А.И. Теоретическая и экспериментальная оценка точности одновременного распределенного измерения температур и деформаций в анизотропных волоконных световодах методом поляризационно-бриллюэновской рефлектометрии. № 4, 51.

Басков В.А. см. Алексеев В.И.

Батраков А.М., Васильев М.Ю., Котов Е.С., Штро К.С. Прецизионный делитель высоковольтных импульсных сигналов. № 2, 58.

Бахланов С.В. см. Базлов Н.В.

Башутин О.А., Григорьева И.Г., Корф А.Н., Салахутдинов Г.Х. Методы исследования спектров импульсного рентгеновского излучения и эмиссии электронов плазмы микропинчевого разряда. № 3, 73.

Баязитов А.А., Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Шагалов В.А. Приемный датчик для специализированного малогабаритного магнитно-резонансного томографа. № 6, 89.

Безуглов В.В., Брязгин А.А., Власов А.Ю., Воронин Л.А., Коробейников М.В., Максимов С.А., Мелехова Р.В., Нехаев В.Е., Пак А.В., Радченко В.М., Сидоров А.В., Ткаченко В.О., Факторович Б.Л., Штарклев Е.А. Поворот немонохроматичных электронных пучков магнитными зеркалами. № 2, 95.

Беликович М.В. см. Швецов А.А.

Белов И.А. см. Зубов В.Е.

Белокрылов М.Е., Константинов Ю.А., Латкин К.П., Клод Д., Селезнев Д.А., Степин А.А., Конин Ю.А., Щербакова В.А., Кашина Р.Р. Полностью волоконный рефлектометр временной области для измерения длины активных эрбиевых волоконных световодов. № 4, 45.

Белолаптиков И.А. см. Аврорин А.В.

Бельский Д.Б. см. Бурцев В.А.

Бехтенев Е.А. см. Карпов Г.В.

Богачев Ю.В. см. Фролов В.В.

Богачков И.В. см. Горлов Н.И.

Богдзель А.А. см. Литвиненко Е.И.

Богомолов В.В., Досовицкий Г.А., Июдин А.Ф., Коржик М.В., Тихомиров С.А., Свертилов С.И., Козлов Д.Ю., Яшин И.В. Временные и спектральные характеристики детекторов на основе неорганического сцинтиллятора Ce:GAGG при использовании вакуумных и кремниевых фотоприемников. № 5, 23.

Боднарчук В.И. см. Литвиненко Е.И.

Большаков Е.П. см. Бурцев В.А.

Большаков О.С. см. Швецов А.А.

Бондаренко Г.Г. см. Грибков В.А.

Боровицкая И.В. см. Грибков В.А.

Бочкова С.Д., Волковский С.А., Ефимов М.Е., Дейнека И.Г., Смирнов Д.С., Литвинов Е.В. Метод локализации воздействия в композитном материале с помощью волоконно-оптических датчиков акустической эмиссии. № 4, 73.

Бравый Б.Г. см. Агроскин В.Я.

Бронзов Т.П. см. Бурцев В.А.

Бруданин В.Б. см. Аврорин А.В.

Брязгин А.А. см. Безуглов В.В.

Буднев Н.М. см. Аврорин А.В.

Буланов В.А., Корсков И.В., Соседко С.Н., Стороженко А.В. Система многочастотного акустического зондирования для исследования акустических характеристик верхнего слоя моря. № 3, 131.

Булатов М.И. см. Конин Ю.А.

Бульбаков И.С. см. Шумихин В.В.

Бураченко А.Г. см. Авдеев С.М.

Бураченко А.Г. см. Тарасенко В.Ф.

Бурдин В.В. см. Барков Ф.Л.

Бурцев А.А. см. Бурцев В.А.

Бурцев В.А., Большаков Е.П., Гетман Д.В., Калинин Н.В. Экспериментальные исследования и оптимизация компактного многоканального генератора наносекундных импульсов. № 6, 26.

Бурцев В.А., Бурцев А.А., Бельский Д.Б., Большаков Е.П., Бронзов Т.П., Ваганов С.А., Гетман Д.В., Елисеев С.И., Калинин Н.В., Самохвалов А.А., Сергушичев К.А., Смирнов А.А., Тимшина М.В. Наносекундный генератор высоковольтных импульсов на основе искусственных двойных формирующих линий. № 4, 23.

Быков В.Ю. см. Зотов М.Б.

Ваганов С.А. см. Бурцев В.А.

Вадченко С.Г. см. Кудряшов В.А.

Вайсберг О.Л. см. Моисеенко Д.А.

Ван Яомин (Wang Yaoming), Тюрин Ю.И., Никитенков Н.Н., Сыпченко В.С., Никитенков А.Н., Чжан Ле (Zhang Le). Установка для исследования люминесценции фосфоров при возбуждении атомно-молекулярными пучками. № 2, 87.

Варламов А.В. см. Власов А.А.

Василенкова Т.В. см. Ксенофонтов С.Ю.

Васильев Г.К. см. Агроскин В.Я.

Васильев Д.А. см. Алферов В.Н.

Васильев И.А., Джилкибаев Р.М., Хлюстин Д.В. Исследование формы сигналов в ^{3}He-счетчике при регистрации нейтронов. № 2, 13.

Васильев И.Е. см. Матвиенко Ю.Г.

Васильев М.Ю. см. Батраков А.М.

Вафин И.Ю. см. Мещеряков А.И.

Власов А.А., Варламов А.В., Аширов А.Н., Кикилич Н.Е., Алейник А.С. Исследование влияния степени акустической герметизации звукозащитных корпусов волоконно-оптических интерферометров на их характеристики. № 4, 67.

Власов А.А., Плотников М.Ю., Аширов А.Н., Алейник А.С., Никитенко А.Н. Разработка экспериментальной установки для акустических исследований компонентов волоконно-оптических измерительных систем. № 4, 58.

Власов А.А., Плотников М.Ю., Лавров В.С., Киселев С.С., Алейник А.С. Исследование влияния метода крепления волоконно-оптической сейсмической косы при буксировке на параметры ее выходного сигнала. № 4, 138.

Власов А.Ю. см. Безуглов В.В.

Волков Е.В., Еремеев Д.Р., Ивашин А.В., Календарёв В.В., Матвеев В.Д., Михасенко М.О., Сугоняев В.П., Хохлов Ю.А., Шумаков А.А. Модуль аналого-цифрового преобразователя с оцифровкой формы сигнала для эксперимента ВЕС. № 2, 32.

Волковский С.А. см. Бочкова С.Д.

Воробьев Н.С. см. Алабин К.А.

Воробьев Н.С. см. Андреев С.В.

Воронин Л.А. см. Безуглов В.В.

Воронов К.Е. см. Пияков И.В.

Воропай Е.С., Ермалицкий Ф.А., Радько А.Е., Самцов М.П. Суб- и наносекундные диодные источники света. № 1, 151.

Вьюхин В.Н. Высоковольтный усилитель. № 1, 52.

Габбасов Д.М. см. Намаконов В.В.

Гайдар А.И. см. Грибков В.А.

Гапон И.В. см. Литвиненко Е.И.

Гаранин А.И. см. Конин Ю.А.

Гасанов А.Р., Гасанов Р.А., Ахмедов Р.А., Агаев Э.А. Акустооптический метод измерения энергогеометрических параметров лазерного излучения. № 2, 109.

Гасанов Р.А. см. Гасанов А.Р.

Гафаров А.Р. см. Аврорин А.В.

Гачев И.Г. см. Проявин М.Д.

Гвелесиани Т.А. см. Андреев В.А.

Гвоздевский Б.Б. см. Балабин Ю.В.

Гейвандов А.Р., Касьянова И.В. Устройство для совмещения микроструктур на двух подложках с микрометрической точностью. № 6, 130.

Геликонов В.М. см. Ксенофонтов С.Ю.

Геликонов Г.В. см. Ксенофонтов С.Ю.

Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Кикеев В.А., Кузьмин В.А., Тотышев К.В., Косяк Е.Г., Кузнецов П.Г., Герасимова Р.В. Газоразрядный излучатель с ограничением распространения разряда для регистрации быстропротекающих процессов и инициирования светочувствительных энергонасыщенных материалов. № 5, 92.

Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Крутик М.И., Тотышев К.В., Косяк Е.Г., Кузнецов П.Г., Герасимова Р.В. Аппаратный комплекс, реализующий схему одновременного получения изображения быстропротекающего процесса в отраженном и проходящем свете. № 5, 88.

Герасимова Р.В. см. Герасимов С.И.

Германенко А.В. см. Балабин Ю.В.

Гетман Д.В. см. Бурцев В.А.

Глушенко А.Г. см. Павлинский М.Н.

Глушкова Т.И. см. Андреев В.А.

Глявин М.Ю. см. Мовшевич Б.З.

Глявин М.Ю. см. Проявин М.Д.

Годин С.М. см. Кудряшов В.А.

Голиков А.В. см. Грибков В.А.

Головня С.Н. см. Ардашев Е.Н.

Голубков К.В. см. Аврорин А.В.

Горбачев А.Н. см. Кусков М.Л.

Горлов Н.И., Богачков И.В. Принципы информационной безопасности физических каналов оптических сетей доступа. № 4, 145.

Горохов С.А. см. Ардашев Е.Н.

Горшков Б.Г. см. Таранов М.А.

Горшков Н.С. см. Аврорин А.В.

Гребенников В.В. см. Огородников Д.Н.

Гренков С.А. см. Зотов М.Б.

Гренков С.А., Кольцов Н.Е. Система регистрации космического радиоизлучения в спектральных линиях. № 4, 131.

Гресь Т.И. см. Аврорин А.В.

Грибков В.А., Боровицкая И.В., Демин А.С., Морозов Е.В., Масляев С.А., Пименов В.Н., Голиков А.В., Дулатов А.К., Бондаренко Г.Г., Гайдар А.И. Установка "Вихрь" типа "плазменный фокус" для диагностики радиационно-термической стойкости материалов, перспективных для термоядерной энергетики и аэрокосмической техники. № 1, 75.

Григорьев Б.В. Метод измерения количества незамерзшей воды в мерзлых грунтах. № 2, 159.

Григорьева И.Г. см. Башутин О.А.

Гринштейн М.Л. см. Таранов М.А.

Гришина И.А. см. Мещеряков А.И.

Губарев Ф.А., Kim S., Li L., Мостовщиков А.В., Ильин А.П. Оптическая система с усилением яркости для исследования поверхности нанопорошков металлов во время горения. № 3, 96.

Губин К.В., Мальцева Ю.И., Оттмар А.В., Рыбицкая Т.В. Спектрометр для измерения характеристик одиночного лазерно-ускоренного электронного сгустка с малым зарядом. № 3, 40.

Гулько В.Л., Мещеряков А.А. Метод определения углов пеленга и крена летательного аппарата по ортогонально линейно поляризованным сигналам радиомаяка. № 6, 32.

Гурашвили В.А. см. Баранов Г.А.

Гурьев В.И. см. Агроскин В.Я.

Гусев А.Н., Козлов А.В., Шурупов А.В., Маштаков А.В., Шурупов М.А. Твердотельный разрядник для сильноточного источника энергии на основе емкостного накопителя с рабочим напряжением 50 кВ. № 1, 64.

Гусев А.Н., Козлов А.В., Шурупов А.В., Маштаков А.В., Шурупов М.А. Воздушный разрядник для сильноточного источника энергии на основе емкостного накопителя с рабочим напряжением 5 кВ. № 5, 60.

Давыдов С.Г., Долгов А.Н., Карпов М.А., Корнеев А.В., Никишин Д.В., Пшеничный А.А., Якубов Р.Х. Регистрация оптических изображений дугового разряда в вакууме с помощью электронно-оптического преобразователя с варьируемым временным разрешением наносекундного диапазона. № 1, 89.

Далькаров О.Д., Негодаев М.А., Русецкий А.С., Чубенко А.П., Щепетов А.Л. Регистрация нейтронов с помощью пропорциональных счетчиков на установке ГЕЛИС. № 1, 24.

Даниелян Г.Л. см. Явелов И.С.

Дейнека И.Г. см. Бочкова С.Д.

Демидов Б.А., Казаков Е.Д., Калинин Ю.Г., Крутиков Д.И., Курило А.А., Орлов М.Ю., Стрижаков М.Г., Ткаченко С.И., Чукбар К.В., Шашков А.Ю. Применение лазерной теневой фотографии с электронно-оптической регистрацией в хронографическом режиме для исследования динамики ударных волн в прозрачных материалах. № 3, 90.

Демин А.С. см. Грибков В.А.

Дербин А.В. см. Базлов Н.В.

Дергачева И.Л. см. Авакян А.К.

Джигайло И.Д. см. Баранов Г.А.

Джилкибаев Ж.-А.М. см. Аврорин А.В.

Джилкибаев Р.М. см. Васильев И.А.

Диденко А.В. см. Шпилинская А.Л.

Дик В.Я. см. Аврорин А.В.

Диячок А.Н. см. Аврорин А.В.

Долгов А.Н. см. Давыдов С.Г.

Домогацкий Г.В. см. Аврорин А.В.

Дорохин Л.А. см. Анциферов П.С.

Дорохов В.Л. см. Андреев С.В.

Дорошенко А.А. см. Аврорин А.В.

Досовицкий Г.А. см. Богомолов В.В.

Драчнев И.С. см. Базлов Н.В.

Дроздов В.А. см. Литвиненко Е.И.

Дронов В.А. см. Алексеев В.И.

Дулатов А.К. см. Грибков В.А.

Евтушенко Г.С. см. Торгаев С.Н.

Егорова Ю.И. см. Пушкарев А.И.

Ежов В.В. см. Пушкарев А.И.

Еланчик А.А. см. Авакян А.К.

Елин И.П., Жидков Н.В., Суслов Н.А., Тачаев Г.В. Измерение выхода ДД-нейтронов методом активации индия на установке “Искра-5”. № 2, 9.

Елисеев С.И. см. Бурцев В.А.

Епифанов Е.О. см. Минаев Н.В.

Епифанов Е.О., Минаева С.А., Зимняков Д.А., Попов В.К., Минаев Н.В. Установка для исследования процессов пластификации и вспенивания полимерных материалов в сверхкритических средах. № 5, 134.

Еремеев Д.Р. см. Волков Е.В.

Ермалицкий Ф.А. см. Воропай Е.С.

Ермалицкий Ф.А., Радько А.Е., Самцов М.П. Модуль усиления и временной фиксации одноэлектронных сигналов фотоумножителей. № 6, 125.

Ермолова Е.В. см. Азриель В.М.

Ерофеев В.И. см. Герасимов С.И.

Ефимов М.Е. см. Бочкова С.Д.

Ефремов И.Н. см. Палатников М.Н.

Жигарьков В.С. см. Минаев Н.В.

Жигарьков В.С., Минаев Н.В., Юсупов В.И. Установка для исследования импульсного лазерного воздействия на поверхность материалов. № 1, 153.

Жигач А.Н. см. Кусков М.Л.

Жидков Н.В. см. Елин И.П.

Жикина Л.А. см. Фадеев К.М.

Жмодиков А.Л. см. Коротков С.В.

Жолобов А.В. см. Явелов И.С.

Жуков А.В. см. Трегубов А.В.

Жуков К.М. см. Таранов М.А.

Журавлев А.Н. см. Карпов Г.В.

Журавлев Р.Н. см. Моисеенко Д.А.

Журавлев Р.Н. см. Шувалов С.Д.

Заборов Д.Н. см. Аврорин А.В.

Зайцев С.И., Трофимов О.В., Шабельникова Я.Л., Чукалина М.В. Конфокальный коллиматор для радионуклидной диагностики и рентгенофлуоресцентного анализа. № 3, 147.

Зарвин А.Е. см. Яскин А.С.

Заровский А.И. см. Алабин К.А.

Заровский А.И. см. Андреев С.В.

Зеленская О.В. см. Шпилинская А.Л.

Зимняков Д.А. см. Епифанов Е.О.

Золотовский И.О. см. Спирин В.В.

Зотов М.Б., Иванов Д.В., Быков В.Ю., Гренков С.А., Поздняков И.А., Рахимов И.А., Стэмпковский В.Г., Царук А.А., Чернов В.К., Шахнабиев И.В., Шишикин А.М. Результаты разработки прототипа мобильной РСДБ-станции. № 6, 76.

Зубов В.Е., Белов И.А. Высокочувствительный прибор для магнитооптических исследований. № 3, 160.

Иванов В.И. см. Матвиенко Ю.Г.

Иванов В.Н., Русаков Ю.С. Инфразвуковые станции КИЗ для геофизических исследований и мониторинга. № 5, 117.

Иванов Д.В. см. Зотов М.Б.

Иванов П.Ю. см. Шумихин В.В.

Иванов Р.А. см. Аврорин А.В.

Ивашин А.В. см. Волков Е.В.

Изегов Г.А. см. Базлов Н.В.

Ильин А.П. см. Губарев Ф.А.

Ионов Д.С. см. Юрасик Г.А.

Исатов А.Т. см. Тетерев Ю.Г.

Исатов А.Т., Тетерев Ю.Г., Кабытаева Р.К., Митрофанов С.В., Калагин И.В. Методика и результаты измерений амплитуды в.ч.-напряжения на дуантах циклотронов ЛЯР ОИЯИ по краю спектра тормозного излучения. № 1, 5.

Июдин А.Ф. см. Богомолов В.В.

Кабанов Д.Б. см. Азриель В.М.

Каблуков С.И. см. Ткаченко А.Ю.

Кабытаева Р.К. см. Исатов А.Т.

Казаков Е.Д. см. Демидов Б.А.

Казанцев Д.В., Казанцева Е.А. Предусилитель для CdHgTe-фотодетектора. № 1, 144.

Казанцева Е.А. см. Казанцев Д.В.

Калагин И.В. см. Исатов А.Т.

Калаев М.П. см. Пияков И.В.

Калашников С.В., Номоев А.В., Шолохов Е.С., Романов Н.А. Установка генерации импульсного магнитного поля до 1.35 Тл. № 5, 156.

Календарёв В.В. см. Волков Е.В.

Калинин Н.В. см. Бурцев В.А.

Калинин Ю.Г. см. Демидов Б.А.

Каляда В.В. см. Яскин А.С.

Каньшин И.А., Солодовников А.А. Измерение эмиттанса пучка заряженных частиц в малогабаритных линейных ускорителях. № 3, 30.

Каплин В.В. см. Рычков М.М.

Капустин Ю.В. см. Рогов А.В.

Карпов Г.В., Бехтенев Е.А., Журавлев А.Н., Пиминов П.А. Новая система измерения положения пучка в канале транспортировки электронов и позитронов из накопителя ВЭПП-3 в коллайдер ВЭПП-4М. № 1, 18.

Карпов М.А. см. Давыдов С.Г.

Касатов Д.А., Кошкарев А.М., Макаров А.Н., Остреинов Г.М., Таскаев С.Ю., Щудло И.М. Источник быстрых нейтронов на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и литиевой мишени. № 5, 5.

Касьянова И.В. см. Гейвандов А.Р.

Катулин М.С. см. Аврорин А.В.

Кашин А.В., Корнев Н.С., Макарычев Н.А., Марьевский С.В., Минеев К.В., Назаров А.В. Применение авторегрессионной модели при обработке сигнала радиометрического канала крайневысокочастотного радиоинтерферометра-радиометра. № 1, 39.

Кашина Р.Р. см. Белокрылов М.Е.

Каштанов С.А. см. Агроскин В.Я.

Кебкал К.Г. см. Аврорин А.В.

Кебкал О.Г. см. Аврорин А.В.

Кикеев В.А. см. Герасимов С.И.

Кикилич Н.Е. см. Власов А.А.

Киряков А.А. см. Ардашев Е.Н.

Киселев С.С. см. Власов А.А

Кладухин В.В., Храмцов С.П., Ялов В.Ю. Генератор высоковольтных импульсов на основе распределенного сумматора с общим изолирующим дросселем. № 2, 52.

Клод Д. см. Белокрылов М.Е.

Кобзев В.М. см. Филатов А.В.

Ковалёв А.А. Измерение спектра отражения в однолучевой схеме. № 6, 53.

Кожин В.А. см. Аврорин А.В.

Козлов А.В. см. Гусев А.Н.

Козлов Д.Ю. см. Богомолов В.В.

Козловский С.С. см. Мельник А.Д.

Колбин М.М. см. Аврорин А.В.

Колесников Я.А., Кошкарев А.М., Таскаев С.Ю., Щудло И.М. Диагностика эффективности газовой обдирочной мишени ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией. № 3, 25.

Колесников Я.А., Сорокин И.Н., Таскаев С.Ю. Повышение электрической прочности ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией. № 6, 17.

Колесникова Л.И. см. Азриель В.М.

Колобов В.В., Баранник М.Б. Широкодиапазонная счетно-электрометрическая система регистрации импульсов вторично-электронного умножителя. № 5, 66.

Колхидашвили М.Р. см. Андреев В.А.

Кольцов А.В. см. Алексеев В.И.

Кольцов Н.Е. см. Гренков С.А.

Комаров О.В. см. Баранов Г.А.

Комельков А.С. см. Андреев С.В.

Комлев В.С. см. Миронов А.В.

Конин Ю.А. см. Белокрылов М.Е.

Конин Ю.А., Булатов М.И., Щербакова В.А., Гаранин А.И., Токарева Я.Д., Мошева Е.В. Исследование свойств цельноволоконного датчика температуры, созданного при помощи эффекта плавления. № 4, 78.

Конищев К.В. см. Аврорин А.В.

Константинов Ю.А. см. Барков Ф.Л.

Константинов Ю.А. см. Белокрылов М.Е.

Коржик М.В. см. Богомолов В.В.

Корнев Н.С. см. Кашин А.В.

Корнеев А.В. см. Давыдов С.Г.

Коробейников М.В. см. Безуглов В.В.

Коробко Д.А. см. Спирин В.В.

Коробченко А.В. см. Аврорин А.В.

Коровкин Д.Ю. см. Авакян А.К.

Коротков Д.А. см. Коротков С.В.

Коротков С.В., Аристов Ю.В., Жмодиков А.Л. Диодно-транзисторный генератор наносекундных импульсов высокого напряжения. № 1, 59.

Коротков С.В., Аристов Ю.В., Жмодиков А.Л., Коротков Д.А. Динисторы с субнаносекундным временем переключения. № 5, 75.

Коротков С.В., Тоскин А.А., Аристов Ю.В., Коротков Д.А. Устройство наносекундного инициирования мощных ударных волн. № 1, 55.

Корсков И.В. см. Буланов В.А.

Корф А.Н. см. Башутин О.А.

Косогоров С.Л. см. Баранов Г.А.

Косяк Е.Г. см. Герасимов С.И.

Котина И.М. см. Базлов Н.В.

Котов А.Н., Лукьянов К.В., Сафонов В.Н., Старостин А.А., Шангин В.В. Устройство для контролируемого импульсного теплового воздействия на вещество. № 6, 133.

Котов В.М., Котов Е.В. Акустооптическая дифракция двухцветного излучения на предельной частоте акустической волны. № 1, 110.

Котов Е.В. см. Котов В.М.

Котов Е.С. см. Батраков А.М.

Кошелев О.Г. Устройство для бесконтактного определения распределения фоточувствитель-

ности по площади кремниевых n^+–$p(n)$–p^+-структур. № 4, 149.

Кошечкин А.П. см. Аврорин А.В.

Кошкарев А.М. см. Касатов Д.А.

Кошкарев А.М. см. Колесников Я.А.

Красильников А.А. см. Швецов А.А.

Краснов А.А. см. Анашин В.В.

Краснов А.А., Леготин С.А. Достижения в области разработки бетавольтаических источников питания (*обзор*). № 4, 5.

Кречетов Ю.Ф. см. Алексеев В.И.

Кривонос Р.А. см. Павлинский М.Н.

Кривошеев А.И. см. Барков Ф.Л.

Кривченко А.В. см. Павлинский М.Н.

Крившич А.Г. см. Андреев В.А.

Круглов М.В. см. Аврорин А.В.

Крутик М.И. см. Герасимов С.И.

Крутиков Д.И. см. Демидов Б.А.

Крылов А.И. см. Тетерев Ю.Г.

Крылова Т.А. см. Авакян А.К.

Крюков И.В., Петров Н.Х., Алфимов М.В. Генератор суперконтинуума с накачкой импульсами фемтосекундного лазера на хром-форстерите в прозрачных конденсированных средах. № 6, 57.

Крюков М.К. см. Аврорин А.В.

Ксенофонтов С.Ю., Моисеев А.А., Маткивский В.А., Шилягин П.А., Василенкова Т.В., Геликонов В.М., Геликонов Г.В. Калибровка поперечного сканирования в приборах оптической когерентной томографии. № 5, 104.

Ксенофонтов С.Ю., Шилягин П.А., Терпелов Д.А., Новожилов А.А., Геликонов В.М., Геликонов Г.В. Применение фазовой коррекции для компенсации артефактов движения в спектральной оптической когерентной томографии. № 1, 136.

Кудин А.М. см. Шпилинская А.Л.

Кудров Б.В. см. Кусков М.Л.

Кудряшов В.А., Годин С.М., Вадченко С.Г., Рогачев А.С. Экспериментальная установка для моделирования процессов электроискрового плазменного спекания. № 1, 84.

Кузнецов П.Г. см. Герасимов С.И.

Кузнецов П.И., Судас Д.П., Савельев Е.А. Формирование волоконных тейперов методом химического травления для применения в волоконных датчиках и лазерах. № 4, 83.

Кузнецова М.В. см. Павлинский М.Н.

Кузьмин В.А. см. Герасимов С.И.

Кузьмин В.Н. см. Баранов Г.А.

Кукин Л.М. см. Швецов А.А.

Кулагин А.Е. см. Торгаев С.Н.

Кулепов В.Ф. см. Аврорин А.В.

Куликов М.Ю. см. Швецов А.А.

Куликов С.А. см. Литвиненко Е.И.

Кумпан А.В., коллаборация COHERENT. Разработка сцинтилляционных детекторов на основе жидких благородных газов для исследования процесса упругого когерентного рассеяния нейтрино на атомных ядрах. № 5, 32.

Курило А.А. см. Демидов Б.А.

Куркин Г.Я. см. Андреев С.В.

Кусков М.Л., Лейпунский И.О., Горбачев А.Н., Жигач А.Н., Кудров Б.В. Мобильный лабораторный масс-спектрометр на основе коммерческого анализатора остаточных газов CIS-300. № 6, 127.

Куфтин А.Н. см. Проявин М.Д.

Лавров В.С. см. Власов А.А

Лавров С.А. см. Фролов В.В.

Лапшов И.Ю. см. Павлинский М.Н.

Ларионов Д.Д. см. Фадеев К.М.

Латкин К.П. см. Белокрылов М.Е.

Лебедев В.Б. см. Фельдман Г.Г.

Левин В.В. см. Павлинский М.Н.

Леготин С.А. см. Краснов А.А.

Лейпунский И.О. см. Кусков М.Л.

Леонова Е.Н. см. Андреев В.А.

Леснов И.В. см. Швецов А.А.

Литвиненко Е.И., Богдзель А.А., Боднарчук В.И., Чураков А.В., Гапон И.В., Дроздов В.А., Куликов С.А., Мурашкевич С.М., Нагорный А.В. Сравнительный анализ характеристик систем сбора данных с позиционно-чувствительных детекторов нейтронов. № 3, 56.

Литвинов Е.В. см. Бочкова С.Д.

Лобач И.А. см. Ткаченко А.Ю.

Лобжанидзе Т.К. см. Авакян А.К.

Ломаев М.И. см. Тарасенко В.Ф.

Лукьянов К.В. см. Котов А.Н.

Львов А.И. см. Алексеев В.И.

Майсузенко Д.А. см. Андреев В.А.

Макаров А.Н. см. Касатов Д.А.

Макаров Е.Ф. см. Агроскин В.Я.

Макарова О.В. см. Палатников М.Н.

Макарычев Н.А. см. Кашин А.В.

Максимов С.А. см. Безуглов В.В.

Максумов О.С. см. Филиппов М.В.

Мальцева Ю.И. см. Губин К.В.

Мамаев А.М., Пелешко В.Н., Савицкая Е.Н., Санников А.В., Сухарев М.М., Сухих С.Э. Пассивный дозиметр нейтронов для высокоэнергетических ускорителей. № 2, 21.

Мануилов В.Н. см. Проявин М.Д.

Марьевский С.В. см. Кашин А.В.

Маслов В.В. см. Проявин М.Д.

Маслов М.А., Рябов А.Д., Скороднев Н.В., Солдатов А.П. Входное окно мишенной станции для наработки медицинских радионуклидов. № 3, 118.

Масляев С.А. см. Грибков В.А.

Матвеев В.Д. см. Волков Е.В.

Матвиенко Ю.Г., Иванов В.И., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Мищенко И.В. Определение скорости распространения волнового пакета в композитных материалах. № 1, 115.

Маткивский В.А. см. Ксенофонтов С.Ю.

Маурчев Е.А. см. Балабин Ю.В.

Махмутов В.С. см. Филиппов М.В.

Маштаков А.В. см. Гусев А.Н.

Мелетов К.П. Азотный криостат с регулируемой температурой и холодной загрузкой образцов для измерений оптических спектров. № 2, 156.

Мелехова Р.В. см. Безуглов В.В.

Мельник А.Д., Афанасьев В.И., Козловский С.С., Миронов М.И., Наволоцкий А.С., Несеневич В.Г., Петров М.П., Петров С.Я., Чернышев Ф.В. Разработка технологии изготовления детекторов для системы атомных анализаторов на токамаке ITER. № 2, 76.

Мереминский И.А. см. Павлинский М.Н.

Мешков О.И. см. Андреев С.В.

Мещеряков А.И., Вафин И.Ю., Гришина И.А. Продольное электрическое поле в режимах омического и электронного циклотронного резонансного нагрева плазмы в стеллараторе Л-2М. № 5, 82.

Мещеряков А.А. см. Гулько В.Л.

Миленин М.В. см. Аврорин А.В.

Минаев Н.В. см. Епифанов Е.О.

Минаев Н.В. см. Жигарьков В.С.

Минаев Н.В., Епифанов Е.О., Шубный А.Г., Юсупов В.И. Установка для эффективного микроструктурирования прозрачных материалов. № 1, 155.

Минаев Н.В., Жигарьков В.С., Олейничук Е.А., Туйцына А.А., Юсупов В.И. Установка для изучения процессов в жидких средах вблизи торца лазерного волокна. № 3, 158.

Минаев Н.В., Миронов А.В., Минаева С.А., Миронова О.А., Сячина М.А., Krumins E., Howdle S., Попов В.К. Установка для исследования процессов селективного лазерного спекания порошковых материалов с высоким пространственным разрешением. № 2, 153.

Минаева С.А. см. Епифанов Е.О.

Минаева С.А. см. Минаев Н.В.

Минеев К.В. см. Кашин А.В.

Минкин А.М. см. Фадеев К.М.

Миньков К.Н. Установка для изготовления оптических диэлектрических микрорезонаторов термическим методом. № 3, 142.

Миргазов Р.А. см. Аврорин А.В.

Миронов А.В. см. Минаев Н.В.

Миронов А.В., Алгебраистова П.Ю., Комлев В.С., Миронова О.А., Попов В.К. Установка для исследования процессов трехмерной криопечати. № 6, 105.

Миронов М.И. см. Мельник А.Д.

Миронова О.А. см. Минаев Н.В.

Миронова О.А. см. Миронов А.В.

Митрофанов С.В. см. Исатов А.Т.

Митрофанов С.В. см. Тетерев Ю.Г.

Митюрин М.В. см. Моисеенко Д.А.

Митюрин М.В. см. Шувалов С.Д.

Михалко Е.А. см. Балабин Ю.В.

Михасенко М.О. см. Волков Е.В.

Мищенко И.В. см. Матвиенко Ю.Г.

Мовшевич Б.З., Цветков А.И., Глявин М.Ю., Фокин А.П. Быстродействующий регулятор анодного напряжения гиротрона. № 6, 40.

Моисеев А.А. см. Ксенофонтов С.Ю.

Моисеев П.П. см. Моисеенко Д.А.

Моисеенко Д.А. см. Шувалов С.Д.

Моисеенко Д.А., Шестаков А.Ю., Вайсберг О.Л., Журавлев Р.Н., Шувалов С.Д., Митюрин М.В., Нечушкин И.И., Моисеев П.П. Исследование процессов рассеяния ионов и нейтральных атомов с использованием стенда нейтральных частиц. № 2, 81.

Молодцов В.О. см. Чихман В.Н.

Мольков С.В. см. Павлинский М.Н.

Морозкин М.В. см. Проявин М.Д.

Морозов Е.В. см. Грибков В.А.

Мостовщиков А.В. см. Губарев Ф.А.

Мошева Е.В. см. Конин Ю.А.

Муратова В.Н. см. Базлов Н.В.

Мурашкевич С.М. см. Литвиненко Е.И.

Мусоров И.С. см. Торгаев С.Н.

Мухамадиев А.А. см. Радаев А.В.

Наволоцкий А.С. см. Мельник А.Д.

Нагорный А.В. см. Литвиненко Е.И.

Назаров А.В. см. Кашин А.В.

Намаконов В.В., Габбасов Д.М., Пасечников В.П. Монитор потока нейтронов с энергией 14 МэВ импульсного канала нейтронного генератора НГ-12И. № 2, 5.

Наумов Д.В. см. Аврорин А.В.

Негодаев М.А. см. Далькаров О.Д.

Немчинов В.С. см. Баранов Г.А.

Несеневич В.Г. см. Мельник А.Д.

Нехаев В.Е. см. Безуглов В.В.

Нечушкин И.И. см. Моисеенко Д.А.

Никитенко А.Н. см. Власов А.А.

Никитенков А.Н. см. Ван Яомин (Wang Yaoming)

Никитенков Н.Н. см. Ван Яомин (Wang Yaoming)

Никишин Д.В. см. Давыдов С.Г.

Николаев Э.О. см. Семенов А.П.

Ниязова Н.В. см. Базлов Н.В.

Новиков С.Г. см. Трегубов А.В.

Новикова А.А. см. Филатов А.В.

Новиков-Бородин А.В. Прямая реконструкция экспериментальных данных при плохой обусловленности задач и наличии искажений. № 5, 48.

Новожилов А.А. см. Ксенофонтов С.Ю.

Номоев А.В. см. Калашников С.В.

Норманов Д.Д. см. Шумихин В.В.

Носов А.В. см. Шувалов С.Д.

Носов Г.В., Носова М.Г. Коммутаторный индуктивно-конденсаторный генератор мощных импульсов тока. № 4, 29.

Носова М.Г. см. Носов Г.В.

Нуждин А.Д. см. Асадчиков В.Е.

Огородников Д.Н. см. Торгаев С.Н.

Огородников Д.Н., Гребенников В.В., Фадеев И.С., Ярославцев Е.В. Работа преобразователей постоянного напряжения при их параллельном включении. № 2, 70.

Олейников В.Н. см. Павлинский М.Н.

Олейничук Е.А. см. Минаев Н.В.

Орлов М.Ю. см. Демидов Б.А.

Остреинов Г.М. см. Касатов Д.А.

Оттмар А.В. см. Губин К.В.

Павлинский М.Н., Ткаченко А.Ю., Левин В.В., Кривченко А.В., Ротин А.А., Кузнецова М.В., Лапшов И.Ю., Семена А.Н., Семена Н.П., Сербинов Д.В., Кривонос Р.А., Штыковский А.Е., Яскович А.Л., Олейников В.Н., Мереминский И.А., Глушенко А.Г., Мольков С.В., Сазонов С.Ю., Арефьев В.А. Моделирование характеристик комплекса зеркальной системы и рентгеновского детектора космического телескопа ART-XC астрофизической обсерватории “Спектр-РГ”. № 2, 118.

Павлов А.А. см. Анциферов П.С.

Пак А.В. см. Безуглов В.В.

Палатников М.Н., Сандлер В.А., Сидоров Н.В., Ефремов И.Н., Макарова О.В. Методы контроля степени униполярности крупногабаритных кристаллов $LiNbO_3$. № 3, 104.

Панарин В.А. см. Авдеев С.М.

Панфилов А.И. см. Аврорин А.В.

Пасечников В.П. см. Намаконов В.В.

Пелешко В.Н. см. Мамаев А.М.

Пелипенко В.И. см. Алабин К.А.

Петров В.С. см. Ардашев Е.Н.

Петров И.В. см. Швецов А.А.

Петров М.П. см. Мельник А.Д.

Петров Н.Х. см. Крюков И.В.

Петров С.Я. см. Мельник А.Д.

Петухов Д.П. см. Аврорин А.В.

Пивоваров А.А., Ярощук И.О., Швырев А.Н., Самченко А.Н. Автономная низкочастотная широкополосная гидроакустическая излучающая станция с электромагнитным преобразователем. № 6, 95.

Пименов В.Н. см. Грибков В.А.

Пиминов П.А. см. Карпов Г.В.

Пияков И.В., Калаев М.П., Сухачев К.И., Воронов К.Е., Телегин А.М. Цифровой модуль регистрации сигнала для пылеударного масс-спектрометра. № 6, 83.

Плисковский Е.Н. см. Аврорин А.В.

Плотников М.Ю. см. Власов А.А

Поздняков И.А. см. Зотов М.Б.

Полихов С.А. см. Авакян А.К.

Полянский В.В. см. Алексеев В.И.

Попов В.К. см. Епифанов Е.О.

Попов В.К. см. Минаев Н.В.

Попов В.К. см. Миронов А.В.

Прима А.И. см. Пушкарев А.И.

Приходько В.В. см. Трегубов А.В.

Проявин М.Д., Мануилов В.Н., Гачев И.Г., Маслов В.В., Морозкин М.В., Куфтин А.Н., Тай Е.М., Глявин М.Ю. Магнитобронированная система на основе теплых соленоидов для гироприборов K-диапазона. № 1, 106.

Пушкарев А.И., Прима А.И., Егорова Ю.И., Ежов В.В. Диагностика импульсных пучков электронов, ионов и атомов (*обзор*). № 3, 5.

Пшеничный А.А. см. Давыдов С.Г.

Радаев А.В., Мухамадиев А.А., Сабирзянов А.Н. Экспериментальный стенд для исследования растворимости диоксида углерода в углеводородах в широком интервале рабочих температур и давлений. № 6, 115.

Радченко В.М. см. Безуглов В.В.

Радько А.Е. см. Воропай Е.С.

Радько А.Е. см. Ермалицкий Ф.А.

Разин В.И. Толстый газовый электронный умножитель. № 2, 28.

Разницына И.А., Тарасов А.П., Рогаткин Д.А. Усовершенствованная система для флуоресцентного анализа in vivo в медицине. № 2, 142.

Ранжуров Ц.В. см. Семенов А.П.

Рахимов И.А. см. Зотов М.Б.

Резвов Ю.Г. см. Антонов С.Н.

Ремнёв Г.Е. см. Шаманин В.И.

Рогаткин Д.А. см. Разницына И.А.

Рогачев А.С. см. Кудряшов В.А.

Рогов А.В., Капустин Ю.В. Угловые распределения при магнетронном распылении поликристаллических мишеней из Mg, Al, Si, Ti, Cr, Cu, Zn, Ge, Zr, Nb, Mo, Ag, In, Sn, W, Pt, Au и Bi. № 5, 137.

Розанов М.И. см. Аврорин А.В.

Романов Н.А. см. Калашников С.В.

Ротин А.А. см. Павлинский М.Н.

Рочагов А.В. см. Явелов И.С.

Рощин Б.С. см. Асадчиков В.Е.

Русаков Ю.С. см. Иванов В.Н.

Русецкий А.С. см. Далькаров О.Д.

Русин Л.Ю. см. Азриель В.М.

Рушай В.Д. см. Аврорин А.В.

Рыбицкая Т.В. см. Губин К.В.

Рыскин В.Г. см. Швецов А.А.

Рычков М.М., Каплин В.В., Смолянский В.А. Определение размера фокального пятна микрофокусного источника жесткого тормозного излучения. № 1, 101.

Рябов А.Д. см. Маслов М.А.

Рябов Е.В. см. Аврорин А.В.

Сабирзянов А.Н. см. Радаев А.В.

Савельев Е.А. см. Кузнецов П.И.

Савицкая Е.Н. см. Мамаев А.М.

Сазонов С.Ю. см. Павлинский М.Н.

Салахутдинов Г.Х. см. Башутин О.А.

Салтыков В.А. см. Черепанцев А.С.

Самохвалов А.А. см. Бурцев В.А.

Самцов М.П. см. Воропай Е.С.

Самцов М.П. см. Ермалицкий Ф.А.

Самченко А.Н. см. Пивоваров А.А.

Сандлер В.А. см. Палатников М.Н.

Санников А.В. см. Мамаев А.М.

Сафонов В.Н. см. Котов А.Н.

Сафронов Г.Б. см. Аврорин А.В.

Свертилов С.И. см. Богомолов В.В.

Светухин В.В. см. Трегубов А.В.

Севрюк М.Б. см. Азриель В.М.

Селезнев Д.А. см. Белокрылов М.Е.

Семена А.Н. см. Павлинский М.Н.

Семена Н.П. см. Павлинский М.Н.

Семенов А.М. см. Анашин В.В.

Семенов А.П., Балданов Б.Б., Ранжуров Ц.В. Источник неравновесной аргоновой плазмы на основе объемного тлеющего разряда атмосферного давления. № 2, 149.

Семенов А.П., Семенова И.А., Цыренов Д.Б.-Д., Николаев Э.О. Газоразрядное распылительное устройство на основе планарного магнетрона с ионным источником. № 5, 143.

Семенов Д.А. см. Базлов Н.В.

Семенова И.А. см. Семенов А.П.

Сенин Л.Н., Сенина Т.Е. Адаптивный приемник последовательных цифровых сигналов в канале связи сейсморегистрирующей аппаратуры. № 5, 158.

Сенина Т.Е. см. Сенин Л.Н.

Сень В.И. см. Баранов Г.А.

Сенько В.А. см. Ардашев Е.Н.

Сербинов Д.В. см. Павлинский М.Н.

Сергушичев К.А. см. Бурцев В.А.

Сердюков К.А. см. Филатов А.В.

Сидорин С.С. см. Алексеев В.И.

Сидоров А.В. см. Безуглов В.В.

Сидоров Н.В. см. Палатников М.Н.

Синийчук А.А. см. Фельдман Г.Г.

Скакун В.С. см. Авдеев С.М.

Скороднев Н.В. см. Маслов М.А.

Скворцов М.И. см. Ткаченко А.Ю.

Скурихин А.В. см. Аврорин А.В.

Смирнов А.А. см. Бурцев В.А.

Смирнов А.В. см. Андреев С.В.

Смирнов В.П. см. Авакян А.К.

Смирнов В.Ю. см. Чихман В.Н.

Смирнов Д.С. см. Бочкова С.Д.

Смолянинов Н.Н. см. Ткаченко А.Ю.

Смолянский В.А. см. Рычков М.М.

Сокол-Кутыловский О.Л. Генератор для магнитомодуляционного преобразователя слабого магнитного поля. № 1, 157.

Солдатов А.П. см. Маслов М.А.

Солдатов М.М. см. Ардашев Е.Н.

Солнушкин С.Д. см. Чихман В.Н.

Соловей В.А. см. Андреев В.А.

Соловьев А.Г. см. Аврорин А.В.

Солодовников А.А. см. Каньшин И.А.

Сорокин В.Б. Исследование метода определения размера фокусного пятна тормозного излучения с использованием щелевого коллиматора. № 1, 10.

Сорокин И.Н. см. Колесников Я.А.

Сороковиков М.Н. см. Аврорин А.В.

Соседко С.Н. см. Буланов В.А.

Соснин Э.А. см. Авдеев С.М.

Сотниченко С.А. см. Агроскин В.Я.

Спирин В.В., López-Mercado C.A., Wuilpart M., Коробко Д.А., Золотовский И.О., Фотиади А.А. Использование полупроводникового лазера с захватом частоты в качестве задающего оптического генератора когерентного рефлектометра для распределенных измерений частоты вибраций. № 4, 40.

Старостин А.А. см. Котов А.Н.

Степин А.А. см. Белокрылов М.Е.

Стожков Ю.И. см. Филиппов М.В.

Стороженко А.В. см. Буланов В.А.

Стрижаков М.Г. см. Демидов Б.А.

Стэмпковский В.Г. см. Зотов М.Б.

Суворова О.В. см. Аврорин А.В.

Сугоняев В.П. см. Волков Е.В.

Судас Д.П. см. Кузнецов П.И.

Суздальцева Я.М. см. Алукер Н.Л.

Суслов Н.А. см. Елин И.П.

Сухарев М.М. см. Мамаев А.М.

Сухачев К.И. см. Пияков И.В.

Сухих С.Э. см. Мамаев А.М.

Сушенок Е.О. см. Аврорин А.В.

Сыпченко В.С. см. Ван Яомин (Wang Yaoming)

Сячина М.А. см. Минаев Н.В.

Таболенко В.А. см. Аврорин А.В.

Тай Е.М. см. Проявин М.Д.

Таранов М.А., Горшков Б.Г., Алексеев А.Э. Достижение 85-километровой дальности измерений деформации (температуры) с помощью низкокогерентной рэлеевской рефлектометрии. № 4, 96.

Таранов М.А., Горшков Б.Г., Жуков К.М., Гринштейн М.Л. О минимальной неопределенности измерения коэффициента затухания в одномодовом оптическом волокне, достижимой с использованием рэлеевской рефлектометрии. № 4, 90.

Тарасенко В.Ф. см. Авдеев С.М.

Тарасенко В.Ф., Алексеев С.Б., Бакшт Е.Х., Бураченко А.Г., Ломаев М.И. Наносекундный ускоритель электронов с неоднородной передающей линией и газонаполненным диодом. № 3, 78.

Тарасов А.П. см. Разницына И.А.

Таращанский Б.А. см. Аврорин А.В.

Тарбоков В.А. см. Шаманин В.И.

Таскаев С.Ю. см. Касатов Д.А.

Таскаев С.Ю. см. Колесников Я.А.

Тачаев Г.В. см. Елин И.П.

Телегин А.М. см. Пияков И.В.

Терпелов Д.А. см. Ксенофонтов С.Ю.

Тетерев Ю.Г. см. Исатов А.Т.

Тетерев Ю.Г., Исатов А.Т., Митрофанов С.В., Крылов А.И. Модернизация сканирующего двухмерного ионизационного монитора профиля в каналах транспортировки пучка. № 6, 5.

Тетерев Ю.Г., Крылов А.И., Исатов А.Т., Митрофанов С.В. Многоканальный детектор для контроля деградации сцинтилляционных и полупроводниковых детекторов в пучках тяжелых ионов низкой интенсивности. № 3, 50.

Тимшина М.В. см. Бурцев В.А.

Тихомиров С.А. см. Богомолов В.В.

Ткаченко А.Ю. см. Павлинский М.Н.

Ткаченко А.Ю., Смолянинов Н.Н., Скворцов М.И., Лобач И.А., Каблуков С.И. Когерентный оптический частотный рефлектометр на основе волоконного лазера с самосканированием частоты для сенсорных применений. № 4, 102.

Ткаченко В.О. см. Безуглов В.В.

Ткаченко С.И. см. Демидов Б.А.

Токарева Я.Д. см. Конин Ю.А.

Торгаев С.Н., Огородников Д.Н., Мусоров И.С., Кулагин А.Е., Евтушенко Г.С. Высокочастотный источник накачки активных сред на парах металлов. № 1, 69.

Тоскин А.А. см. Коротков С.В.

Тотышев К.В. см. Герасимов С.И.

Трегубов А.В., Приходько В.В., Алексеев А.С., Жуков А.В., Новиков С.Г., Светухин В.В. Модель распределенного калориметрического волоконного дозиметра на основе эффекта вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна. № 4, 109.

Трофимов О.В. см. Зайцев С.И.

Трушин М.В. см. Базлов Н.В.

Туйцына А.А. см. Минаев Н.В.

Тюрин Ю.И. см. Ван Яомин (Wang Yaoming)

Тютюкин К.В. см. Фролов В.В.

Унжаков Е.В. см. Базлов Н.В.

Успенский Н.А. см. Баранов Г.А.

Фадеев И.С. см. Огородников Д.Н.

Фадеев К.М., Ларионов Д.Д., Жикина Л.А., Минкин А.М., Шевцов Д.И. Волоконно-оптический датчик одновременного измерения температуры и давления с использованием интерферометра Фабри-Перо и волоконной брэгговской решетки. № 4, 115.

Факторович Б.Л. см. Безуглов В.В.

Фаттахов Я.В. см. Баязитов А.А.

Фахрутдинов А.Р. см. Баязитов А.А.

Федоров В.А. см. Асадчиков В.Е.

Федорова О.П. см. Андреев В.А.

Фейгин А.М. см. Швецов А.А.

Фельдман Г.Г., Лебедев В.Б., Синийчук А.А. Установка для измерения характеристик скоростных электронно-оптических камер, работающих в диапазоне мягкого рентгена и вакуумного ультрафиолета. № 5, 127.

Фетисов А.А. см. Андреев В.А.

Фиалковский С.В. см. Аврорин А.В.

Филатов А.В., Кобзев В.М., Филатов Н.А., Сердюков К.А., Новикова А.А. Простой цифровой термометр. № 3, 65.

Филатов Н.А. см. Филатов А.В.

Филиппов М.В., Махмутов В.С., Стожков Ю.И., Максумов О.С. Наземная установка для детектирования заряженной компоненты космических лучей CARPET. № 3, 109.

Филиппов М.В., Махмутов В.С., Стожков Ю.И., Максумов О.С., Raulin J.-P., Tacza J. Наземная установка для детектирования нейтральной компоненты космических лучей “Нейтронный детектор”. № 5, 96.

Фокин А.П. см. Мовшевич Б.З.

Фотиади А.А. см. Спирин В.В.

Фролов В.В., Тютюкин К.В., Шубин С.А., Лавров С.А., Богачев Ю.В. Мультиядерный слабопольный магнитно-резонансный минитомограф. № 5, 111.

Хайкин В.Б. см. Швецов А.А.

Хлюстин Д.В. см. Васильев И.А.

Хохлов Ю.А. см. Волков Е.В.

Храмов Е.В. см. Аврорин А.В.

Храмцов С.П. см. Кладухин В.В.

Царук А.А. см. Зотов М.Б.

Цветков А.И. см. Мовшевич Б.З.

Цымбаленко В.Л. Сверхпроводящий механический осциллятор с изменяемой резонансной частотой. № 5, 153.

Цыренов Д.Б.-Д. см. Семенов А.П.

Цюпа Ю.П. см. Ардашев Е.Н.

Черепанцев А.С., Салтыков В.А. Широкополосный акселерометр для исследования высокочастотных собственных шумов Земли. № 1, 130.

Чернов В.К. см. Зотов М.Б.

Чернов Д.В. см. Матвиенко Ю.Г.

Чернышев Ф.В. см. Мельник А.Д.

Чернышев Ю.А. см. Агроскин В.Я.

Чжан Ле (Zhang Le) см. Ван Яомин (Wang Yaoming)

Чиковани Н.З. см. Алабин К.А.

Чиненов С.Т. см. Яскин А.С.

Чихман В.Н., Солнушкин С.Д., Молодцов В.О., Смирнов В.Ю. Устройство для электрораздражения лабораторных животных на основе использования генератора тока. № 2, 161.

Чмель Е.А. см. Базлов Н.В.

Чубенко А.П. см. Далькаров О.Д.

Чукалина М.В. см. Зайцев С.И.

Чукбар К.В. см. Демидов Б.А.

Чураков А.В. см. Литвиненко Е.И.

Шабельникова Я.Л. см. Зайцев С.И.

Шагалов В.А. см. Баязитов А.А.

Шайбонов Б.А. см. Аврорин А.В.

Шаманин В.И., Ремнёв Г.Е., Тарбоков В.А. Ионный диод с магнитной самоизоляцией для генерации ионных пучков алюминия. № 4, 35.

Шангин В.В. см. Котов А.Н.

Шахнабиев И.В. см. Зотов М.Б.

Шашков А.Ю. см. Демидов Б.А.

Шведюк В.Я. см. Баранов Г.А.

Швецов А.А., Беликович М.В., Красильников А.А., Куликов М.Ю., Кукин Л.М., Рыскин В.Г., Большаков О.С., Леснов И.В., Щитов А.М., Фейгин А.М., Хайкин В.Б., Петров И.В. Спектрорадиометр 5-миллиметрового диапазона для исследования атмосферы и подстилающей поверхности. № 6, 100.

Швырев А.Н. см. Пивоваров А.А.

Шевцов Д.И. см. Фадеев К.М.

Шелепин Е.Ю. см. Шелепин К.Ю.

Шелепин К.Ю., Шелепин Е.Ю., Балякова А.А. Ассистивный программно-аппаратный комплекс “Стерх” для осуществления взаимодействия между обездвиженным пациентом и персональным компьютером. № 1, 161.

Шелепов М.Д. см. Аврорин А.В.

Шестаков А.Ю. см. Моисеенко Д.А.

Шестаков А.Ю. см. Шувалов С.Д.

Шилягин П.А. см. Ксенофонтов С.Ю.

Шишикин А.М. см. Зотов М.Б.

Шишков В.А. см. Асадчиков В.Е.

Шолохов Е.С. см. Калашников С.В.

Шпилинская А.Л., Кудин А.М., Андрющенко Л.А., Диденко А.В., Зеленская О.В. Защитное гидрофобное покрытие для кристаллов CsI(Tl). № 1, 35.

Штарклев Е.А. см. Безуглов В.В.

Штро К.С. см. Батраков А.М.

Штыковский А.Е. см. Павлинский М.Н.

Шубин С.А. см. Фролов В.В.

Шубный А.Г. см. Минаев Н.В.

Шувалов С.Д. см. Моисеенко Д.А.

Шувалов С.Д., Шестаков А.Ю., Носов А.В., Митюрин М.В., Моисеенко Д.А., Журавлев Р.Н. Электронный компактный спектрометр ЭКОС для спутников CubeSat. № 2, 113.

Шумаков А.А. см. Волков Е.В.

Шумихин В.В., Азаров Д.А., Аткин Э.В., Бульбаков И.С., Иванов П.Ю., Норманов Д.Д. Интерполятор для определения амплитуды сигнала в считывающей детекторной электронике. № 1, 46.

Шурупов А.В. см. Гусев А.Н.

Шурупов М.А. см. Гусев А.Н.

Щепетов А.Л. см. Далькаров О.Д.

Щербакова В.А. см. Белокрылов М.Е.

Щербакова В.А. см. Конин Ю.А.

Щитов А.М. см. Швецов А.А.

Щудло И.М. см. Касатов Д.А.

Щудло И.М. см. Колесников Я.А.

Щур Л.И. см. Балабин Ю.В.

Юрасик Г.А., Ионов Д.С. Экспериментальный комплекс для высокопроизводительного скрининга фотолюминесцентных хемосенсорных материалов. № 1, 121.

Юсупов В.И. см. Жигарьков В.С.

Юсупов В.И. см. Минаев Н.В.

Явелов И.С., Даниелян Г.Л., Рочагов А.В., Жолобов А.В., Явелов О.И. Исследование матричных датчиков пульсовой волны. № 3, 125.

Явелов О.И. см. Явелов И.С.

Якимчук В.И. см. Ардашев Е.Н.

Яковлев С.А. см. Аврорин А.В.

Якубов Р.Х. см. Давыдов С.Г.

Ялов В.Ю. см. Кладухин В.В.

Ярославцев Е.В. см. Огородников Д.Н.

Ярощук И.О. см. Пивоваров А.А.

Яскин А.С., Каляда В.В., Зарвин А.Е., Чиненов С.Т. Метод эффективного сканирования сверхзвуковых струй разреженных газов. № 3, 152.

Яскович А.Л. см. Павлинский М.Н.

Яшин И.В. см. Богомолов В.В.

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 6, с. 148–160

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ ЖУРНАЛА “ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА” ЗА 2020 ГОД

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

DOI: 10.31857/S0032816220060270

Номер Стр.

ОБЗОРЫ

Диагностика импульсных пучков электронов, ионов и атомов.
Пушкарев А.И., Прима А.И., Егорова Ю.И., Ежов В.В. 3 5

Достижения в области разработки бетавольтаических источников питания.
Краснов А.А., Леготин С.А. 4 5

УСКОРИТЕЛИ И ПУЧКИ ЧАСТИЦ

Методика и результаты измерений амплитуды в.ч.-напряжения на дуантах циклотронов ЛЯР ОИЯИ по краю спектра тормозного излучения.
Исатов А.Т., Тетерев Ю.Г., Кабытаева Р.К., Митрофанов С.В., Калагин И.В. 1 5

Исследование метода определения размера фокусного пятна тормозного излучения с использованием щелевого коллиматора.
Сорокин В.Б. 1 10

Новая система измерения положения пучка в канале транспортировки электронов и позитронов из накопителя ВЭПП-3 в коллайдер ВЭПП-4М.
Карпов Г.В., Бехтенев Е.А., Журавлев А.Н., Пиминов П.А. 1 18

Модернизация сканирующего двухмерного ионизационного монитора профиля в каналах транспортировки пучка.
Тетерев Ю.Г., Исатов А.Т., Митрофанов С.В., Крылов А.И. 6 5

Мониторирование фотонного пучка.
Алексеев В.И., Басков В.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кольцов А.В., Кречетов Ю.Ф., Полянский В.В., Сидорин С.С 6 11

Повышение электрической прочности ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией.
Колесников Я.А., Сорокин И.Н., Таскаев С.Ю. 6 17

Диагностика эффективности газовой обдирочной мишени ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией.
Колесников Я.А., Кошкарев А.М., Таскаев С.Ю., Щудло И.М. 3 25

Источник быстрых нейтронов на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и литиевой мишени.
Касатов Д.А., Кошкарев А.М., Макаров А.Н., Остреинов Г.М., Таскаев С.Ю., Щудло И.М. 5 5

НЕЙТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

Регистрация нейтронов с помощью пропорциональных счетчиков на установке ГЕЛИС.
Далькаров О.Д., Негодаев М.А., Русецкий А.С., Чубенко А.П., Щепетов А.Л. 1 24

Монитор потока нейтронов с энергией 14 МэВ импульсного канала нейтронного генератора НГ-12И.
Намаконов В.В., Габбасов Д.М., Пасечников В.П. 2 5

Измерение выхода ДД-нейтронов методом активации индия на установке “Искра-5”.
Елин И.П., Жидков Н.В., Суслов Н.А., Тачаев Г.В. 2 9

Исследование формы сигналов в ^{3}He-счетчике при регистрации нейтронов.
Васильев И.А., Джилкибаев Р.М., Хлюстин Д.В. 2 13

Пассивный дозиметр нейтронов для высокоэнергетических ускорителей.
Мамаев А.М., Пелешко В.Н., Савицкая Е.Н., Санников А.В., Сухарев М.М., Сухих С.Э. 2 21

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЧАСТИЦ

Диагностика импульсных пучков электронов, ионов и атомов (*обзор*).
Пушкарев А.И., Прима А.И., Егорова Ю.И., Ежов В.В. 3 5

Измерение эмиттанса пучка заряженных частиц в малогабаритных линейных ускорителях.
Каньшин И.А., Солодовников А.А. 3 30

Спектрометр для измерения характеристик одиночного лазерно-ускоренного электронного сгустка с малым зарядом.
Губин К.В., Мальцева Ю.И., Оттмар А.В., Рыбицкая Т.В. 3 40

Определение энергетических характеристик электронного пучка с помощью легкого сцинтиллятора.
Алексеев В.И., Басков В.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кольцов А.В., Кречетов Ю.Ф., Полянский В.В. 5 10

ДЕТЕКТОРЫ ЧАСТИЦ

Изменение параметров Si(Li)-детекторов под действием α-частиц.
Базлов Н.В., Бахланов С.В., Дербин А.В., Драчнев И.С., Изегов Г.А., Котина И.М., Муратова В.Н., Ниязова Н.В., Семенов Д.А., Трушин М.В., Унжаков Е.В., Чмель Е.А. 1 30

Защитное гидрофобное покрытие для кристаллов CsI(Tl).
Шпилинская А.Л., Кудин А.М., Андрющенко Л.А., Диденко А.В., Зеленская О.В. 1 35

Толстый газовый электронный умножитель.
Разин В.И. 2 28

Исследование формы сигналов в ^{3}He-счетчике при регистрации нейтронов.
Васильев И.А., Джилкибаев Р.М., Хлюстин Д.В. 2 13

Пассивный дозиметр нейтронов для высокоэнергетических ускорителей.
Мамаев А.М., Пелешко В.Н., Савицкая Е.Н., Санников А.В., Сухарев М.М., Сухих С.Э. 2 21

Многоканальный детектор для контроля деградации сцинтилляционных и полупроводниковых детекторов в пучках тяжелых ионов низкой интенсивности.
Тетерев Ю.Г., Крылов А.И., Исатов А.Т., Митрофанов С.В. 3 50

Сравнительный анализ характеристик систем сбора данных с позиционно-чувствительных детекторов нейтронов.
Литвиненко Е.И., Богдзель А.А., Боднарчук В.И., Чураков А.В., Гапон И.В., Дроздов В.А., Куликов С.А., Мурашкевич С.М., Нагорный А.В. 3 56

Разработка двухкоординатного детектора тепловых нейтронов с входным окном 600 × 600 мм.

Андреев В.А., Гвелесиани Т.А., Глушкова Т.И., Колхидашвили М.Р., Крившич А.Г., Леонова Е.Н., Майсузенко Д.А., Соловей В.А., Федорова О.П., Фетисов А.А. 5 16

Временные и спектральные характеристики детекторов на основе неорганического сцинтиллятора Ce:GAGG при использовании вакуумных и кремниевых фотоприемников.

Богомолов В.В., Досовицкий Г.А., Июдин А.Ф., Коржик М.В., Тихомиров С.А., Свертилов С.И., Козлов Д.Ю., Яшин И.В. 5 23

Разработка сцинтилляционных детекторов на основе жидких благородных газов для исследования процесса упругого когерентного рассеяния нейтрино на атомных ядрах.

Кумпан А.В., коллаборация COHERENT 5 32

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ И ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Применение авторегрессионной модели при обработке сигнала радиометрического канала крайневысокочастотного радиоинтерферометра-радиометра.

Кашин А.В., Корнев Н.С., Макарычев Н.А., Марьевский С.В., Минеев К.В., Назаров А.В. 1 39

Интерполятор для определения амплитуды сигнала в считывающей детекторной электронике.

Шумихин В.В., Азаров Д.А., Аткин Э.В., Бульбаков И.С., Иванов П.Ю., Норманов Д.Д. 1 46

Электроника считывания вершинного детектора установки СВД-2.

Ардашев Е.Н., Головня С.Н., Горохов С.А., Киряков А.А., Петров В.С., Сенько В.А., Солдатов М.М., Цюпа Ю.П., Якимчук В.И. 5 38

Прямая реконструкция экспериментальных данных при плохой обусловленности задач и наличии искажений.

Новиков-Бородин А.В. 5 48

РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Усилители, измерители, преобразователи

Высоковольтный усилитель.

Вьюхин В.Н. 1 52

Модуль аналого-цифрового преобразователя с оцифровкой формы сигнала для эксперимента BEC.

Волков Е.В., Еремеев Д.Р., Ивашин А.В., Календарёв В.В., Матвеев В.Д., Михасенко М.О., Сугоняев В.П., Хохлов Ю.А., Шумаков А.А. 2 32

Работа преобразователей постоянного напряжения при их параллельном включении.

Огородников Д.Н., Гребенников В.В., Фадеев И.С., Ярославцев Е.В. 2 70

Модуль усиления и временной фиксации одноэлектронных сигналов фотоумножителей.

Ермалицкий Ф.А., Радько А.Е., Самцов М.П. 6 125

Простой цифровой термометр.

Филатов А.В., Кобзев В.М., Филатов Н.А., Сердюков К.А., Новикова А.А. 3 65

Воздушный разрядник для сильноточного источника энергии на основе емкостного накопителя с рабочим напряжением 5 кВ.

Гусев А.Н., Козлов А.В., Шурупов А.В., Маштаков А.В., Шурупов М.А. 5 60

Источники питания

Достижения в области разработки бетавольтаических источников питания (*обзор*).

Краснов А.А., Леготин С.А. 4 5

Импульсная техника

Устройство наносекундного инициирования мощных ударных волн.

Коротков С.В., Тоскин А.А., Аристов Ю.В., Коротков Д.А. 1 55

Диодно-транзисторный генератор наносекундных импульсов высокого напряжения.

Коротков С.В., Аристов Ю.В., Жмодиков А.Л. 1 59

Твердотельный разрядник для сильноточного источника энергии на основе емкостного накопителя с рабочим напряжением 50 кВ.

Гусев А.Н., Козлов А.В., Шурупов А.В., Маштаков А.В., Шурупов М.А. 1 64

Высокочастотный источник накачки активных сред на парах металлов.

Торгаев С.Н., Огородников Д.Н., Мусоров И.С., Кулагин А.Е., Евтушенко Г.С. 1 69

Генератор высоковольтных импульсов на основе распределенного сумматора с общим изолирующим дросселем.

Кладухин В.В., Храмцов С.П., Ялов В.Ю. 2 52

Прецизионный делитель высоковольтных импульсных сигналов.

Батраков А.М., Васильев М.Ю., Котов Е.С., Штро К.С. 2 58

Экспериментальные исследования и оптимизация компактного многоканального генератора наносекундных импульсов.

Бурцев В.А., Большаков Е.П., Гетман Д.В., Калинин Н.В. 6 26

Временная зависимость сопротивления плазменно-эрозионного размыкателя для цепей быстрого разряда.

Анциферов П.С., Дорохин Л.А., Павлов А.А. 3 69

Наносекундный генератор высоковольтных импульсов на основе искусственных двойных формирующих линий.

Бурцев В.А., Бурцев А.А., Бельский Д.Б., Большаков Е.П., Бронзов Т.П., Ваганов С.А., Гетман Д.В., Елисеев С.И., Калинин Н.В., Самохвалов А.А., Сергушичев К.А., Смирнов А.А., Тимшина М.В. 4 23

Коммутаторный индуктивно-конденсаторный генератор мощных импульсов тока.

Носов Г.В., Носова М.Г. 4 29

Широкодиапазонная счетно-электрометрическая система регистрации импульсов вторично-электронного умножителя.

Колобов В.В., Баранник М.Б. 5 66

Динисторы с субнаносекундным временем переключения.

Коротков С.В., Аристов Ю.В., Жмодиков А.Л., Коротков Д.А. 5 75

С.в.ч.-техника

Метод определения углов пеленга и крена летательного аппарата по ортогонально линейно поляризованным сигналам радиомаяка.

Гулько В.Л., Мещеряков А.А. 6 32

МАСС-СПЕКТРОМЕТРЫ

Мобильный лабораторный масс-спектрометр на основе коммерческого анализатора остаточных газов CIS-300.
Кусков М.Л., Лейпунский И.О., Горбачев А.Н., Жигач А.Н., Кудров Б.В. 6 127

Цифровой модуль регистрации сигнала для пылеударного масс-спектрометра.
Пияков И.В., Калаев М.П., Сухачев К.И., Воронов К.Е., Телегин А.М. 6 83

ПЛАЗМЕННЫЕ И ИОННЫЕ ПРИБОРЫ

Установка “Вихрь” типа “плазменный фокус” для диагностики радиационно-термической стойкости материалов, перспективных для термоядерной энергетики и аэрокосмической техники.
Грибков В.А., Боровицкая И.В., Демин А.С., Морозов Е.В., Масляев С.А., Пименов В.Н., Голиков А.В., Дулатов А.К., Бондаренко Г.Г., Гайдар А.И. 1 75

Экспериментальная установка для моделирования процессов электроискрового плазменного спекания.
Кудряшов В.А., Годин С.М., Вадченко С.Г., Рогачев А.С. 1 84

Регистрация оптических изображений дугового разряда в вакууме с помощью электронно-оптического преобразователя с варьируемым временным разрешением наносекундного диапазона.
Давыдов С.Г., Долгов А.Н., Карпов М.А., Корнеев А.В., Никишин Д.В., Пшеничный А.А., Якубов Р.Х. 1 89

Разработка технологии изготовления детекторов для системы атомных анализаторов на токамаке ITER.
Мельник А.Д., Афанасьев В.И., Козловский С.С., Миронов М.И., Наволоцкий А.С., Несеневич В.Г., Петров М.П., Петров С.Я., Чернышев Ф.В. 2 76

Исследование процессов рассеяния ионов и нейтральных атомов с использованием стенда нейтральных частиц.
Моисеенко Д.А., Шестаков А.Ю., Вайсберг О.Л., Журавлев Р.Н., Шувалов С.Д., Митюрин М.В., Нечушкин И.И., Моисеев П.П. 2 81

Установка для исследования люминесценции фосфоров при возбуждении атомно-молекулярными пучками.
Ван Яомин (Wang Yaoming), Тюрин Ю.И., Никитенков Н.Н., Сыпченко В.С., Никитенков А.Н., Чжан Ле (Zhang Le) 2 87

Методы исследования спектров импульсного рентгеновского излучения и эмиссии электронов плазмы микропинчевого разряда.
Башутин О.А., Григорьева И.Г., Корф А.Н., Салахутдинов Г.Х. 3 73

Ионный диод с магнитной самоизоляцией для генерации ионных пучков алюминия.
Шаманин В.И., Ремнёв Г.Е., Тарбоков В.А. 4 35

Продольное электрическое поле в режимах омического и электронного циклотронного резонансного нагрева плазмы в стеллараторе Л-2М.
Мещеряков А.И., Вафин И.Ю., Гришина И.А. 5 82

ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ

Пикосекундный электронно-оптический диссектор со скрещенной разверткой.
Андреев С.В., Воробьев Н.С., Дорохов В.Л., Заровский А.И., Комельков А.С., Куркин Г.Я., Мешков О.И., Смирнов А.В. 1 96

Поворот немонохроматичных электронных пучков магнитными зеркалами.
Безуглов В.В., Брязгин А.А., Власов А.Ю., Воронин Л.А., Коробейников М.В., Максимов С.А., Мелехова Р.В., Нехаев В.Е., Пак А.В., Радченко В.М., Сидоров А.В., Ткаченко В.О., Факторович Б.Л., Штарклев Е.А. 2 95

Сравнение широкоапертурных низкоэнергетичных ускорителей электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда с ускорителями на основе протяженных термоэмиттеров.

Баранов Г.А., Гурашвили В.А., Джигайло И.Д., Комаров О.В., Косогоров С.Л., Кузьмин В.Н., Немчинов В.С., Сень В.И., Успенский Н.А., Шведюк В.Я. 2 102

Быстродействующий регулятор анодного напряжения гиротрона.

Мовшевич Б.З., Цветков А.И., Глявин М.Ю., Фокин А.П. 6 40

Наносекундный ускоритель электронов с неоднородной передающей линией и газонаполненным диодом.

Тарасенко В.Ф., Алексеев С.Б., Бакшт Е.Х., Бураченко А.Г., Ломаев М.И. 3 78

ОПТИКА

Оптические приборы и измерения

Устройство для контролируемого импульсного теплового воздействия на вещество.

Котов А.Н., Лукьянов К.В., Сафонов В.Н., Старостин А.А., Шангин В.В. 6 133

Акустооптический метод измерения энергогеометрических параметров лазерного излучения.

Гасанов А.Р., Гасанов Р.А., Ахмедов Р.А., Агаев Э.А. 2 109

Акустооптические устройства на основе многолучевой дифракции.

Антонов С.Н., Резвов Ю.Г. 6 46

Измерение спектра отражения в однолучевой схеме.

Ковалёв А.А. 6 53

Юстировка и определение направления оси телескопического резонатора.

Агроскин В.Я., Бравый Б.Г., Васильев Г.К., Гурьев В.И., Каштанов С.А., Макаров Е.Ф., Сотниченко С.А., Чернышев Ю.А. 3 83

Электронно-оптическая камера для исследования процессов в нано- и микросекундном диапазоне.

Алабин К.А., Воробьев Н.С., Заровский А.И., Пелипенко В.И., Чиковани Н.З. 3 86

Применение лазерной теневой фотографии с электронно-оптической регистрацией в хронографическом режиме для исследования динамики ударных волн в прозрачных материалах.

Демидов Б.А., Казаков Е.Д., Калинин Ю.Г., Крутиков Д.И., Курило А.А., Орлов М.Ю., Стрижаков М.Г., Ткаченко С.И., Чукбар К.В., Шашков А.Ю. 3 90

Оптическая система с усилением яркости для исследования поверхности нанопорошков металлов во время горения.

Губарев Ф.А., Kim S., Li L., Мостовщиков А.В., Ильин А.П. 3 96

Использование полупроводникового лазера с захватом частоты в качестве задающего оптического генератора когерентного рефлектометра для распределенных измерений частоты вибраций.

Спирин В.В., López-Mercado C.A., Wuilpart M., Коробко Д.А., Золотовский И.О., Фотиади А.А. 4 40

Полностью волоконный рефлектометр временной области для измерения длины активных эрбиевых волоконных световодов.

Белокрылов М.Е., Константинов Ю.А., Латкин К.П., Клод Д., Селезнев Д.А., Степин А.А., Конин Ю.А., Щербакова В.А., Кашина Р.Р. 4 45

Теоретическая и экспериментальная оценка точности одновременного распределенного измерения температур и деформаций в анизотропных волоконных световодах методом поляризационно-бриллюэновской рефлектометрии.

Барков Ф.Л., Константинов Ю.А., Бурдин В.В., Кривошеев А.И. 4 51

Разработка экспериментальной установки для акустических исследований компонентов волоконно-оптических измерительных систем.
Власов А.А., Плотников М.Ю., Аширов А.Н., Алейник А.С., Никитенко А.Н. 4 58

Исследование влияния степени акустической герметизации звукозащитных корпусов волоконно-оптических интерферометров на их характеристики.
Власов А.А., Варламов А.В., Аширов А.Н., Кикилич Н.Е., Алейник А.С. 4 67

Метод локализации воздействия в композитном материале с помощью волоконно-оптических датчиков акустической эмиссии.
Бочкова С.Д., Волковский С.А., Ефимов М.Е., Дейнека И.Г., Смирнов Д.С., Литвинов Е.В. 4 73

Исследование свойств цельноволоконного датчика температуры, созданного при помощи эффекта плавления.
Конин Ю.А., Булатов М.И., Щербакова В.А., Гаранин А.И., Токарева Я.Д., Мошева Е.В. 4 78

Формирование волоконных тейперов методом химического травления для применения в волоконных датчиках и лазерах.
Кузнецов П.И., Судас Д.П., Савельев Е.А. 4 83

О минимальной неопределенности измерения коэффициента затухания в одномодовом оптическом волокне, достижимой с использованием рэлеевской рефлектометрии.
Таранов М.А., Горшков Б.Г., Жуков К.М., Гринштейн М.Л. 4 90

Достижение 85-километровой дальности измерений деформации (температуры) с помощью низкокогерентной рэлеевской рефлектометрии.
Таранов М.А., Горшков Б.Г., Алексеев А.Э. 4 96

Когерентный оптический частотный рефлектометр на основе волоконного лазера с самосканированием частоты для сенсорных применений.
Ткаченко А.Ю., Смолянинов Н.Н., Скворцов М.И., Лобач И.А., Каблуков С.И. 4 102

Модель распределенного калориметрического волоконного дозиметра на основе эффекта вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна.
Трегубов А.В., Приходько В.В., Алексеев А.С., Жуков А.В., Новиков С.Г., Светухин В.В. 4 109

Волоконно-оптический датчик одновременного измерения температуры и давления с использованием интерферометра Фабри-Перо и волоконной брэгговской решетки.
Фадеев К.М., Ларионов Д.Д., Жикина Л.А., Минкин А.М., Шевцов Д.И. 4 115

Аппаратный комплекс, реализующий схему одновременного получения изображения быстропротекающего процесса в отраженном и проходящем свете.
Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Крутик М.И., Тотышев К.В., Косяк Е.Г., Кузнецов П.Г., Герасимова Р.В. 5 88

Излучатели света, лазеры и лазерные приборы

Генератор суперконтинуума с накачкой импульсами фемтосекундного лазера на хром-форстерите в прозрачных конденсированных средах.
Крюков И.В., Петров Н.Х., Алфимов М.В. 6 57

Суб- и наносекундные диодные источники света.
Воропай Е.С., Ермалицкий Ф.А., Радько А.Е., Самцов М.П. 1 151

Газоразрядный излучатель с ограничением распространения разряда для регистрации быстропротекающих процессов и инициирования светочувствительных энергонасыщенных материалов.
Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Кикеев В.А., Кузьмин В.А., Тотышев К.В., Косяк Е.Г., Кузнецов П.Г., Герасимова Р.В. 5 92

АКУСТИКА, ВЫСОКИЕ ДАВЛЕНИЯ

Акустооптическая дифракция двухцветного излучения на предельной частоте акустической волны.
Котов В.М., Котов Е.В. 1 110

Определение скорости распространения волнового пакета в композитных материалах.
Матвиенко Ю.Г., Иванов В.И., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Мищенко И.В. 1 115

Методы контроля степени униполярности крупногабаритных кристаллов $LiNbO_3$.
Палатников М.Н., Сандлер В.А., Сидоров Н.В., Ефремов И.Н., Макарова О.В. 3 104

РЕНТГЕНОВСКАЯ ТЕХНИКА

Определение размера фокального пятна микрофокусного источника жесткого тормозного излучения.
Рычков М.М., Каплин В.В., Смолянский В.А. 1 101

МАГНИТНЫЕ ПРИБОРЫ

Магнитобронированная система на основе теплых соленоидов для гироприборов K-диапазона.
Проявин М.Д., Мануилов В.Н., Гачев И.Г., Маслов В.В., Морозкин М.В., Куфтин А.Н., Тай Е.М., Глявин М.Ю. 1 106

Высокочувствительный прибор для магнитооптических исследований.
Зубов В.Е., Белов И.А. 3 160

Установка генерации импульсного магнитного поля до 1.35 Тл.
Калашников С.В., Номоев А.В., Шолохов Е.С., Романов Н.А. 5 156

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Исследование процессов рассеяния ионов и нейтральных атомов с использованием стенда нейтральных частиц.
Моисеенко Д.А., Шестаков А.Ю., Вайсберг О.Л., Журавлев Р.Н., Шувалов С.Д., Митюрин М.В., Нечушкин И.И., Моисеев П.П. 2 81

Экспериментальный комплекс для высокопроизводительного скрининга фотолюминесцентных хемосенсорных материалов.
Юрасик Г.А., Ионов Д.С. 1 121

Установка для исследования процессов селективного лазерного спекания порошковых материалов с высоким пространственным разрешением.
Минаев Н.В., Миронов А.В., Минаева С.А., Миронова О.А., Сячина М.А., Krumins E., Howdle S., Попов В.К. 2 153

Установка для исследования импульсного лазерного воздействия на поверхность материалов.
Жигарьков В.С., Минаев Н.В., Юсупов В.И. 1 153

Установка для эффективного микроструктурирования прозрачных материалов.
Минаев Н.В., Епифанов Е.О., Шубный А.Г., Юсупов В.И. 1 155

ЭКОЛОГИЯ

Спектрофотометрия вод в ультрафиолетовом и видимом диапазоне как элемент экоаналитики водных ресурсов.
Алукер Н.Л., Herrmann M.E., Суздальцева Я.М. 6 64

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, АСТРОНОМИЯ

Электронный компактный спектрометр ЭКОС для спутников CubeSat.

Шувалов С.Д., Шестаков А.Ю., Носов А.В., Митюрин М.В., Моисеенко Д.А., Журавлев Р.Н. 2 113

Моделирование характеристик комплекса зеркальной системы и рентгеновского детектора космического телескопа ART-XC астрофизической обсерватории “Спектр-РГ”.

Павлинский М.Н., Ткаченко А.Ю., Левин В.В., Кривченко А.В., Ротин А.А., Кузнецова М.В., Лапшов И.Ю., Семена А.Н., Семена Н.П., Сербинов Д.В., Кривонос Р.А., Штыковский А.Е., Яскович А.Л., Олейников В.Н., Мереминский И.А., Глушенко А.Г., Мольков С.В., Сазонов С.Ю., Арефьев В.А. 2 118

Компактный мюонный телескоп для мониторинга потоков вторичных космических лучей.

Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б., Германенко А.В., Михалко Е.А., Маурчев Е.А., Щур Л.И. 6 71

Результаты разработки прототипа мобильной РСДБ-станции.

Зотов М.Б., Иванов Д.В., Быков В.Ю., Гренков С.А., Поздняков И.А., Рахимов И.А., Стэмпковский В.Г., Царук А.А., Чернов В.К., Шахнабиев И.В., Шишикин А.М. 6 76

Цифровой модуль регистрации сигнала для пылеударного масс-спектрометра.

Пияков И.В., Калаев М.П., Сухачев К.И., Воронов К.Е., Телегин А.М. 6 83

Наземная установка для детектирования заряженной компоненты космических лучей CARPET.

Филиппов М.В., Махмутов В.С., Стожков Ю.И., Максумов О.С. 3 109

Калибровка измерительных каналов нейтринного телескопа Baikal-GVD.

Аврорин А.В., Аврорин А.Д., Айнутдинов В.М., Bannasch R., Bardáĉová Z., Белолаптиков И.А., Бруданин В.Б., Буднев Н.М., Гафаров А.Р., Голубков К.В., Горшков Н.С., Гресь Т.И., Dvornický R., Домогацкий Г.В., Дорошенко А.А., Джилкибаев Ж.-А.М., Дик В.Я., Диячок А.Н., Eckerová E., Заборов Д.Н., Иванов Р.А., Катулин М.С., Кебкал К.Г., Кебкал О.Г., Кожин В.А., Колбин М.М., Конищев К.В., Коробченко А.В., Кошечкин А.П., Круглов М.В., Крюков М.К., Кулепов В.Ф., Миленин М.В., Миргазов Р.А., Nazari V., Наумов Д.В., Панфилов А.И., Петухов Д.П., Плисковский Е.Н., Розанов М.И., Рушай В.Д., Рябов Е.В., Сафронов Г.Б., Šimkovic F., Скурихин А.В., Соловьев А.Г., Сороковиков М.Н., Štekl I., Суворова О.В., Сушенок Е.О., Таболенко В.А., Таращанский Б.А., Fajt L., Фиалковский С.В., Храмов Е.В., Шайбонов Б.А., Шелепов М.Д., Яковлев С.А. 4 120

Система регистрации космического радиоизлучения в спектральных линиях.

Гренков С.А., Кольцов Н.Е. 4 131

Наземная установка для детектирования нейтральной компоненты космических лучей “Нейтронный детектор”.

Филиппов М.В., Махмутов В.С., Стожков Ю.И., Максумов О.С., Raulin J.-P., Tacza J. 5 96

ПРИБОРЫ ДЛЯ БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЫ

Применение фазовой коррекции для компенсации артефактов движения в спектральной оптической когерентной томографии.

Ксенофонтов С.Ю., Шилягин П.А., Терпелов Д.А., Новожилов А.А., Геликонов В.М., Геликонов Г.В. 1 136

Усовершенствованная система для флуоресцентного анализа in vivo в медицине.

Разницына И.А., Тарасов А.П., Рогаткин Д.А. 2 142

Приемный датчик для специализированного малогабаритного магнитно-резонансного томографа.

Баязитов А.А., Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Шагалов В.А. 6 89

Экспериментальная установка конусно-лучевого компьютерного томографа для медицинских систем рентгеновской визуализации.
Авакян А.К., Дергачева И.Л., Еланчик А.А., Коровкин Д.Ю., Крылова Т.А., Лобжанидзе Т.К., Полихов С.А., Смирнов В.П. 1 159

Ассистивный программно-аппаратный комплекс “Стерх” для осуществления взаимодействия между обездвиженным пациентом и персональным компьютером.
Шелепин К.Ю., Шелепин Е.Ю., Балякова А.А. 1 161

Устройство для электрораздражения лабораторных животных на основе использования генератора тока.
Чихман В.Н., Солнушкин С.Д., Молодцов В.О., Смирнов В.Ю. 2 161

Входное окно мишенной станции для наработки медицинских радионуклидов.
Маслов М.А., Рябов А.Д., Скороднев Н.В., Солдатов А.П. 3 118

Исследование матричных датчиков пульсовой волны.
Явелов И.С., Даниелян Г.Л., Рочагов А.В., Жолобов А.В., Явелов О.И. 3 125

Калибровка поперечного сканирования в приборах оптической когерентной томографии.
Ксенофонтов С.Ю., Моисеев А.А., Маткивский В.А., Шилягин П.А., Василенкова Т.В., Геликонов В.М., Геликонов Г.В. 5 104

Мультиядерный слабопольный магнитно-резонансный минитомограф.
Фролов В.В., Тютюкин К.В., Шубин С.А., Лавров С.А., Богачев Ю.В. 5 111

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ

Широкополосный акселерометр для исследования высокочастотных собственных шумов Земли.
Черепанцев А.С., Салтыков В.А. 1 130

Спектрофотометрия вод в ультрафиолетовом и видимом диапазоне как элемент экоаналитики водных ресурсов.
Алукер Н.Л., Herrmann М.Е., Суздальцева Я.М. 6 64

Автономная низкочастотная широкополосная гидроакустическая излучающая станция с электромагнитным преобразователем.
Пивоваров А.А., Ярощук И.О., Швырев А.Н., Самченко А.Н. 6 95

Спектрорадиометр 5-миллиметрового диапазона для исследования атмосферы и подстилающей поверхности.
Швецов А.А., Беликович М.В., Красильников А.А., Куликов М.Ю., Кукин Л.М., Рыскин В.Г., Большаков О.С., Леснов И.В., Щитов А.М., Фейгин А.М., Хайкин В.Б., Петров И.В. 6 100

Метод измерения количества незамерзшей воды в мерзлых грунтах.
Григорьев Б.В. 2 159

Адаптивный приемник последовательных цифровых сигналов в канале связи сейсморегистрирующей аппаратуры.
Сенин Л.Н., Сенина Т.Е. 5 158

Метод определения углов пеленга и крена летательного аппарата по ортогонально линейно поляризованным сигналам радиомаяка.
Гулько В.Л., Мещеряков А.А. 6 32

Система многочастотного акустического зондирования для исследования акустических характеристик верхнего слоя моря.
Буланов В.А., Корсков И.В., Соседко С.Н., Стороженко А.В. 3 131

Исследование влияния метода крепления волоконно-оптической сейсмической косы при буксировке на параметры ее выходного сигнала.
Власов А.А., Плотников М.Ю., Лавров В.С., Киселев С.С., Алейник А.С. 4 138

Принципы информационной безопасности физических каналов оптических сетей доступа.
Горлов Н.И., Богачков И.В. 4 145

Инфразвуковые станции КИЗ для геофизических исследований и мониторинга.
Иванов В.Н., Русаков Ю.С. 5 117

ЛАБОРАТОРНАЯ ТЕХНИКА

Общие вопросы

Предусилитель для CdHgTe-фотодетектора.
Казанцев Д.В., Казанцева Е.А. 1 144

Источник неравновесной аргоновой плазмы на основе объемного тлеющего разряда атмосферного давления.
Семенов А.П., Балданов Б.Б., Ранжуров Ц.В. 2 149

Установка для исследования процессов селективного лазерного спекания порошковых материалов с высоким пространственным разрешением.
Минаев Н.В., Миронов А.В., Минаева С.А., Миронова О.А., Сячина М.А., Krumins E., Howdle S., Попов В.К. 2 153

Установка для исследования процессов трехмерной криопечати.
Миронов А.В., Алгебраистова П.Ю., Комлев В.С., Миронова О.А., Попов В.К. 6 105

Устройство для совмещения микроструктур на двух подложках с микрометрической точностью.
Гейвандов А.Р., Касьянова И.В. 6 130

Измерение концентрации активаторов рентгенофлуресцентным методом на примере ионов Cr в кристаллах Al_2O_3.
Асадчиков В.Е., Рощин Б.С., Федоров В.А., Нуждин А.Д., Шишков В.А. 3 137

Установка для изготовления оптических диэлектрических микрорезонаторов термическим методом.
Миньков К.Н. 3 142

Конфокальный коллиматор для радионуклидной диагностики и рентгенофлуоресцентного анализа.
Зайцев С.И., Трофимов О.В., Шабельникова Я.Л., Чукалина М.В. 3 147

Устройство для бесконтактного определения распределения фоточувствительности по площади кремниевых $n^+–p(n)–p^+$-структур.
Кошелев О.Г. 4 149

Эксилампы барьерного разряда с выходным окном малого диаметра и их применение.
Авдеев С.М., Бураченко А.Г., Панарин В.А., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. 4 156

Установка для измерения характеристик скоростных электронно-оптических камер, работающих в диапазоне мягкого рентгена и вакуумного ультрафиолета.
Фельдман Г.Г., Лебедев В.Б., Синийчук А.А. 5 127

Установка для исследования процессов пластификации и вспенивания полимерных материалов в сверхкритических средах.
Епифанов Е.О., Минаева С.А., Зимняков Д.А., Попов В.К., Минаев Н.В. 5 134

Тонкие слои, микро- и наночастицы

Угловые распределения при магнетронном распылении поликристаллических мишеней из Mg, Al, Si, Ti, Cr, Cu, Zn, Ge, Zr, Nb, Mo, Ag, In, Sn, W, Pt, Au и Bi.
Рогов А.В., Капустин Ю.В. 5 137

Газоразрядное распылительное устройство
на основе планарного магнетрона с ионным источником.
Семенов А.П., Семенова И.А., Цыренов Д.Б.-Д., Николаев Э.О. 5 143

Газы и жидкости

Изучение газопоглощающих свойств геттерных насосов по различным газам.
Анашин В.В., Краснов А.А., Семенов А.М. 6 109

Экспериментальный стенд для исследования растворимости диоксида углерода
в углеводородах в широком интервале рабочих температур и давлений.
Радаев А.В., Мухамадиев А.А., Сабирзянов А.Н. 6 115

Источник примесного сверхзвукового пучка молекул
щелочно-галоидных солей.
*Азриель В.М., Акимов В.М., Ермолова Е.В., Кабанов Д.Б.,
Колесникова Л.И., Русин Л.Ю., Севрюк М.Б.* 6 120

Установка для изучения процессов в жидких
средах вблизи торца лазерного волокна.
*Минаев Н.В., Жигарьков В.С., Олейничук Е.А.,
Туйцына А.А., Юсупов В.И.* 3 158

Метод эффективного сканирования сверхзвуковых
струй разреженных газов.
Яскин А.С., Каляда В.В., Зарвин А.Е., Чиненов С.Т. 3 152

Акустический газоанализатор.
Алферов В.Н., Васильев Д.А. 5 148

Тепловые и криогенные приборы

Азотный криостат с регулируемой температурой и холодной загрузкой образцов
для измерений оптических спектров.
Мелетов К.П. 2 156

Устройство для контролируемого импульсного
теплового воздействия на вещество.
*Котов А.Н., Лукьянов К.В., Сафонов В.Н.,
Старостин А.А., Шангин В.В.* 6 133

Сверхпроводящий механический осциллятор
с изменяемой резонансной частотой.
Цымбаленко В.Л. 5 153

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ В ЛАБОРАТОРИЯХ

Суб- и наносекундные диодные источники света.
Воропай Е.С., Ермалицкий Ф.А., Радько А.Е., Самцов М.П. 1 151

Установка для исследования импульсного лазерного воздействия
на поверхность материалов.
Жигарьков В.С., Минаев Н.В., Юсупов В.И. 1 153

Установка для эффективного микроструктурирования
прозрачных материалов.
Минаев Н.В., Епифанов Е.О., Шубный А.Г., Юсупов В.И. 1 155

Генератор для магнитомодуляционного
преобразователя слабого магнитного поля.
Сокол-Кутыловский О.Л. 1 157

Экспериментальная установка конусно-лучевого компьютерного томографа для медицинских систем рентгеновской визуализации.
Авакян А.К., Дергачева И.Л., Еланчик А.А., Коровкин Д.Ю., Крылова Т.А., Лобжанидзе Т.К., Полихов С.А., Смирнов В.П. 1 159

Ассистивный программно-аппаратный комплекс “Стерх” для осуществления взаимодействия между обездвиженным пациентом и персональным компьютером.
Шелепин К.Ю., Шелепин Е.Ю., Балякова А.А. 1 161

Метод измерения количества незамерзшей воды в мерзлых грунтах.
Григорьев Б.В. 2 159

Устройство для электрораздражения лабораторных животных на основе использования генератора тока.
Чихман В.Н., Солнушкин С.Д., Молодцов В.О., Смирнов В.Ю. 2 161

Установка для изучения процессов в жидких средах вблизи торца лазерного волокна.
Минаев Н.В., Жигарьков В.С., Олейничук Е.А., Туйцына А.А., Юсупов В.И. 3 158

Высокочувствительный прибор для магнитооптических исследований.
Зубов В.Е., Белов И.А. 3 160

Установка генерации импульсного магнитного поля до 1.35 Тл.
Калашников С.В., Номоев А.В., Шолохов Е.С., Романов Н.А. 5 156

Адаптивный приемник последовательных цифровых сигналов в канале связи сейсморегистрирующей аппаратуры.
Сенин Л.Н., Сенина Т.Е. 5 158

Устройство для совмещения микроструктур на двух подложках с микрометрической точностью.
Гейвандов А.Р., Касьянова И.В. 6 130

Модуль усиления и временной фиксации одноэлектронных сигналов фотоумножителей.
Ермалицкий Ф.А., Радько А.Е., Самцов М.П. 6 125

Устройство для контролируемого импульсного теплового воздействия на вещество.
Котов А.Н., Лукьянов К.В., Сафонов В.Н., Старостин А.А., Шангин В.В. 6 133

Мобильный лабораторный масс-спектрометр на основе коммерческого анализатора остаточных газов CIS-300.
Кусков М.Л., Лейпунский И.О., Горбачев А.Н., Жигач А.Н., Кудров Б.В. 6 127

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 6, с. 161–165

СИГНАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

АННОТАЦИИ СТАТЕЙ, НАМЕЧАЕМЫХ К ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ ПТЭ

DOI: 10.31857/S0032816220060282

ОБЗОРЫ

Харлов А.В. Многокулонные газовые разрядники и их применение в импульсной технике (*обзор*). – 43 с., 19 рис.

Сильноточные высоковольтные замыкающие разрядники являются ключевыми компонентами импульсных источников питания на основе энергоемких конденсаторных батарей. Самыми распространенными на сегодняшний день являются искровые разрядники благодаря относительно простой конструкции, надежности, простоте обслуживания и ремонта. Основным недостатком искровых промежутков является ограниченный срок службы, что прямо или косвенно связано с эрозией электродов. Для предотвращения эрозии электродов были предложены многоканальные разрядники и разрядники с движением канала разряда. В этом обзоре рассмотрены оба типа разрядников, и в обоих случаях Отдел импульсной техники ИСЭ СО РАН занимает лидирующие позиции в мире по их разработке.

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Алексеев В.И., Басков В.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кольцов А.В., Кречетов Ю.Ф., Полянский В.В., Сидорин С.С. Сцинтилляционный годоскопический спектрометр. – 10 с., 9 рис.

Представлены результаты калибровки сцинтилляционного годоскопического спектрометра, предназначенного для регистрации заряженных частиц в эксперименте по поиску “тяжелого электрона” на тормозном пучке фотонов ускорителя “Пахра” ФИАН. При энергии электронов $E = 40$ МэВ относительное энергетическое и координатное разрешения спектрометра составили $\delta = 22\%$ и $\sigma_x = 9.5$ мм соответственно. Обнаружено, что ширину электромагнитных ливней в поперечном направлении при энергии электронов $E < 100$ МэВ можно описать зависимостью $\Delta \sim \ln E$, при $E > 100$ МэВ – зависимостью $\Delta \sim 1/\exp E$.

Васильев И.А., Джилкибаев Р.М., Хлюстин Д.В. Гамма-детектор установки ИНЕС для измерения нейтронных сечений. – 16 с., 11 рис.

Представлены результаты исследования жидкостного сцинтилляционного γ-детектора. Описана электроника, состоящая из предусилителя и усилителя-формирователя сигналов детектора. Разработан метод определения стартового импульса для времяпролетной методики, основанный на регистрации нескольких γ-квантов (>3) от нейтронного источника в узком временном интервале. Данный метод не зависит от временной нестабильности синхроимпульса протонного пучка. Проведено сравнение энергетического разрешения секции γ-детектора с результатами моделирования при регистрации γ-квантов. Показаны возможности γ-детектора по измерению сечений радиационного захвата нейтрона ядром.

Дементьев Д.В., Лыгденова Т.З., Харламов П.И. Исследование и оптимизация прототипа системы охлаждения модуля кремниевой трековой системы эксперимента BM@N. – 19 с., 6 рис.

Протестированы различные материалы для элементов системы охлаждения считывающей электроники кремниевого трекового детектора установки BM@N. Проведены тепловые расчеты при помощи программного пакета ANSYS, а также экспериментальные измерения теплопроводности различных клеев и углепластиковых материалов, по результатам которых были выбраны материалы для тепловых мостов. Проведены тепловые испытания макетов платы со считывающей электроникой на алюминиевом радиаторе, в ходе которых были также протестированы различные термоинтерфейсы.

Дробышевский Ю.В., Анфимов И.М., Варлачев В.А., Кобелева С.П., Некрасов С.А., Столбов С.Н. Анизотропные структуры для концентрации потоков тепловых нейтронов. – 9 с., 8 рис.

Подготовлен и выполнен эксперимент по доказательству возможности создания анизотропных структур, в которых сформированы поверхности стоков тепловых нейтронов с последующей концентрацией в выделенных областях. В основу устройства, обладающего способностью проводить селекцию нейтронов по направлению в пространстве, положен эффект отражения нейтронов от поверхности материалов. Получено экспериментальное подтверждение работоспособности конструкции концентратора нейтронов устройств, формирующих и использующих направленные высокоинтенсивные пучки тепловых нейтронов с каналами эллиптического профиля, выполненного в виде блоков пластин из профилированного графита и алюминия. Экспериментально проверена работоспособность конструкции замедляюще-фокусирующей структуры на базе пакета нейтронных зеркал эллиптической формы, которая позволяет формировать ориентированные пучки тепловых нейтронов из выходящего потока нейтронов реактора. Были использованы кремниевые монокристаллических пластины, применение которых позволяет получать распределения интегральных потоков нейтронов в реакторе с целью регистрации эффекта селективной сепарации тепловых нейтронов. Эксперименты проводили в канале ГЭК-4 на реакторе ИРТ-Т Национального исследовательского Томского политехнического университета. Интегральный поток нейтронов составил $(2.3–3.02) \cdot 10^{17}$ см$^{-2}$. Нейтронный поток детектировали по изменению удельного электросопротивления пластин монокристаллического кремния. Эффект концентрирования тепловых нейтронов зарегистрирован как на

блоке графитовых нейтронных зеркал, так и на блоке алюминиевых тонкостенных эллиптических зеркал.

Егоров В.К., Егоров Е.В., Калин Б.А., Сафонов Д.А. Неразрушающая элементная диагностика поверхности оболочек твэлов ионно-пучковыми и рентгеновскими аналитическими методами. – 16 с., 9 рис.

Представлена характеристика технологии изготовления оболочки тепловыделяющих элементов (твэлов), ориентированных на водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР) с температурой теплоносителя 300–350°С, и указаны предполагаемые направления модификации ее поверхности. Обсуждается методическая база диагностики материалов, развитая на основе ионно-пучковых и рентгеновских методов, которая позволяет характеризовать параметры внешней и внутренней поверхности оболочки твэла без изменения ее формы. Приведены экспериментальные данные, показывающие эффективность предлагаемого аналитического комплекса для характеризации поверхностных слоев оболочки твэлов.

Макаров А.Н., Соколова Е.О., Таскаев С.Ю. Люминесценция литиевой мишени при облучении протонным пучком. – 7 с., 5 рис.

Представлены результаты измерения спектра люминесценции лития при его облучении пучком протонов с энергией 2 МэВ. Разработана и внедрена в эксплуатацию устойчивая к радиационному воздействию оперативная диагностика контроля положения пучка протонов на литиевой мишени, используемая при генерации нейтронов.

Сиксин В.В. Особенности совместной работы координатно-чувствительной камеры на "теплой жидкости" и детектора телевизионного типа. – 9 с., 6 рис.

Рассматриваются особенности конструкции многоканальной падовой (координатно-чувствительной) ионизационной камеры (п.к.) на "теплой жидкости". П.к. предназначена для совместной работы с детектором телевизионного типа для моделирования дозных полей в водном фантоме в режиме сканирующего (модулируемого) "карандашного" протонного пучка. Приведены результаты тестирования электронного тракта камеры п.к. от импульсного рентгеновского источника. П.к., являясь детектором, измеряет абсолютное значение дозы "карандашного" протонного пучка за один импульс, выделившейся в данном вокселе мишени.

ЭЛЕКТРОНИКА И РАДИОТЕХНИКА

Безуглов В.В., Брязгин А.А., Власов А.Ю., Воронин Л.А., Кокин Е.Н., Коробейников М.В., Сидоров А.В., Ткаченко В.О., Штарклев Е.А. Разработка трехмодуляторной системы импульсного питания ускорителя электронов ИЛУ-14. – 6 с., 6 рис.

Описаны системы управления и защиты, позволившие создать уникальный 3-модуляторный источник импульсного питания для ускорителя ИЛУ-14. Также уделено внимание разработке электронных и программных средств, обеспечивших расширение области применения мощного ускорителя электронов с энергией до 10 МэВ в промышленности. Ускоритель является основным элементом промышленного облучательного комплекса, осуществляющего обработку медицинских и промышленных изделий.

Безуглов В.В., Брязгин А.А., Власов А.Ю., Воронин Л.А., Коробейников М.В., Максимов С.А., Пак А.В., Радченко В.М., Сидоров А.В., Ткаченко В.О., Штарклев Е.А. Импульсный источник питания для ускорителей серии ИЛУ на основе емкостных накопителей. – 8 с., 6 рис.

Описан импульсный источник питания на основе емкостных накопителей с частичным разрядом для высокочастотных импульсных линейных ускорителей электронов типа ИЛУ. Максимальное выходное импульсное напряжение источника составляет 36 кВ при токе нагрузки до 250 А и длительности импульса до 1 мс, частота повторения импульсов – до 100 Гц. Источник построен по относительно простой модульной схеме и состоит из десяти последовательно включенных модулей. Собран и испытан с подключением нагрузки один модуль. Схема обеспечивает равномерное потребление тока по всем фазам питающей трехфазной сети 380 В.

Васеленок А.А., Гурашвили В.А., Джигайло И.Д., Кириленко Д.А., Кондратенко А.К., Кузьмин В.Н., Немчинов В.С., Полтанов А.Е., Сень В.И., Туркин Н.Г. Источник питания газоразрядного лазера на основе литий-полимерной аккумуляторной батареи. – 10 с., 10 рис.

Приведены результаты экспериментальных исследований и проведен анализ опыта эксплуатации источника питания непрерывного газового лазера на основе литий-полимерной аккумуляторной батареи без промежуточного преобразователя. Продемонстрирована продолжительная (более четырех лет) работа высоковольтного аккумуляторного источника питания в составе лазерной установки при напряжении холостого хода 7.76 кВ, напряжении под нагрузкой 6.1 кВ, токе нагрузки до 250 А, мощности более 1.5 МВА и энергозапасе 550 МДж. Время срабатывания ключа для отключения нагрузки при пробоях в разрядной камере не превышало 120 мкс. Приведены результаты измерений внутреннего сопротивления аккумуляторов и его изменения в процессе эксплуатации.

Рыбин Ю.В., Еремкин В.В., Марабян А.С. Генератор высоковольтных импульсов с фронтом субнаносекундной длительности, формируемым гиромагнитной передающей линией. – 6 с., 7 рис.

Продемонстрирована возможность обострения фронта импульса напряжения, формируемого высоковольтным импульсным генератором, в гиромагнитной линии за счет возбуждения гиромагнитной прецессии вектора намагниченности насыщенного феррита. На нагрузке 50 Ом получены импульсы напряжения с длительностью фронта 135–140 пс, амплитудой 170 кВ и частотой следования импульсов 300 Гц. Описана схема генератора и приведены результаты экспериментов.

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Abdul Basit, Zenghua Liu, Mubarak Ahmad, Bin Wu, Cunfu He. A novel method for evaluation of surface breaking crack using position time graph. – 15 p., 12 fig. (публикуется только в английской версии ПТЭ).

A large plate like structures can undergo some severe ruptures because of the stress created by the mass and shape. Ruptures are regularly started by surface cracks. For this aim, it is important to evaluate brutality of the noticeable cracks, by constant nondestructive assessments. In this work, a novel method for surface crack depth estimation based on Rayleigh waves by Electromagnetic Acoustic

Transducers (EMATs) is introduced. The method is based on a position-time (P-T) graph for direct transmitted Rayleigh waves between fixed transmitter and uniformly movable receiver on surface of the specimen. The process is repeated on different center frequencies both in the experiment as well as in two-dimensional finite element method simulation on steel plates. One of the specimens was without crack while the other one hold surface cracks with the depth ranging from 3–6 mm. Results obtained from simulation and experiment were significant to estimate crack depth with a maximum error of 7.5%.

Almabouada F. Microsecond Long Pulse Generation of Nd:YAG Laser Using Rayleigh PFN Circuit. – 8 p., 9 fig. (публикуется только в английской версии ПТЭ).

A free-running mode operation of a Nd:YAG laser allowed to obtain long laser pulses varying from tens to hundreds of microseconds. The laser rod was pumped by a xenon flash-lamp that has been electrically supplied by a pulsed current obtained using a PFN (Pulse Forming Network) circuit. The output laser pulse width was increased by increasing the number of the PFN meshes. For a PFN circuit with five meshes, the obtained laser pulse widths were 436 and 700 μs depending on the single-mesh current width. The generation of long laser pulses allowed obtaining multipulse with different laser pulse lengths thanks to the use of an Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) instead of a Silicon Controlled Rectifier (SCR) to control the capacitor discharge time into the flash-lamp. In this mode of operation, the number of pulses and the pulse width could be adjusted. The obtained laser pulse widths were of 100 and 25 μs.

Андреев С.В., Воробьев Н.С., Михальков Ю.М., Смирнов А.В., Шашков Е.В., Турьянский А.Г., Сенков В.М., Пиршин И.В., Фишман Р.И., Гижа С.С. Источник рентгеновского излучения среднего диапазона энергий на основе электронно-оптического преобразователя. – 11 с., 7 рис.

Описан точечный источник рентгеновского излучения диапазона энергий до 40 кэВ, созданный на основе специально разработанного электронно-оптического преобразователя, работающий в импульсном и непрерывном режимах. Основная цель разработки – применение источника для тестирования времяанализирующих рентгеновских электронно-оптических камер. Прибор также может быть использован в рентгеновской микроскопии и спектроскопии в качестве эталонного источника излучения, в медико-биологических исследованиях и ряде других областей.

Аруев П.Н., Бобашев С.В., Красильщиков А.М., Николаев А.В., Петров Д.Ю., Шерстнев Е.В. Архитектура гибридного матричного высокоскоростного детектора формата 32 × 32 для спектрального диапазона вакуумный ультрафиолет–жесткий рентген. – 5 с., 2 рис.

Представлена усовершенствованная архитектура гибридного матричного детектора, работающего в диапазоне вакуумный ультрафиолет–жесткий рентген, формата 32 × 32 для высокоскоростной регистрации профиля излучения высокотемпературной плазмы с энергией фотонов (E_{ph} = 1–10000 эВ). Детектор включает кремниевые фотодиоды, предусилители, систему оцифровки и передачи информации при времени кадра 2 мкс и непрерывной записи до 4 с. При разработке учтен опыт применения предыдущей модели гибридного матричного детектора формата 16 × 16 в токамаках Т-11М и "Глобус-М". Представлены результаты абсолютных калибровок чувствительности фотодиодов в диапазоне энергий 1–60000 эВ. Продемонстрирован функционирующий прототип субмодуля формата 1 × 32.

Крышталь Р.Г., Медведь А.В. Динамические магнонные кристаллы для измерения дисперсии объемных магнитостатических спиновых волн, обусловленных магнитной анизотропией в пленках железоиттриевого граната. – 11 с., 5 рис.

Динамический магнонный кристалл, созданный поверхностной акустической волной, распространяющейся в структуре ГГГ–ЖИГ (галлий-гадолиниевый гранат–железоиттриевый гранат), используется для измерения дисперсии объемных магнитостатических волн, обусловленных магнитной анизотропией в пленке ЖИГ. Такие волны, называемые анизотропно-дипольными магнитостатическими волнами (а.д.м.с.в.), могут распространяться вместе с поверхностными спиновыми волнами в пленках ЖИГ, помещенных в тангенциальное магнитное поле. Экспериментально показано, что в пленках, выращенных методом жидкофазной эпитаксии и не подвергнутых какой-либо дополнительной обработке, существуют а.д.м.с.в. с положительным законом дисперсии. В пленках, подвергнутых дополнительной обработке при нанесении пьезоэлектрической пленки окиси цинка или при бомбардировке ионами бора, закон дисперсии а.д.м.с.в. отрицателен.

Мунтян А.Н., Петров С.И., Романова Н.М., Таран С.С. Методики измерения параметров распространения рентгеновского излучения в замкнутых полостях и определения времени теплового пробоя фольг. – 10 с., 8 рис.

Описаны методики, позволяющие измерять скорость распространения рентгеновского излучения в замкнутых полостях, время теплового прогрева фольг, а также температуру излучения и временные параметры импульсов рентгеновского излучения в экспериментах на установке "Искра-5". Методики основаны на проводимой с использованием рентгеновских фотохронографов пространственно-временной (пространственное разрешение 150 мкм, временное 50 пс) регистрации рентгеновского излучения в четырех узких спектральных интервалах 0.2–1 кэВ, а также на многокадровой регистрации (длительность кадра 100 пс, число кадров – 10, пространственное разрешение – 30 мкм). В проведенных опытах пиковая планковская температура излучения в облучающей мишени составила 110–150 эВ, в дополнительном боксе и за фольгами – 50–90 эВ, скорость распространения излучения по замкнутым полостям находится в диапазоне 0.5–13 мм/нс, время теплового пробоя фольг – в диапазоне 50–550 пс.

Проявин М.Д., Морозкин М.В., Лучинин А.Г., Глявин М.Ю., Денисов Г.Г. Экспериментальное исследование влияния профиля продольного распределения магнитного поля на выходные характеристики гиротрона. – 8 с., 4 рис.

Экспериментально исследовано влияние профиля магнитного поля в пространстве взаимодействия гиротрона на эффективность и частоту генерации. Профилированное магнитное поле создавалось системой из нескольких катушек малой индуктивности. Показана возможность в ~1.3 раза повысить эффективность генерации, что сопоставимо с результатами, получаемыми с использованием одноступенчатой рекуперации остаточной энергии электронного пучка. При этом предложенный метод более прост в реализации и может быть использован совместно с рекуперацией.

Продемонстрирована также возможность управления частотой генерации в пределах, как минимум вдвое превышающих ширину спектра излучения, и с характерными временами порядка миллисекунд. Это позволяет надеяться на успешную реализацию схемы стабилизации частоты гиротрона с помощью малых изменений магнитного поля.

Сергеев В.А., Беринцев А.В., Новиков С.Г., Фролов И.В. Измерение температурного сдвига спектра излучения светодиодов при их включении с помощью фотоприемной КМОП-матрицы. – 8 с., 6 рис.

Исследована динамика температурной трансформации спектра излучения светодиодов с использованием режима “бегущего” затвора фотоприемной комплементарной металлооксидной полупроводниковой (КМОП) матрицы. Разработана установка для измерения параметров сдвига спектра светодиодов при их включении. В основе установки оптическая система спектрофотометра СФ-46 без выходной щели и с фокусирующей системой перед фотоприемной КМОП-матрицей SCMOS-00350KPA с фоточувствительной областью 480 × 640 пикселей и временем построчной регистрации 84 мкс. По быстродействию и разрешающей способности по длине волны (0.125 нм) установка существенно превосходит отечественные и зарубежные спектрометры IS3000-LED, Cary 100/300, Ocean Optic USB2000 и др. Экспериментально получены временные зависимости сдвига спектра красного SMD-светодиода FYLS-3528BURC в первые 40 мс после его включения при различных значениях рабочего тока. Полученные зависимости можно использовать для оценки тепловых параметров светодиодов.

Хамдохов З.М., Федотова Г.В., Самодуров П.С., Шерметова М.А. Холодные катоды на основе сборки микроканальных пластин для маломощных рентгеновских трубок. – 6 с., 6 рис.

Описан простой и экономичный способ изготовления холодного катода (генератора электронов) для миниатюрного и маломощного рентгеновского излучателя. Автоэлектронный генератор содержит сборку из двух микроканальных пластин (м.к.п.) типа шеврон с эмиссионным углеродным слоем из токопроводящего клея Graphite 33, содержащего углеродные наноструктуры (у.н.с.). Рабочее напряжение не превышает 2000 В. Установлена зависимость выходного тока генератора электронов от расстояния между м.к.п. в сборке. Так, при увеличении зазора от 0.2 до 0.63 мм максимальная величина постоянного тока возрастает от 0.65 до 4 мкА, при дальнейшем увеличении зазора до 1.4 мм ток возрастает до 4.5 мкА. Установлено, что достижение максимального тока генератора электронов в импульсном режиме 53 мкА обеспечивается, если на первую в сборке м.к.п. со слоем у.н.с. на входном торце подавать импульсное напряжение амплитудой 800 В, частотой 2.3 кГц и скважностью 28, а на вторую м.к.п. –постоянное напряжение в 1200 В, при этом зазор между м.к.п. в сборке равен 1.4 мм.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

Hongkun Zhou, Lianjin Hong, Xinyi Sun, Wenni Liu. An Inertial-Type Acoustic Vector Sensor Used in Airborne Sonobuoy. – 6 p., 4 fig. (публикуется только в английской версии ПТЭ).

An inertial-type acoustic vector sensor (AVS) prototype used as an acoustic directional receiver in the airborne sonobuoy was designed, fabricated and tested. The AVS prototype consists of a hydrophone, a biaxial piezoelectric accelerometer, a magnetic compass, and the related signal-conditioning circuits. Calibration experiments were performed in an acoustic standing wave calibrator. Test results show that the acoustic pressure sensitivity of the hydrophone is −157 dB (0 dB re 1 V/μPa), and the biaxial accelerometer provides equivalent acoustic pressure sensitivities of −166 dB and −167 dB (0 dB re 1 V/μPa) at 100 Hz respectively. The operating frequencies of the AVS prototype extend from 5 Hz to around 2.5 kHz, and the equivalent self-noise pressure levels are less than 45dB/√Hz at 1 kHz.

Medjadj T., Ксенофонтов А.И., Климанов В.А., Далечина А.В., Кирпичев Ю.С. Экспериментальная валидация расчетов методом Монте-Карло для аппарата Leksell Gamma Knife Perfexion с помощью радиохромной дозиметрической пленки EBT3 и алмазного детектора T60019 PTW. – 14 с., 4 рис.

Представлены экспериментальные измерения, выполненные при помощи дозиметрической пленки GAFChromic EBT3 и алмазного детектора PTW T60019 с целью валидации дозиметрических расчетов для кобальтового аппарата Leksell Gamma Knife Perfexion. Исследовались относительные профили глубинных доз вдоль осей X и Z для коллиматоров размером 4, 8 и 16 мм и относительные факторы выхода. Проверка модели Leksell Gamma Knife Perfexion, разработанной с помощью программного обеспечения penEasy, проводилась путем сравнения рассчитанных факторов выхода и боковых профилей доз с соответствующими экспериментальными результатами. Разница между рассчитанными факторами выхода и результатами измерений составила 1.8% и 2.1% соответственно для коллиматоров размером 8 и 4 мм. Результаты сравнения расчетов в penEasy и измерений с помощью дозиметрической пленки EBT3 демонстрируют хорошее совпадение. Разница в факторах выхода составила 0.4% и –0.7% соответственно для коллиматоров 8 и 4 мм. Экспериментальные результаты для относительных дозовых профилей, измеренных обоими детекторами, также согласуются с расчетами методом Монте-Карло. При сравнении измеренных и рассчитанных дозовых профилей гамма-индекс составил (3%, 1 мм) < 1.

Yıldırım I.D., Sarioglu B., Gokdel Y.D. 3D Printed Head for a Handheld Laser Scanning Confocal Microscope. – 10 p., 6 fig. (публикуется только в английской версии ПТЭ).

The laser scanning confocal microscope head can axially move and perform z-slicing. The presented confocal microscope head is composed of (1) an optical fiber bundle, (2) a custom-designed mechanical housing and lastly, (3) an embedded electronic system to control the head and gather images from the samples. The dimensions of the housing are 88 mm × 160 mm × 110 mm; and it is 3D printed with 30% filling ratio using standard PLA 3D printing material. The presented handheld confocal microscope is capable of moving with 1 μm step size back and forth in axial direction and has a dynamic range of 2 cm. The results show that cost-effective 3D printing methods are suitable for realizing a handheld confocal microscope with an axial movement feature. Using cheap and replaceable 3D printed parts can ease the cleaning and disinfection procedures in clinical practices.

Демихов Е.И., Протопопов А.В., Дмитриев Д.С., Багдинова А.Н., Лысенко В.В., Рыбаков А.С., Константинов М.В., Ивлев Д.А., Буякас В.И., Гиппиус А.А. Радиочастотные катушки для магнитно-резонансного микроскопа на основе безгелиевого томографа с полем 1.5 Тл. – 10 с., 8 рис.

Разработаны радиочастотные катушки для изучения малых объектов с использованием магнитно-резонансного микроскопа с полем 1.5 Тл. Получено изображение мозга крысы высокой диагностической ценности. Предложенный подход может быть использован при создании микроскопа на основе ядерного магнитного резонанса.

ЛАБОРАТОРНАЯ ТЕХНИКА

Elif Ebru Ermis, Cuneyt Celiktas. A Different Method to Determine the Gamma-ray Linear Attenuation Coefficient. – 6 p., 3 fig. (публикуется только в английской версии ПТЭ).

Gamma-ray linear attenuation coefficient values of Pb, Fe and Al absorber materials were investigated. A fast coincidence timing measurement spectrometer was used for this purpose differently from other traditional spectrometers. A solid point ^{22}Na positron source was utilized for the annihilation radiations. Obtained results were compared with those of XCOM program and literature values.

Huiying Wang, Chengyun Liu, Sijin Wu, Weixian Li. Simultaneous measurement of Three-dimensional Displacement Gradients Using Tri-color Digital Shearography. – 14 p., 8 fig. (публикуется только в английской версии ПТЭ).

A tri-color Michelson-type spatial phase-shift digital shearography is introduced to measure three displacement gradients, including one out-of-plane component and two in-plane components, simultaneously. By using this setup, three shearograms are recorded simultaneously in a single frame. The high-frequency components of these shearograms are then separated in the frequency domain due to their different spatial frequencies which are produced by the use of three lasers with different wavelength, yielding three individual phase maps with which the three displacement gradients are solved. The detailed capability of the proposed approach is described by theoretical discussion as well as experimental demonstration.

Алабин К.А., Воробьев Н.С., Заровский А.И. Измерение времени задержки запуска электронно-оптической камеры. – 6 с., 4 рис.

Представлена методика измерения времени срабатывания (мертвого времени) электронно-оптических камер (э.о.к.) для нескольких длительностей развертки. Как правило, время срабатывания э.о.к. измеряется только для самой короткой развертки, что усложняет синхронизацию запускающего импульса э.о.к. с исследуемым процессом при работе на других развертках. Использование в качестве метки светового импульса лазерного диода с фронтом ≤1 нс позволило существенно уменьшить неопределенность отсчета момента появления импульса на камере. Кроме того, предложенная методика позволяет учитывать все возможные задержки срабатывания, что повышает точность измерений, а также измерять длительность разверток э.о.к.

Гайнулина Е.Ю., Корнев Н.С., Минеев К.В., Назаров А.В., Орехов Ю.И. Применение линий передачи с малыми потерями в составе к.в.ч.-радиометра при проведении газодинамических экспериментов. – 9 с., 7 рис.

Исследуется возможность применения сверхразмерных прямоугольных металлических волноводов в составе линии передачи к.в.ч.-радиометра, предназначенного для исследования быстропротекающих газодинамических процессов. Приводятся результаты численного моделирования и экспериментальных исследований гибкого волновода для связи металлических волноводов стандартного и сверхразмерного сечений, построенного на основе диэлектрического волновода. Проводится количественная оценка затухания сигнала в линии передачи, являющейся комбинацией гибкого волновода и сверхразмерного металлического волновода.

Смолина Е.В. Способ передачи сигнала в условиях высокого уровня помех со стороны мощной плазменной установки. – 7 с., 3 рис.

Проблема передачи сигналов на экспериментальных установках имеет особое значение для физики плазмы вследствие характерных мощных импульсных помех, вызываемых работой энергетического оборудования. В статье описан фильтр на основе широкополосного синфазного трансформатора, предназначенный для передачи сигналов на установке по моделированию солнечной плазмы КИ-1 Института лазерной физики СО РАН. Параметры плазмы, получаемой воздействием импульса мощного CO_2-лазера на твердотельную мишень, резко отличаются от параметров плазмы установок по удержанию, что обусловливает неприемлемость известных методов передачи сигналов на основе классических трансформаторов и оптронов. Наличие рентгеновского излучения также накладывает ограничения на применение оптоволоконных решений.

Тихонов А.М., Асадчиков В.Е., Волков Ю.О., Нуждин А.Д., Рощин Б.С. Термостатная камера для рентгеновских исследований тонкопленочных структур на жидких подложках. – 10 с., 5 рис.

Универсальная термостатная камера предназначена для проведения рентгеноструктурных исследований разного рода адсорбционных слоев на границах воздух – вода и масло – вода. Камера может быть использована как на лабораторном дифрактометре с горизонтальным расположением образца и подвижной системой излучатель – детектор, так и на специализированном спектрометре на синхротронном источнике излучения.

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 6, с. 166–168

СИГНАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

ПРАВИЛА ПУБЛИКАЦИИ В ПТЭ

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Журнал издается на русском языке и в переводе на английский язык. К публикации в журнале принимаются рукописи обзорных, оригинальных работ, краткие сообщения, комментарии, содержащие дискуссию по существу статей, ранее опубликованных в ПТЭ, рекламные объявления о новых физических приборах и материалах. Статьи принимаются от граждан любой страны на русском или английском языке (от авторов из стран дальнего зарубежья).

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ СТАТЕЙ

1. Предмет статьи должен иметь конкретные применения к задачам экспериментов, использующих физические методы, описанные и проиллюстрированные в статье.

2. Описываемый прибор или метод должен быть осуществлен и испытан в эксперименте, показавшем преимущества по сравнению с опубликованными ранее, и эти преимущества нужно четко указать в статье.

3. Обзор должен быть написан достаточно подробно и ясно для понимания физиками любой специальности. Рекомендуется снабжать обзор сжатым введением, разъясняющим основные задачи, понятия и термины.

4. Статья должна быть достаточно полна и подробна для обеспечения возможности с учетом цитированных публикаций воспроизведения квалифицированным читателем метода и прибора, осуществленного и испытанного авторами. Статья должна давать ясное представление о цели работы, принципе метода или устройства прибора, технических характеристиках, погрешностях измерений, возможностях и особенностях его применения.

5. Комментарий, как и ответ автора, должен касаться только существа обсуждаемой статьи: физических ошибок, неточностей, указания более удачных альтернативных решений и подходов.

6. Краткая информация о новом приборе и материале, изготовленных в лаборатории, 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 описание 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-electonic-version/supplementary-materials/. Объем остальных материалов не должен превышать: комментариев и ответов на них – 2 страниц и 1 рисунка, краткой информации о приборах, изготовленных в лабораториях, – 2 страниц и 1 рисунка, рекламных объявлений – 1 страницы и 1 рисунка на каждую оплаченную полосу.

Посылая рукопись в журнал, автор гарантирует, что соответствующий материал (в оригинале или в переводе на другие языки или с других языков) ранее нигде не публиковался и не находится на рассмотрении для публикации в других издательствах.

Для принятия редколлегией решения о публикации статьи в журнале авторам необходимо представить в редакцию рукопись статьи, сопроводительное письмо от авторов и авторский договор с издателем журнала, заполненный и подписанный автором и всеми соавторами. Авторский договор вступает в силу в случае и с момента принятия статьи к публикации. Формы договоров с издателями и дополнительная юридическая информация размещены на сайтах www.sciencejournals.ru (русская версия) и www.pleiades.online (английская версия). Для публикации в русской версии следует оформить лицензионный договор, бланк которого размещен на сайте www.sciencejournals.ru. 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 www.sciencejournals.ru, 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.

Рукопись желательно присылать по электронной почте. Файлы рукописи, подписанных договоров и сопроводительных документов должны быть собраны в один архив (желательно ZIP). Дополнительные файлы большого объема (например, оригинальные файлы иллюстраций) могут быть переданы в редакцию после принятия статьи к публикации. В случае возникновения у редакции вопросов по предоставленному варианту рукописи редколлегия вправе запросить у авторов ее печатный вариант (или вызвавший вопросы фрагмент).

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.

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 подрисуночная 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 сайтах www.maik.ru (русская версия) и www.pleiades.online (английская версия). Упоминаемые в статье или заметке выпускаемые промышленностью приборы или материалы должны именоваться их паспортным наименованием с указанием типа или марки, а также фирмы-изготовителя с указанием города, страны или Интернет-сайта. Чертежи, графики и схемы должны быть четко выполнены в формате, обеспечивающем ясность понимания всех деталей. Рисунки следует выполнять компактно в целях экономии места. Полезно иметь в виду, что наиболее удобны для типографского воспроизведения рисунки шириной в одну колонку (~8 см), две колонки (~17 см) или во весь лист (17 × 23 см). Поэтому желательно изображать отдельные элементы и надписи на рисунке так, чтобы при уменьшении масштаба рисунка до одного из указанных размеров буквы и цифры приобрели высоту 1.5–2 мм, элементы радиосхем – 3–5 мм, отдельные точки – 1 мм, а линии должны быть при этом разнесены на расстояние не менее 1–2 мм. Величины деталей радиосхем следует указывать непосредственно на чертежах с десятичными приставками, но без наименования единиц, за исключением величины емкостей в микрофарадах, которые пишутся без десятичных приставок (например, 1 Ом – 1; 5.6 кОм – 5.6 к; 2.0 МОм – 2 М; 1.1 ГОм – 1.1 Г; 15 пФ – 15 п; 2.2 нФ – 2 н; 1.0 мкФ – 1). Для изображения элементов схем следует пользоваться стандартными обозначениями. Редакция обращает внимание авторов на необходимость особенно тщательной проверки представляемых рисунков. Фотографии, изображающие наиболее интересные детали или общий вид описываемых приборов или полученные на экспериментальных установках (осциллограммы, треки в камерах, микрофотограммы и т.п.), представляются в виде, соответствующем требованиям МАИК “НАУКА/ИНТЕРПЕРИОДИКА”.

9. К статье должен быть приложен список специфических терминов, материалов и их принятого перевода на английский язык. Необходимо привести также авторский вариант перевода заглавия и аннотации, названия учреждения, направляющего работу, и написание латинскими литерами имен авторов. В списке литературы необходимо указывать ссылку не только на оригинал статьи, но и на ее перевод, если статья вышла в журнале нашего издательства.

При отсутствии хотя бы одного из указанных выше элементов рукопись может быть отклонена без рассмотрения по существу.

3. ФОРМАТ РУКОПИСИ

Технические требования к подготовке текстовой части статьи и иллюстраций размещены на сайтах www.maik.ru (русская версия) и www.pleiades.online (английская версия). Текстовую часть статей желательно готовить с использованием стилевого файла.

4. РАБОТА С ЭЛЕКТРОННОЙ КОРРЕКТУРОЙ

Для работы с электронной корректурой авторам высылается по электронной почте PDF-файл верстки статьи. Файлы можно прочитать и отредактировать с помощью программы Adobe Reader (версии 9 и выше), которую можно бесплатно скачать через Интернет: http://get.adobe.com/reader. На все письма необходимо дать ответ, не изменяя тему письма, даже если замечания или исправления отсутствуют.

Замечания нужно вносить прямо в PDF-файл статьи, используя панель инструментов “Комментарии и пометки” программы Adobe Reader версии 9+. **Не используйте другие программы для правки PDF-файлов,** иначе авторские замечания могут быть потеряны при автоматической обработке ответов.

Нельзя изменять название pdf-файла статьи и тему e-mail сообщения по той же причине.

Подробная инструкция Вам будет выслана вместе с корректурой статьи. Дополнительно ознакомиться с требованиями по внесению исправлений можно на сайтах www.maik.ru (русская версия) и www.pleiades.online (английская версия).