



ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА



www.sciencejournals.ru



Гелиевый криостат замкнутого цикла для мессбауэровских исследований

К статье Старчикова С.С. и др., с. 130



СОДЕРЖАНИЕ

Номер 3, 2023

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Калибровка черенковского монитора протонного пучка

С. В. Акулиничев, Ю. К. Гаврилов, Р. М. Джилкибаев 5

Моделирование детектора антинейтрино для второй нейтринной лаборатории на реакторе СМ-3

А. К. Фомин, А. П. Серебров 9

ЭЛЕКТРОНИКА И РАДИОТЕХНИКА

Прецизионные источники высокого напряжения для детекторов ядерного излучения на стандартном промышленном трансформаторе

*А. Г. Артюх, Г. А. Кононенко,
А. В. Саламатин, Ю. М. Середа* 17

Прецизионный источник тока с накопителем энергии для питания сверхпроводящих структурных магнитов Бустера комплекса NICA

*А. А. Шиянов, Ю. М. Сеннов, С. В. Чистилин,
Г. М. Мустафа, С. И. Гусев, В. Н. Карпинский,
Г. Г. Ходжибагян, А. А. Шурыгин, Н. В. Травин* 23

Мощный источник сверхширокополосного излучения субнаносекундной длительности с управляемыми характеристиками

*Е. В. Балзовский, Ю. И. Буянов, А. М. Ефремов,
В. И. Кошелев, Э. С. Некрасов, С. С. Смирнов* 37

Сильноточный высоковольтный предохранитель для защиты импульсных силовых цепей

Р. Ш. Еникеев, К. С. Сапожников, А. А. Руденко 46

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Эффективный способ генерации и вывода электронного пучка в атмосферу в широкоапертурном ускорителе на основе ионно-электронной эмиссии

*С. Ю. Дорошкевич, М. С. Воробьев, М. С. Торба,
А. А. Гришков, Н. Н. Коваль, С. А. Сулашкин,
В. В. Шугуров, В. А. Леванисов*

53

Управляемое сведение лучей с разными длинами волн посредством акустооптической брэгговской дифракции

В. М. Котов

61

Планарный интерферометр Майкельсона на поверхностных плазмонах терагерцевого диапазона

В. В. Герасимов, А. К. Никитин, А. Г. Лемзяков

67

Прецизионный датчик положения для оперативного контроля лазерного синтеза микроструктур на трехмерных поверхностях оптических материалов

М. А. Завьялова, А. В. Солдатенко, С. А. Кокарев

80

Регистрация рентгеновского изображения с помощью детектора на основе микроканальных пластин

*Ю. М. Яρμοшенко, И. Э. Кантур,
В. Е. Долгих, Т. В. Кузнецова*

91

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

Широкополосная приемная система для радиоинтерферометра нового поколения

*Ю. В. Векшин, М. Б. Зотов, А. С. Лавров,
И. А. Поздняков, Е. Ю. Хвостов, В. К. Чернов*

98

Люминометр.
Принцип работы, устройство и рекомендации при сборке

Р. В. Мальшев, Е. В. Силина

108

Многоканальная установка для исследования гидроэлектродинамических явлений, возникающих при набегании волн на береговую линию озера Байкал

Ю. Б. Башкуев, Д. Б. Аюров, А. Д. Шунков

116

ЛАБОРАТОРНАЯ ТЕХНИКА

Метод проведения усталостных испытаний тонких проволок

*О. И. Аксенов, А. А. Фукс,
Н. А. Волков, А. С. Аронин*

121

Адаптация гидробаллистического стенда для испытаний малогабаритных метательных установок

*А. Н. Ищенко, В. В. Буркин, В. З. Касимов,
А. С. Дьячковский, А. В. Чупашев, А. Ю. Саммель,
К. С. Рогачев, А. Д. Сидоров, И. В. Майстренко,
Л. В. Корольков, В. А. Бураков, Н. М. Саморокова*

125

Модернизированный безжидкостный гелиевый криостат замкнутого цикла для мессбауэровских исследований

*С. С. Старчиков, К. О. Фунтов, В. А. Заяханов,
К. В. Фролов, М. Г. Клёнов, И. Ю. Бондаренко, И. С. Любутин*

130

Твердотельный миниатюрный термостат с программным управлением

*В. А. Зеленков, М. Е. Лебедев,
А. С. Рудый, А. Б. Чурилов*

142

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ В ЛАБОРАТОРИЯХ

Электронный регулятор переменного напряжения

А. Ф. Васильев, И. В. Негинский, А. Л. Якимец

148

Стенд для исследования образцов с газогидратами

*В. И. Юсупов, А. Н. Коновалов,
Н. В. Минаев, С. И. Цыпина, И. С. Семилетов*

151

Встроенная микропроцессорная система регистрации импульсов для четырехканальной системы оптических детекторов на основе 32-битных ARM-контроллеров Миландр 1986VE92Q1

*Н. В. Дунин, В. Б. Дунин, С. А. Савинов,
Т. Е. Демихов, С. Н. Майбуров, Е. И. Демихов*

153

Регистрация рефлекса испуга

*В. О. Молодцов, В. Ю. Смирнов,
С. Д. Солнушкин, В. Н. Чихман*

154

Установка для механических испытаний in situ
в растровом электронном микроскопе

*Т. Д. Пацаев, Е. В. Ястремский, С. В. Крашенинников,
А. Е. Крупнин, К. Г. Антипова, К. Е. Луканина,
Т. Е. Григорьев, Р. А. Камышинский, А. Л. Васильев*

157

СИГНАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Аннотации статей, намечаемых к публикации в журнале ПТЭ

160

Правила публикации в ПТЭ

165

КАЛИБРОВКА ЧЕРЕНКОВСКОГО МОНИТОРА ПРОТОННОГО ПУЧКА

© 2023 г. С. В. Акулиничев^{a,b}, Ю. К. Гаврилов^a, Р. М. Джилкибаев^{a,*}

^aИнститут ядерных исследований РАН

Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а

^bРоссийский научный центр хирургии им. Б.В. Петровского
Россия, 119435, Москва, Абрикосовский пер., 2

*e-mail: rmd@inr.ru

Поступила в редакцию 27.09.2022 г.

После доработки 07.10.2022 г.

Принята к публикации 11.11.2022 г.

Представлены результаты калибровочных измерений черенковского монитора протонного пучка. Получено хорошее согласие измерений монитора с показаниями ионизационной камеры и пластикового монитора. Черенковский монитор не регистрирует фотоны и электроны с энергией ниже 170 кэВ, что важно для подавления низкоэнергетического фона.

DOI: 10.31857/S0032816223020131, EDN: GSKNMH

1. ВВЕДЕНИЕ

Калибровочные измерения двух черенковских мониторов (Ch1, Ch2) протонного пучка [1] проводили на медицинском канале центра коллективного пользования ИЯИ РАН в сравнении с ионизационной камерой (IC) Semiflex Ionization Chamber Type 31010 [2] объемом 0.14 см³, используемой совместно с клиническим дозиметром “RTW Multidos elektrometer” и калиброванным пластиковым монитором (RF) “Gafchromic EBT³” [3].

Ускоритель протонов с энергией 169–209 МэВ работает в диапазоне частот 1–50 Гц, в широком диапазоне интенсивностей протонного пучка — от малых импульсных токов 0.1 мкА до 10 мА, при этом длительность импульса протонов находится в диапазоне от 0.3 до 100 мкс. Черенковский монитор имеет принципиальную возможность работать в этом диапазоне интенсивностей протонного пучка в условиях сильного низкоэнергетического электромагнитного фона. Известные детекторы, такие как ионизационные камеры [4–6] и индукционные датчики тока [7, 8], не могут работать в таком широком диапазоне интенсивностей. Ионизационные камеры хорошо работают в области сравнительно малых токов, до 10 мкА. При больших токах в ионизационных камерах возникают нелинейные эффекты, связанные с пространственным зарядом и рекомбинацией ионов в газе камеры. Индукционные датчики тока работают хорошо в области сравнительно больших токов, выше 10 мкА. Ионизационная камера и пластиковый

монитор измеряют поглощенную дозу ионизирующего излучения. Черенковский монитор измеряет черенковский свет, излучаемый протонами в тонком стеклянном радиаторе монитора. Протоны с энергией 209 МэВ излучают в среднем 0.5 фотона/протон [1] в области чувствительности спектра фотоумножителя XR2020. Монитор не регистрирует фотоны и электроны с энергией ниже 170 кэВ, что важно для подавления низкоэнергетического фона. Поглощенная доза в веществе детекторов и черенковское излучение пропорциональны количеству регистрируемых протонов.

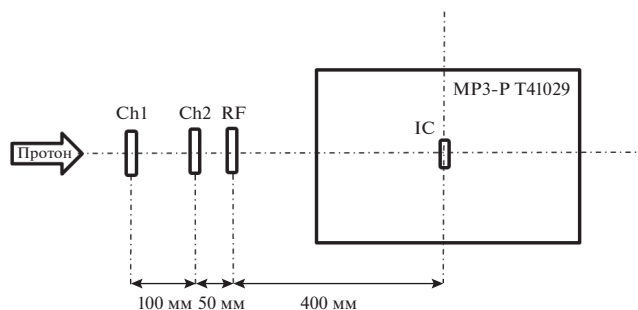


Рис. 1. Схема расположения детекторов и водного фантома MP3-P T41029 на пучке протонов с энергией 169 МэВ. Ch1, Ch2 — черенковские детекторы; RF — калиброванный пластиковый детектор; IC — ионизационная камера.

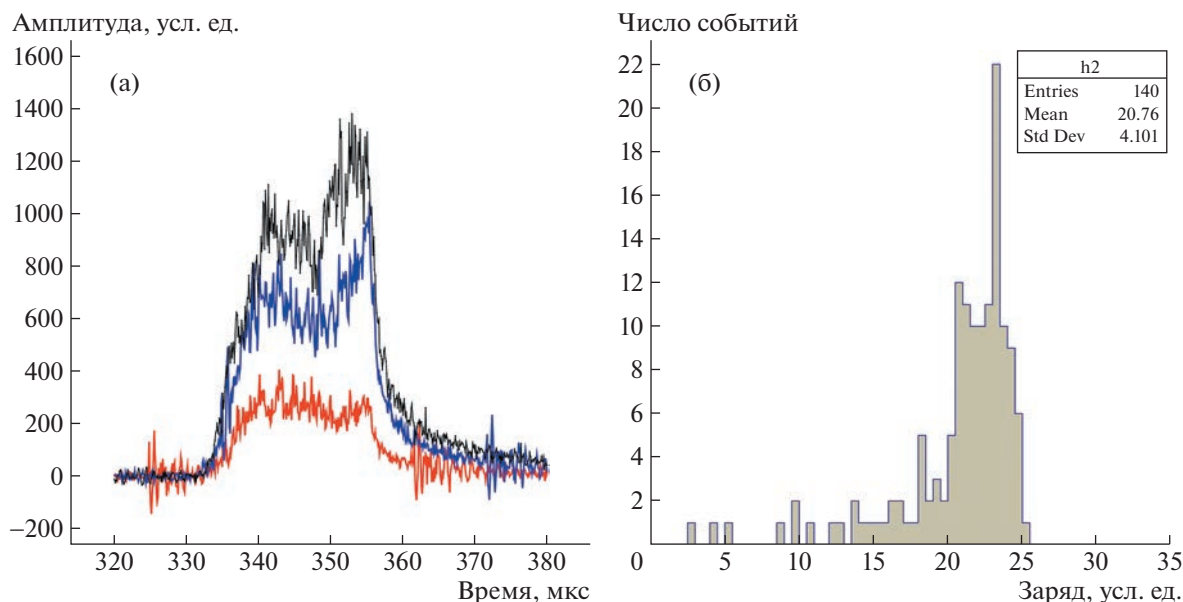


Рис. 2. а – зависимость амплитуды сигнала детектора Ch1 от времени для трех выборочных импульсов (малого, среднего, большого) протонного пучка из цикла D1; б – гистограмма распределения заряда в каждом импульсе для цикла D1, состоящего из 140 импульсов.

2. КАЛИБРОВОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА ПРОТОННОМ ПУЧКЕ

Схема расположения детекторов на пучке протонов с энергией 169 МэВ показана на рис. 1. Протонный пучок полностью поглощался в водном фантоме MP3-PT41029 размером $448 \times 480 \times 350$ мм, в котором в области максимального энерговыделения (брэгговский пик) протонного пучка размещалась ионизационная камера IC. Черенковские Ch1, Ch2 и пластиковый RF мониторы устанавливались по центру протонного пучка перед фантомом в воздушном зазоре.

Измерения проводились на пучке протонов с энергией 169 МэВ и с длительностью импульса протонов, равной 35 мкс, для трех режимов работы ускорителя: цикл D1 – 140 импульсов, D2 – 943 импульса и D3 – 1561 импульс. Детекторы IC и RF измеряют суммарную дозу в цикле от всех импульсов протонов. Детекторы Ch1 и Ch2 измеряют импульс тока во времени для каждого импульса протонов. Интегрирование импульса тока

по времени дает заряд, пропорциональный числу протонов, для каждого импульса.

На рис. 2а приведены зависимости амплитуды сигнала от времени для трех выборочных импульсов. Амплитуда сигнала от детекторов Ch1 и Ch2 измерялась с помощью преобразователя CAEN DT5720 [9]. Гистограмма распределения числа протонов в каждом импульсе для цикла D1, состоящего из 140 импульсов, показана на рис. 2б.

Результаты измерений поглощенной дозы детекторами Ch1, IC и RF в трех режимах работы ускорителя представлены в табл. 1. Ионизационная камера IC и пластиковый монитор RF откалиброваны в грях. Измеренная доза черенковским монитором получена путем интегрирования импульса тока (см. рис. 2а) для определения заряда в каждом импульсе (см. рис. 2б). Суммарные значения заряда детектора Ch1 для всего цикла измерения в табл. 1 представлены в условных единицах.

На рис. 3а показаны результаты измерений дозы пластиковым монитором RF в зависимости от

Таблица 1. Результаты измерений поглощенной дозы ионизирующего излучения детекторами (Ch1, IC и RF) в трех режимах работы ускорителя

Цикл	Число импульсов	Заряд Ch1, усл. ед.	Доза, Гр, измеренная	
			IC	RF
D1	140	1.92	1.32	1.0
D2	943	8.37	8.26	8.0
D3	1561	18.9	18.1	17.8

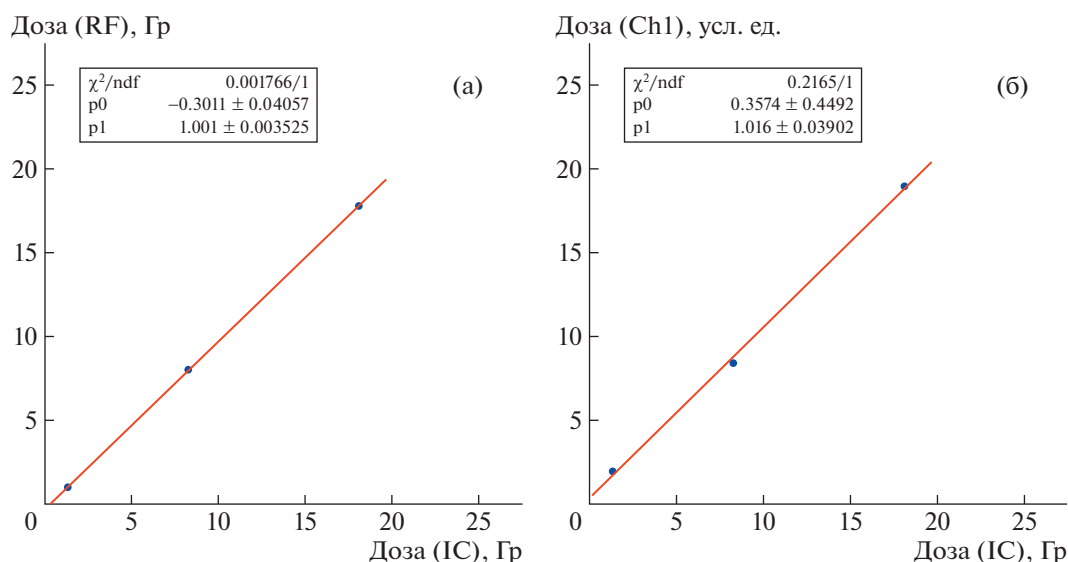


Рис. 3. а – зависимость суммарной дозы, измеренной пластиковым монитором RF, от суммарной дозы, измеренной ионизационной камерой; б – калибровочный график связи результатов измерений суммарной дозы черенковским монитором Ch1 и ионизационной камерой IC. Сплошные линии – результаты подгонок линейными зависимостями.

суммарной дозы, измеренной ионизационной камерой IC, в трех режимах работы ускорителя. Сплошной линией представлен результат фита линейной зависимостью. Результат показывает хорошее соответствие данных, полученных детекторами IC и RF. Это демонстрирует хорошую калибровку детекторов IC и RF. Полученная в результате фитирования линейная зависимость суммарной

дозы, измеренной черенковским монитором Ch1, от суммарной дозы, полученной ионизационной камерой IC, говорит о том, что детекторы хорошо согласуются между собой (рис. 3б). Тем самым показано, что черенковским детектором можно измерять дозу в водном фантоме в области максимального энерговыделения (брэгговский пик) протонного пучка.

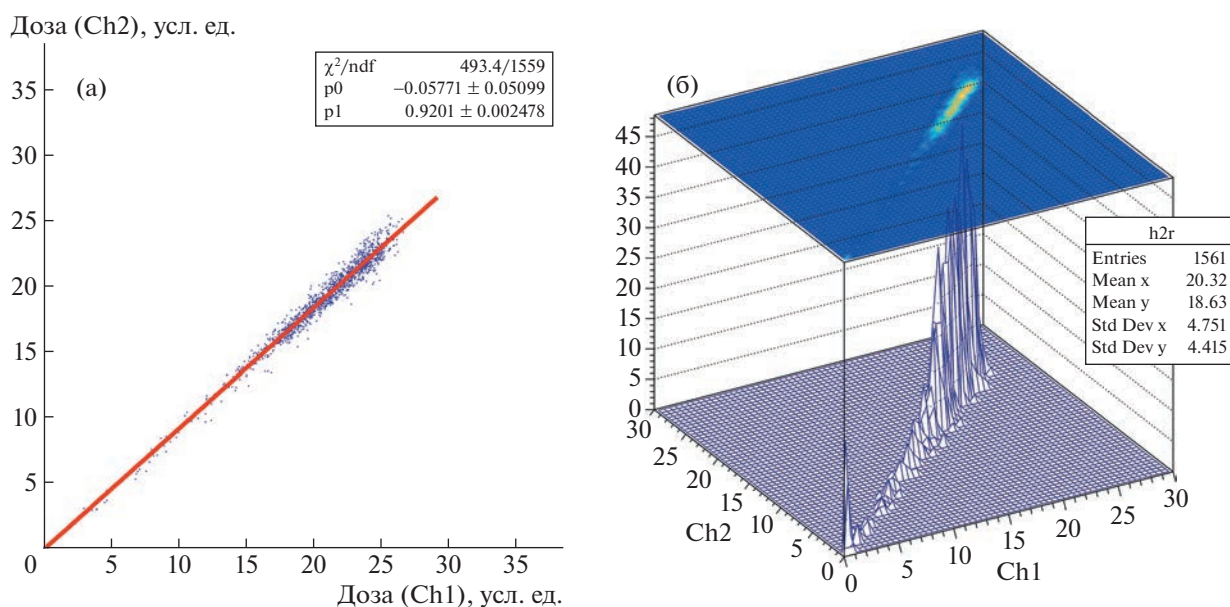


Рис. 4. а – зависимость суммарной дозы, измеренной черенковским монитором Ch2, от дозы, измеренной черенковским монитором Ch1, сплошная линия – результат подгонки линейной зависимостью; б – двумерная гистограмма результатов измерений мониторами Ch1 и Ch2, демонстрирующая степень корреляции и разброс независимых результатов измерений дозы черенковскими мониторами.

Измерения черенковскими мониторами Ch1 и Ch2 хорошо согласуются между собой (рис. 4). Относительную точность измерений дозы монитора Ch можно оценить по разбросу точек (см. рис. 4а) в области 20–25 Гр, ее величина равна ~3%.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты калибровочных измерений черенковским монитором протонного пучка. Получено хорошее согласие результатов измерений монитором с показаниями ионизационной камеры и пластикового монитора. Черенковский монитор не регистрирует фотоны и электроны с энергией ниже 170 кэВ, что важно для подавления низкоэнергетического фона.

БЛАГОДАРНОСТИ

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность И.И. Ткачеву, Д.А. Коконцеву, И.А. Яковлеву и В.Е. Постоеву за поддержку и помощь в работе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования “Ускорительный центр нейтронных исследований структуры вещества и ядерной медицины ИЯИ РАН” при поддержке Министерства образования и науки Российской Федера-

ции в рамках Соглашения о предоставлении субсидии (№ 14.621.21.0014 28.08.2017), уникальный идентификатор RFMEFI62117X0014. Работа поддержана грантом РНФ № 22-25-00211 “Исследование реакции клеток на воздействие рекордно мощных сверхкоротких импульсов протонов”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Джилкибаев Р.М.* // ПТЭ. 2021. № 4. С. 10. <https://doi.org/10.31857/S0032816221040145>
2. www.rpdinc.com “Scanditronics ionization chamber”
3. www.gafchromic.com. An Efficient Calibration Protocol for Radiochromic Film, April 2011 available at www.filmqapro.com
4. *Boag J.W.* Ionization chamber in Radiation dosimetry. USA, NY.: Press Academic, 1968.
5. *McDonald J., Velissaris C., Viren B., Diwan M., Erwin A., Naples D., Ping H.* // Nucl. Instrum. and Methods in Physics Res. 2003. V. A496. P. 293. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)01768-0](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)01768-0)
6. *Абрамов А.И., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С.* Основы экспериментальных методов ядерной физики. М.: Атомиздат, 1970.
7. *Reinhardt-Nikoulin P., Gaidash V., Menshov A., Mirzozjan A., Feschenko A.* // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Physics Investigations. 2006. V. 2 (46). P. 113.
8. *Дьяченко А.Ф.* // Вестник Харьковского университета. Серия физика. 2010. Вып. 1 (45). № 887. P. 118.
9. CAEN DT5720. 4 channel 12 bit waveform digitizer. <http://www.caen.it>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТЕКТОРА АНТИНЕЙТРИНО ДЛЯ ВТОРОЙ НЕЙТРИННОЙ ЛАБОРАТОРИИ НА РЕАКТОРЕ СМ-3

© 2023 г. А. К. Фомин^{а,*}, А. П. Серебров^а

^а *Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”
Россия, 188300, Гатчина Ленинградской обл., мкр. Орлова Поща, 1*

**e-mail: fomin_ak@pnpi.nrcki.ru*

Поступила в редакцию 06.10.2022 г.

После доработки 27.11.2022 г.

Принята к публикации 28.11.2022 г.

Выполнено моделирование эксперимента по поиску стерильного нейтрино с новым детектором для второй нейтринной лаборатории на реакторе СМ-3 (Дмитровград, Россия). Детектор сцинтилляционного типа предназначен для регистрации реакторных антинейтрино и имеет многосекционную структуру с горизонтальным расположением секций. В результате моделирования получены распределения счетов от мгновенных и задержанных сигналов, а также эффективность детектора в зависимости от выбранных порогов. Проведено моделирование потока антинейтрино с учетом размеров активной зоны реактора и ее пространственного расположения по отношению к детектору. Благодаря этому рассчитан эффект, который должен быть получен в результате измерений для заданных параметров осцилляций и энергетического разрешения детектора.

DOI: 10.31857/S0032816223020179, EDN: GTCCFD

1. ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени результаты ряда экспериментов побуждают к обсуждению возможности существования стерильного нейтрино, имеющего значительно меньшее сечение взаимодействия с веществом, чем, например, электронные антинейтрино от реактора. Предполагается, что благодаря переходу реакторных антинейтрино в стерильное состояние может наблюдаться эффект осцилляций на коротких расстояниях от реактора и дефицит потока реакторных антинейтрино на больших расстояниях. Процесс осцилляций в стерильное состояние может быть описан на коротких расстояниях следующей формулой:

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m_{14}^2 L}{E_{\bar{\nu}}} \right), \quad (1)$$

где L , м — расстояние, которое антинейтрино пролетело от реактора; $E_{\bar{\nu}}$, МэВ — энергия антинейтрино; Δm_{14}^2 , эВ² — разность квадратов масс электронного нейтрино и стерильного нейтрино; $\sin^2 2\theta_{14}$ — угол смешивания электронного нейтрино и стерильного нейтрино.

Аномалии обнаружены в нескольких ускорительных и реакторных экспериментах: LSND [1], MiniBooNE [2], реакторная аномалия [3], а также

в экспериментах с радиоактивными источниками GALLEX/GNO, SAGE и BEST [4–6]. Наконец, в эксперименте “Нейтрино-4” был обнаружен эффект осцилляций с параметрами $\Delta m_{14}^2 = 7.3$ эВ² и $\sin^2 2\theta = 0.36$ на уровне достоверности 2.9σ [7].

Эксперимент “Нейтрино-4” осуществляется с конца 2013 года на реакторе СМ-3 (Дмитровград, Россия) в нейтринной лаборатории в помещении 162. Исследовательский реактор СМ-3, благодаря своей высокой мощности (100 МВт), компактной активной зоне (42 × 42 × 35 см), топливу с высоким обогащением и некоторым конструктивными особенностям здания (лабораторные помещения отделены друг от друга толстыми бетонными стенами), является одним из лучших мест для проведения такого эксперимента. Идея эксперимента состоит в использовании передвижного секционированного детектора, с помощью которого измеряются поток и спектры антинейтрино на разной удаленности от реактора (6–12 м). Детектор состоит из 5 × 10 вертикальных секций с одним фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) наверху.

Для развития эксперимента создается вторая нейтринная лаборатория на реакторе СМ-3 в помещении 170. В этом помещении есть возможность измерить поток антинейтрино в более широком диапазоне расстояний (6–15 м), чем в существую-

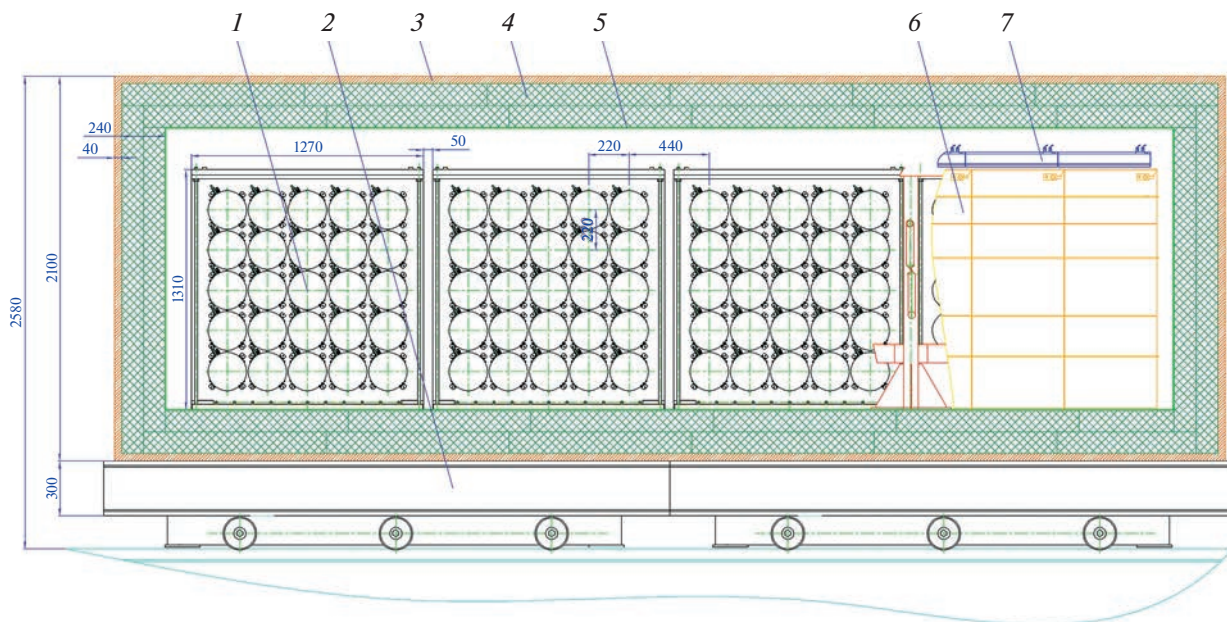


Рис. 1. Схема детектора реакторных антинейтрино на подвижной платформе. 1 – детектор антинейтрино, 2 – подвижная платформа, 3 – медь, 4 – борированный полиэтилен, 5 – борированная резина, 6 – вертикальные панели активной защиты, 7 – верхние панели активной защиты.

шей лаборатории. Измерения будут проводиться с новым усовершенствованным детектором [8]. Также будет использован ряд дополнительных методов для борьбы с коррелированным фоном и для снижения фона случайных совпадений, как то: разделение сигналов по форме импульса, увеличение эффективности активной защиты, оптимизация конструкции пассивной защиты, увеличение концентрации гадолиния.

2. КОНСТРУКЦИЯ ДЕТЕКТОРА

Детектор состоит из четырех идентичных модулей, расположенных на подвижной платформе вместе с активной и пассивной защитой (рис. 1). Благодаря перемещениям детектора будет охвачен весь диапазон расстояний до активной зоны реактора. Каждый из четырех модулей состоит из 5×5 горизонтальных секций размерами $21.6 \times 21.6 \times 116.6$ см с жестко фиксированными перегородками между ними. Перегородки служат для предотвращения выхода света за пределы секции. При проведении измерений детектор будет перемещаться в различные позиции на расстояния, кратные размеру секции. Таким образом, каждая точка будет промерена разными секциями и усреднена возможная разница в эффективности секций детектора. Секции заполнены жидким сцинтиллятором. Материал сцинтиллятора – минеральное масло (CH_2) с добавкой гадолиния. Световой выход сцинтиллятора составляет 10^4 фотонов на 1 МэВ.

В каждой секции с торцов расположены два ФЭУ Hamamatsu R5912.

Расчетная схема отдельного модуля представлена на рис. 2. Жидкий сцинтиллятор отделен от ФЭУ стенкой из прозрачного оргстекла толщиной 3 см. Между стенкой и ФЭУ расположен цилиндрический световод. Оптический контакт отсутствует, между поверхностью ФЭУ и прозрачной стенкой имеется воздушный зазор.

Детектор сцинтилляционного типа основан на использовании реакции обратного β -распада: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$. Образовавшийся позитрон аннигилирует с испусканием двух γ -квантов с энергией 511 кэВ каждый, которые разлетаются в противоположных направлениях. Образовавшийся нейтрон поглощается гадолинием с испусканием каскада γ -квантов с суммарной энергией около 8 МэВ. В детекторе будет регистрироваться два последовательных сигнала от позитрона и нейтрона – так называемые коррелированные сигналы. В первом приближении связь между энергией позитрона и антинейтрино линейна: $E_{\bar{\nu}} = E_{e^+} + 1.8$ МэВ. Поэтому спектр антинейтрино в эксперименте восстанавливается из спектра позитронов.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕТОСБОРА

Для моделирования эксперимента разработана с использованием метода Монте-Карло модель, в которой рассчитывается траектория каждого фотона. При расчетах использовался спектр

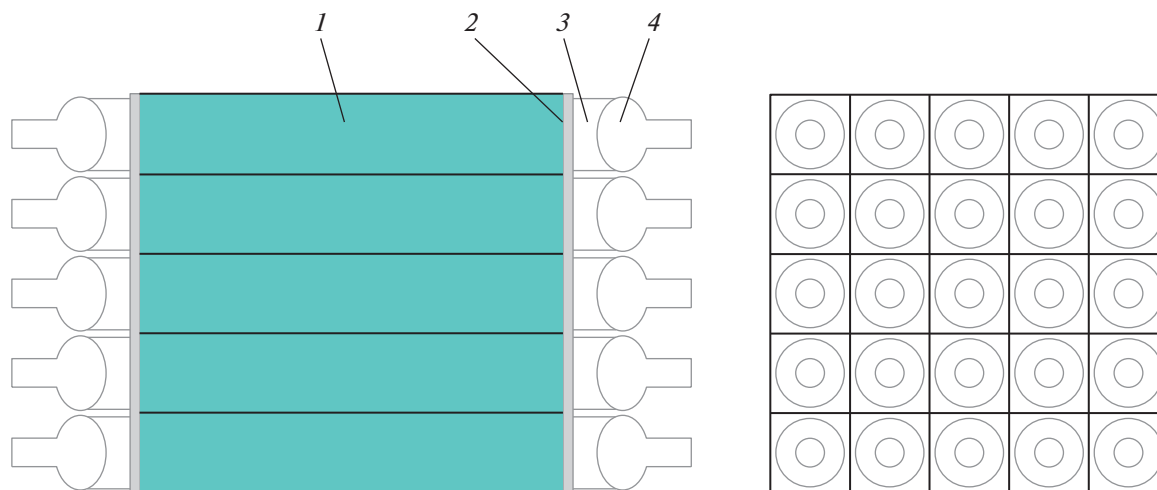


Рис. 2. Расчетная схема одного модуля. 1 – сцинтиллятор, 2 – стенка из оргстекла, 3 – воздушный зазор, 4 – ФЭУ.

antineйтрино распада ^{235}U . Было принято, что пучок антинейтрино направлен вдоль оси детектора. Такое допущение возможно при удалении детектора от активной зоны реактора на расстояние 6–15 м. Направление вылета позитронов принято изотропным. Экспоненциальная длина пробега фотонов в сцинтилляторе при расчете составляет 4 м. Фотоны отражаются от стенок зеркально с вероятностью отражения 0.95. На рис. 3

представлено полученное в результате моделирования методом Монте-Карло распределение счета ФЭУ (число зарегистрированных фотонов) от позитронов разных энергий с учетом энерговыделения по 511 кэВ от каждого из двух γ -квантов. Ширина распределения практически не зависит от энергии позитрона и составляет 500 кэВ, что определяется в основном неполным поглощением γ -квантов в пределах секции. Расщепление рас-

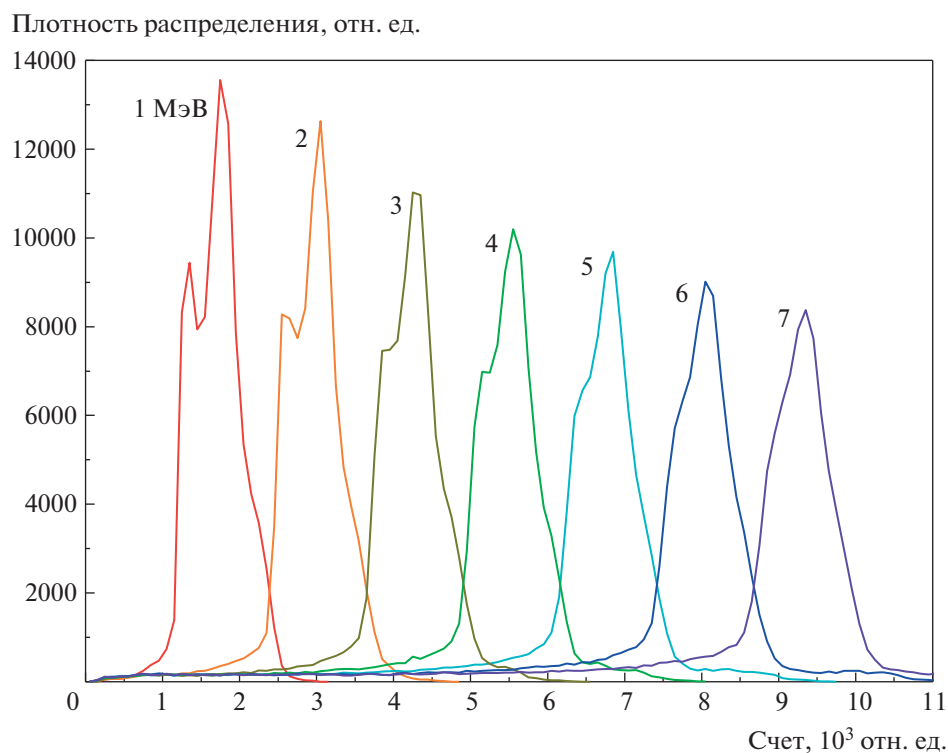


Рис. 3. Распределение счета ФЭУ от позитронных событий с энергией от 1 до 7 МэВ.

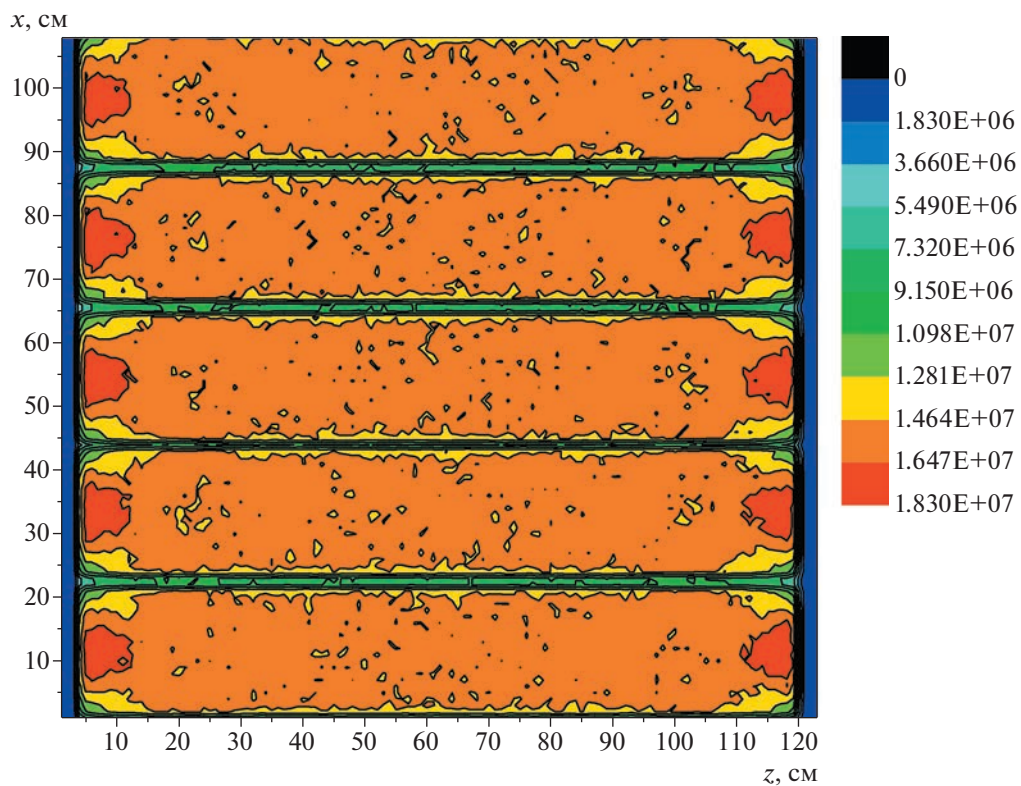


Рис. 4. Счет ФЭУ секций детектора в зависимости от места позитронного события с энергией позитрона 4 МэВ.

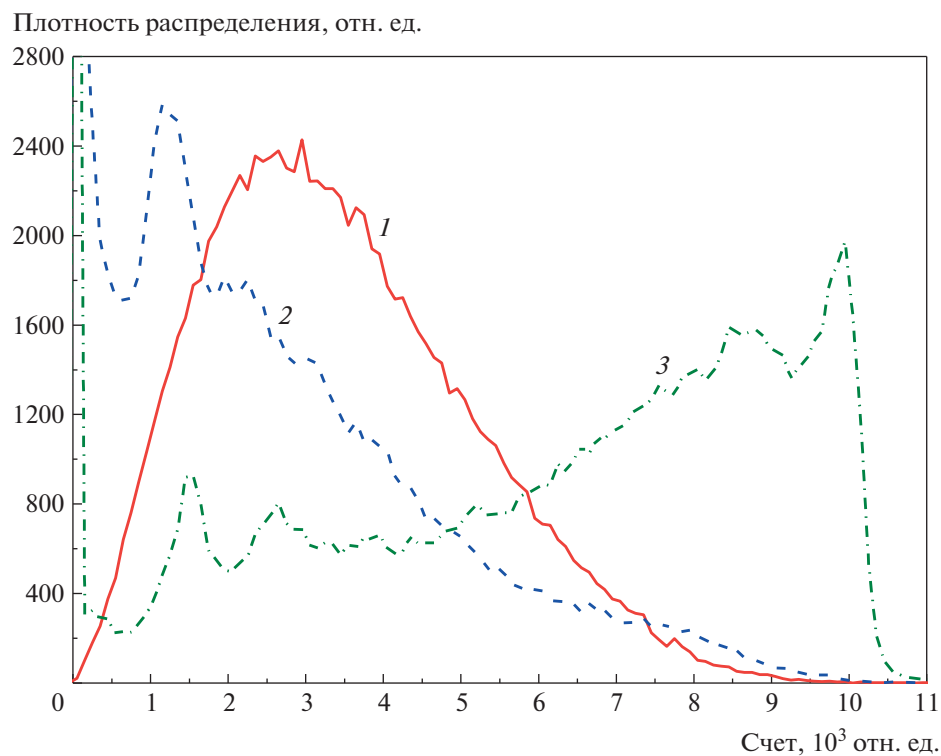


Рис. 5. Распределение сигналов от позитронного события для спектра позитронов (1) и нейтронного события при использовании ФЭУ только секции, в которой произошло событие, (2) и ФЭУ всех секций (3).

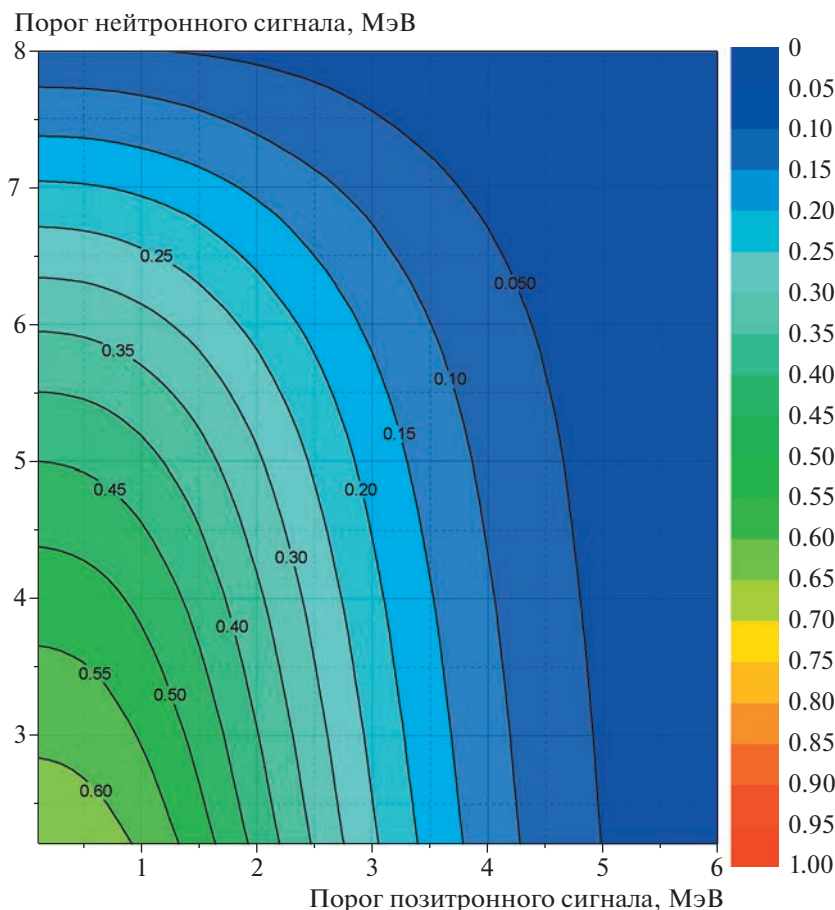


Рис. 6. Эффективность детектора в зависимости от порогов позитронного и нейтронного сигналов.

пределения на два пика при малых энергиях также объясняется этим обстоятельством. Используя данные рис. 3, можно установить связь между счетом фотонов и энергией позитрона.

На рис. 4 показан счет ФЭУ в зависимости от места позитронного события с энергией позитрона 4 МэВ. Эффективность транспортировки света для прямых углов падения на зеркальные стенки световода хуже из-за многократного переотражения между стенками. Поэтому свет с дальних позиций до ФЭУ доходит хуже, чем с ближних. В связи с этим в установке используется эффект полного внутреннего отражения света на границе сцинтиллятор–воздух при малых углах падения, чтобы улучшить равномерность сбора света с разных расстояний.

На рис. 5 представлены распределения сигналов от позитронных и нейтронных событий. В эксперименте порог регистрации позитронного сигнала будет 1.5 МэВ. Для спектра позитронов эффективность регистрации при таком пороге составляет $\epsilon_{e^+} = 0.817(5)$.

При регистрации нейтронного сигнала предполагается использовать порог 3.2 МэВ. Это необходимо для подавления фона случайных совпадений, связанного с естественной радиоактивностью. При этом эффективность регистрации нейтронного сигнала при учете счета ФЭУ всех секций детекторного модуля составляет $\epsilon_n = 0.722(5)$. При учете счета ФЭУ только той секции, в которой произошло событие, $\epsilon_n = 0.217(5)$. С учетом того, что примерно 20% нейтронов захватывается водородом с выделением около 2.2 МэВ, эффективность при учете ФЭУ всех секций модуля равна $\epsilon_n = 0.578(5)$. В итоге эффективность детектора, полученная в результате моделирования с учетом порогов позитронного и нейтронного сигналов, составляет $\epsilon = 0.472(5)$. Зависимость эффективности детектора от порогов при учете счета ФЭУ всех секций модуля показана на рис. 6.

Однако следует заметить, что при используемой в эксперименте обработке данных методом относительных измерений эффективность детек-

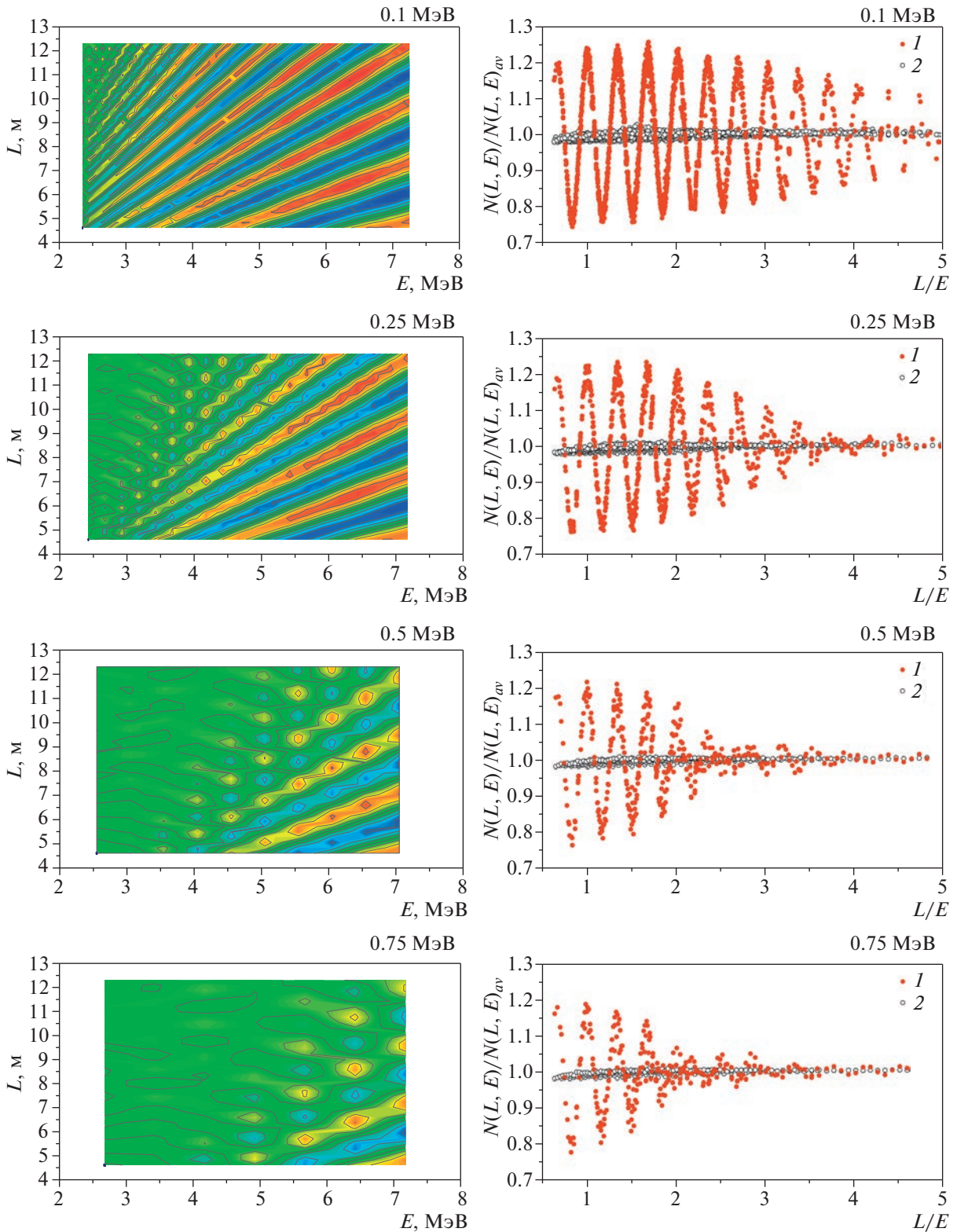


Рис. 7. Слева – моделирование отношения $N_{ik} L_k^2 / \left(K^{-1} \sum_k^K N_{ik} L_k^2 \right)$ при разном энергетическом разрешении детектора; справа – эффект осцилляций: 1 – моделирование с осцилляциями антинейтрино при $\sin^2 2\theta_{14} = 0.36$ и $\Delta m_{14}^2 = 7.3 \text{ эВ}^2$, 2 – без осцилляций.

тора не входит в задачу, хотя и влияет на точность измерений.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКА АНТИНЕЙТРИНО

В эксперименте используется метод, основанный на относительных измерениях, при которых исключается форма спектра, т.е. модельно-независимый анализ данных. Метод основан на использовании уравнения:

$$R_{ik}^{\text{exp}} = (N_{ik} \pm \Delta N_{ik}) L_k^2 / \left(K^{-1} \sum_k (N_{ik} \pm \Delta N_{ik}) L_k^2 \right), \quad (2)$$

где числитель – счет антинейтринных событий с заданной энергией с поправкой на геометрический множитель L^2 ; знаменатель – счет антинейтринных событий с той же заданной энергией, усредненный по всем расстояниям; i – номер интервала по энергии; k – номер интервала по расстоянию.

Выборку данных необходимо проводить по параметру L/E , так как именно от него зависит эффект осцилляций, как видно из формулы (1). Это метод так называемого когерентного сложения результатов измерений, который благодаря выборке данных по переменной L/E дает возможность прямого наблюдения антинейтринных осцилляций.

Поток антинейтрино был смоделирован с учетом размеров активной зоны реактора и ее пространственного расположения по отношению к детектору антинейтрино. Антинейтрино равномерно рождаются в объеме активной зоны реактора с изотропным направлением вылета. Моделирование проведено для точек по расстоянию, соответствующему шагу перемещения детектора, и для разных вариантов разрешения по энергии антинейтрино: 0.1, 0.25, 0.5 и 0.75 МэВ. Результаты моделирования, демонстрирующие эффект осцилляций, показаны на рис. 7.

В расчетах статистическая точность моделирования отношения $\Delta N_{ik}/N_{ik}$ составляла 1%, что значительно лучше, чем в эксперименте. Из результатов моделирования методом Монте-Карло становится очевидным, как должен выглядеть ожидаемый эффект осцилляций на плоскости (E, L) . Следующий важный вывод состоит в том, что процесс осцилляций затухает, и это зависит от энергетического разрешения детектора.

Из проведенного моделирования ясно, что разрешение детектора очень важно для детектирования эффекта осцилляций. Кроме того, эффект осцилляций может быть выявлен путем построения зависимости экспериментально полученного отношения по формуле (2) от L/E . Следует отметить,

что суммирование элементов матрицы отдельно по энергии или по расстоянию существенно снижает возможности для детектирования эффекта осцилляций.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана компьютерная модель нового детектора реакторных антинейтрино в эксперименте “Нейтрино-4” с горизонтальным расположением секций. Проведены расчеты, необходимые для проектирования установки. Получен расчетный спектр антинейтрино, который может быть в дальнейшем сравнен с экспериментальным. В результате моделирования рассчитан эффект, который должен быть получен при измерениях для заданных параметров осцилляций и энергетического разрешения детектора.

В настоящее время в мире существует ряд реакторных экспериментов по поиску стерильного нейтрино на коротких дистанциях: DANSS [9], NEOS [10], PROSPECT [11], STEREO [12]. Эксперимент “Нейтрино-4” показывает наилучшую чувствительность в области больших Δm_{14}^2 благодаря компактным размерам активной зоны реактора, секционной структуре детектора и схеме измерений спектра на разных расстояниях в достаточно широком диапазоне расстояний вблизи реактора. Все эти преимущества сохранятся и в новой лаборатории. Благодаря созданию второй нейтринной лаборатории на реакторе СМ-3 и нового детектора будет получен окончательный ответ на вопрос о существовании стерильного нейтрино с наблюдаемыми в эксперименте “Нейтрино-4” параметрами осцилляций.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-12-00079).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. LSND Collaboration. *Aguilar A. et al.* // Phys. Rev. D. 2001. V. 64. P. 112007. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.64.112007>
2. MiniBooNE Collaboration. *Aguilar-Arevalo A.A. et al.* // Phys. Rev. Letters. 2018. V. 121. P. 221801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.221801>
3. *Mention G., Fechner M., Lasserre Th., Mueller Th.A., Lhuillier D., Cribier M., Letourneau A.* // Phys. Rev. D. 2011. V. 83. P. 073006. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.83.073006>
4. GALLEX Collaboration. *Hampel W. et al.* // Phys. Letters B. 1998. V. 420. P. 114. [https://doi.org/10.1016/S0370-2693\(97\)01562-1](https://doi.org/10.1016/S0370-2693(97)01562-1)

5. SAGE Collaboration. *Abdurashitov J. et al.* // Phys. Rev. C. 1999. V. 59. P. 2246.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevC.59.2246>
6. BEST Collaboration. *Barinov V.V. et al.* // Phys. Rev. C. 2022. V. 105. P. 065502.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevC.105.065502>
7. *Serebrov A.P., Samoilo v R.M., Ivochkin V.G., Fomin A.K., Zinoviev V.G., Neustroev P.V., Golovtsov V.L., Volkov S.S., Chernyj A.V., Zherebitsov O.M., Chaikovskii M.E., Petelin A.L., Izhutov A.L., Tuzov A.A., Sazontov S.A. et al.* // Phys. Rev. D. 2021. V. 104. P. 032003.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.104.032003>
8. Neutrino-4 Collaboration. *Samoilo v R.M. et al.* // LXXI International conference “NUCLEUS–2021. Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies”. St.Petersburg, September 20–25, 2021.
https://indico.cern.ch/event/1012633/contributions/4480300/attachments/2315193/3940949/Samoilo v_neutrino-4_nucleus21.pdf
9. *Alekseev I., Belov V., Brudanin V., Danilov M., Egorov V., Filosofov D., Fomina M., Hons Z., Kazartsev S., Kobayashi A., Kuznetsov A., Machikhiliyan I., Medvedev D., Nesterov V., Olshevsky A. et al.* // Phys. Lett. B. 2018. V. 787. P. 56.
<https://doi.org/10.1016/j.physletb.2018.10.038>
10. NEOS Collaboration. *Ko Y.J. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 118. P. 121802.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.121802>
11. PROSPECT Collaboration. *Andriamirado M. et al.* // Phys. Rev. D. 2021. V. 103. P. 032001.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.103.032001>
12. STEREO Collaboration. *Almazán H. et al.* // Phys. Rev. D. 2020. V. 102. P. 052002.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.102.052002>

ПРЕЦИЗИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ДЕТЕКТОРОВ ЯДЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СТАНДАРТНОМ ПРОМЫШЛЕННОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ

© 2023 г. **А. Г. Артюх^а**, **Г. А. Кононенко^{а,*}**, **А. В. Саламатин^а**, **Ю. М. Середа^а**

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

*e-mail: Kononenko@jinr.ru

Поступила в редакцию 22.08.2022 г.

После доработки 31.08.2022 г.

Принята к публикации 17.10.2022 г.

Разработаны прецизионные источники высокого напряжения для детекторов ядерного излучения (полупроводниковых детекторов, на основе фотоэлектронных умножителей и пр.). Вместо специализированного высоковольтного трансформатора использован распространенный сетевой (~220 В) трансформатор POL-12012 совместно с умножителем напряжения. Электрические параметры блоков: диапазон – от 0 до ± 2500 В; мощность ≤ 10 Вт; КПД – до 77%; пульсации при нагрузке 2 МОм (2 кВ) – 1 мВ; частота преобразования – до 150 кГц; управление ручное/внешнее; плавный рост/спад напряжения; отключение при перегрузке; температурный дрейф $\leq 0.004\%/^{\circ}\text{C}$; рабочая температура – от -40 до $+60^{\circ}\text{C}$. Исполнение: евромеханика 3U или автономный блок $80 \times 80 \times 40$ мм. Источники используются в ряде экспериментов и промышленных установках, где обеспечивают качество, надежность, температурный диапазон и необходимый функционал.

DOI: 10.31857/S0032816223020027, EDN: UXLWZ

ВВЕДЕНИЕ

Источники высокого напряжения (ИВН) являются естественными элементами измерительных установок экспериментальной ядерной физики. Как правило, они используются для питания разнообразных детекторов радиоактивного излучения [1–5]. В экспериментах, в зависимости от решаемой задачи, количество детекторов может сильно различаться (от единиц до нескольких тысяч) [6]. В большинстве случаев потребности в ИВН удовлетворяются фирменными предложениями (<https://www.ortec-online.com>; ntnk.ru; sanberra.ru; www.caen.it). Тем не менее, часто возникает необходимость в индивидуальном изготовлении ИВН при создании ядерно-физических установок [1] или специализированных приборных комплексов прикладного характера [2–4], особенно портативного типа [5]. Разработки направлены на удовлетворение специальных требований к уровню шумов и пульсаций выходного напряжения или температурной и временной нестабильности, к величине электромагнитных наводок, к возможности плавного подъема и снижения напряжения, к повышению КПД, а также к конструкционному исполнению прибора, его габаритам и массе.

Высоковольтные источники индивидуальной разработки выполняются, как правило, по типу DC-DC-преобразователей [7], и можно выделить три основных варианта формирования в них высокого напряжения.

1. Применение специальной высоковольтной сборки. Данный подход предполагает использование уже готовых ИВН в виде модулей, которые производят ряд фирм (www.tracopower.com, www.emco-highvoltage.com, mantigora.ru, www.spellmanhv.com). Однако для получения качественных характеристик ИВН модули приходится дополнять необходимыми элементами с целью улучшения параметров выходного напряжения (уменьшения пульсаций и шумов, повышения стабильности [8]); расширять их функциональные возможности (модули рассчитаны, как правило, на одну полярность выходного напряжения). Также рассмотренные устройства не обслуживаются, не ремонтно-пригодны, не всегда доступны при замене и в приобретении.

2. Использование высоковольтного трансформатора. Подходящее промышленное изделие (ТВС-70П1 [9]) уже не производится и замены ему практически нет. Но даже специальная конструкция [10] и тщательное изготовление трансформатора не снижают его общую емкость и ин-

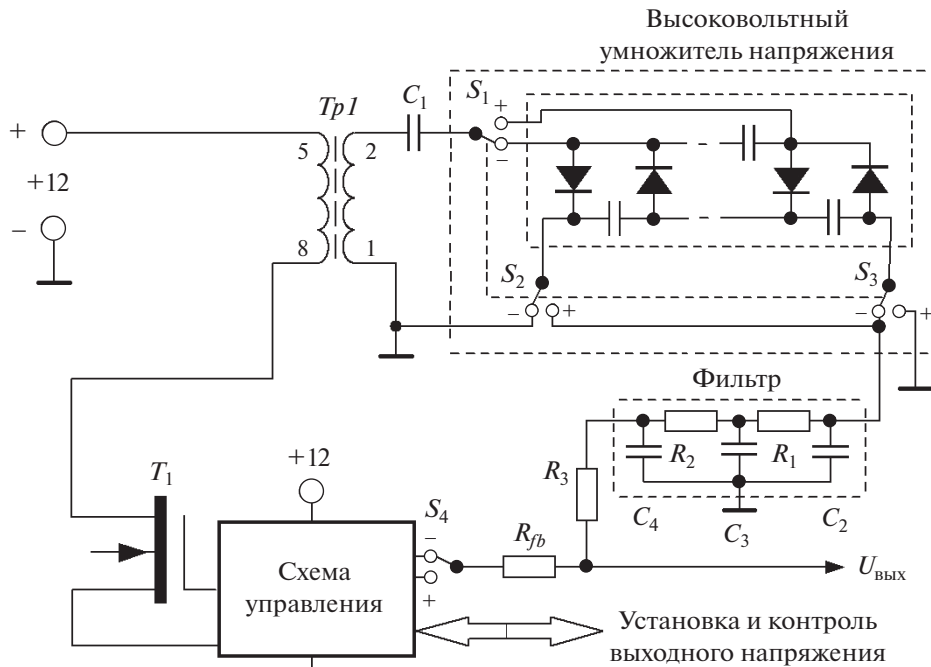


Рис. 1. Блок-схема источника высокого напряжения. $Tp1$ – POL12012 (KST-POL-12012); T_1 – IRF540N; C_2 – C_4 – 3×3.3 нФ, 3 кВ; $R_1 = R_2 = 11$ кОм; $R_3 = 1$ кОм; $R_{fb} = 40$ МОм.

дуктивность рассеяния, что ограничивает частоту преобразования DC-DC-конвертера диапазоном 20–30 кГц [9, 10].

3. Применение двухступенчатой схемы получения высокого напряжения, состоящей из повышающего трансформатора (с выходным напряжением 300–500 В) совместно с емкостно-диодной системой умножения напряжения [11]. Здесь трансформатор работает при более низком выходном напряжении, и коэффициент трансформации небольшой. Общая емкость и индуктивность рассеяния такого трансформатора в разы меньше, чем у высоковольтного, и рабочая частота может быть гораздо выше при тех же потерях при преобразовании. Это позволяет получить высокие технические характеристики устройства и существенно уменьшить габариты трансформатора и фильтра. Однако качественно изготовить трансформатор небольших размеров возможно лишь на специализированном оборудовании, поэтому лучше использовать повышающий трансформатор промышленного производства.

В настоящей работе предлагается простое решение – использование готовых импульсных понижающих трансформаторов от AC-DC-источников питания при индивидуальной разработке регулируемых высоковольтных блоков питания небольшой мощности. К таким трансформаторам относится, например, трансформатор POL-12012 фирмы PremierMagnetics, имеющий отечественный аналог KST-POL-12012 [12]. Трансформатор

предназначен для 15-ваттного импульсного обратноходового AC-DC-преобразователя, в котором входное переменное напряжение электросети (85–265 В) преобразуется в 12 В на выходе. Его первичная обмотка рассчитана на выпрямленное AC-напряжение, число витков в ней в несколько раз больше, чем во вторичной [12]. Если вторичную обмотку подключить на входе DC-DC-преобразователя, а первичную использовать как выходную, то такой трансформатор можно использовать как повышающий.

ИСТОЧНИК ВЫСОКОГО НАПЯЖЕНИЯ С ТРАНСФОРМАТОМ POL-12012 (KST-POL-12012)

Блок-схема высоковольтного источника напряжения приведена на рис. 1. Она представляет собой обратноходовую схему, в которой постоянное входное напряжение +12 В преобразуется в стабилизированное выходное с регулировкой от 0 до ± 2500 кВ.

Схема состоит из трансформатора POL-12012 (KST-POL-12012), соединенного с шестикаскадной емкостно-диодной системой умножения для однополярной последовательности импульсов (умножитель напряжения собран на элементах поверхностного монтажа: диоды US1M, конденсаторы 100 нФ, 1 кВ), выходного RC-фильтра ($R_1, R_2; C_2$ – C_4) и схемы управления с мощным полевым МОП (металл–оксид–полупроводник) тран-

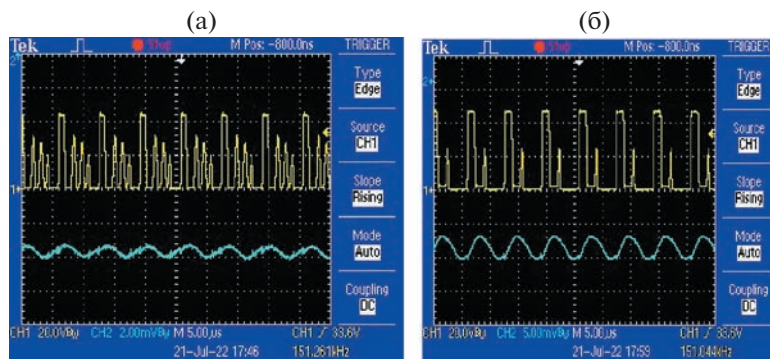


Рис. 2. Напряжение на стоке транзистора IRF540N (верхние графики) и пульсации выходного напряжения 2 кВ (нижние графики): **а** – нагрузка 2 МОм, частота 150 кГц; **б** – нагрузка 400 кОм, частота 150 кГц.

зистором T_1 (инвертор), рассчитанным на напряжение стока до 100 В. Вторичная обмотка (согласно паспорту [12]) выполнена в тройной изоляции. Одним выводом она подключена к стоку транзистора T_1 , а на второй – подается напряжение +12 В. В качестве выходной используется обмотка с выводами 1 и 2, имеющая наибольшее число витков. Между обмотками проложен двойной слой изоляции, обеспечивающий гальваническую развязку до 3000 В [12]. Число витков первичной обмотки больше, чем вторичной, в 7.71 раза [12]. Небольшая величина соотношения витков обмоток компенсируется множителем напряжения и свойством обратного преобразователя повышать импульсное напряжение на инверторе во время обратного хода по отношению к напряжению питания (12 В) в несколько раз. В результате на выходной обмотке трансформатора формируется во столько же раз более высокий импульс напряжения, что позволяет снизить количество каскадов умножения. Их число выбирается в зависимости от необходимого максимального выходного напряжения. Так, шесть каскадов умножения вполне обеспечивают выходное напряжение 2500 В при токе нагрузки 2 мА для указанных на рис. 1 параметров фильтра. Напряжение на стоке инвертора при этом не превышает 60 В.

Для удобной смены полярности выходного напряжения умножитель выполнен в виде съемной кассеты из двух плат одинаковых размеров 21 × 90 мм. На первой собран умножитель, а на второй установлены угловые штыревые разъемы (на рис. 1 они указаны как переключатели S_1-S_3). Платы совмещены плоскостями с зазором между ними на толщину угловых разъемов. Отводы от разъемов соединены жесткими проволочными перемычками с платой умножителя в соответствии с рис. 1. Для удобства перевода умножителя на обратную полярность конденсатор C_1 размещен отдельно на основной плате. Для положительной полярности кассета вставляется в ответные разъемы на основной плате высоковольтного

блока в одном положении, а для отрицательной полярности кассету необходимо вставить в эти же разъемы с поворотом на 180°. Положительное выходное напряжение через разъем S_2 или отрицательное – через S_3 (согласно рис. 1) поступает на вход RC-фильтра и через резистор R_3 – на выходной разъем блока. Через сопротивление обратной связи R_{fb} и переключатель S_4 (в виде переставляемой перемычки) это же напряжение подается на вход схемы управления. Схема содержит узел формирования напряжения обратной связи и контроля выходного напряжения, микроконтроллер с широтно-импульсным преобразованием (TL494 [13]) и буферный усилитель мощности, который соединяет выход микроконтроллера с затвором транзистора T_1 . Назначение переключателя S_4 состоит в обеспечении постоянной полярности сигнала обратной связи на входе микроконтроллера независимо от полярности напряжения на выходе умножителя. Узел формирования вырабатывает на своем выходе сигнал, пропорциональный высоковольтному напряжению с коэффициентом деления 1: 1000. Далее этот сигнал разветвляется и через ограничивающие резисторы поступает на неинвертирующий вход усилителя ошибки микроконтроллера и на разъем для контроля выходного напряжения. Схема включения контроллера TL494 соответствует техническому паспорту [13].

Трансформатор POL-12012(KST-POL-12012) предназначен для работы с ШИМ (широтно-импульсная модуляция) контроллером в трехвыводном корпусе TOP202YAL с замкнутой архитектурой и фиксированной частотой преобразования 100 кГц [13].

Мы рассмотрели зависимость эффективности работы источника питания от частоты преобразования до 150 кГц и нагрузки от 0 до 10 Вт. Собственная мощность потребления блоком в отсутствие нагрузки при $U_{\text{вых}} = 2$ кВ возрастает от 0.7 Вт для 80 кГц до 0.9 Вт для 150 кГц. Максимальная

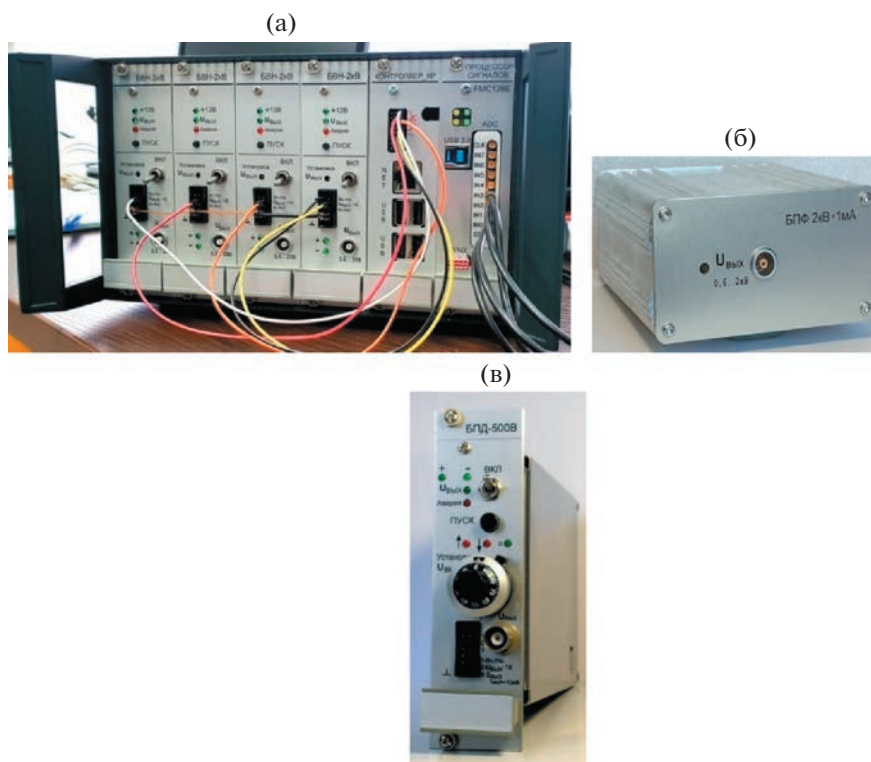


Рис. 3. Высоковольтные блоки: **а** – блоки питания фотоумножителей (БВН-2 кВ) в крейте управления установки ВУК; **б** – автономный высоковольтный модуль (БПФ-2 кВ \times 1 мА); **в** – блок питания кремниевых полупроводниковых детекторов (БПД-500 В).

выходная мощность источника составляет 10 Вт (нагрузка 400 кОм, $U_{\text{вых}} = 2$ кВ). При частоте преобразования 150 кГц пульсации и шум не превышают 1 мВ для нагрузки 2 Вт ($U_{\text{вых}} = 2$ кВ) и менее 4 мВ для нагрузки 10 Вт (рис. 2). При максимальной мощности потребления КПД прибора достигает 75% для частоты преобразования 150 кГц и 77% для частоты 100 кГц.

На рис. 2 приведены осциллограммы пульсаций выходного напряжения (нижние графики) с фильтром в соответствии с рис. 1 для частоты преобразования 150 кГц и двух значений мощности потребления: 2 кВ \times 1 мА (рис. 2а) и 2 кВ \times 5 мА (рис. 2б). Также на рисунке приведены осциллограммы напряжений на стоке транзистора T_1 (IRF540N) высоковольтного блока (верхние графики). Максимальное значение амплитуды импульса напряжения при обратном ходе преобразователя, согласно рис. 2, не превышает 50 В для напряжения на выходе блока 2 кВ. Измерение пульсаций выполнено на осциллографе TDS2004. Сигнал снимался с резистора сопротивлением 10 кОм, который подключался к основной нагрузке через высоковольтную емкость 3300 пФ. Резистор был зашунтирован встречно включенными диодами US1M.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе распространенных электронных элементов для использования в экспериментальных установках [1, 2, 5, 14, 15] были разработаны прецизионные высоковольтные источники питания для фотоумножителей и полупроводниковых детекторов ядерного излучения. Блоки представляют собой обратноточные DC-DC-преобразователи. Основным элементом схемы является силовой узел, который построен на основе доступного и недорогого трансформатора POL-12012 с емкостно-диодным умножителем напряжения. Частота работы преобразователей до 150 кГц. Такая схема обеспечила напряжение на выходе до 2500 В, низкие пульсации с незначительным шумом и высокий КПД приборов, до 77%.

Конструктивно источники питания изготовлены в двух вариантах. В виде модулей-кассет закрытого типа системы Евромеханика (ЗУ) для установок, описанных в статьях [1, 2, 14, 15], и в виде автономного модуля размерами 80 \times 80 \times 40 мм для установки, описанной в статье [5]. Регулировка выходного напряжения осуществляется или внутренним многооборотным потенциометром, или внешним сигналом через разъем на передней панели. Напряжение питания блоков 12 В (11–24 В).

Таблица 1.

Тип блока	$U_{\text{вых}}, \text{В}$	$P_{\text{max}}, \text{Вт}$	Ток срабатывания защиты, мА	Мощность в нагрузке $U_{\text{н}} I_{\text{н}}, \text{кВ мА}$	Пульсации выходного напряжения пик-пик $\Delta U_{\text{p-p}}, \text{мВ}$	Частота преобразования $F, \text{кГц}$
БВН-2 кВ	$\pm(600-2000)$	10	1500*	1.5×1 2×1 2×5	<1 1 <4	150
БПФ-2 кВ	$\pm(600-2000)$	2	1500*	2×1	<1	150
БПД-500 В	0 ± 500	0.5	1500*	0.5×1	<1	100
			(0.01–1)**			

*Ток срабатывания защиты по питанию; **по нагрузке.

На рис. 3а представлена фотография крейта спектрометра ВУК (возмущенных угловых $\gamma\gamma$ -корреляций) [1] с установленными в нем четырьмя источниками высокого напряжения БВН-2 кВ для питания ФЭУ. В спектрометре ВУК [1, 14] используются четыре современных высокоточных и быстродействующих сцинтилляционных детектора с кристаллами LaBr_3 с энергетическим разрешением <3% по ^{137}Cs и временным <400 пс по ^{60}Co . Загрузка на каждом детекторе достигает 50–60 тысяч/с, обычное время экспозиции 2–3 сут. В крейте также расположен блок 8-канального цифрового процессора сигналов (14 бит, 250 МГц) и блок контроллера крейта с процессором Linux. Они обеспечивают регистрацию сигналов ФЭУ, управление и мониторинг выходного напряжения высоковольтных блоков. Разработанные источники высокого напряжения эксплуатируются в спектрометре на протяжении нескольких лет, они показали свою надежность, стабильность и обеспечили необходимую точность измерений [14]. Аналогичные блоки использовались для двух сцинтилляционных детекторов с кристаллами ВГО в установке [5].

В корпусе Евромеханика (3U) для кремниевых детекторов фрагмент-сепаратора КОМБАС [15], а также для многоканальных кремниевых детекторов, встроенных в капсулу нейтронного генератора, установок с использованием метода меченых нейтронов [2, 5] были разработаны блоки питания с регулируемым напряжением от 0 до $\pm 500 \text{ В}$ и максимальным током 1 мА (БПД-500 В, см. рис. 3в).

Для сцинтилляционного детектора инспекционного модуля [5] был разработан источник питания в виде автономного модуля, см. рис. 3б. Работа источников питания для сцинтилляционного и кремниевого детекторов проходила в более неблагоприятных условиях замкнутого объема $740 \times 510 \times 410 \text{ мм}$. Детекторы совместно с блоками питания работали при высоких радиационных активностях и температуре порядка 50°C . Источ-

ники питания также показали свою надежность и стабильность.

Основные характеристики блоков приведены в табл. 1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Brudanin V.B., Tsvyashchenko A.V., Salamatin A.V., Kochetov O.I., Velichkov A., Fomicheva L.N., Budzinski M., Wiertel M., Sorokin A.A., Rysniy G.K., Komissarova B.A., Milanov M.* // Nucl. Instrum. and Methods in Physics Research A. 2005. V. 547. P. 389. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.04.002>
2. *Быстрицкий В.М., Замятин Н.И., Зубарев Е.В., Рапацкий В.Л., Рогов Ю.Н., Романов И.В., Садовский А.Б., Саламатин А.В., Сапожников М.Г., Сафонов М.В., Слепнев В.М., Филиппов А.В.* // Письма в ЭЧАЯ. 2013. Т. 10. № 5 (182). С. 722.
3. *Тетерев Ю.Г., Гикал Б.Н., Иванов О.И., Кононенко Г.А., Миронов В.И.* // ПТЭ. 2009. № 2. С. 9.
4. *Тетерев Ю.Г., Кононенко Г.А.* // ПТЭ. 2011. № 4. С. 148.
5. *Aleksakhin V.Yu., Bystritskii V.M., Zamyatin N.I., Zubarev E.V., Krasnoperov A.V., Rapatskii V.L., Rogachev A.V., Rogov Yu.N., Sadovskii A.B., Salamatin A.V., Sapozhnikov M.G., Slepnev V.M.* // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2013. V. 10. Iss. 7. P. 860. <https://doi.org/10.1134/S154747711401004X>
6. *Акимов Ю.К.* Фотонные методы регистрации излучений. Дубна: ОИЯИ, 2006.
7. *Мэк Р.* Импульсные источники питания. Теоретические основы проектирования и руководство по практическому применению. М.: Додэка-XXI, 2008.
8. *Григорьев А.В., Храпко А.Н.* // Труды международной конференции “Современные проблемы оптики естественных вод”. Т. 8. М.: Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2015. С. 259–262.
9. *Черепин В.Т., Красовский Т.А., Василенко В.И., Твердохлеб А.Ф.* // ПТЭ. 2014. № 2. С. 57. <https://doi.org/10.7868/S0032816214020050>
10. *Трубицын А.А., Грачев Е.Ю., Морозов Д.А., Полонский Б.А., Серебряков А.Е.* // ПТЭ. 2019. № 5. С. 52. <https://doi.org/10.1134/S003281621904030X>

11. *Tamuri A.R., Bidin N., Daud Y.M.* // International Journal of Recent Research and Applied Studies (IJR-RAS). 2010. V. 3. Iss. 2. P. 143.
12. <http://www.premiermag.com>; <https://kodo-trans.ru>
13. <http://www.ti.com>. TL494 Pulse-Width-Modulation Control Circuits. Texas Instruments Data Sheet, 2017.
14. *Salamatina D.A., Tsvyashchenko A.V., Salamatina A.V., Velichkov A., Magnitskaya M.V., Chchelkatchev N.M., Sidorov V.A., Fomicheva L.N., Mikhin M.V., Kozin M.G., Nikolaev A.V., Romashkina I.L., Budzynski M.* // Journal of Alloys and Compounds. 2021. V. 850. P. 156601. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156601>
15. *Конonenko Г.А., Артюх А.Г., Воронцов А.Н., Кислуха Д.А., Клыгин С.А., Ковтун В.Е., Осташко В.В., Павленко Ю.Н., Серeda Ю.М., Эрдэмчимэг Б.* // ПТЭ. 2015. № 3. С. 35. <https://doi.org/10.7868/S0032816215020202>

ПРЕЦИЗИОННЫЙ ИСТОЧНИК ТОКА С НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПИТАНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СТРУКТУРНЫХ МАГНИТОВ БУСТЕРА КОМПЛЕКСА NICA

© 2023 г. А. А. Шиянов^а, Ю. М. Сеннов^а, С. В. Чистилин^а, Г. М. Мустафа^а, С. И. Гусев^{а,*},
В. Н. Карпинский^б, Г. Г. Ходжибагиян^б, А. А. Шурыгин^б, Н. В. Травин^б

^аООО “НПП ЛМ Инвертор”

Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 12

^бОбъединенный институт ядерных исследований

Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

*e-mail: gusev-si@lm-inverter.ru, gusev-si@inbox.ru

Поступила в редакцию 17.08.2022 г.

После доработки 31.08.2022 г.

Принята к публикации 13.10.2022 г.

Прецизионный источник тока типа ПИТ11-260 мощностью 2.2 МВт предназначен для питания сверхпроводящих структурных магнитов Бустера коллайдерной установки NICA, создаваемой в Объединенном институте ядерных исследований. Источник формирует периодические импульсы тока трапециевидной формы амплитудой до 10 кА с точностью 0.001–0.01%. Источник выполнен на основе модульных многоуровневых транзисторных преобразователей напряжения в комбинации с емкостным накопителем энергии на 6.1 МДж, обеспечивающим снижение влияния мощной импульсно-периодической нагрузки на сеть общего пользования и снимающим проблему проникновения возмущений из сети в цепи питания сверхпроводящих магнитов.

DOI: 10.31857/S0032816223020118, EDN: UXQSYW

ВВЕДЕНИЕ

В ОИЯИ в настоящее время ведутся работы по созданию ион-ионного коллайдера NICA [1]. Коллайдер NICA предназначен для фундаментальных исследований в области релятивистской физики. Основной целью этого проекта является проведение в ближайшие годы экспериментов по изучению сильного взаимодействия в горячей и плотной кварк-глюонной материи и поиск возможного образования “смешанной фазы” такой материи. Эксперименты будут реализованы в режиме столкновения встречных ион-ионных пучков. Проект NICA предполагает создание интеллектуальной прецизионной системы электропитания и управления всем ускорительным комплексом, включая Бустер, Нуклотрон, коллайдер и каналы транспортировки пучков. Прецизионный источник тока типа ПИТ11-260 является частью этой системы.

Использование сверхпроводящих технологий позволяет существенно снизить энергопотребление ускорителя. Кроме того, реализация такой технологии приводит к уменьшению размеров ускорительных комплексов и массы их магнитных элементов. Все это способствует заметному снижению потребления электроэнергии и расходов на капитальное строительство. Наличие

сверхпроводимости вносит ряд специфических требований к системам электропитания, управления, алгоритмам работы ускорителя. Также требуется создать систему эвакуации энергии из магнитных элементов при их переходе из сверхпроводящего в “теплое” состояние.

Система электропитания ускорителя должна обеспечить формирование магнитных полей в сверхпроводящих элементах с высокой точностью и с заданной скоростью изменения. Для Бустера это требование выливается в создание системы питания с пиковой мощностью 2.2 МВт.

Надежность работы системы питания заключается в обеспечении безопасного и устойчивого функционирования всего комплекса физического и электротехнического оборудования, в том числе сверхпроводящих магнитов, при эвакуации накопленной энергии в случае срыва сверхпроводимости в каком-либо из элементов.

Особой задачей системы питания является обеспечение прецизионного соблюдения заданного закона изменения поля в дипольных магнитах и отношения градиентов полей в квадрупольных магнитах к полю диполей во всем динамическом диапазоне от 0 до 1.8 Тл с требуемой точностью, как правило, 0.001–0.01%.

Стандартный цикл изменения поля в дипольных магнитах Бустера имеет трапецеидальную форму с участками неизменного тока (“столами тока”) на уровне инжекции пучка в области малых токов и вывода пучка при максимальном поле. Фазы стола тока и роста тока сопрягаются переходными участками, изменяющимися по закону с отсутствием изломов во 2-й производной. Сверхпроводящий магнит – это идеальная индуктивность, а значит, при циклической работе в фазе завода тока напряжение на источнике должно быть максимальным, на столе тока – равным нулю, и при выводе тока в режиме рекуперации энергии напряжение будет максимально отрицательным. Такой режим работы источника с предельными перепадами напряжения и при этом с прецизионным выдерживанием значения тока требует специальных схемотехнических решений и глубокой проработки подсистем регулирования.

ПРЕЦИЗИОННЫЙ ИСТОЧНИК ТОКА ТИПА ПИТ11-260

Прецизионный источник тока типа ПИТ11-260, предназначенный для питания сверхпроводящих структурных дипольных и квадрупольных магнитов ускорителя Бустера NICA импульсно-периодическим током амплитудой до 10 кА с относительной стабильностью отслеживания уровня тока 10^{-4} , выполнен на основе транзисторных преобразователей напряжения в комбинации с емкостным накопителем энергии на 6.1 МДж. Для обеспечения работы Бустера токи его структурных магнитов должны периодически изменяться с большой скоростью. При использовании сверхпроводящих магнитов мощность регулирующего источника является периодической переменной со значительной амплитудой и ничтожным средним значением (постоянной составляющей).

Предыдущее поколение источников тока магнитов ускорителей строилось на основе ведомых сетью тиристорных преобразователей. Скорость регулирования в них ограничена длительностью периода электрической сети, а переменная мощность транслируется в сеть, вызывая нарушение показателей качества электрической энергии.

Развитие мощных управляемых электрических вентилях – транзисторов с изолированным затвором (Insulated Gate Bipolar Transistor – IGBT) и обновление способов регулирования вентилях преобразователей электричества позволяют перейти к более эффективному построению источников тока. Лаборатория физики высоких энергий (ЛФВЭ) ОИЯИ разработала структуру нового источника и требования к нему. Согласно последним, источник должен:

а) использовать преимущества сверхпроводящей индуктивной нагрузки, работающей в циклическом режиме с фазами рекуперации энергии;

б) иметь улучшенные характеристики за счет использования современных технологий преобразования энергии с применением мощных и высокочастотных вентилях IGBT;

в) содержать накопитель энергии, поглощающий колебания энергии магнитов и разгружающий тем самым сеть общего пользования от низкочастотных колебаний.

Применение накопителя энергии отягощает источник. Тем не менее, оно было признано целесообразным по двум причинам. Колебания сетевой мощности мегаваттного диапазона порождают колебания сетевого напряжения (фликер), которые в любом случае должны быть снижены до предписанной в [2] величины. Существенней, однако, другое обстоятельство: источник питания магнитов ускорителя должен обеспечивать сверхвысокие показатели точности и стабильности, которые на несколько порядков превышают показатели стабильности напряжения сети общего пользования, предписанные тем же стандартом. Накопитель энергии, кроме устранения фликера, снимает также проблему проникновения возмущений из сети общего пользования от включения мощных двигателей, удаленных коротких замыканий и т.п. в цепи питания сверхпроводящих магнитов. Благодаря режиму рекуперации энергии из сверхпроводящих магнитов в накопитель энергии, осуществляемой источником на каждом цикле изменения поля в дипольных магнитах Бустера, обмен энергией с сетью сведен до незначительного уровня.

Научно-производственное предприятие “НПП ЛМ Инвертор” во взаимодействии с ЛФВЭ разработало и изготовило агрегат ПИТ11-260, а также дополнительные прецизионные источники коррекции тока в фокусирующих и дефокусирующих магнитах (ИП₂ и ИП₃ на рис. 1), обеспечивающие выполнение предписанных требований.

СХЕМА ВКЛЮЧЕНИЯ И ПАРАМЕТРЫ ИСТОЧНИКА ТОКА

Схема включения источников тока и графики тока магнитов Бустера приведены на рис. 1 и 2, а основные параметры – в табл. 1.

Сверхпроводящие магниты L_m , L_f и L_d (см. рис. 1) соединены последовательно с ключами эвакуации энергии K_1 – K_4 . В нормальном состоянии ключи замкнуты и пропускают через себя ток. В случае детектирования внешней системой срыва сверхпроводимости ключ размыкается, и энергия, накопленная в магнитах, рассеивается на резисторах гашения поля, включенных параллельно ключам. Ключ эвакуации построен по

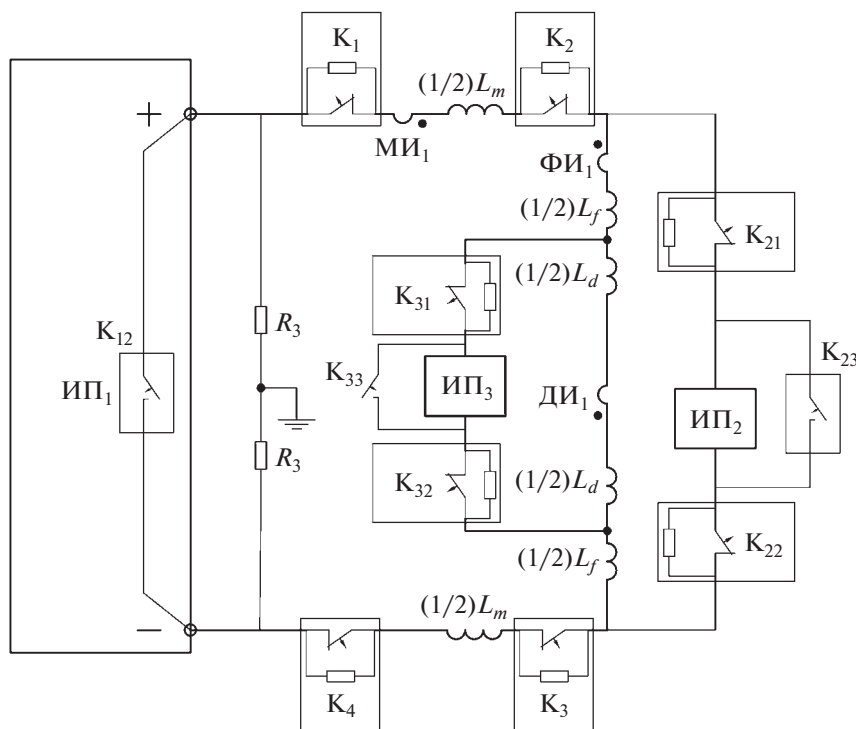


Рис. 1. Принципиальная схема системы питания Бустера. ИП – прецизионный источник тока; МИ – магнит дипольный измерительный; ФИ – фокусирующий измерительный квадрупольный магнит; ДИ – дефокусирующий измерительный квадрупольный магнит; К₁–К₄ – ключи эвакуации энергии.

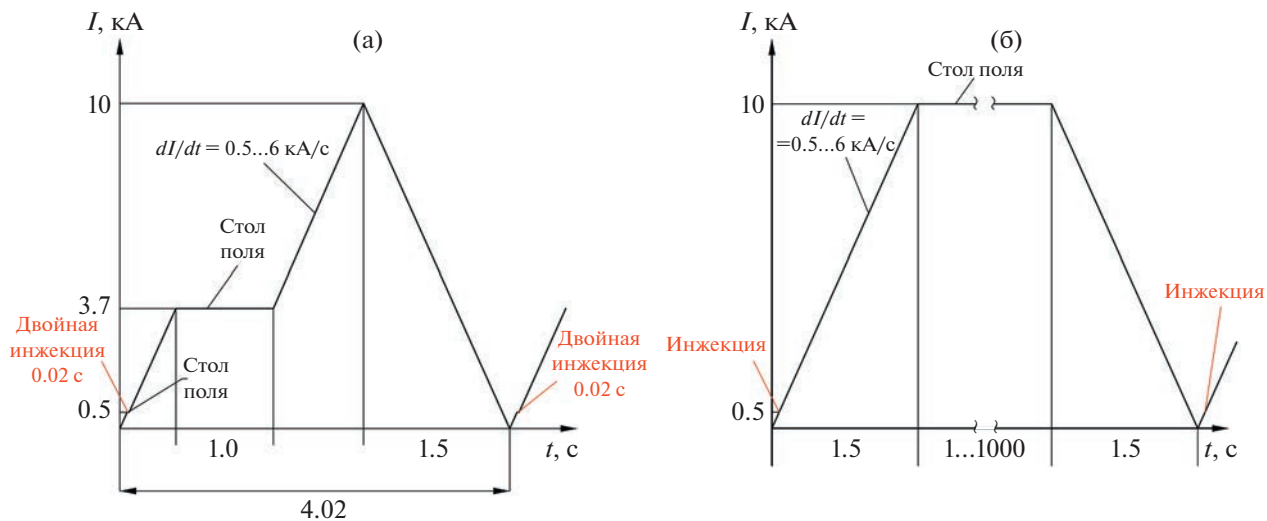


Рис. 2. Рабочие циклы основного источника питания ИП1: а – в составе инжекционной цепочки коллайдера NICA; б – при медленном выводе пучка из Бустера.

принципу тиристорно-конденсаторного коммутатора, основным силовым элементом которого служат четыре тиристора типа Т173-3200-12-74, включенные параллельно. Время размыкания ключа не более 200 мкс, время вывода энергии 0.5 с. Количество ключей и сопротивление резисторов гашения поля обеспечивают постоянную време-

ни вывода энергии 160 мс и ограничение напряжения на магнитах относительно “земли” при эвакуации до 500 В.

Требуемая точность отслеживания задания тока магнитов Бустера является экстраординарной и на 2-3 порядка превышает ту, которая предъявляется к обычным регулирующим преобразовате-

Таблица 1. Основные технические параметры ПИТ11-260

Параметр	Значение	Примечание
Входное питающее напряжение $U_{\text{н-15\%}}^{+10\%}$, кВ, на входных клеммах источника	0.38	
Максимальная мощность, кВт, потребляемая от сети, не более	500	
Максимальная мощность источника, МВт	2.86	
Максимальное выходное напряжение, В, источника не менее	± 260 dc	
Выходной ток, А, не менее ($I_{\text{макс}}$)	11 000 dc	
Индуктивность нагрузки, мГн	31 1–40	Штатный режим Наладочный режим
Относительная стабильность тока на участках его нарастания и спада	$2 \cdot 10^{-4}$	Должна обеспечиваться с момента инжекции тока $I = 500$ А и до конца стола тока (см. рис. 2)
Относительная стабильность тока на столе поля	$5 \cdot 10^{-5}$	Параметры цикла (см. рис. 2)
Пульсация выходного напряжения, мВ, на столе поля, пик–пик	≤ 215 ≤ 10	При максимальном токе На полке инжекции
Диапазон установки выходного тока, % от $I_{\text{макс}}$	2–100	
Устойчивость к короткому замыканию	Да	
Режимы работы	Статический Динамический с $dI/dt = 0 \dots \pm 7$ кА/с	
Охлаждение	Воздушное принудительное (внутренние вентиляторы), жидкостное	
Вывод тока нагрузки из сверхпроводящих магнитов: – в циклическом режиме работы – при аварийном срыве сверхпроводимости	путем рекуперации энергии в накопитель энергии переводом источника в инверторный режим с одновременным введением резистора последовательно с нагрузкой (выполняется заказчиком)	
Частота следования циклов, Гц	0.25	
Минимальное количество токовых циклов без замены или ремонта каких-либо частей источника	$5 \cdot 10^6$	

лям электроэнергии, применяемым в электроприводах, электрохимии и других электротехнологиях. Вдобавок к этому прецизионность требуется не только в статических режимах, но и на интервалах нарастания и спада тока. При этом отягощающим обстоятельством является наличие точек излома в графиках изменения тока (см. рис. 2а, 2б). К требованиям по точности добавляются жесткие требования по фильтрации гармоник тока. Пульсации (шумы) источника не должны мешать работе измерительных, диагностических и управляющих систем Бустера. Весь этот комплекс условий вместе с требованием обеспечения продолжительной работы с циклически меняющимся током, замыкаемом в накопителе, определяют структуру силовой схемы источника и его системы регулирования.

ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ПИТ11-260

Современным базовым полупроводниковым прибором для регулируемых преобразователей электроэнергии является IGBT с управляемой прямой и неуправляемой большой обратной проводимостью. Четыре IGBT, соединенные в мостовую схему, образуют четырехполюсник с двумя портами: портом знакопостоянного напряжения (Direct Current – DC, переменные – u_d, i_d) и портом знакопеременного напряжения (Alternating Current – AC, переменные – u_a, i_a). Порт DC шунтируется сглаживающим конденсатором, а порт AC отделяется электрическим реактором (рис. 3а). Регулирование конверторного моста осуществляется путем широтно-импульсной модуляции (Pulse Width Modulation – PWM). Системное действие такого конвертора адекватно описывается усредненными значениями переменных u_d, i_d, u_a, i_a , которые являются непрерывными функциями и связаны друг с другом обыкновенными дифференциальными уравнениями. Функционально такой конвертор действует как регулируемый (авто)трансформатор (рис. 3б), в котором

$$\begin{aligned} u_a &= s u_d; \\ i_d &= s i_a, \end{aligned}$$

где $s(t)$ – регулируемый коэффициент передачи, равный заполнению цикла PWM; этот коэффициент устанавливается модулятором системы управления и может изменяться в диапазоне

$$-1 \leq s \leq 1.$$

Конвертор передает мощность между портами без потерь:

$$\forall t : u_a i_a \equiv u_d i_d$$

и является структурным блоком системы [3]. Его порт AC является четырехквadrантным, а порт

DC – двухквadrантным. Это свойство конвертора создает возможность двунаправленной передачи энергии: от накопителя в Бустер и от Бустера в накопитель, обеспечивая режим рекуперации энергии магнитов в накопитель на каждом этапе спада поля.

Транзисторный конвертор напряжения (Voltage Source Converter – VSC) естественным образом сопрягается с накопителем энергии емкостного типа. Для сопряжения достаточно присоединить к технологическому конденсатору порта DC дополнительную накопительную конденсаторную батарею. Напряжение $u_d(\cdot)$ при этом становится меняющимся в зависимости от отданной или принятой энергии. Однако это не препятствует правильному регулированию нагрузки, присоединенной к порту AC. Для получения требуемого напряжения нагрузки u_{az} необходимо только модифицировать передачу конвертора:

$$s(t) = \frac{u_{az}(t)}{u_d(t)}.$$

Необходимо, чтобы напряжение u_d не опускалось слишком низко:

$$\forall t : u_d(t) \geq u_{az}(t).$$

Для этого требуется, чтобы емкость накопителя C_d была достаточно велика. Именно такое естественное сопряжение регулирующего конвертора Бустера с накопителем энергии осуществлено в агрегате ПИТ11-260.

Конверторы нового поколения свободны от ограничения частоты переключений величиной частоты сети, которое было присуще ведомым сетью тиристорным конверторам. IGBT позволяет держать частоту переключений на уровне 3–4 кГц и даже 5 кГц. Тем самым существенно облегчается проблема фильтрации сопровождающих пульсаций, которые присущи как фазному регулированию (тиристорные конверторы), так и PWM (транзисторные конверторы). Однако из-за экстраординарных требований к пульсациям в системе питания Бустера такого повышения основной частоты оказалось недостаточно. Новая схема, позволяющая эффективно снизить пульсации, – это модульная многоуровневая система (ММС). ММС распространилась на конверторы электроприводов после изобретения Питера Хэммонда (Р. Hammond, [4]), а затем – после изобретения Райнера Марквардта (R. Markwardt, [5]) – и на конверторы передач постоянного тока. ММС Хэммонда и Марквардта являются высоковольтными. В них некоторое число N элементарных конверторов соединяются последовательно. Действуя с регулярным сдвигом фазы PWM на угол $2\pi/N$, последовательно включенные конверторы обеспечивают одновременно снижение ступени модуляции и

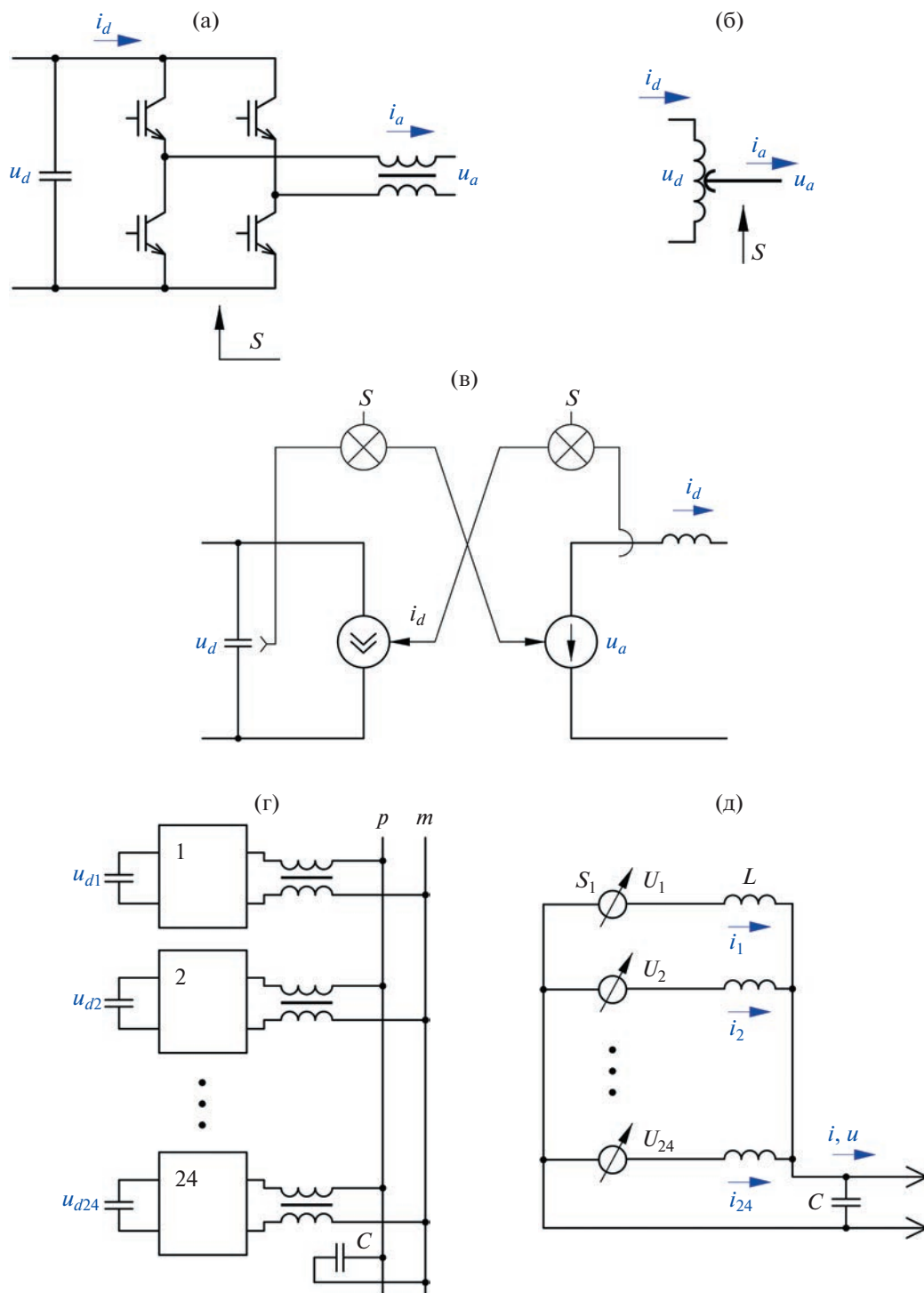


Рис. 3. Мостовая схема конвертора из четырех IGBT (а); функциональное представление регулируемым (авто)трансформатором (б); функциональное представление парой зависимых источников тока/напряжения (в); параллельная модульная многоуровневая система (г); схема замещения ММС (д).

N раз и такое же повышение результирующей частоты модуляции.

Система питания Бустера является сильноточной и низковольтной. Прямое применение ММС [4, 5] в ней невозможно. Поэтому для ПИТ11-260

была разработана параллельная ММС по структуре, представленной на рис. 3г. В ней

$$L \frac{di_k}{dt} = u_k - u, \quad k = 1, 2, \dots, N (N = 24, \text{ см. рис. 3г}).$$

Сложение дает

$$\frac{L}{N} \frac{di}{dt} = u_s - u,$$

где

$$u_s = \frac{1}{N} \sum u_k.$$

Каждое напряжение $u_k(\cdot)$ имеет ступень модуляции $u_d = 430$ В. В сумме u_s ступень снижается пропорционально N , как и при последовательном включении конверторов. В отличие от последнего, в параллельной ММС из-за необходимости поддержания малого смещения нейтрали удается реализовать кратность понижения ступени, равную только $N/2$.

ПИТ11-260 выполнен из $N = 24$ параллельных ячеек.

Период модуляции ячейки равен $2h = 2 \cdot 48$ мкс (h – период PWM).

Частота переключения транзисторов ячейки при этом $1/(4h) = 5.2$ кГц.

Шаг регулярного сдвига модуляции равен $h_0 = \frac{2h}{N/2} = 8$ мкс.

Результирующая частота модуляции при этом $1/h_0 \approx 125$ кГц.

Ступень результирующей PWM равна $430 \text{ В}/12 \approx 36$ В, а амплитуда основной гармоники $(1/2)36(4/\pi) = 22.9$ В.

Резонансная частота фильтра $\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 1.33$ кГц дает кратность подавления гармоник $(125/1.33)^2 \approx 8.9 \cdot 10^3$.

Расчетная амплитуда основной гармоники PWM на выходе ПИТ11-260 равна $22.9/(8.9 \cdot 10^3) = 2.6$ мВ.

Таким образом, применение ММС позволяет получить приемлемый уровень пульсаций уже при умеренной фильтрации (собственный период фильтра ≈ 0.75 мс).

Разбиение на большое количество ячеек, помимо решения задачи фильтрации, дает также решение сопутствующей задачи – обеспечение циклоустойкости IGBT. Из-за малой массы и малой теплоемкости кристаллы транзисторов весьма чувствительны к циклической загрузке, а условия циклирования при питании Бустера гораздо более жесткие, чем в других тяжелых циклических применениях (период ≈ 4.5 с в сравнении с периодом 50–150 с в преобразователях, устанавливаемых в городском транспорте). Для обеспечения требуемого срока службы в ПИТ11-260 загрузка IGBT снижена более чем вдвое. В каждой ячейке установлено два IGBT на 600 А, 1200 В. При этом средняя температура кристалла

транзистора снижена до $\approx 73^\circ\text{C}$, а циклический перепад температур – до $\approx 19^\circ\text{C}$.

НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ

Современные накопители энергии, как правило, выполнены на литий-ионных аккумуляторах или на молекулярных “суперконденсаторах” [6]. Однако по результатам выполненных расчетов для ПИТ11-260 предпочтительным оказалось использование серийных электролитических конденсаторов. При длительности цикла нагрузки около 4 с и частоте следования циклов 0.25 Гц определяющим фактором является внутреннее сопротивление накопителя, т.е. рассеиваемая мощность, что приводит к неприемлемому ухудшению показателей при использовании аккумуляторов и “суперконденсаторов”. Электролитическая батарея определяется исключительно емкостью и в рассматриваемых условиях оказывается предпочтительной. В накопителе ПИТ11-260 используются конденсаторы на напряжение 450 В и емкостью 15 мФ. Минимальная емкость конденсаторной батареи определяется перепадом энергии магнитов Бустера ΔE_{Bu} и перепадом напряжений конденсаторов от $u_{dmx} \approx 450$ до $u_{dmn} \approx 280$ В:

$$C_d(u_{dmx}^2 - u_{dmn}^2) = 2\Delta E_{Bu}.$$

В ПИТ11-260 конденсаторная батарея разделена на блоки соответственно блокам конверторов, каждой конверторной ячейке сопоставлена своя ячейка накопителя. Для повышения надежности каждая комплексная ячейка “конвертор-накопитель” работает независимо: отказ в одной ячейке не вызывает повреждений и отключений других ячеек. Предусмотрено резервирование ячеек по принципу $(N - 1)$, а также дополнительный резерв на выход из строя отдельных конденсаторов и на старение конденсаторов. С учетом всех запасов установлено 4032 конденсатора – по 336 конденсаторов на каждую линию “конвертор-накопитель”. Общая энергоемкость составила 6.1 МДж. Разделение на блоки сняло проблему больших токов короткого замыкания системы постоянного тока с мощным накопителем – в расщепленной структуре все возможные короткие замыкания локализованы.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Система управления ПИТ11-260 построена на основе комплекса аппаратно-программных средств Unicon, разработанного ООО “НПП ЛМ Инвертор”. Комплекс был разработан для управления высоковольтными преобразователями электроприводов и высоковольтными сетевыми фильтрокомпенсирующими преобразователями. Отличительные особенности Unicon:

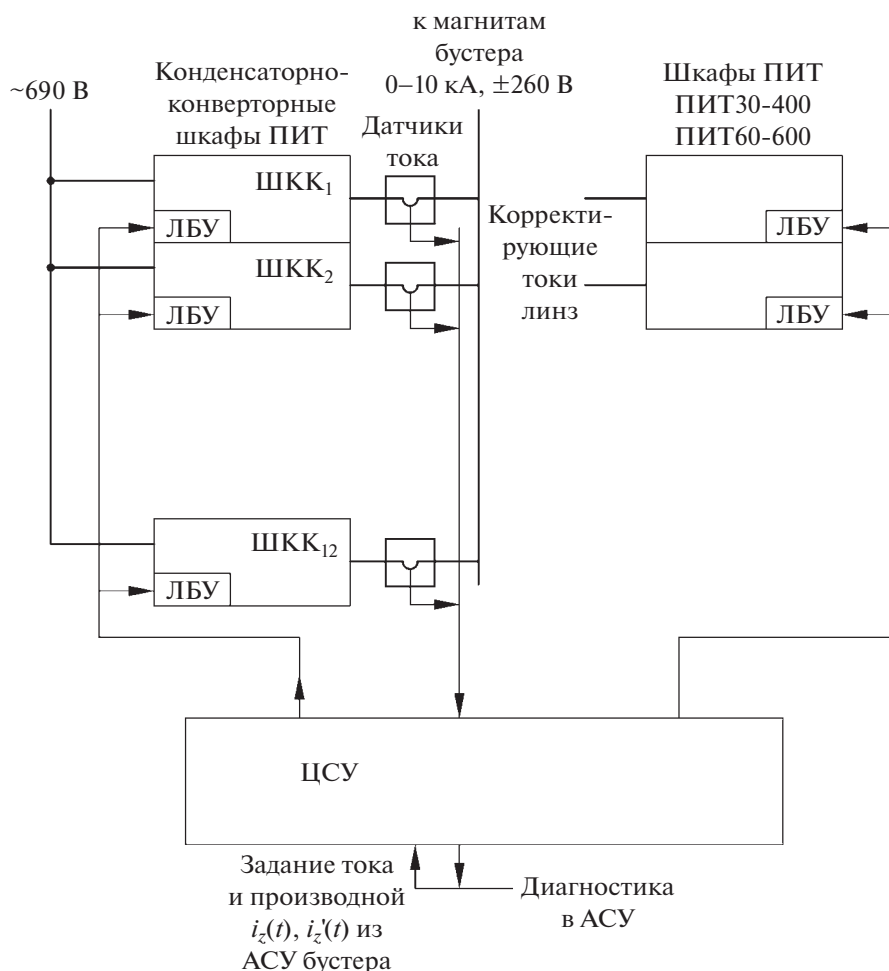


Рис. 4. Структура системы питания Бустера с основным и двумя корректирующими источниками. ЛБУ – локальный блок управления; АСУ – автоматизированная система управления; ШКК – шкаф конденсаторно-конверторный; ЦСУ – центральная система управления; ПИТ – прецизионный источник тока.

– использование встроенных аналого-цифровых преобразователей с оптоволоконными каналами связи со всеми применяемыми датчиками и драйверами;

– применение специального разделения функций между сигнальными процессорами (СП) и программируемыми логическими матрицами (ПЛМ), что обеспечивает высокую скорость расчетов и короткий интервал повторения расчетов;

– применение системы собственного питания системы управления с высокочастотной токовой петлей и одновитковыми трансформаторами вторичных источников питания, обеспечивающими ничтожность проходных емкостей.

Эти свойства Unicon позволили обеспечить высокую помехозащищенность ПИТ11-260.

Система управления ПИТ11-260 состоит из локальных блоков управления (ЛБУ) и центральной системы управления (ЦСУ). Конденсаторно-конверторные блоки ПИТ11-260 размещены в 12-ти

конденсаторно-конверторных шкафах (ШКК₁–ШКК₁₂, рис. 4). Каждый из них содержит локальный блок управления (ЛБУ₁–ЛБУ₁₂). Помимо них в ранге локальных действуют также контроллеры малых корректирующих источников ИП60-600 и ИП30-400 (ИП₂, ИП₃ на общей схеме питания Бустера на рис. 1).

ЦСУ принимает от циклозадающей аппаратуры (ЦЗА) Бустера текущие значения токов основного контура и корректирующих источников $i_z(t)_{0,1,2}$. Наряду с заданиями токов, для обеспечения прецизионности из ЦЗА пересылаются также производные токов заданий $i'_z(t)_{0,1,2}$. В ЦЗА возвращается требуемая диагностическая информация.

Широтная модуляция и исполнительный регулятор напряжения реализуются в каждом из 12-ти ШКК его собственным ЛБУ. Каждый из ШКК действует как самостоятельный регулируемый источник напряжения. ЦСУ определяет за-

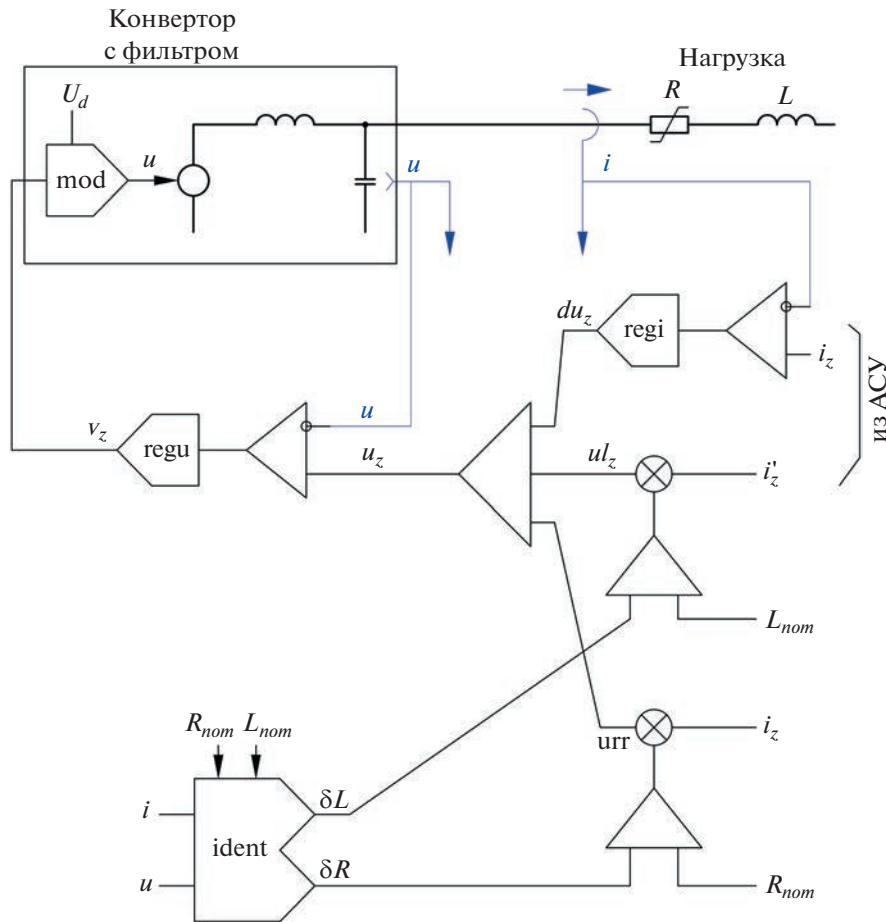


Рис. 5. Система регулирования тока магнитов с подчиненным регулятором напряжения regu (slave) с доминирующим регулятором regi (master) и подпором с блоком идентификации (коррекции) параметров.

дание напряжений ШКК, а также задание напряжений малых корректирующих источников. Период обновления заданий равен шагу сдвига модуляции модульной многоуровневой системы $h_0 = 8$ мкс.

ПРОГРАММА УПРАВЛЕНИЯ

Программа управления системой “конвертор-накопитель”, осуществляемая ЦСУ, состоит из двух отдельных и различных ветвей. Основная ветвь – это программа регулирования тока Бустера. Она действует в быстром темпе с периодом повторения в микросекундном диапазоне ($h_0 \approx 8$ мкс), обеспечивая прецизионное и динамичное исполнение поступающего задания тока магнитов. Действие ее проявляется далее как независимая периодическая переменная – мощность $p_{bu}(t)$. В силу сверхпроводимости магнитов среднее значение $p_{bu}(t)$ равно нулю на цикле

$$\Delta E_{bu} = \int_T p_{bu}(t) dt = 0.$$

Из-за наличия несверхпроводящих частей это равенство не является строгим; имеются небольшие потери проводимости $p_r(t)$, которые компенсируются малым подзарядным выпрямителем системы. Вторая ветвь – вспомогательная служебная программа ЦСУ – это программа управления подзарядом накопителя. К этой программе не предъявляются сколь-нибудь сложные требования. От нее требуется лишь, чтобы напряжение накопителя не поднималось выше допустимого уровня (≈ 450 В) и не опускалось ниже необходимого для отслеживания тока минимального уровня (≈ 260 В). Здесь может быть применен примитивный разностный регулятор, в котором ток подзаряда корректируется дискретно, по измеряемым в началах проходящих циклов рассогласованиям напряжений (энергий). Такой регулятор можно построить по аналогии с обычным пропорционально-интегральным регулятором:

$$i_{s_{k+1}} = K \Delta U d_k + \frac{1}{N \tau} \sum \Delta U_m.$$



Рис. 6. Внешний вид ПИТ11-260, установленного на цокольном этаже Бустера.

Здесь $\Delta U d_k$ – текущее рассогласование, а $\sum \Delta U_m$ – накапливающаяся сумма (аналог интеграла); τ – постоянная времени регулятора. Такой регулятор обеспечивает апериодическую сходимость и астатизм. Темп его лежит в секундном диапазоне и исчисляется несколькими циклами.

Обычным средством для формирования тока в индуктивности было бы применение пропорционально-интегрального регулятора тока вида [7]

$$u_z = \left(k + \frac{1}{p\tau} \right) \Delta i. \quad (1)$$

В этом выражении

$$\Delta i = i_z - i,$$

где i_z – задание тока; i – измеренный ток, а u_z – задание напряжения усилителю-повторителю, который на силовом уровне повторяет сигнал систе-

мы управления с некоторой задержкой и некоторой погрешностью.

Интегральная часть регулятора обеспечивает астатизм, т.е. устранение ошибки в установившихся режимах, а пропорциональная часть обуславливает устойчивость и длительность переходных процессов [7]. Специфичность требований к источникам питания магнитов Бустера (см. табл. 1) не позволяет обойтись таким простым средством. Для динамичного и точного отслеживания задания тока с угловыми точками смены производной требуется, чтобы u_z в (1) изменялось бы в полном диапазоне при приращении Δi на величину $\approx 10^{-4}$. Требуемые для этого значения коэффициента усиления k нереализуемы из-за шумов. Положение не улучшает добавление в (1) дифференциальной составляющей. Таким образом, оказывается неизбежным переход к составной двухконтурной системе с подчиненным регулятором напряжения (система master-slave, рис. 5).

В этой системе динамичность улучшается при умеренном коэффициенте усиления по току путем применения подпора выхода регулятора тока reg_i напряжением:

$$u_z = du_z + Li'_z + Ri_z. \quad (2)$$

Для определения напряжения подпора (2), помимо i_z и i'_z , используются значения индуктивности L и сопротивления R . Параметры L , R известны лишь с ограниченной точностью и могут несколько изменяться в процессе работы. Поэтому в регуляторе требуется дополнительный блок – блок идентификации $ident$ [8, 9]. По измеренным переменным $i(t)$, $u(t)$ блок $ident$ определяет поправки к представленным предполагаемым значениям L_{nom} , R_{nom} :

$$L = L_{nom} + \delta L,$$

$$R = R_{nom} + \delta R.$$

Блок $ident$ действует перманентно и устраняет не только первоначальную погрешность, но и медленные изменения R , L при работе.

РЕАЛИЗАЦИЯ

На рис. 6 представлен внешний вид ПИТ11-260.

На рис. 7 показан вид шкафа управления источником тока (ШУПТ) ПИТ11-260. ШУПТ представляет собой отдельно стоящий шкаф с установленной внутри стандартной блочной универсальной конструкцией (“Ripac Vario”, Rittal) с размещенными в ней платами управления преобразователем. На передней двери ШУПТ установлены монитор с сенсорным экраном и панель местного управления. Последняя необходима для задания режимов работы преобразователя и управления им в местном режиме. На монитор



Рис. 7. Внешний вид шкафа управления источником тока: а – вид снаружи; б – вид изнутри.

выводится информация о состоянии преобразователя, текущей конфигурации силовой схемы, настройках регулятора, сообщения о сработавших защитах и различные предупреждения (например, предупреждение о неправильно собранной силовой схеме) и т.д. Внутри ШУПТ установлен блок управления ЦСУ, внешний вид которого показан на рис. 8.

По структуре управления ПИТ11-260 разделен на группу из трех “логических” преобразователей, каждый из которых состоит из четырех ШКК. Каждым таким “логическим” преобразователем управляет свой блок управления группой преобразователей (БУГП), входящий в состав ЦСУ и содержащий две платы управления: плату цифрового сигнального процессора (ЦСП) и плату обмена данными с ЛБУ. Источники токодобавки ПИТ06-60Д и ПИТ03-40Д работают независимо друг от друга, но управляет ими один БУГП.

Обмен данными между ЛБУ и ЦСУ идет по оптическим линиям связи на скорости 100 Мбит/с.

Измерение мгновенных значений электрических параметров работы ПИТ11-260 (входные и выходные напряжения и токи, напряжения на конденсаторных батареях и т.д.) осуществляется на основе использования 16-битных АЦП фирмы Analog Devices и 24-битных АЦП фирмы Texas Instruments с последующим кодированием данных в ПЛИС Altera и передачей их в систему управления по оптоволоконной связи на скорости 50 Мбит/с. Дальнейшая обработка измеренных значений осуществляется платами ЦСП ЦСУ. Внешний вид платы ЦСП/ПЛМ приведен на рис. 9. На плате ЦСП/ПЛМ, установленной в ЦСУ ПИТ11-260, применена связка 32-битного двухъядерного микроконтроллера TMS320F28377D фирмы Texas Instruments и ПЛИС Artix-7 фирмы XILINX. На микроконтроллер возложены задачи

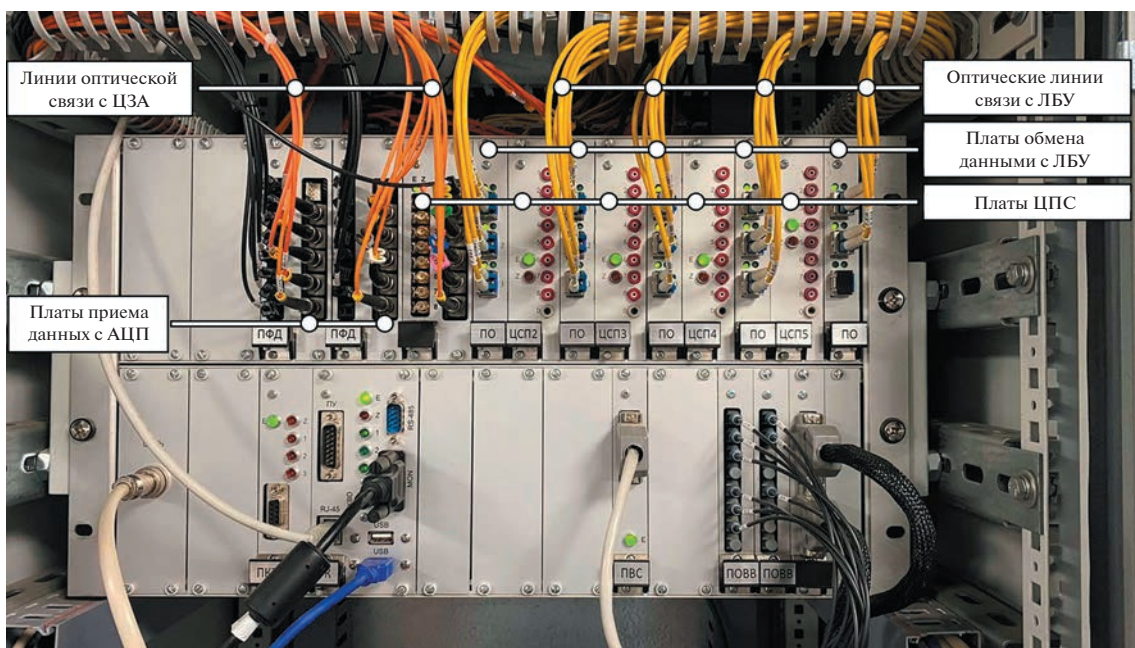


Рис. 8. Внешний вид блока управления ЦСУ. ЛБУ – локальный блок управления; ЦЗА – циклозадающая аппаратура; ЦСП – цифровой сигнальный процессор; АЦП – аналого-цифровой преобразователь.

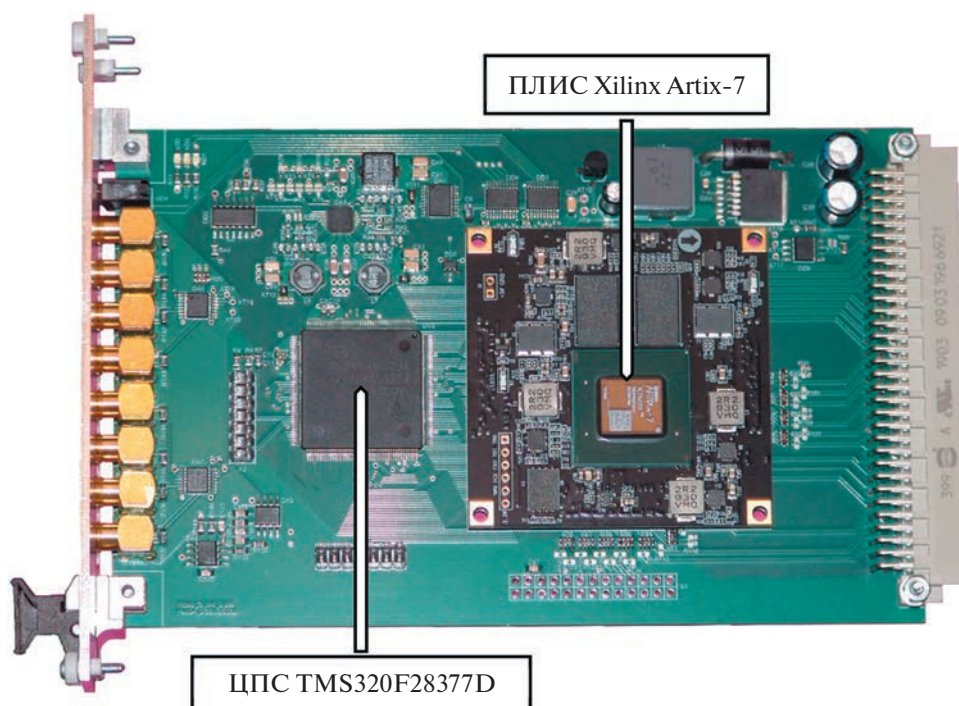


Рис. 9. Внешний вид платы ЦСП/ПЛМ.

по управлению режимами работы и защитами преобразователей, расчету регуляторов тока и обработке данных, поступающих из локальных блоков управления. В ПЛИС реализованы различные периферийные блоки, отвечающие за прием

и ускоренную обработку данных с плат АЦП, межплатный обмен внутри блока управления ЦСУ и т.д. Использование ПЛИС для ускорения обработки данных с плат АЦП позволило проводить расчеты регулятора тока с шагом по времени 8 мкс.

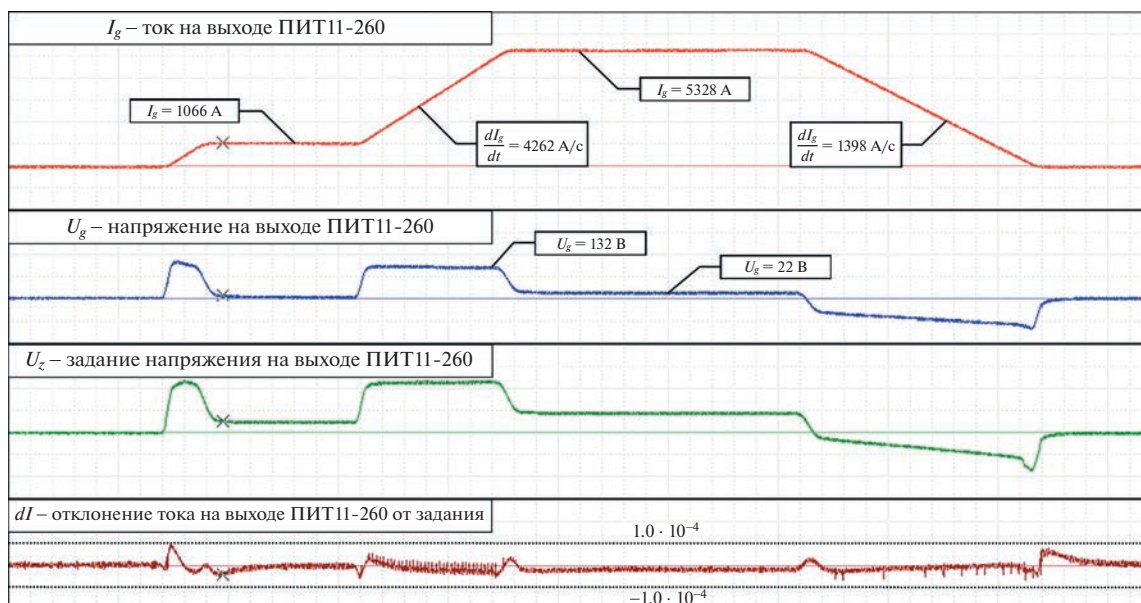


Рис. 10. Осциллограммы работы ПИТ11-260 в сеансе работы Бустера. Один цикл.

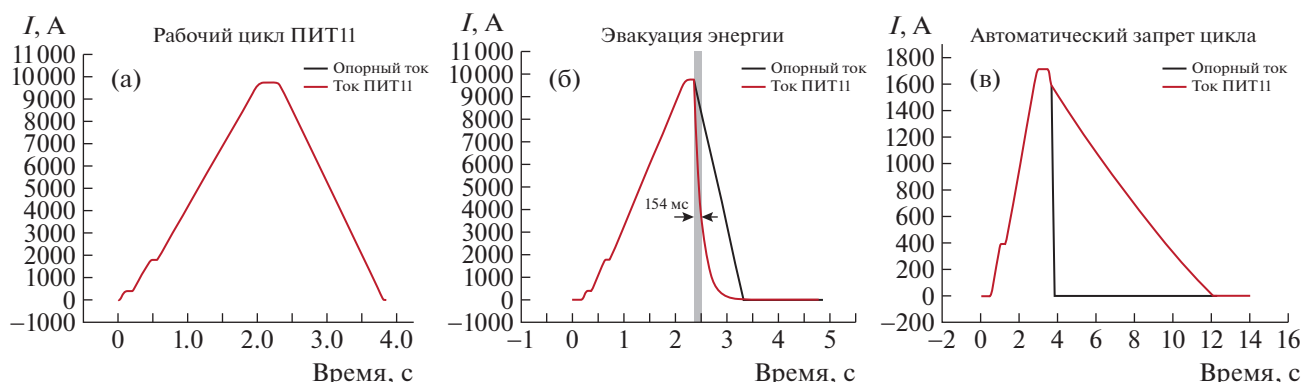


Рис. 11. Осциллограммы работы ПИТ11-260 в штатном и аварийных режимах: а – рабочий цикл; б – технологический режим вывода тока с эвакуацией энергии из магнитов (постоянная времени 154 мс при расчетной величине 160 мс); в – вывод тока с возвратом энергии в емкостный накопитель.

Задание формы и амплитуды выходного тока осуществляется с внешней циклозадающей аппаратуры (ЦЗА). ЦЗА формирует синхроимпульс цикла “STROBE” и 6 опорных сигналов, каждый из которых состоит из двух серий цифровых импульсов, соответствующих росту (“СЕРИЯ +”) и уменьшению (“СЕРИЯ –”) задаваемого параметра. Для обеспечения помехозащищенности передача задания из ЦЗА в ЦСУ идет по оптическим линиям связи.

ЦСУ позволяет осуществлять работу преобразователя на нагрузку в любой конфигурации силовых шкафов. Это необходимо в случае вывода одного или нескольких силовых преобразователей из работы для проведения плановых работ по ремонту и/или техническому обслуживанию.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

До начала работы на сверхпроводящие магниты выполнен цикл работы источника на эквивалентную нагрузку: проведены первичная настройка регулятора тока ПИТ11 и полноценные испытания ключей эвакуации с номинальным током. В первом технологическом сеансе Бустера в декабре 2020 г. были проведены пусконаладочные работы.

На рис. 10 приведена осциллограмма работы ПИТ11-260 с типовым циклом в сеансе работы Бустера, где I_g – ток на выходе ПИТ11-260, U_g – напряжение на выходе ПИТ11-260, U_z – задание напряжения на выходе ПИТ11-260 и dI – отклонение тока на выходе ПИТ11-260 от заданного значения.

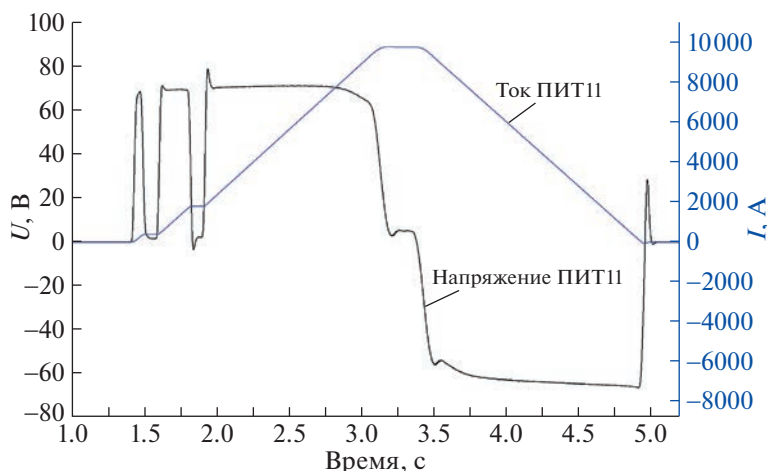


Рис. 12. Проектный цикл источника ПИТ11 Бустера в составе инжекционной цепи коллайдера NICA.

Максимальное напряжение на выходе источника составляет 132 В при скорости нарастания тока 4262 А/с. Максимальное отклонение тока от задания не превышает $1.0 \cdot 10^{-4}$ и наблюдается в угловых точках, где происходит смена производной задания выходного тока. При постоянном токе нагрузки (так называемый “стол тока”), равном 5328 А, напряжение на выходе преобразователя составляет всего 22 В. Отклонение тока от задания при этом меньше чем $5.0 \cdot 10^{-5}$. Осциллограммы работы ПИТ11-260 в штатном и аварийных режимах приведены на рис. 11, где показан вывод энергии из магнитов после размыкания ключей гашения поля (рис. 11б) и путем рекуперации энергии в накопитель за счет действия ПИТ11-260 (рис. 11в).

29 декабря 2020 г. был получен проектный цикл Бустера с максимальным током 9.7 кА и скоростью роста поля 7 кА/с (рис. 12). На осциллограмме напряжения прослеживаются эффекты насыщения магнитопроводов в области больших токов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Агрегат ПИТ11-260 был введен в работу и успешно прошел испытания в ходе сеанса работы Бустера в декабре 2020 года. В ходе сеанса подтвержден высокий уровень функциональности, обеспеченный интеллектуальными схемотехническими решениями и новой конверторной техникой с IGBT. Применение встроенного накопи-

теля существенно снизило издержки по созданию сетевой инфраструктуры, сняло пульсирующую нагрузку сети и уменьшило ее искажения.

Совокупность принятых решений при создании оборудования системы питания сверхпроводящих магнитов Бустера и, прежде всего, источника ПИТ11-260 позволили построить высокоэффективную прецизионную преобразовательную энергосистему.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Technical Project of NICA Acceleration Complex. Dubna, 2015.
2. ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014.
3. Мустафа Г.М. // Электричество. 1987. № 2. С. 23.
4. Hammond P. US patent 562545A. Оpubл. 29.04.1997.
5. Marquardt R. Current rectification circuit for voltage source inverters with separate energy stores replaces phase blocks with energy storing capacitors // Publication number DE10103031 (DE). 25.07.2002.
6. DIN EN 62391-1-2016. Fixed electric double-layer capacitors for use in electric and electronic equipment. Part 1: Generic specification (IEC 62391-1: 2015).
7. Смит О.Дж. Автоматическое регулирование. Пер. с англ. / Под ред. Е.П. Попова. М.: ГИФМЛ, 1962.
8. Калман Р., Фалб П., Арбив М. Очерки по математической теории систем. Пер. с англ. / Под ред. Я.З. Цыпкина. М.: Мир, 1971.
9. Эйхгофф П. Основы идентификации систем управления / Пер. с англ. М.: Мир, 1975.

МОЩНЫЙ ИСТОЧНИК СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
СУБНАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ С УПРАВЛЯЕМЫМИ
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ© 2023 г. Е. В. Балзовский^а, Ю. И. Буянов^а, А. М. Ефремов^а,
В. И. Кошелев^{а,*}, Э. С. Некрасов^а, С. С. Смирнов^а^аИнститут сильноточной электроники СО РАН
Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3

*e-mail: koshelev@lhfe.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 26.08.2022 г.

После доработки 05.09.2022 г.

Принята к публикации 08.11.2022 г.

Разработан мощный источник сверхширокополосного излучения субнаносекундной длительности на основе гибридной антенны с офсетным отражателем. В фокусе отражателя расположена решетка 2×2 комбинированных антенн, возбуждаемых четырехканальным формирователем биполярных импульсов напряжения с амплитудой 65 кВ и длительностью 0.5 нс на частоте повторения до 100 Гц. Реализованы режимы излучения с дискретным сканированием волновым пучком, а также с линейной, ортогональными и эллиптической поляризациями. Получены импульсы излучения с напряженностью поля 40–120 кВ/м на расстоянии 4.5 м.

DOI: 10.31857/S0032816223020143, EDN: GSNWFE

1. ВВЕДЕНИЕ

Мощные источники сверхширокополосного (СШП) излучения разрабатываются для исследований взаимодействия сильных электромагнитных полей с объектами [1, 2], а также для радаров с высоким пространственным разрешением [3]. В Институте сильноточной электроники СО РАН создана серия источников СШП-излучения на основе решеток комбинированных антенн, возбуждаемых высоковольтными биполярными импульсами длительностью 0.2–3 нс [4]. Наряду с многоэлементными решетками, во многих лабораториях разрабатываются мощные источники СШП-излучения на основе зеркальных антенн. Для возбуждения таких антенн используются одиночные излучатели следующих типов: ТЕМ [5], электрический диполь [6, 7] и комбинированная антенна [8]. В последнем случае использовался офсетный отражатель.

Каждое направление имеет свои достоинства. В источниках на основе решеток возможно управление характеристиками излучения, включая диаграмму направленности [9] и спектр излучения [10]. Зеркальные антенны привлекают к себе внимание простотой увеличения пиковой напряженности электрического поля E_p импульса излучения. Гибридные антенны, состоящие из отражателя, в фокусе которого располагается решетка, позволяют объединить достоинства двух

направлений в создании мощных источников СШП-излучения. В работе [11] предложена гибридная антенна на основе офсетного отражателя с решеткой 2×2 комбинированных антенн, возбуждаемых биполярным импульсом длительностью 0.5 нс. По результатам расчетов выбраны поперечные размеры антенны 65×60 мм². Была разработана и создана комбинированная антенна (КА) [12, 13] с требуемыми параметрами для применения в решетке 2×2 .

Целью данной работы является исследование и разработка мощного источника СШП-излучения субнаносекундной длительности на основе гибридной антенны. Важным элементом мощного источника является четырехканальный формирователь биполярных импульсов (ФБИ). В разработанных ранее четырехканальных ФБИ [9, 10] в каждом канале использовалась схема с двумя разрядниками и тремя коаксиальными линиями [14]. Разрядники расположены в одном газовом объеме, и для субнаносекундного времени их срабатывания требуется тщательная настройка межэлементных зазоров. Каждый разрядник имеет свой разброс времени срабатывания, что снижает стабильность по амплитуде и длительности выходных биполярных импульсов.

В данной работе с целью увеличения стабильности биполярных импульсов длительностью 0.5 нс впервые применена в каждом канале схема

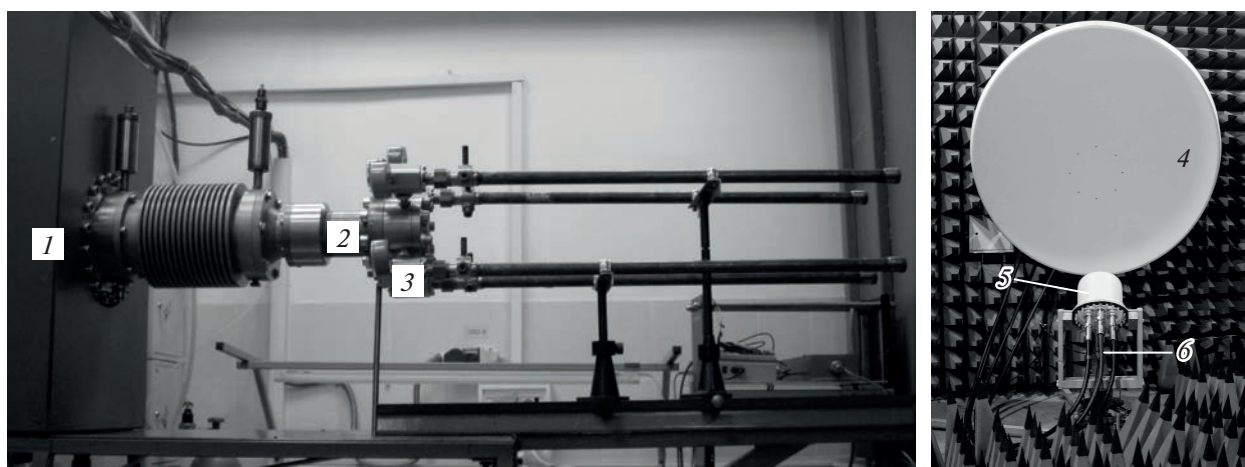


Рис. 1. Конструкция источника. 1 – генератор высоковольтных импульсов СИНУС-160; 2 – промежуточная ступень обострения; 3 – четырехканальный формирователь биполярных импульсов; 4 – офсетный отражатель; 5 – антенная решетка в диэлектрическом контейнере; 6 – коаксиальные кабели.

с одним разрядником. Ожидается, что сокращение общего числа разрядников с 9 до 5 в четырехканальном формирователе позволит повысить стабильность излученных импульсов и упростить процедуру настройки схемы формирователя.

2. КОНСТРУКЦИЯ ИСТОЧНИКА

Источник мощных СШП-импульсов (рис. 1) включает в себя генератор биполярных импульсов и гибридную антенну. Четырехканальный генератор биполярных импульсов состоит из генератора высоковольтных монополярных импульсов СИНУС-160 (1), промежуточной ступени обострения 2 и четырехканального формирователя биполярных импульсов 3. Гибридная антенна состоит из офсетного отражателя 4, в фокусе которого расположена решетка 2×2 комбинированных антенн 5. Антенная решетка располагается в диэлектрическом контейнере. Элементы решетки подключены к выходам генератора коаксиальными кордельными кабелями РК 50-17-51С (6). Кабели и диэлектрический контейнер заполнены газом SF₆ под давлением 5 и 1.5 атм соответственно.

3. ЧЕТЫРЕХКАНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР БИПОЛЯРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Эквивалентная схема четырехканального генератора биполярных импульсов приведена на рис. 2. Схема содержит промежуточную ступень обострения и четыре идентичных формирователя биполярных импульсов F_1-F_4 . В состав промежуточной ступени входят накопительная линия FL_1 и разрядник S_1 . Каждый формирователь собран по схеме с одним разрядником и содержит формирующие линии $FL_{31}-FL_{34}$ и $FL_{41}-FL_{44}$, разде-

лительные линии $FL_{21}-FL_{24}$, передающие линии $FL_{51}-FL_{54}$, разрядники $S_{21}-S_{24}$ и нагрузки $R_{11}-R_{14}$.

Схема моделировалась в программном продукте PSpice. Время коммутации, т.е. время, в течение которого сопротивление разрядника меняется от 100 кОм до 0.01 Ом, установлено для S_1 равным 0.75 нс, а для $S_{21}-S_{24}$ – 0.2 нс. Промежуточная накопительная линия FL_1 заряжается за время 3 нс от генератора СИНУС-160 с частотой следования 100 Гц (рис. 3, кривая U_1). При срабатывании разрядника S_1 при напряжении, близком к максимальному 470 кВ, происходит зарядка за время 0.4 нс формирующих линий $FL_{31}-FL_{34}$ и $FL_{41}-FL_{44}$ через разделительные линии $FL_{21}-FL_{24}$ (кривая U_2). При срабатывании разрядников $S_{21}-S_{24}$ в максимуме зарядного напряжения 360 кВ в передающих линиях $FL_{51}-FL_{54}$, нагруженных на согласованные нагрузки $R_{11}-R_{14}$, формируются биполярные импульсы напряжения (кривая U_3). Амплитуды биполярных импульсов приблизительно равны половине зарядного напряжения на линиях $FL_{31}-FL_{34}$ и $FL_{41}-FL_{44}$, а длительности – двойному суммарному пробегу в каждой паре из этих линий. Биполярные импульсы напряжения имеют небольшие предимпульсы, связанные с прохождением в нагрузки части зарядных импульсов через формирующие линии.

Конструкция промежуточной ступени обострения и блока формирователей биполярных импульсов F_1-F_4 представлена на рис. 4 и состоит из шести газовых объемов. В первом объеме с внутренним диаметром 54 мм в среде азота под давлением 50 атм размещены линия FL_1 , многоканальный разрядник S_1 и емкостный делитель зарядного напряжения D_1 . В четырех независимых идентичных объемах с внутренними диаметрами 22 мм,

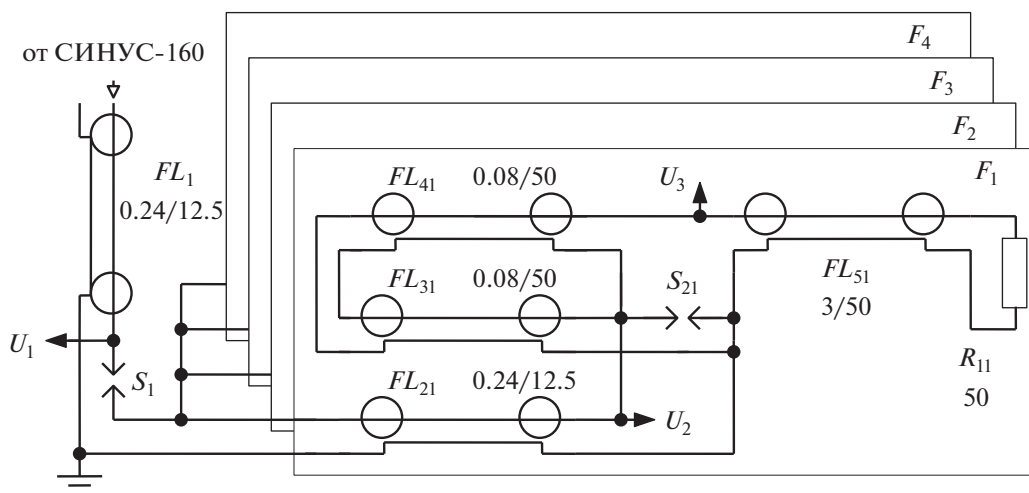


Рис. 2. Эквивалентная схема четырехканального генератора биполярных импульсов. *F* – формирователи; *FL* – коаксиальные линии (электрическая длина линии [нс]/ее волновое сопротивление [Ом]); *S* – разрядники; *R* – нагрузки.

ограниченных изоляторами *I* и изоляторами разделительных линий *FL*₂₁–*FL*₂₄, в среде азота под давлением 30–50 атм расположены линии *FL*₄₁–*FL*₄₄, *FL*₃₁–*FL*₃₄ и разрядники *S*₂₁–*S*₂₄. Электроды разрядника *S*₁ изготовлены из меди и встроены в концы линий. Для многоканального режима коммутации электроды этого разрядника установлены с зазором 1.4 ± 0.05 мм, согласно рекомендации работы [15]. Межэлектродное расстояние в разрядниках *S*₂₁–*S*₂₄ равно 0.3–0.4 мм. Оси четырех формирователей *F*₁–*F*₄ расположены в диаметрально противоположных точках на окружности с диаметром 220 мм. Давление азота в объемах промежуточной ступени обострения и в формирователях *F*₁–*F*₄ автоматически поддерживается с помощью пяти датчиков давления модели PSD-30 и десяти клапанов напуска и сброса газа. Идентичные по конструкции передающие линии *FL*₅₁–*FL*₅₄ со встроенными делителями напряже-

ния *D*₂₁–*D*₂₄ на связанных линиях и нагрузки *R*₁₁–*R*₁₄ имеют газовую (SF₆) изоляцию при давлении 5 атм.

Делители *D*₂₁–*D*₂₄ калибровались с помощью подачи биполярных импульсов напряжения с длительностями 0.5 нс на входы линий *FL*₅₁–*FL*₅₄ от низковольтных генераторов. Емкостный делитель *D*₁ не калиброван и служит для оценки времени зарядки напряжения на линии *FL*₁. Для регистрации выходных биполярных импульсов с

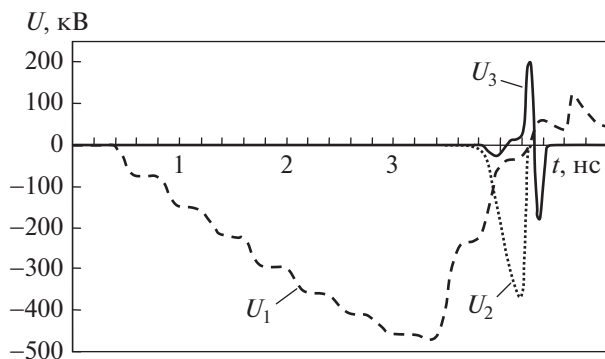


Рис. 3. Расчетные импульсы зарядных напряжений: *U*₁ – на линии *FL*₁; *U*₂ – на линиях *FL*₃₁, *FL*₄₁; *U*₃ – выходной биполярный импульс.

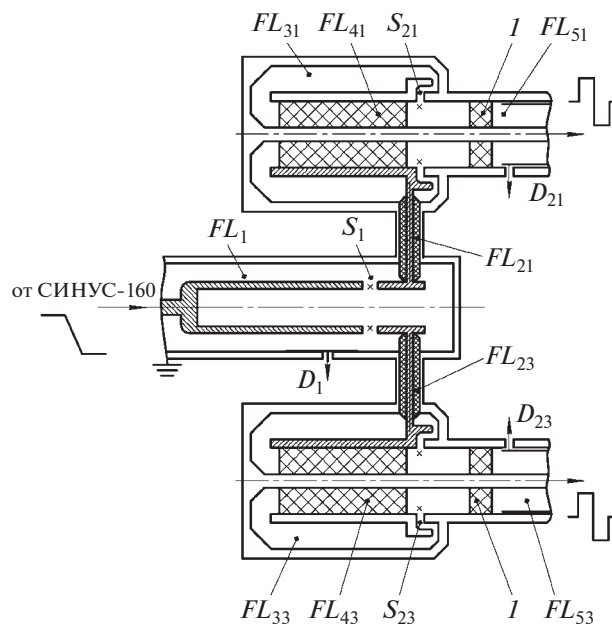


Рис. 4. Конструкция четырехканального формирователя биполярных импульсов. *I* – изоляторы; *D* – делители напряжения; *FL* – коаксиальные линии; *S* – разрядники.

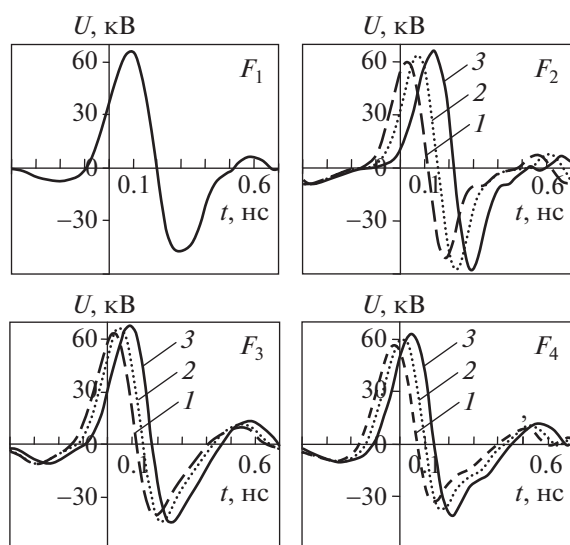


Рис. 5. Осциллограммы выходных биполярных импульсов, полученные с делителей D_{21} – D_{24} при давлениях: в канале F_1 – 50 атм, в каналах F_2 – F_4 – 40 (1), 45 (2) и 50 (3) атм.

делителей напряжения D_{21} – D_{24} и импульса зарядного напряжения с D_1 на линии FL_1 использовался осциллограф TDS 6604 с частотной полосой до 6 ГГц. Импульс зарядного напряжения на линию FL_2 поступал от генератора СИНУС-160, а выходные биполярные импульсы после последовательного срабатывания разрядников S_1 и S_{21} – S_{24} передавались по четырем передающим линиям FL_{51} – FL_{54} с волновым сопротивлением 50 Ом каждая либо в согласованные резистивные нагрузки при настройке генератора, либо в антенны. При указанных выше зазоре и давлении разрядник S_1 пробивался с задержкой, приблизительно равной 3 нс. При установке новых электродов через 5–7 мин работы генератора на частоте 100 Гц реализуется многоканальный режим работы с равномерной эрозией поверхности этих электродов.

На рис. 5 показаны осциллограммы выходных биполярных импульсов, полученные с делителей D_{21} – D_{24} . В качестве опорного сигнала для запуска осциллографа использовался выходной импульс канала F_1 при постоянном давлении 50 атм. Осциллограммы 1, 2 и 3 в каналах F_2 – F_4 получены при давлениях 40, 45 и 50 атм, соответственно. Амплитуды импульсов достигли 65 кВ. При среднем квадратичном разбросе амплитуды зарядного напряжения генератора СИНУС-160 относительно средней амплитуды около 1% среднее квадратичное разброс амплитуд биполярных импульсов относительно средней для всех каналов F_1 – F_4 составил не более 2.5%. Стабильность выходных импульсов между каналами оценивалась измере-

нием разброса временного интервала t_1 от переднего фронта импульса канала F_1 до точки нулевого перехода другого канала. Для всех каналов среднее квадратичное отклонение разброса времени t_1 не превышало 10–15 пс. На этот режим генератор выходил через 5 мин после его включения. Длительность импульсов определялась путем аппроксимации передних и задних фронтов до пересечений с нулевыми линиями и составила около 0.5 нс. В отличие от схемы формирователя с разомкнутой линией, в данной схеме реализована более высокая стабильность заднего фронта импульса. Среднее квадратичное разброс заднего фронта импульса относительно переднего составил 8–10 пс, практически он равен стабильности развертки осциллографа.

При изменении давления в каналах F_2 – F_4 с 50 до 40 атм возможна регулировка задержки импульсов по времени в диапазоне 70–100 пс. При этом амплитуды импульсов уменьшаются на 6.5–16%. Вероятно, это связано с тем, что зарядные импульсы формирующих линий FL_{31} – FL_{34} и FL_{41} – FL_{44} не имеют плоской вершины.

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИБРИДНОЙ АНТЕННЫ

Варианты размещения антенн в решетке-облучателе показаны на рис. 6. Антенны зафиксированы на фланце из оргстекла. Геометрические центры антенн расположены на окружности с диаметром 125 мм. Выбрано два варианта размещения антенн: для излучения импульсов с линейной (рис. 6а) и ортогональными либо эллиптической (рис. 6б) поляризациями. Отметим, что полоса частот согласования элемента решетки (0.94–6.45 ГГц) при коэффициенте стоячей волны по напряжению (КСВН) ≤ 2.5 уже, чем для изолированной антенны (0.94–6.7 ГГц) [12]. Излучение импульсов с эллиптической поляризацией достигается путем внесения временной задержки между двумя парами элементов антенной решетки с ортогональными поляризациями. Для варианта размещения антенн, показанного на рис. 6а, реализован режим сканирования волновым пучком путем внесения временного сдвига 1 нс между биполярными импульсами, питающими элементы решетки-облучателя. Временная задержка регулируется изменением длины коаксиальных кабелей, подключенных к антенным элементам. Антенны имеют локальный центр излучения на расстоянии 5.5 мм от апертуры [13]. Центр излучения антенной решетки-облучателя совмещен с фокусом офсетного отражателя. Отражатель представляет собой вырезку из параболоида вращения диаметром 1400 мм. Фокусное расстояние отражателя составляет 700 мм.

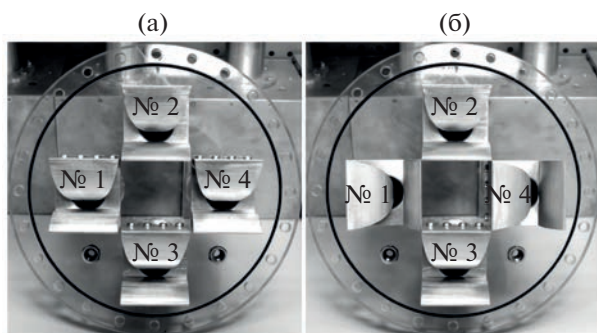


Рис. 6. Варианты размещения антенн № 1–№ 4 в решетке-облучателе для излучения импульсов с линейной (а), ортогональными и эллиптической (б) поляризациями.

Проведены экспериментальные исследования характеристик гибридной антенны при возбуждении низковольтными биполярными импульсами. В качестве источника низковольтных импульсов использован генератор биполярных импульсов напряжения производства НПП ТРИМ (<https://trimcom.ru/main-page/catalog/generatory-radioimpulsov/>), подключенный к элементам облучателя через широкополосный делитель мощности 1:4. Для регистрации излученного поля использованы ТЕМ-антенна с размерами апертуры 400×80 мм [16] и комбинированная антенна с поперечными размерами 75×75 мм [17]. Приемная антенна была расположена на расстояниях от 4.17 до 4.5 м от точки фокуса отражателя. Гибридная антенна установлена на опорно-поворотном устройстве. Сигнал с выхода приемной антенны регистрировался стробоскопическим осциллографом ТРИМ ТМР8112 (<https://trimcom.ru/main-page/catalog/cifrovye-stroboskopicheskie-oscillogrffy/>) с полосой до 12 ГГц.

Распределение по пиковой напряженности поля для гибридной антенны в режиме сканирования волновым пучком показано на рис. 7. Сканирование в H -плоскости (рис. 7а) осуществлялось при возбуждении с временной задержкой элементов решетки-облучателя № 1 (1) и № 4 (2), а в E -плоскости (рис. 7б) – при возбуждении элементов решетки-облучателя № 2 (3) и № 3 (4). Нумерация элементов решетки указана на рис. 6.

При сканировании в H -плоскости наблюдается симметрия распределения поля. Максимум излучения при возбуждении элемента № 1 направлен на угол -4° , при возбуждении элемента № 4 – на угол $+4^\circ$. Угловая ширина распределения поля по уровню 0.707 одинакова для обоих случаев и составила 7.7° . Уровень кроссполяризации составил не более 0.25 относительно основной поляризации. В E -плоскости максимум излучения при возбуждении антенны № 2 направлен на угол -3.5° . Ширина распределения по уровню 0.707

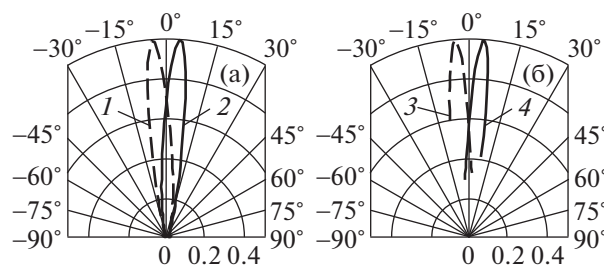


Рис. 7. Распределение пиковой напряженности поля гибридной антенны в режиме сканирования волновым пучком: а – в H -плоскости при возбуждении элементов решетки-облучателя № 1 (1) и № 4 (2); б – в E -плоскости при возбуждении элементов решетки-облучателя № 2 (3) и № 3 (4).

составила 7.1° . При возбуждении с задержкой антенны № 3 максимум излучения направлен на угол $+5^\circ$, ширина распределения поля составила 6.6° . Уровень кроссполяризации составил не более 0.07 относительно основной поляризации.

Осциллограмма излученных гибридной антенной низковольтных импульсов в режиме сканирования волновым пучком показана на рис. 8. Импульсы на осциллограмме соответствуют следующим антеннам: 1 – № 4; 2 – № 3; 3 – № 1 (в максимуме распределения поля); 4 – № 2. Задержка между соседними импульсами составляет 1 нс. Оценена эффективность по пиковой напряженности электрического поля: $k_E = rE_p/U_{g\max}$, где r – расстояние, $U_{g\max}$ – максимальная амплитуда импульса напряжения. Пиковая напряженность поля E_p определяется выражением $E_p = U_p/l_e$, где U_p – пиковая амплитуда напряжения на выходе приемной антенны, l_e – эффективная длина приемной антенны. Для ТЕМ-антенны $l_e = 3.84$ см на частоте 2 ГГц, соответствующей максимуму спектра излучения, вблизи которого сосредоточена основная часть энергии излучения. Средняя величина k_E в режиме сканирования волновым пучком составляет 6.12.

При синхронном возбуждении элементов облучателя максимум излучения направлен по оси, ширина распределения поля в H -плоскости составляет 8.3° , величина кроссполяризованной компоненты поля не превышает 0.21 относительно амплитуды основной поляризации. В E -плоскости ширина волнового пучка 9° , амплитуда кроссполяризованной компоненты не превышает 0.04. Эффективность по пиковой напряженности поля $k_E = 15.9$.

Распределение поля гибридной антенны в режиме излучения импульсов с ортогональными поляризациями приведено на рис. 9. Две пары антенн облучателя: № 1 + № 4 и № 2 + № 3 – возбуждались биполярными импульсами с задержкой 1 нс между ними. Распределение поля в

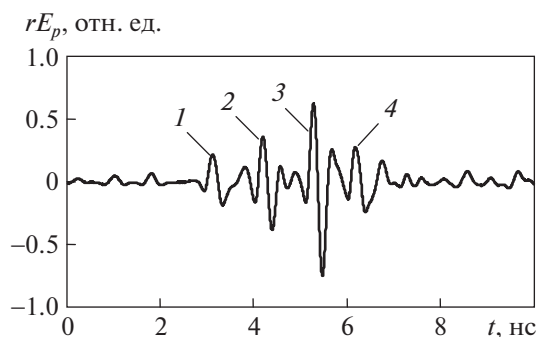


Рис. 8. Осциллограмма излученных импульсов в режиме сканирования волновым пучком. Импульсы соответствуют следующим антеннам: 1 — № 4; 2 — № 3; 3 — № 1 (в максимуме распределения поля); 4 — № 2.

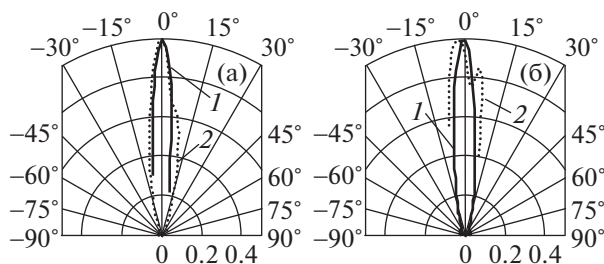


Рис. 9. Распределение пиковой напряженности поля гибридной антенны в режиме излучения импульсов с ортогональными поляризациями в H - (а) и E -плоскости (б) при возбуждении антенн решетки-облучателя № 1 + № 4 (1) и № 2 + № 3 (2).

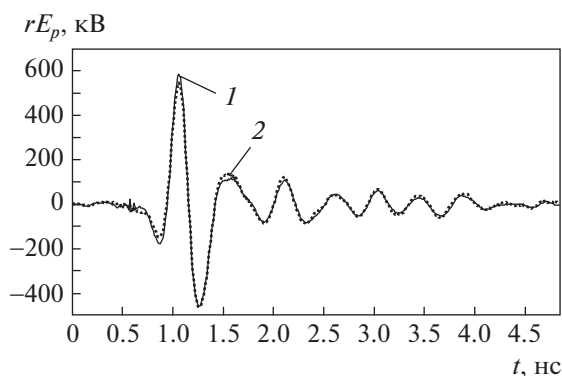


Рис. 10. Осциллограммы импульсов излучения при синхронном возбуждении антенн решетки-облучателя и частотах повторения импульсов 10 (1) и 100 Гц (2).

H -плоскости (рис. 9а) при синхронном возбуждении элементов № 1 + № 4 (кривая 1) имеет ширину 7.8° , величина кроссполяризации не превышает 0.11 во всем диапазоне измерения. При синхронном возбуждении элементов № 2 + № 3 (кривая 2) ширина волнового пучка составляет

8° , а величина кроссполяризации не превышает 0.22. Ширина волнового пучка в E -плоскости (рис. 9б) по уровню 0.707 относительно амплитуды при синхронном возбуждении элементов № 1 + № 4 (кривая 1) составляет 8.3° , уровень кроссполяризации не превышает 0.21. При синхронном возбуждении элементов № 2 + № 3 (кривая 2) ширина пучка 14° , величина кроссполяризационной компоненты поля 0.05.

5. ИЗЛУЧЕНИЕ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Проведены экспериментальные исследования по излучению мощных СШП-импульсов гибридной антенной. На вход элементов решетки поступали биполярные импульсы с пиковой мощностью 84.5 МВт. Суммарная пиковая мощность импульсов напряжения на входе 4-элементной решетки была 338 МВт. В измерениях использовалась приемная ТЕМ-антенна, расположенная на расстоянии 4.5 м от точки фокуса отражателя. Запись осциллограмм проводилась осциллографом Keysight MR608A с полосой пропускания 6.3 ГГц.

На рис. 10 приведены осциллограммы зарегистрированных импульсов излучения при синхронном возбуждении антенн решетки-облучателя и частотах повторения импульсов 10 (кривая 1) и 100 Гц (кривая 2). Спектр излучения по уровню -10 дБ, оцененный с помощью преобразования Фурье, находился в диапазоне частот 0.9–3.16 ГГц. Максимуму спектра соответствовала частота 2.05 ГГц. Произведение rE_p равно 580 кВ при частоте повторения 10 Гц и 540 кВ при частоте повторения 100 Гц. Эффективность по пиковой напряженности поля $k_E = 8.9$ при частоте повторения 10 Гц и $k_E = 8.3$ при частоте повторения 100 Гц. В последнем случае оцененная пиковая плотность мощности излучения в приближении дальней зоны (плоской волны) равнялась 38 МВт/м².

Осциллограммы зарегистрированных импульсов излучения в режиме сканирования волновым пучком показаны на рис. 11. Элементы решетки возбуждались последовательно импульсами с временной задержкой 1 нс. Осциллограммы приведены при углах поворота гибридной антенны, соответствующих максимумам излучения антенны. В H -плоскости при возбуждении антенн № 4 (рис. 11а) и № 1 (рис. 11б) произведение пиковой напряженности поля на расстояние составило 220 кВ. Эффективность по пиковой напряженности поля $k_E \approx 3.4$. В E -плоскости при возбуждении антенн № 3 (рис. 11в) и № 2 (рис. 11г) произведение пиковой напряженности поля на расстояние составило 210 и 200 кВ соответственно. Эффективность по пиковой напряженности поля $k_E \approx 3.2$ при возбуждении антенны № 3 и $k_E \approx 3.1$ при возбуждении антенны № 2. Измерения в ре-

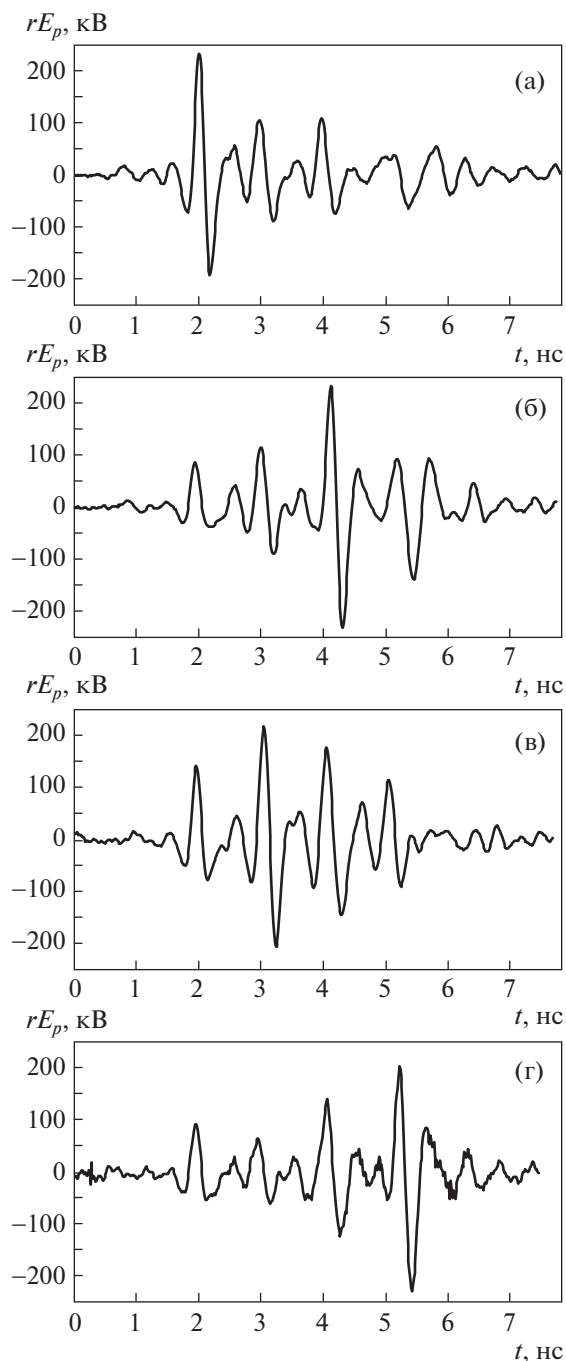


Рис. 11. Осциллограммы импульсов излучения в режиме сканирования волновым пучком для антенн № 4 (а), № 1 (б), № 3 (в) и № 2 (г).

жиме сканирования проведены при частоте повторения импульсов 10 Гц.

Меньшее значение k_E по сравнению с низковольтными измерениями обусловлено различием форм импульсов и потерями мощности в кабелях РК 50-17-51С длиной до 4 м. Амплитудно-частотная характеристика кабельного тракта по уровню

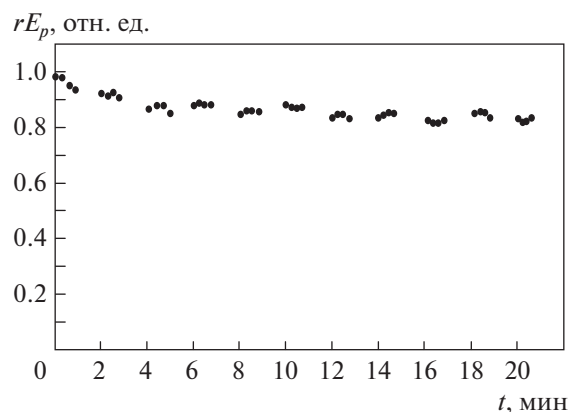


Рис. 12. Зависимость произведения пиковой напряженности поля на расстояние от времени при частоте повторения импульсов 100 Гц.

–3 дБ находилась в пределах 0–6.75 ГГц. Линейность фазочастотной характеристики ($\pm 11.25^\circ$) соответствовала частотной полосе 0–4 ГГц. При этом в полосе частот 0–4.9 ГГц величина КСВН не превышала 2.5.

Результаты измерений излучения гибридной антенны при частоте повторения импульсов 100 Гц на протяжении 20 мин приведены на рис. 12. Среднее значение пиковой напряженности поля падает не более чем на 18%. При этом основное падение наблюдается в течение первых 5–7 мин, что соответствует времени установления многоканального режима работы разрядников генератора.

Проведен эксперимент по излучению мощных импульсов с эллиптической поляризацией. На рис. 13 показаны годографы излученного гибридной антенной поля при синхронном изменении давления в двух каналах генератора. В оставшихся двух каналах давление постоянно и составляло 50 атм. Изменение давления в двух каналах генератора приводит к возбуждению с временной задержкой пары антенн решетки-облучателя с ортогональной поляризацией. Расположение элементов решетки соответствует рис. 6б. При давлении 50 атм (кривая 1) задержка импульсов между двумя парами антенн мала и поляризация близка к линейной. При дальнейшем уменьшении давления в двух каналах генератора временная задержка увеличивается, что приводит к изменению годографа и увеличению коэффициента эллиптичности излученного поля. Отметим также, что с уменьшением давления уменьшается амплитуда импульсов напряжения. Оценка коэффициента эллиптичности проведена по среднеквадратичному отклонению компонент поля E_y и E_x . При давлении 50 атм коэффициент эллиптичности равен 0.14; при 45 атм (кривая 2) – 0.16; при 40 атм (кривая 3) – 0.23; при 35 атм – 0.33; при

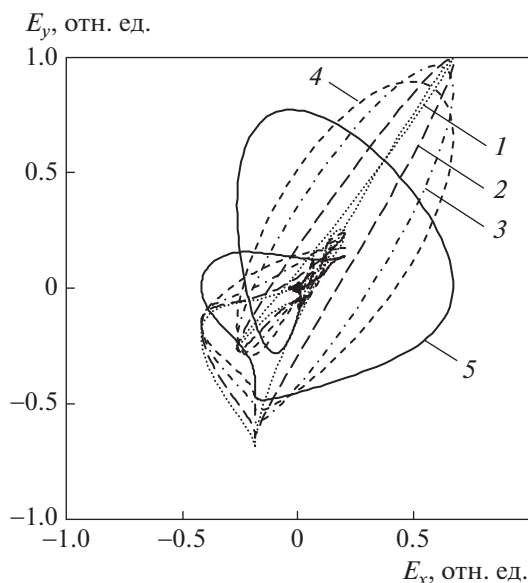


Рис. 13. Изменение годографа излученного поля при различном давлении в разрядниках двух каналов генератора: 50 (1); 45 (2); 40 (3); 35 (4); 30 атм (5).

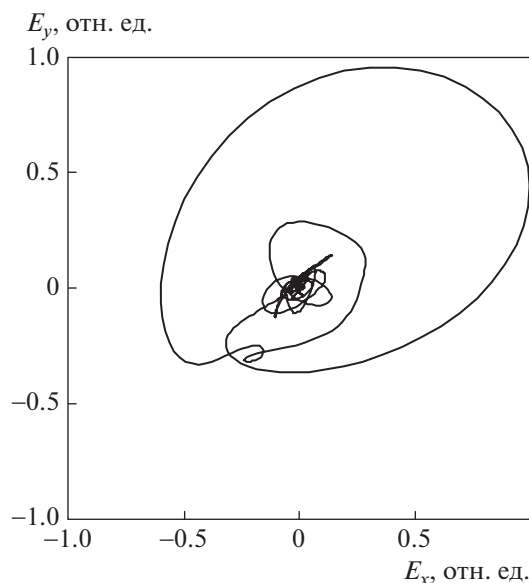


Рис. 14. Годограф поля при задержке 120 пс между импульсами излучения с ортогональными поляризациями.

30 атм — 0.74. Произведение rE_p при этом изменяется от 330 до 255 кВ.

По результатам расчетов максимальный коэффициент эллиптичности достигается при задержке импульсов между двумя парами антенн 120 пс. На рис. 14 показан годограф излученного гибридной антенной поля при возбуждении высоковольтными биполярными импульсами и задержке между импульсами с ортогональными поляризациями 120 пс. Давление во всех каналах генератора было 50 атм, а временная задержка регулировалась отрезками коаксиального кабеля. Коэффициент эллиптичности составил 0.74. При этом произведение rE_p достигало 290 кВ.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан мощный источник сверхширокополосного излучения субнаносекундной длительности на основе гибридной антенны. Реализованы режимы излучения с дискретным сканированием волновым пучком, а также с линейной, ортогональными и эллиптической поляризациями. Получены мощные импульсы излучения с произведением пиковой напряженности поля на расстояние до 540 кВ в режиме синхронного возбуждения антенн облучателя при частоте повторения до 100 Гц. В режиме дискретного сканирования волновым пучком получены импульсы излучения с произведением пиковой напряженности поля на расстояние до 220 кВ при частоте повторения 10 Гц. В режиме излучения с эллиптической поляризацией поля получены импульсы с произве-

дением пиковой напряженности поля на расстояние 255–290 кВ и коэффициентом эллиптичности до 0.74.

Разработан новый четырехканальный формирователь биполярных импульсов длительностью 0.5 нс с амплитудами импульсов до 65 кВ. Реализован режим управления временной задержкой при изменении давления в каналах генератора. При изменении давления в каналах с 50 до 40 атм задержка импульсов по времени возрастала до 100 пс. При этом амплитуды импульсов уменьшались на 16%.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 20-08-00529.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Giri D.V.* High-power Electromagnetic Radiators (Nonlethal Weapons and Other Applications). Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 2004.
2. *Giri D.V., Hoad R., Sabath F.* High-power Electromagnetic Effects on Electronic Systems. Boston, London: Artech House, 2020.
3. Ultra-Wideband Radar Technology / Ed. by J.D. Taylor. Boca Raton: CRC Press, 2001.
4. *Koshelev V.I., Buyanov Yu.I., Belichenko V.P.* Ultrawideband Short-Pulse Radio Systems. Boston, London: Artech House, 2017.
5. *Giri D.V., Lachner H., Smith I.D., Morton D.W., Baum C.E., Marek J.R., Prather W.D., Scholfield D.W.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1997. V. 25. Iss. 2. P. 318.

6. *Ryu J., Lee J., Chin H., Yeom J.-H., Rom H.-T., Kwon H.-O., Han S.H., Choi J.S.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. V. 41. Iss. 8. P. 2283.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2013.2272472>
7. *Фортон В.Е., Исаенков Ю.И., Михайлов В.М., Нестеров Е.В., Остапьев В.Е., Семенов Ю.В., Строганов В.А.* // РЭ. 2013. Т. 58. № 11. С. 1102.
<https://doi.org/10.7868/S0033849413110041>
8. *Balzovsky E., Buyanov Y., Koshelev V., Nekrasov E., Gubanov V., Stepchenko A., Efremov A.* // 20th Int. Symp. on High-Current Electronics (ISHCE). NY.: IEEE, Inc., 2018. P. 80.
<https://doi.org/10.1109/ISHCE.2018.8521226>
9. *Ефремов А.М., Кошелев В.И., Ковальчук Б.М., Плиско В.В.* // ПТЭ. 2013. № 3. С. 61.
<https://doi.org/10.7868/S0032816213030038>
10. *Ефремов А.М., Кошелев В.И., Плиско В.В., Севостьянов Е.А.* // ПТЭ. 2019. № 1. С. 36.
<https://doi.org/10.1134/S003281621806006X>
11. *Буянов Ю.И., Балзовский Е.В., Кошелев В.И., Некрасов Э.С.* // Изв. вузов. Физика. 2019. Т. 62. № 7. С. 111.
<https://doi.org/10.17223/00213411/62/7/111>
12. *Balzovsky E., Buyanov Y., Koshelev V., Nekrasov E.* // Microw. Opt. Technol. Lett. 2021. V. 63. Iss. 11. P. 2866.
<https://doi.org/10.1002/mop.32994>
13. *Balzovsky E.V., Buyanov Yu.I., Koshelev V.I., and Nekrasov E.S.* // 2nd Int. Conf. on Advances in Materials, Systems and Technologies (CAMSTech). NY.: AIP, Inc., 2022. V. 2467. P. 060021.
<https://doi.org/10.1063/5.0092398>
14. *Andreev Yu.A., Gubanov V.P., Efremov A.M., Koshelev V.I., Korovin S.D., Kovalchuk B.M., Kremnev V.V., Plisko V.V., Stepchenko A.S., and Sukhushin K.N.* // Laser Part. Beams. 2003. V. 21. Iss. 2. P. 211.
<https://doi.org/10.1017/S0263034603212088>
15. *Ефремов А.М.* // ПТЭ. 2017. № 4. С. 90.
<https://doi.org/10.7868/S0032816217040036>
16. *Андреев Ю.А., Кошелев В.И., Плиско В.В.* // Доклады 5 Всероссийской научно-технической конференции “Радиолокация и радиосвязь”. М.: ИРЭ РАН, 2011, С. 77.
17. *Ефремов А.М., Кошелев В.И., Ковальчук Б.М., Плиско В.В., Сухушин К.Н.* // ПТЭ. 2011. № 1. С. 77.

СИЛЬНОТОЧНЫЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ИМПУЛЬСНЫХ СИЛОВЫХ ЦЕПЕЙ

© 2023 г. Р. Ш. Еникеев^{а,*}, К. С. Сапожников^а, А. А. Руденко^а

^аНаучно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова
Россия, 196641, Санкт-Петербург, пос. Металлострой, дорога на Металлострой, 3

*e-mail: enikeev@sintez.niiefa.spb.su

Поступила в редакцию 30.09.2022 г.

После доработки 19.10.2022 г.

Принята к публикации 26.11.2022 г.

Представлены результаты разработки и исследования сильноточного высоковольтного предохранителя, предназначенного для защиты от токов короткого замыкания отдельных элементов силового оборудования системы электропитания международного экспериментального термоядерного реактора (ИТЭР). В соответствии с требованиями ИТЭР предохранитель предназначен для использования в импульсном режиме работы и при возникновении короткого замыкания должен отключить ток амплитудой до 30 кА, обеспечив длительный разрыв электрической цепи с напряжением до 9 кВ. Приводится описание конструкции разработанного предохранителя, рассматриваются основные технические решения, обеспечивающие его соответствие требованиям по электрической прочности, коммутуемым токам и времени отключения, а также результаты экспериментальных исследований коммутационных характеристик. Определены диапазон отключаемых токов и электрическая прочность в импульсном режиме работы с приложением послекоммутационного напряжения.

DOI: 10.31857/S0032816223020167, EDN: GSUGTS

ВВЕДЕНИЕ

Сверхпроводящая магнитная система ИТЭР состоит из 18-ти катушек тороидального поля, шести катушек полоидального поля и шести модулей центрального соленоида. В случае потери сверхпроводимости магнитная энергия, накопленная в катушках, должна быть выведена с целью их защиты от перегрева. Это достигается за счет включения силовых энергопоглощающих резисторов последовательно с катушками при помощи системы быстрого вывода энергии, состоящей из коммутационных аппаратов, батареи противотока и RC -цепи, демпфирующей коммутационные перенапряжения [1, 2].

Предохранитель включен последовательно с демпфирующей цепью для отключения аварийного тока в случае электрического пробоя конденсатора цепи. Он представляет собой управляемый выключатель одноразового действия, работа которого основана на отключении тока при электрическом взрыве токоведущего проводника (ЭВП). Простота конструкции предохранителя позволила обеспечить надежность изделия и его сравнительно небольшие габариты.

КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЯ

Предохранитель (рис. 1) состоит из следующих основных конструктивных узлов: коммутирующей части и буферных камер.

Коммутирующая часть выполнена в виде набора параллельно соединенных медных многопроводных проводников (отключающий элемент L) в шелковой и полимерной изоляции, расположенных в каналах изоляционных стеклопластиковых труб 2. При протекании аварийного тока медные проводники коммутирующей части за короткий промежуток времени с интенсивностью взрыва переходят в непроводящее парообразное состояние с последующим образованием паузы тока [3]. Характерной особенностью использования набора изолированных проводников является равномерное протекание тока по их сечению и уменьшение времени отключения за счет большой площади поверхности и высокой скорости испарения по сравнению с набором неизолированных проводников или с одножильным проводником. Расширяющиеся продукты электрического взрыва проводника заполняют внутренние каналы изоляционных стеклопластиковых труб, что приводит к возрастанию давления внутри них и отключению аварийного тока амплитудой до ~ 30 кА с производ-

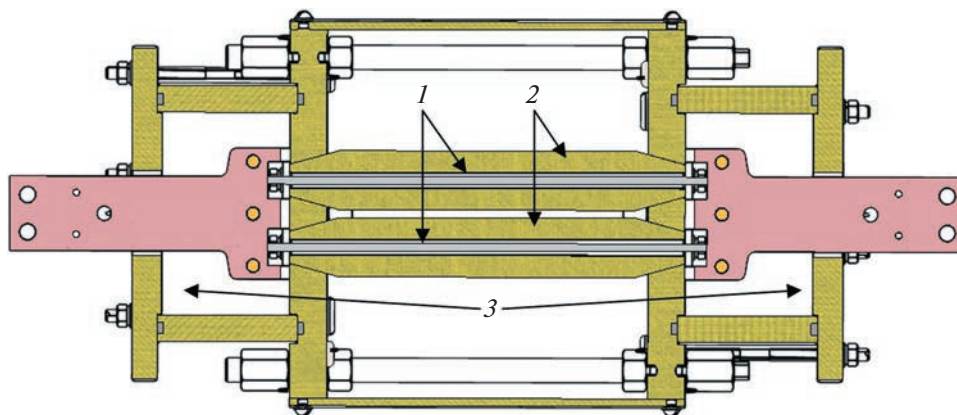


Рис. 1. Конструкция сильноточного высоковольтного предохранителя на основе ЭВП. 1 – отключающий элемент, 2 – изоляционная труба, 3 – буферные камеры.

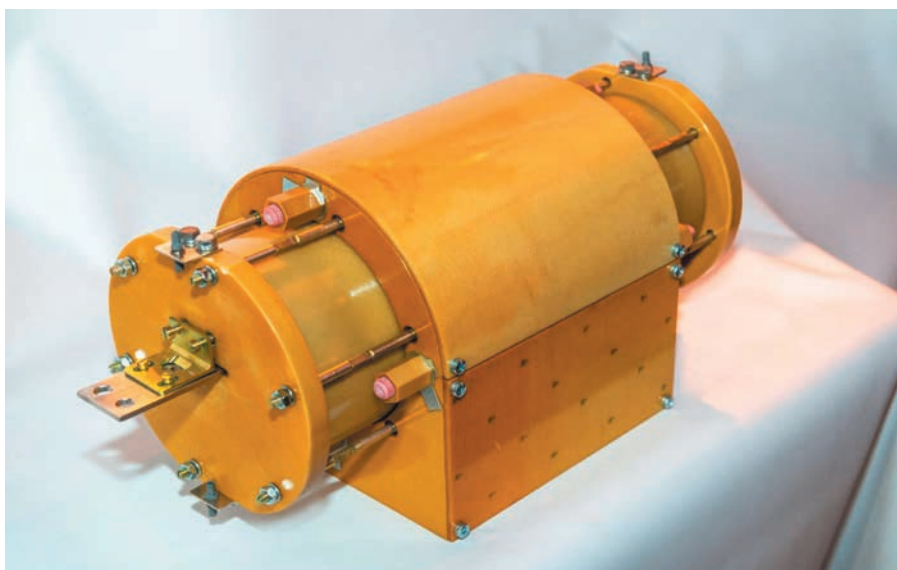


Рис. 2. Внешний вид сильноточного высоковольтного предохранителя на основе ЭВП.

ной ~ 20 кА/мс. Буферные камеры 3 в виде изоляционных цилиндров размещены с двух сторон предохранителя и закрывают боковые отверстия каналов коммутирующей части. Они предназначены для приема продуктов ЭВП при коммутации и ограничения их выхода в атмосферу, что защищает от возникновения электрического пробоя и вторичного дугового разряда в образовавшейся среде снаружи предохранителя. Такая конструкция позволяет уменьшить размеры коммутирующей части и обеспечить высокую электрическую прочность изоляционного промежутка, а также снизить воздействие на расположенное рядом оборудование при срабатывании предохранителя.

Предохранитель, внешний вид которого представлен на рис. 2, имеет собственную систему индикации. Через токоведущие шины проходит сигнальный оптический кабель, подключаемый к

внешней системе контроля и защиты. При срабатывании предохранителя металлические ножи перерезают оптический кабель, что фиксируется внешней системой контроля и защиты.

Коммутационные характеристики предохранителя задаются конструкцией изоляционной части и выбором параметров взрывающихся проводников. Соответствие требованиям ИТЭР было подтверждено в результате проведенной серии экспериментов.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПРЕДОХРАНИТЕЛЯ В ДЕМПФИРУЮЩЕЙ ЦЕПИ

Система быстрого вывода энергии ИТЭР предназначена для отключения тока в сверхпроводящих магнитных катушках, при этом с целью

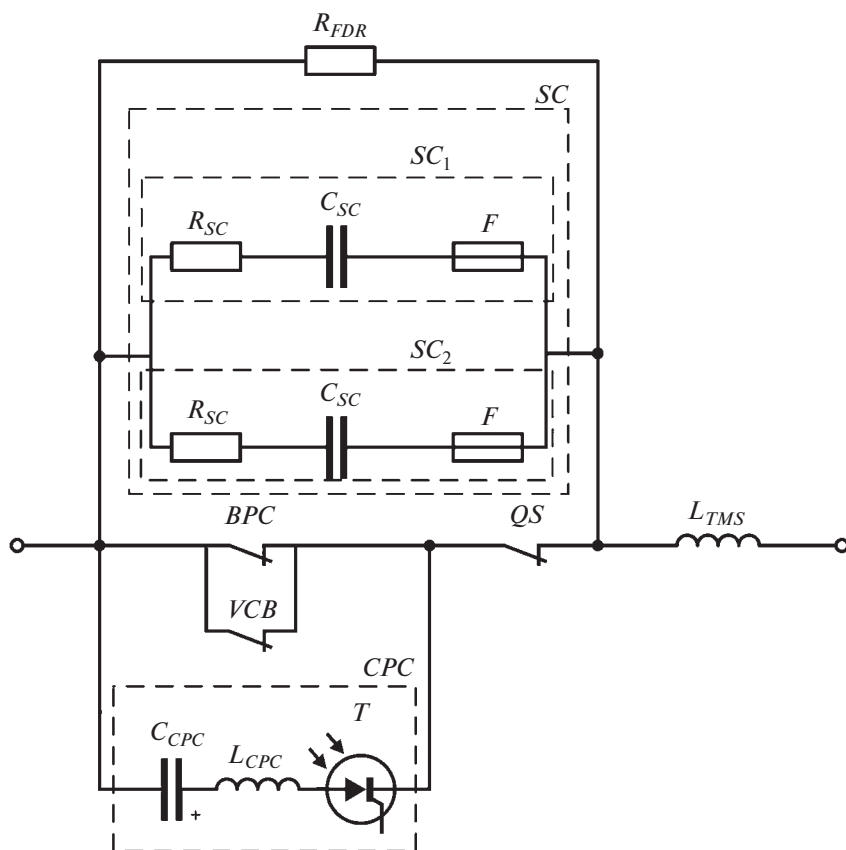


Рис. 3. Упрощенная схема системы быстрого вывода энергии. L_{TMS} – сверхпроводящая катушка тороидальной магнитной системы токамака; R_{FDR} – резисторы системы быстрого аварийного вывода энергии; T – сборка фототиристоров ТФИ193-2500-42; BPS , VCB , Q_S – управляемые размыкатели; CPC – батарея противотока; SC – демпфирующее устройство, F – предохранитель. Параметры элементов схемы: $L_{TMS} = 2.37$ Гн, $C_{SC} = 2$ мФ, $R_{SC} = 0.2$ Ом, $R_{FDR} = 0.11$ Ом, $C_{CPC} = 1.6$ мФ, $L_{CPC} = 16$ мкГн [1, 4].

облегчения режимов работы силовых элементов оборудования требуется ограничить уровень перенапряжений, возникающих в системе при коммутации тока. Ограничение коммутационных перенапряжений достигается путем применения демпфирующего устройства – RC -цепи, включенной параллельно с группой коммутационных аппаратов. На рис. 3 приведена упрощенная схема быстрого вывода энергии.

Демпфирующее устройство SC состоит из двух идентичных цепей SC_1 и SC_2 , включенных параллельно. Конденсаторы C_{SC} (со свойством самовосстановления) должны выдерживать ограниченное число циклов заряд/разряд при напряжении на 25% ниже, чем номинальное. Тем не менее, даже при таких рабочих режимах, вероятность пробоя конденсатора не исключена, и с целью соблюдения высоких требований по надежности системы последовательно с конденсаторами включены предохранители F , предназначенные для отключения демпфирующего устройства от внешней цепи в случае возможной аварии (пробоя конденсатора C_{SC}).

Результаты численного моделирования режимов работы предохранителя F в демпфирующей цепи SC приведены на рис. 4.

На осциллограмме рис. 4 в промежутке времени от 0 до 14 мс происходит штатный заряд конденсаторов C_{SC} , демпфирующий перенапряжения при выводе тока из сверхпроводящей магнитной системы, при этом интеграл действия тока в цепи предохранителя не превышает $0.22 \text{ MA}^2 \cdot \text{с}$. В момент времени, соответствующий 14 мс, происходит пробой конденсатора C_{SC} в цепи SC_2 (см. рис. 3), при этом в промежутке времени от 14 до 16 мс через цепь этого конденсатора идет разряд конденсатора параллельной ветви, приводящий к увеличению тока в цепи предохранителя до 30 кА. В промежутке времени от 16 до 17 мс осуществляется отключение тока в цепи предохранителя с обеспечением электрической прочности в цепи пробитого конденсатора при напряжении до 9 кВ. При моделировании принято допущение о линейном характере отключения тока в предохранителе.

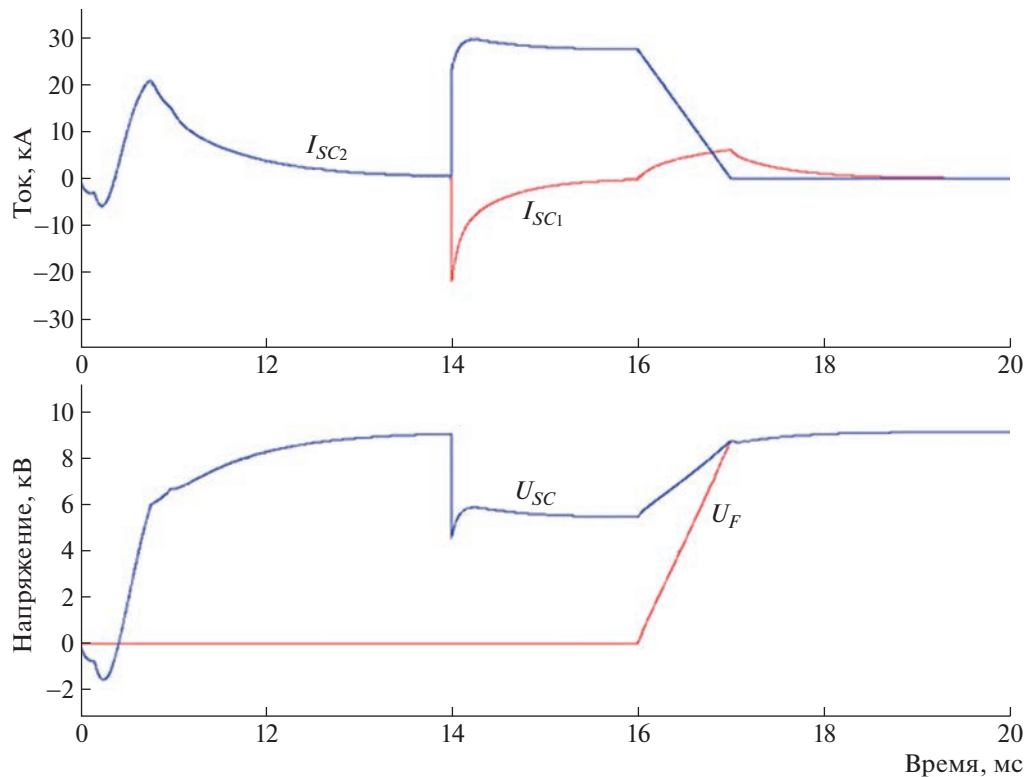


Рис. 4. Результаты численного моделирования напряжения и тока в демпфирующем устройстве при пробое конденсатора: I_{SC1} – ток в цепи SC_1 ; I_{SC2} – ток в цепи SC_2 ; U_{SC} – напряжение на демпфирующей цепи; U_F – напряжение на предохранителе в цепи пробитого конденсатора.

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ПРОВОДНИКА

При выборе сечения отключающего элемента предохранителя должны быть выполнены два взаимоисключающих требования, вытекающие из необходимости обеспечения надежного функционирования как в рабочем, так и аварийном режимах. С одной стороны, отключающий элемент должен надежно выдерживать тепловые нагрузки в номинальном эксплуатационном режиме (при максимальных рабочих токах), которые соответствуют величине интеграла действия тока $0.22 \text{ MA}^2 \cdot \text{с}$, а с другой – обеспечить достаточно быстрое отключение поврежденного конденсатора демпфирующей цепи в аварийном режиме.

Расчет сечения отключающего элемента выполнен путем решения уравнения теплового баланса без учета потери тепла в окружающее пространство [5]:

$$\int_{T_0}^{T_m} \frac{dT}{1 + \alpha T} = \frac{\rho_0}{S^2 c \gamma_0} \int_0^{\tau} I^2(t) dt, \quad (1)$$

где c – теплоемкость материала отключающего элемента (зависимость теплоемкости от температуры в первом приближении не учитывается); γ – плот-

ность материал отключающего элемента; ρ_0 – удельное сопротивление материала отключающего элемента при температуре окружающей среды; S – площадь сечения отключающего элемента; α – температурный коэффициент сопротивления материала отключающего элемента; $I(t)$ – функция тока в отключающем элементе предохранителя.

Исходя из требований долговечности отключающего элемента необходимо обеспечить соответствующий температурный режим его работы без перегрева [6]. С учетом ограничения по максимально допустимой температуре для выбранного типа изоляции проводников (150°C) при значении интеграла действия тока в номинальном режиме $0.22 \text{ MA}^2 \cdot \text{с}$ площадь сечения отключающего элемента выбирается равной 3.08 мм^2 .

КОММУТАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Испытательный стенд

С целью проверки технических решений, использованных в конструкции предохранителя, была разработана испытательная схема (рис. 5), построенная на основе конденсаторной батареи с запасаемой энергией до 1 МДж. В предложенной

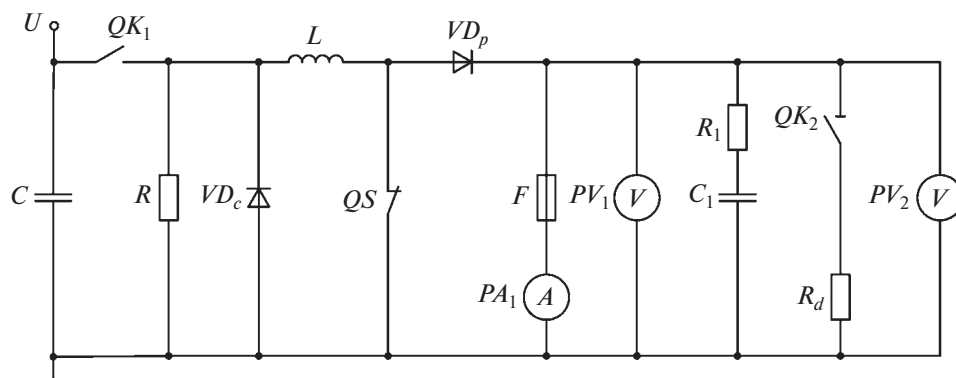


Рис. 5. Электрическая схема испытательного стенда. F – испытываемый предохранитель; QK_1 – игнитронный разрядник; QK_2 – защитный замыкатель; QS – быстродействующий управляемый размыкатель; PV_1 – датчик напряжения; PA_1 – датчик тока; C – конденсаторная батарея (0.16 Ф); L – формирующая индуктивность (490 мкГн); R_d – разрядное сопротивление (300 Ом); R – сопротивление резистора в цепи запуска (0.3 Ом); R_1 – сопротивление нагрузки (0.39 Ом); C_1 – емкость (от 400 до 1200 мкФ); VD_c – сборка кроубарных диодов; VD_p – сборка отсекающих диодов.

испытательной схеме проверялись основные характеристики предохранителя: коммутационная способность в аварийных режимах при максимальных токах и напряжениях; коммутационные характеристики, соответствующие пониженным отключаемым токам, и электрическая прочность после срабатывания предохранителя.

Конденсаторная батарея C с формирующей катушкой индуктивности $L = 490$ мкГн заряжается до напряжения, необходимого для получения

тока требуемой амплитуды – от 14 до 32 кА, а затем, после получения сигнала на запуск, разряжается на управляемый размыкатель QS . Таким образом, в исходном состоянии предохранитель F шунтируется размыкателем до момента времени, когда ток достигает требуемого значения, после чего срабатывает размыкатель и ток переводится в предохранитель. Когда интеграл действия тока через предохранитель достигает порогового уровня, соответствующего испарению материала про-

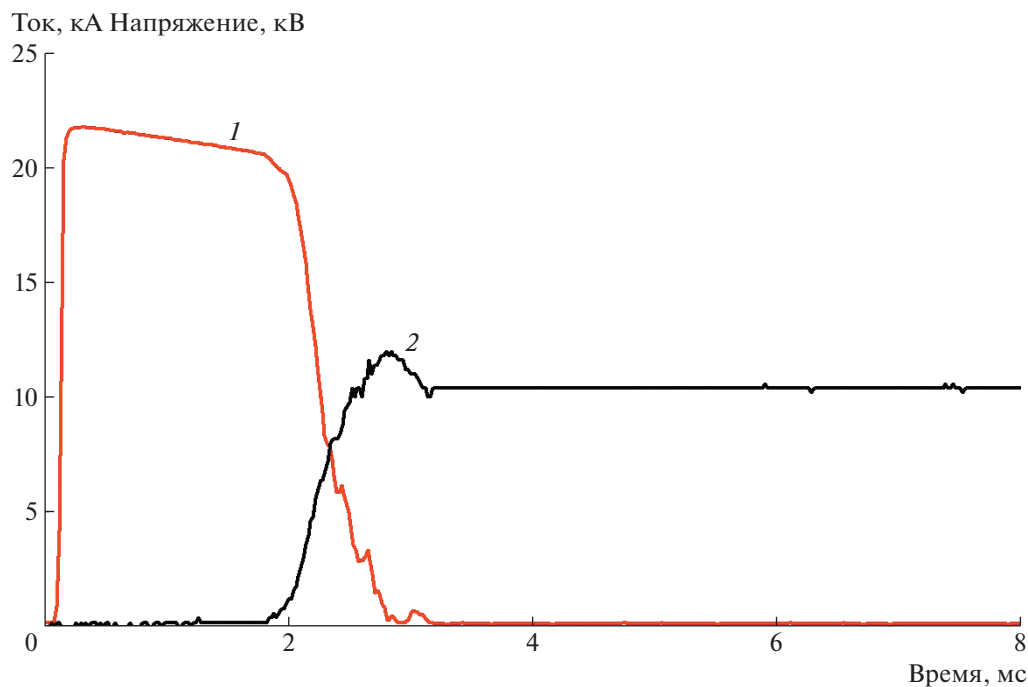


Рис. 6. Осциллограмма тока (1) и напряжения (2) на предохранителе в режиме коммутации аварийных токов.

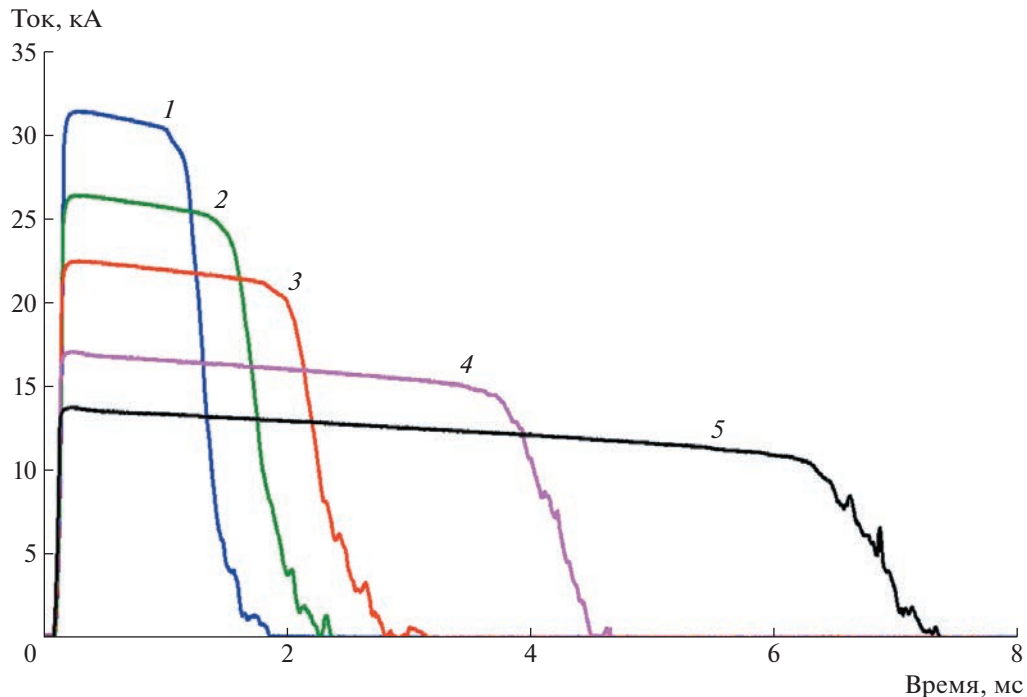


Рис. 7. Результаты испытаний предохранителя при различных величинах коммутируемого тока при площади поперечного сечения отключающего элемента 3.08 мм^2 . Нумерация осциллограмм на рисунке соответствует табл. 1.

водника, предохранитель размыкается за время $\sim 1 \text{ мс}$ и ток переводится в нагрузочную R_1C_1 -цепь, задающую амплитуду и форму восстанавливающегося напряжения на предохранителе. Сборка отсекающих диодов VD_p препятствует разряду конденсаторов цепи нагрузки в запасную емкость конденсаторной батареи. Это позволяет обеспечить длительное приложение напряжения к объекту испытаний, а также исследовать восстанавливающуюся электрическую прочность коммутационного промежутка с применением метода критических режимов [7].

Согласно спецификации ИТЭР, условия срабатывания предохранителя соответствуют току 20 кА при напряжении 10 кВ . Эти условия были

достигнуты при использовании нагрузочной R_1C_1 -цепи с параметрами 0.39 Ом , 800 мкФ . Затем была проведена новая серия испытаний при повышенных значениях восстанавливающегося напряжения с уменьшенным до 200 мкФ значением емкости.

Кривые тока регистрировались преобразователями тока СWT (пояс Роговского). Для измерения напряжения использовались высоковольтные щупы Tektronix P6015A.

Результаты испытаний

На рис. 6 представлена типовая осциллограмма процесса переключения тока предохраните-

Таблица 1. Результаты испытаний предохранителя с поперечным сечением проводника 3.08 мм^2

Номер кривых на рис. 7	Амплитудное значение тока в предохранителе, кА	Время отключения, мс	Амплитудное/длительное значение напряжения на предохранителе, кВ	Интеграл действия плотности тока, $10^{17} \text{ А}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-4}$
1	31.4	0.85	18/16	1.016
2	26.4	1.00	15/13	1.074
3	22.5	1.34	12/10	1.108
4	17.0	1.16	15/13	1.040
5	13.7	1.26	9/8	1.039

лем, записанная в условиях, близких к аварийному режиму в демпфирующей цепи (20 кА, 10 кВ). Полная длительность переходного процесса в этих условиях, включая нарастание и отключение тока, составляет ~3 мс.

С увеличением аварийного тока продолжительность процесса коммутации уменьшается вследствие квадратичной зависимости интеграла действия тока, необходимого для ЭВП, от протекающего по предохранителю тока. При этом длительность спада тока во всех экспериментах изменялась незначительно и увеличивалась с уменьшением амплитуды отключаемого тока, что связано со снижением интенсивности выделяемой в предохранителе энергии в процессе коммутации тока.

На рис. 7 приведены результаты испытаний предохранителя при различных величинах коммутируемого тока. Основные результаты испытаний: амплитудное значение тока в предохранителе, время отключения (длительность спада тока по заднему фронту), амплитудное значение напряжения на предохранителе и интеграл действия плотности тока в предохранителе — сведены в табл. 1.

Согласно табл. 1 и осциллограммам на рис. 7, увеличение коммутируемого тока сопровождается сокращением длительности процесса коммутации, при этом кривая тока на спаде стремится к линейной форме с минимальным числом всплесков, предположительно соответствующих возникновению шунтирующих разрядов на отдельных участках отключающего элемента. Возникновение всплесков становится возможным в случае, когда интенсивность вводимой в проводник энергии в процессе коммутации недостаточна для полной сублимации металла отключающего элемента. Конструкция и принцип работы предохранителя обеспечивают возможность его срабатывания в режимах с ЭВП и позволяют его применять для отключения токов относительно широкого диапазона. При этом следует отметить, что верхняя граница коммутируемых токов будет определяться механической прочностью изоляционных труб и выделяемой в предохранителе энергией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан простой и надежный сильноточный высоковольтный предохранитель однократного действия.

Предложено схемотехническое решение с использованием емкостного накопителя энергии, позволяющее при проведении коммутационных испытаний задавать в широком диапазоне величину послеконмутационного испытательного напряжения.

Коммутационные испытания, проведенные на прототипах предохранителя, продемонстрировали его надежную работу в заданных параметрах. Получены положительные результаты испытаний с длительным приложением послеконмутационного напряжения величиной 16 кВ, что на 78% превышает требования ИТЭР (9 кВ). Предохранитель будет использоваться в качестве защитного элемента в системах коммутации цепей питания магнитных катушек ИТЭР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Song I., Roshal A., Tanchuk V., Thomsen J., Milani F., Benfatto I.* // 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. Beijing. IEEE, 2011. P. 1. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2011.6073779>
2. *Neumeyer C., Benfatto I., Hourtoule J., Tao J., Mankani A., Milani F., Nair S., Suh I., Tan H., Wang M., Oh J.S., Roshal A.* // 2013 IEEE 25th Symposium on Fusion Engineering (SOFE). San Francisco, CA, USA. IEEE, 2013. P. 1. <https://doi.org/10.1109/SOFE.2013.6635287>
3. *Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В.* Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. М.: Энергоатомиздат, 1990. С. 26–31.
4. *Serebrov R.A., Enikeev R.Sh., Fridman B.E.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 2013. V. 41. № 1. P. 250. <https://doi.org/10.1109/TPS.2012.2225642>
5. *Намитокоев К.К., Хмельницкий Р.С., Аникеева К.Н.* Плавкие предохранители. М.: Энергия, 1979. С. 45–51.
6. *Кульгавчук В.М.* // ПТЭ. 1966. № 2. С. 159.
7. *Аполлонский С.М., Козярук Е.А., Куклёв Ю.В.* Испытания и системы контроля электрических аппаратов. Учебное пособие. СПб.: Троицкий мост, 2016. С. 192–199.

ЭФФЕКТИВНЫЙ СПОСОБ ГЕНЕРАЦИИ И ВЫВОДА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В АТМОСФЕРУ В ШИРОКОАПЕРТУРНОМ УСКОРИТЕЛЕ НА ОСНОВЕ ИОННО-ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

© 2023 г. С. Ю. Дорошкевич^{а,*}, М. С. Воробьев^а, М. С. Торба^а, А. А. Гришков^а,
Н. Н. Коваль^а, С. А. Сулакшин^а, В. В. Шугуров^а, В. А. Леванисов^а

^аИнститут сильноточной электроники СО РАН
Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3

*e-mail: doroshkevich096@gmail.com

Поступила в редакцию 08.08.2022 г.

После доработки 19.09.2022 г.

Принята к публикации 20.10.2022 г.

Представлен новый способ повышения коэффициента вывода электронного пучка в атмосферу для ускорителей с несамостоятельным высоковольтным тлеющим разрядом, характеризующийся высокочастотной (десятки килогерц) генерацией вспомогательного разряда. Повышение эффективности вывода пучка в атмосферу достигается путем использования импульсного вспомогательного тлеющего разряда орбитронного типа и управления коэффициентом заполнения импульсов этого разряда при стабилизации среднего значения его тока. На примере исследуемого ускорителя показана возможность повышения коэффициента вывода на 0.3 относительно режима с постоянным током.

DOI: 10.31857/S0032816223020052, EDN: UXOCTO

ВВЕДЕНИЕ

Отдельным направлением ускорительной техники является генерация электронных пучков большого сечения (ПБС), которые выводятся в атмосферу через тонкую фольгу [1]. Такие ПБС характеризуются поперечным сечением порядка 1000 см², что обеспечивает высокую производительность при электронно-пучковой обработке различных материалов. Получение ПБС возможно двумя способами: формированием узкого пучка и его разверткой до необходимых размеров с помощью электромагнитной отклоняющей системы (пучки сканирующего типа) [2, 3], а также созданием катода с большой эмитирующей поверхностью, соответствующей размерам генерируемого ПБС [4–6]. Для облучения объектов пучком вне вакуумной камеры используется выводное фольговое окно. Зачастую оно представляет собой многоапертурную пластину с уложенной на нее металлической фольгой, через которую ускоренные электроны выводятся в атмосферу.

Одним из типов ускорителей электронов, позволяющих генерировать ПБС, является ускоритель на основе высоковольтного тлеющего разряда (ВТР). Их принцип действия основан на формировании потока ускоренных ионов, которые бомбардируют поверхность высоковольтного катода,

зачастую представляющего собой металлическую пластину. В результате образуются вторичные электроны, формирующие электронный пучок с энергией, соответствующей приложенному ускоряющему напряжению. Такие ускорители можно разделить на две группы – с самостоятельным и несамостоятельным ВТР.

Ускорители с самостоятельным ВТР отличаются простотой конструкции, обусловленной возможностью образования плазмы, необходимой для возбуждения ионно-электронной эмиссии, и генерации электронного пучка в одном межэлектродном промежутке без использования дополнительных источников электропитания [7, 8]. Кроме того, данные ускорители способны генерировать многоапертурные электронные пучки различной геометрической формы [9] и иметь электродную систему отличную от плоскопараллельной [10, 11]. Однако ускорители с самостоятельным ВТР зачастую работают в импульсно-периодическом режиме с длительностью импульса, не превышающей нескольких сотен наносекунд, что ограничено переходом ВТР в дуговую форму разряда с резким снижением напряжения на ускоряющем промежутке. Помимо этого, управление током электронного пучка и распределением плотности тока по сечению пучка возможно лишь с помощью изменения давления рабочего газа, повышение которого приводит к со-

крашению высоковольтной стадии генерации разряда.

Более гибкое управление током электронного пучка реализуется в ускорителях с несамостоятельным ВТР, в которых ионный поток для бомбардировки поверхности высоковольтного катода формируется не самим ВТР, а специально созданной анодной плазмой. Данная плазма может быть сгенерирована вспомогательным разрядом различного типа (тлеющий разряд с полым катодом [12], тонкопроволочный разряд орбитронного типа [13], дуговой разряд [14], разряд с термокатодом [15]) либо отдельными ленточными электронными пучками [16, 17]. Для разделения области генерации вспомогательного разряда и ускоряющего промежутка с несамостоятельным ВТР используют металлическую сетку или перфорированный электрод. Это позволяет обеспечить слабую зависимость положения границы анодной плазмы и характеристик вспомогательного разряда от величины ускоряющего напряжения. Таким образом, в ускорителях с несамостоятельным ВТР возможна малоинерционная регулировка тока электронного пучка путем изменения концентрации анодной плазмы и ее распределения при постоянном ускоряющем напряжении. Кроме того, наличие вспомогательного разряда позволяет осуществлять генерацию ВТР при пониженном рабочем давлении (до 10^{-2} Па), тем самым снижая вероятность перехода ВТР в низковольтную форму и обеспечивая возможность генерации непрерывного электронного пучка.

Ускорители на основе ВТР имеют следующие преимущества: относительную простоту конструкции, высокий срок службы катода, возможность управления током пучка без изменения ускоряющего напряжения, умеренные требования к насосной группе, возможность работы в отсутствие нагревательных элементов [18, 19]. Важным преимуществом является возможность расположения элементов ускорителя (кроме высоковольтного катода) под потенциалом “земли”, что значительно упрощает как схему электропитания и управления ускорителя, так и диагностику его систем.

К недостатку ускорителей на основе ВТР можно отнести то, что высокая эффективность вывода тока пучка достигается только при определенной конфигурации электронно-оптической системы и в достаточно узком диапазоне параметров [20]. Данная проблема носит глобальный характер и присуща всем источникам и ускорителям электронов данного типа. Так, например, при изменении ускоряющего напряжения или тока вспомогательного разряда происходит расфокусировка ионного пучка, бомбардирующего катод, что неизбежно приводит к потерям тока электронного пучка на ребрах анодной решетки и опорной ре-

шетки выпускного фольгового окна и, как следствие, к снижению энергетической эффективности ускорителя. Именно поэтому цель данной работы состояла в определении нового энергоэффективного способа генерации электронного пучка в ускорителе электронов на основе несамостоятельного ВТР при переходе к высокочастотному режиму генерации вспомогательного разряда.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Исследуемый широкоапертурный ускоритель на основе несамостоятельного ВТР позволяет генерировать и выводить в атмосферу непрерывный электронный пучок сечением 650×450 мм², энергией 150 кэВ и током до 30 мА [21]. Конструкция ускорителя (рис. 1) имеет два основных промежутка: дрейфовый промежуток 1, в котором горит вспомогательный разряд, генерирующий эмиссионную плазму и формирующий плазменный анод, и ускоряющий промежуток (область горения несамостоятельного ВТР) 2, в котором заряженные частицы приобретают высокую энергию, соответствующую ускоряющему напряжению. Промежутки разделены анодной решеткой 5 с отверстиями щелевого типа. Конфигурация отверстий в анодной решетке повторяет конфигурацию отверстий в водоохлаждаемой опорной решетке выводного окна, перекрытого алюминий-магниевого фольгой марки АМг-2н толщиной 30 мкм. Роль вспомогательного разряда выполняет самостоятельный тлеющий разряд с полым катодом и двумя тонкопроволочными анодами [22, 23]. В качестве полого катода используются стенки вакуумной камеры 7 (площадь $\approx 21\,000$ см²), а анодом служат две вольфрамовые проволоки 4 диаметром 0.035 см и длиной 85 см (суммарной площадью ≈ 18 см²), натянутые вдоль длинной стороны выводного окна и находящиеся в геометрической тени для электронного пучка. Рабочий газ гелий напускается в область горения вспомогательного разряда, рабочее давление составляет 1–5 Па. Ионы, эмитированные с границы анодной/эмиссионной плазмы и прошедшие через отверстия анодной решетки, набирают энергию в ускоряющем промежутке и бомбардируют поверхность высоковольтного катода, находящегося под потенциалом до -150 кВ относительно “земли”, что приводит к вторичной ионно-электронной эмиссии. Часть ионов нейтрализуется в высоковольтном зазоре, и бомбардировка катода в этом случае осуществляется нейтралами, имеющими широкий энергетический спектр [24]. В результате такой бомбардировки возникают вторичные электроны, которые ускоряются по направлению к анодной решетке, дрейфуют через плазму вспомогательного разряда и, проходя через каналы выводного фольгового окна, выводятся в атмосферу.

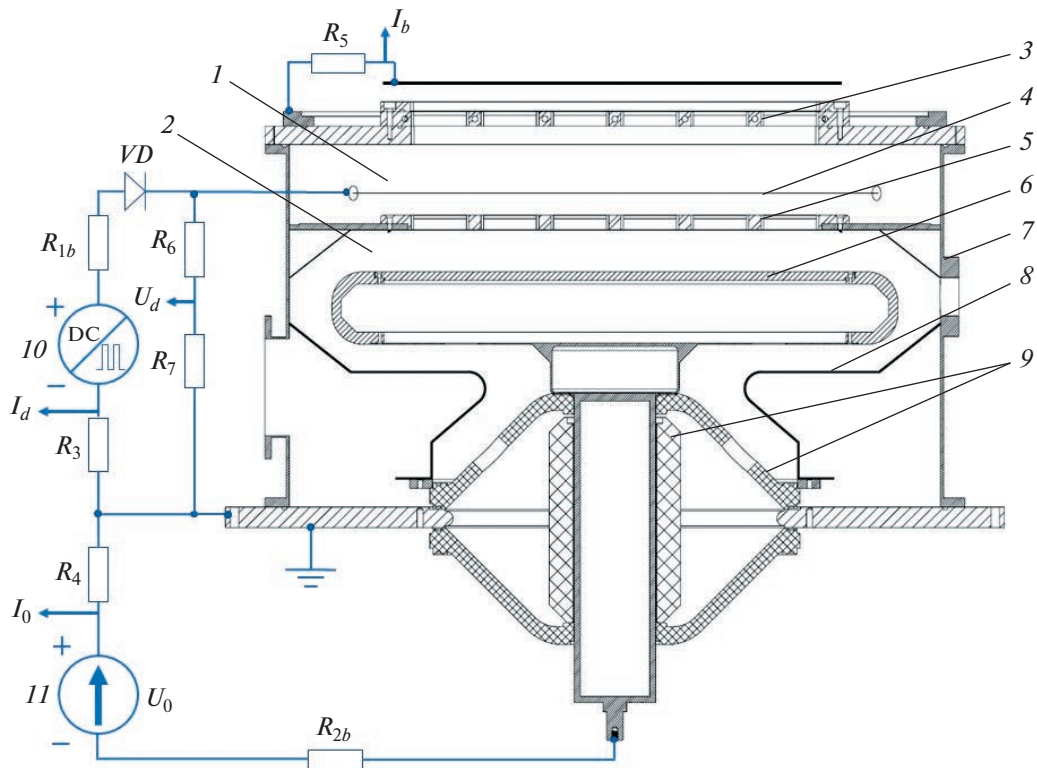


Рис. 1. Схема ускорителя электронов с несамостоятельным ВТР. 1 – дрейфовый промежуток; 2 – ускоряющий промежуток; 3 – выводное фольговое окно; 4 – тонкопроволочный анод; 5 – анодная решетка; 6 – высоковольтный катод; 7 – вакуумная камера; 8 – экран; 9 – изоляторы; 10 – источник питания вспомогательного разряда; 11 – высоковольтный источник питания.

Генерация вспомогательного разряда осуществляется с помощью источника электропитания, который способен работать как в постоянном (direct current – DC), так и в импульсном режиме с частотой 1–100 кГц со стабилизацией среднего значения тока. Импульсный режим генерации вспомогательного разряда позволяет обеспечить большую амплитуду тока вспомогательного разряда и концентрацию эмиссионной плазмы за счет изменения коэффициента заполнения импульсов. Ранее подобная регулировка, но в более низкочастотном режиме была продемонстрирована при использовании источника электронов с сеточным плазменным катодом [25]. Изменение частоты следования импульсов при этом позволяет управлять длительностью импульса тока разряда и паузой между импульсами, которая для рассматриваемой высокочастотной генерации разряда находится в диапазоне 5–800 мкс.

Для тлеющего разряда орбитронного типа характерно значительное превышение площади катода S_c над площадью анода S_a ($S_a \ll S_c$), что обеспечивает осцилляции электронов внутри вакуумного объема и эффективную ионизацию рабочего газа электронным ударом [22, 26]. При этом площадь анода S_a должна быть достаточной для отве-

дения тепловой нагрузки, определяемой плотностью электронного тока в соответствии с отношением масс электрона m_e и иона рабочего газа M_i : $(m_e/M_i)^{1/2}$ [27, 28]. В нашем случае $S_a/S_c \approx 8 \cdot 10^{-4}$, что отличается более чем на порядок от отношения масс для атомарного гелия $(m_e/M_i)^{1/2} \approx 11 \cdot 10^{-3}$. Важно отметить, что импульсный режим генерации вспомогательного разряда позволяет снизить тепловую нагрузку на тонкопроволочные аноды с возможностью достижения большей амплитуды тока разряда, в отличие от постоянного режима генерации, в котором зачастую наблюдается перегрев и выход из строя анодных проволочек при величине тока разряда более нескольких сотен миллиампер. Кроме того, генерация разряда с частотой в десятки килогерц способствует снижению вероятности образования катодных пятен на стенках полого катода вспомогательного разряда [29], что связано с компенсацией заряда, накопленного на поверхности диэлектрических пленок, в момент паузы генерации разряда [30].

Характерные осциллограммы и вольт-амперные характеристики (ВАХ) разряда в импульсном режиме генерации для разных значений коэффициента заполнения импульсов D при стабилизации среднего тока представлены на рис. 2 и 3 со-

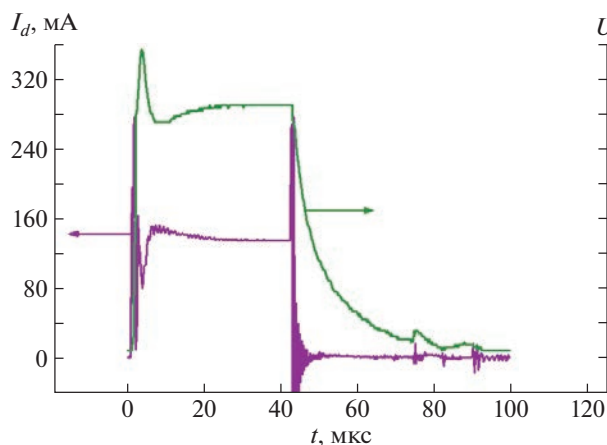


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения вспомогательного разряда при $f = 10$ кГц, $D = 40\%$, $p(\text{He}) = 3$ Па, $I_{dcp} = 55$ мА.

ответственно. Наибольшее напряжение разряда соответствует наименьшему D за счет большей амплитуды тока разряда и растущей ВАХ. Поэтому напряжение разряда в ДС-режиме ($D = 100\%$) всегда меньше, чем в импульсном режиме, при одинаковом среднем токе разряда. Амплитудное значение тока разряда на одном проволочном аноде определяется как:

$$I_m = \frac{I_{dcp}}{2D}, \quad (1)$$

где I_m — амплитудное значение тока; D — коэффициент заполнения импульса; I_{dcp} — среднее за период значение тока разряда с двух проволочных анодов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Ток электронного пучка, выведенного в атмосферу, регистрировался коллектором, представляющим собой пластину из нержавеющей стали, полностью перекрывающую выводное окно ускорителя и расположенную на расстоянии 20 мм от выводной фольги. На резисторе $R_5 = 100$ Ом (см. рис. 1) измерялась разность потенциалов, создаваемая током пучка, относительно корпуса ускорителя. Для сравнения эффективности вывода электронного пучка из вакуума в атмосферу в разных режимах генерации вспомогательного разряда использовался параметр — коэффициент вывода электронного пучка, рассчитываемый как отношение тока пучка, выведенного в атмосферу, к общему току в ускоряющем промежутке: $\beta = I_b/I_0$. В ДС-режиме коэффициент вывода слабо зависел от величины тока вспомогательного разряда в исследуемом диапазоне (рис. 4) и составлял менее 0.25 при ускоряющем напряжении 140 кВ [31]. Осциллограммы токов ускорителя в ДС-режиме

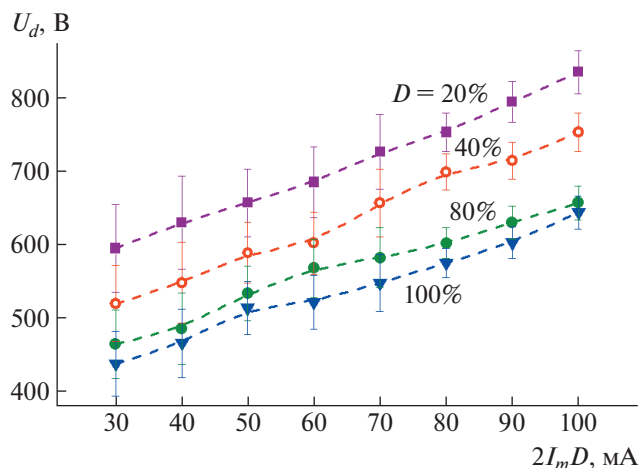


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики вспомогательного разряда при разных значениях коэффициента заполнения импульсов D ($p(\text{He}) = 3$ Па, $f = 20$ кГц).

вспомогательного разряда при ступенчатом изменении ускоряющего напряжения от 50 до 150 кВ приведены на рис. 5.

Слабая зависимость коэффициента β от тока вспомогательного разряда в постоянном режиме генерации, вероятно, связана со слабым изменением положения границы анодной плазмы и ионно-электронной оптической системы (ИЭОС) в диапазоне токов 30–80 мА. Низкое значение β (< 0.25) свидетельствует о значительных потерях тока пучка внутри электродной системы ускорителя. Потери электронного пучка складываются из потерь на анодной и выводной решетках, а также потерь внутри алюминий-магниевой выводной фольги [20].

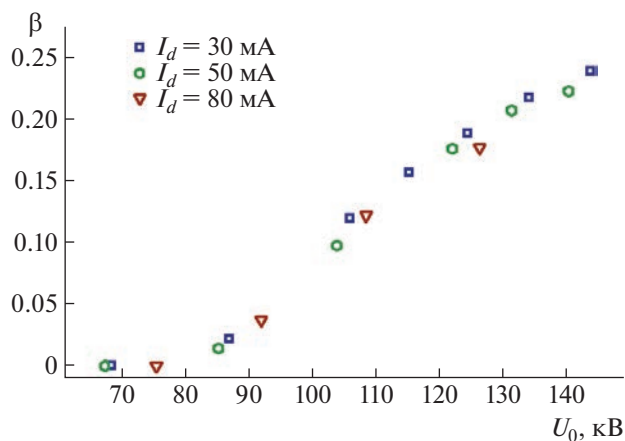


Рис. 4. Зависимости коэффициента вывода тока пучка β в атмосферу от ускоряющего напряжения в ДС-режиме при разных значениях тока вспомогательного разряда ($p(\text{He}) = 4.5$ Па).

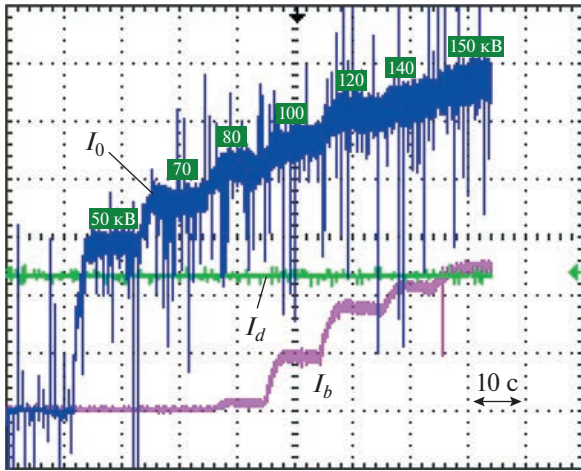


Рис. 5. Осциллограммы токов в DC-режиме при разном ускоряющем напряжении (50, 70, 80, 100, 120, 140, 150 кВ). I_0 – ток в ускоряющем промежутке (10 мА/деление), I_d – ток вспомогательного разряда (20 мА/деление), I_b – ток пучка (5 мА/деление).

Осциллограммы токов ускорителя при генерации вспомогательного разряда в импульсном режиме приведены на рис. 6. Коэффициент вывода в этом случае определялся в момент окончания импульса тока вспомогательного разряда. Согласно рис. 7, коэффициент β при $D = 80\%$ близок по значениям к режиму постоянного тока. Уменьшение коэффициента заполнения D приводит к росту β : при $D = 20\%$, $U_0 = 150$ кВ коэффициент вывода $\beta > 0.5$. При уменьшении коэффициента заполнения D соответственно увеличиваются ток и напряжение горения разряда, а следовательно, повышается концентрация эмиссионной плазмы и изменяется ширина прикатодного слоя:

$$d_k = \epsilon_0^{1/2} \left(\frac{1}{ekT_e} \right)^{1/4} \frac{U_k^{3/4}}{n_i^{1/2}}. \quad (2)$$

Повышение напряжения горения разряда может приводить к росту прикатодного потенциала, в результате чего эмитированные из анодной плазмы ионы поступают в ускоряющий промежуток с большей энергией, изменяя ИЭОС таким образом, что коэффициент вывода пучка в атмосферу растет.

Максимальный коэффициент вывода электронного пучка при определенной энергии задается, прежде всего, толщиной и материалом выводной фольги. В нашем случае использовалась алюминий-магниевая фольга толщиной 30 мкм. В работах [32, 33] представлены данные по коэффициентам прохождения электронами алюминиевой фольги разной толщины (см. рис. 7). Из приведенных данных видно, что максимальный коэффициент вывода β при 150 кВ составляет ≈ 0.85 , в то время как в DC-режиме достигнут β , равный

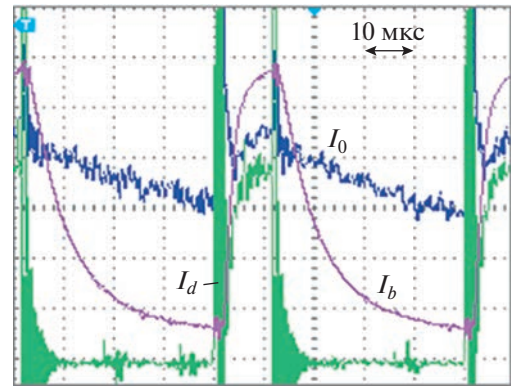


Рис. 6. Осциллограммы токов в импульсном режиме ($U_0 = 146$ кВ, $I_{dcp} = 30$ мА, $f = 20$ кГц, $D = 20\%$, $p(\text{He}) = 3$ Па). I_0 – ток в ускоряющем промежутке (5 мА/деление); I_d – ток разряда (20 мА/деление); I_b – ток пучка (2 мА/деление).

0.25, а при переходе в импульсный режим максимальное значение β составило 0.57 при $D = 20\%$. В нашем случае коэффициент β включает в себя еще ионный компонент тока в ускоряющем промежутке. При коэффициенте ионно-электронной эмиссии γ около 10 [24] доля ионного тока в ускоряющем промежутке составляет $\approx 10\%$, а значит, реальный коэффициент вывода электронного пучка β_e в импульсном режиме генерации достигает значения: $\beta_e = I_b / (0.9I_0) = 0.63$. Таким образом, даже в этом случае имеется более 20% потеря тока пучка на ребрах анодной и опорной решеток.

Кроме того, согласно осциллограммам (см. рис. 6), после окончания генерации вспомога-

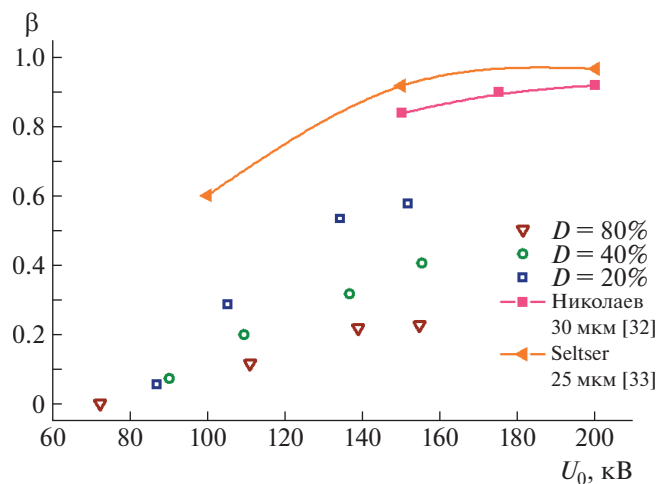


Рис. 7. Зависимости коэффициента вывода тока пучка в атмосферу от ускоряющего напряжения в импульсном режиме при разном коэффициенте заполнения D . $p(\text{He}) = 3$ Па, $I_{dcp} = 30$ мА, $f = 10$ кГц.

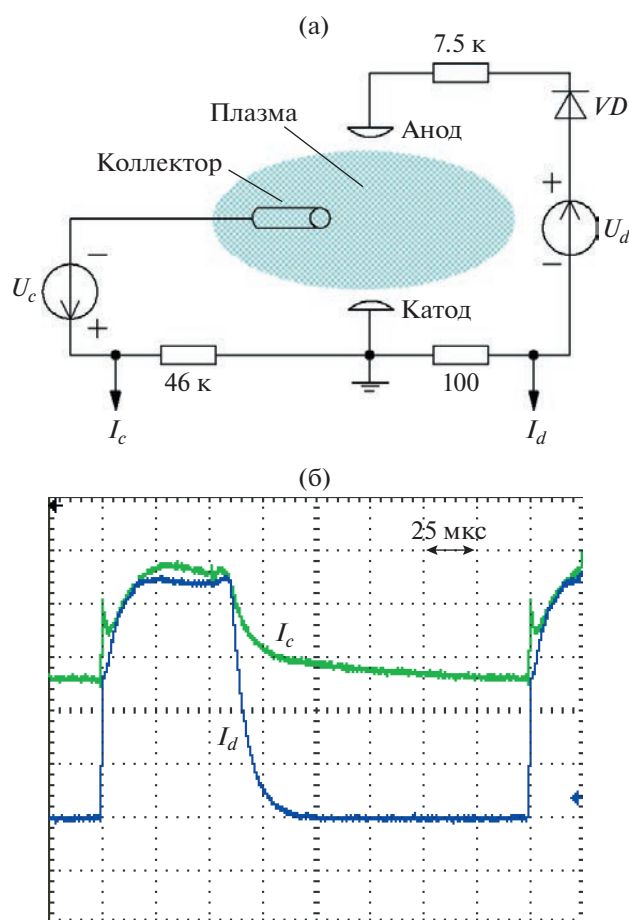


Рис. 8. а – схема подключения цилиндрического коллектора; б – осциллограммы тока вспомогательного разряда I_d (50 мА/деление) и тока на цилиндрическом коллекторе I_c (0.2 мА/деление). $I_{dcp} = 65$ мА, $f = 5$ кГц, $D = 30\%$, $p(\text{He}) = 4.5$ Па.

тельного разряда начинается спад тока пучка I_b , выведенного в атмосферу, и за время паузы он становится близким к нулю. При этом ток в ускоряющем промежутке I_0 после прекращения генерации вспомогательного разряда I_d спадает с меньшей скоростью и во время паузы остается значительным. Таким образом, в момент паузы генерации вспомогательного разряда коэффициент β стремится к нулю.

Наличие тока в ускоряющем промежутке в паузу генерации вспомогательного разряда можно объяснить релаксационными процессами в анодной плазме после прекращения импульса тока разряда. Для проверки данного предположения внутри вакуумной камеры был помещен цилиндрический коллектор площадью ≈ 130 см², на который в отсутствие ускоряющего напряжения подавалось постоянное отрицательное напряжение смещения относительно полого катода для измерения тока ионов из плазмы вспомогательного

тлеющего разряда (рис. 8а). Согласно рис. 8б, после окончания импульса разряда I_d ток коллектора I_c спадает, но за время паузы ≈ 130 мкс не достигает нуля, а остается на уровне 100 мкА. Это позволяет сделать вывод, что время релаксации плазмы вспомогательного разряда существенно превышает время паузы между импульсами тока разряда. В результате во время паузы между импульсами тока разряда в ускоряющий промежуток продолжают поступать ионы из плазменного анода, поддерживающие горение ВТР.

По результатам анализа проведенных экспериментов была также построена зависимость коэффициента вывода β электронного пучка от ускоряющего напряжения U_0 при варьировании частоты генерации f вспомогательного разряда (рис. 9). Согласно рис. 9, наибольшее значение коэффициента β достигается при генерации импульсов вспомогательного разряда с частотой $f = 10\text{--}30$ кГц. С повышением частоты генерации разряда от 10 до 70 кГц ток пучка в атмосфере изменяется незначительно, однако ток в ускоряющем промежутке при $f > 30$ кГц возрастает, что в итоге приводит к соответствующему снижению коэффициента β . Важно отметить, что напряжение горения разряда U_d с ростом частоты следования импульсов изменяется незначительно. Так, при повышении частоты f от 1 до 70 кГц напряжение U_d (рис. 10), которое фиксировалось в конце импульса при одинаковой величине тока 140 мА, изменяется менее чем на 50 В и составляет $U_d = 700 \text{ В} \pm 3\%$. Тем не менее, зависимость $\beta(f)$ может быть также обусловлена динамикой прикладного падения потенциала в полом катоде, которая, в свою очередь, может способствовать фокусировке или расфокусировке ионного потока в области ускоряющего промежутка. Для проверки данной гипотезы необходимо провести зондовые измерения параметров эмиссионной плазмы и последующее математическое моделирование.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что генерация вспомогательного тлеющего разряда в импульсном режиме с частотой десятки килогерц позволяет повысить коэффициент вывода тока пучка в атмосферу ускорителей на основе ионно-электронной эмиссии. Так, на исследуемом ускорителе показано, что при ускоряющем напряжении 150 кВ в DC-режиме коэффициент вывода электронного пучка не превышает 0.25. Переход к импульсному режиму генерации вспомогательного разряда позволяет увеличить коэффициент вывода на 0.3 в момент максимума тока в ускоряющем промежутке. По-видимому, увеличение тока и напряжения горения разряда, а следовательно, повышение концентрации эмиссионной

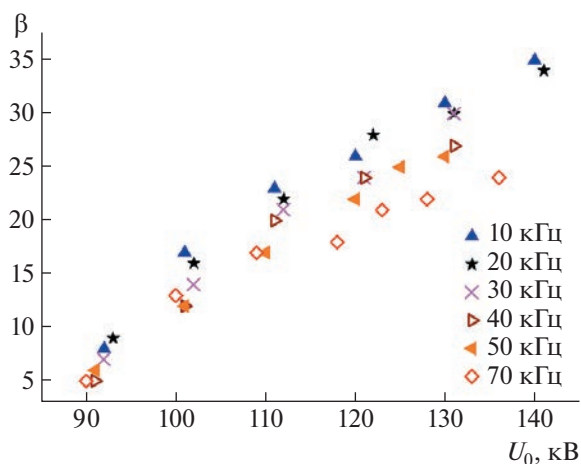


Рис. 9. Зависимости коэффициента вывода тока пучка в атмосферу от ускоряющего напряжения в импульсном режиме при разной частоте генерации ($I_d = 50$ мА, $D = 30\%$, $p(\text{He}) = 3$ Па).

плазмы, уменьшение ширины прикатодного слоя и рост прикатодного падения потенциала вспомогательного разряда, вызванные снижением коэффициента заполнения D и соответствующим ростом амплитуды тока разряда, приводят к снижению потерь на анодной и опорной решетках и формированию более оптимальной ИОЭС. Однако в паузу генерации вспомогательного разряда спад тока пучка в атмосфере происходит быстрее чем спад тока в ускоряющем промежутке, что приводит к резкому уменьшению коэффициента вывода: $\beta < 0.05$. Такой рост потерь тока пучка в момент паузы между импульсами тока разряда можно объяснить релаксационными процессами плазмы вспомогательного разряда, уменьшением энергии и доли ионов, поступающих в ускоряющий промежуток, а следовательно, изменением ИОЭС и/или релаксационными процессами плазмы ВТР, что является предметом дальнейших исследований. Сокращение паузы между импульсами путем повышения частоты генерации вспомогательного разряда с 10 до 70 кГц приводит к снижению максимального коэффициента вывода β на ≈ 0.1 , но при этом в момент паузы генерации β может составлять ~ 0.15 .

Даже при условии, что интегральная эффективность вывода пучка в атмосферу остается неизменной при переходе от постоянного к импульсному режиму генерации вспомогательного разряда, можно однозначно заключить о целесообразности использования предлагаемого подхода как для повышения стабильности генерации электронного пучка (уменьшения количества пробоев, обусловленных снижением вероятности образования катодных пятен на стенках полого катода вспомогательного разряда), так и для дальнейших использований оборудования такого

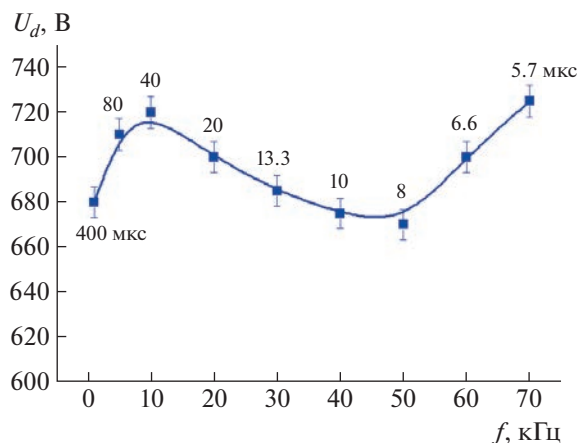


Рис. 10. Зависимость напряжения вспомогательного разряда от частоты его генерации ($I_d = 55$ мА, $D = 40\%$, $p(\text{He}) = 3$ Па). Цифры у кривой – время, соответствующее длительности импульса разряда для конкретной частоты.

класса с возможностью достижения более высокой импульсной плотности мощности пучка, что может быть крайне важно при решении многих радиационных задач при облучении различных органических материалов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-10015).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бугаев С.П., Крейнделъ Ю.Е., Шанин П.М. Электронные пучки большого сечения. М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Salimov R.A., Cherepkov V.G., Golubenko J.I., Krainov G.S., Korabelnikov B.M., Kuznetsov S.A., Kuksanov N.K., Malinin A.B., Nemytov P.I., Petrov S.E., Prudnikov V.V., Fadeev S.N., Veis M.E. // Radiation Physics and Chemistry. 2000. V. 57. P. 661. [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(99\)00486-7](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(99)00486-7)
3. Брызгин А.А., Безуглов В.И., Кокин Е.Н., Коробейников М.В., Кузнецов Г.И., Макаров И.Г., Острейко Г.Н., Панфилов А.Д., Радченко В.М., Сердобинцев Г.В., Сидоров А.В., Тарнецкий В.В., Тиунов М.А., Факторович Б.Л., Чернов К.Н., Ческидов В.Г. // ПТЭ. 2011. № 3. С. 5.
4. Воробьев М.С., Коваль Н.Н., Сулакшин С.А. // ПТЭ. 2015. № 5. С. 112. <https://doi.org/10.7868/S0032816215040138>
5. Баранов Г.А., Бодакин Л.В., Гурашвили В.А., Джигайло И.Д., Комаров О.В., Косоголов С.Л., Кузьмин В.Н., Сень В.И., Ткаченко Д.Ю., Успенский Н.А., Шведюк В.Я. // ПТЭ. 2013. № 1. С. 81. <https://doi.org/10.7868/S0032816213010047>

6. Соковнин С.Ю. Наносекундные ускорители электронов для радиационных технологий. Екатеринбург: Уральский ГАУ, 2017.
7. Crocker A., Foster H., Rampson H.M., Holliday J.H. // *Electronics Lett.* 1972. V. 8. № 18. P. 460.
8. O'Brien B.V. // *Applied Physics Letters.* 1973. V. 22. Iss. 10. P. 503.
<https://doi.org/10.1063/1.1654485>
9. Вагнер И.В., Болгов Э.И., Гракун В.Ф., Гохфельд В.Л., Кудлай В.А. // *ЖТФ.* 1974. Т. 44. № 8. С. 1669.
10. Garnsworthy R.K., Mathias L.E.S., Carmichael C.H.H. // *Applied physics letters.* 1971. V. 19. № 12. P. 506.
11. Балтаков Ф.Н., Босамыкин В.С., Корнилов В.Г., Кудрявкин Е.В., Павловский А.И., Селявский В.Т., Суханов Л.В., Челпанов В.И. // *ЖТФ.* 1976. Т. 46. № 10. С. 2195.
12. Isaacs G.G., Jordan D.L., Dooley P.J. // *J. Phys. E.: Sci. Instrum.* 1979. V. 12. P. 115.
13. Dior V., Bonnet J., Schmid T., Mohamed A. // *Sensors.* 2011. V. 11. № 5. P. 5202.
<https://doi.org/10.3390/s110505202>
14. Гаврилов Н.В., Крейнделъ Ю.Е., Щанин П.М. // *ЖТФ.* 1985. Т. 55. № 9. С. 1886.
15. Нечаев А.А., Персианцев И.Г., Полушкин В.М., Тимофеев М.А., Тугарев В.А. // *ПТЭ.* 1983. № 2. С. 156.
16. Денисов С.С., Успенский Н.А., Федяков В.П. // *ПТЭ.* 1984. № 2. С. 139.
17. Аброян М.А., Успенский Н.А., Федяков В.П. // *ПТЭ.* 1984. № 4. С. 24.
18. Косогоров С.Л., Успенский Н.А., Шведюк В.Я., Васеленок А.А., Джигайло И.Д., Смирнов Г.А. // *Известия вузов. Физика.* 2020. Т. 63. № 10. С. 41.
19. 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. // *ПТЭ.* 2020. № 2. С. 102.
<https://doi.org/10.31857/S0032816220030027>
20. Аброян М.А., Евстратов И.Ю., Косогоров С.Л., Мотовилов С.А., Сиrotинкин В.В., Шаниро В.Б. // *ПТЭ.* 1998. № 2. С. 83.
21. Doroshkevich S., Sulakshin S., Vorobyov M., Koval N., Ekavyan A., Chistyakov A. // *IEEE 2020. Proc. of 7th Int. Cong. on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE). 21st Int. Symp. on High-Current Electronics (Toms).* 2020. P. 42.
<https://doi.org/10.1109/EFRE47760.2020.9241926>
22. McClure G. // *Appl. Phys. Lett.* 1963. V. 2. № 12. P. 233.
<https://doi.org/10.1063/1.1753749>
23. Makarov M., Loumani Y., Minea T., Gousset G., Kozyrev A. // *Europhys. Lett.* 2006. V. 74. № 3. P. 431.
<https://doi.org/10.1209/epl/i2005-10542-y>
24. Новиков А.А. Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой. М.: Энергоатомиздат, 1983.
25. Гаврилов Н.В., Крейнделъ Ю.Е., Месяц Г.А., Шведов Ф.Н. // *ПЖТФ.* 1988. Т. 14. № 10. С. 865.
26. Никулин С.П. // *ЖТФ.* 1997. Т. 67. № 5. С. 43.
27. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.
28. Метель А.С., Григорьев С.Н., Мельник Ю.А., Панин В.В. // *Физика плазмы.* 2009. Т. 35. № 12. С. 1140.
29. Torba M.S., Doroshkevich S.Yu., Levanisov V.A., Vorobyov M.S., Koval N.N., Sulakshin S.A. // *Journal of Physics: Conference Series.* 2021. V. 2064. 012122.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2064/1/012122>
30. Belkind A., Freilich A., Scholl R. // *Surface and Coatings Technology.* 1998. V. 108–109. P. 558.
31. Doroshkevich S.Yu., Vorobyov M.S., Torba M.S., Koval N.N., Sulakshin S.A., Levanisov V.A., Ekavyan A.A., Chistyakov A.V. // *Journal of Physics: Conference Series.* 2021. V. 2064. 012116.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2064/1/012116>
32. Николаев В.Б. // *ЖТФ.* 1976. № 7. С. 1555.
33. Seltser S.M., Berger M.J. // *Nucl. Instrum. and Methods.* 1974. V. 119. P. 157.

УПРАВЛЯЕМОЕ СВЕДЕНИЕ ЛУЧЕЙ С РАЗНЫМИ ДЛИНАМИ ВОЛН ПОСРЕДСТВОМ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ БРЭГГОВСКОЙ ДИФРАКЦИИ

© 2023 г. В. М. Котов^{а,*}

^аИнститут радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
Россия, 141195, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

*E-mail: vmk277@ire216.msk.su

Поступила в редакцию 05.10.2022 г.

После доработки 05.10.2022 г.

Принята к публикации 26.11.2022 г.

Предложен метод управляемого сведения лучей с разными длинами волн посредством акустооптической (АО) брэгговской дифракции. Приведена методика расчета параметров дифракции двух лучей на одной акустической волне в одноосном кристалле, позволяющая определить условие сведения лучей. Расчеты продемонстрированы на примере сведения лучей с длинами волн 0.514 и 0.633 мкм в одноосном кристалле парателлуриата посредством АО-взаимодействия с “медленной” акустической волной. Выполнены эксперименты, подтвердившие основные теоретические выводы.

DOI: 10.31857/S0032816223020222, EDN: GTLDFJ

ВВЕДЕНИЕ

Акустическая волна, взаимодействуя с оптическим излучением в упругой среде, позволяет управлять многими параметрами света: его направлением распространения, амплитудой, поляризацией, частотой и т.д. [1–3]. Особый интерес представляет режим брэгговской акустооптической (АО) дифракции, когда оптическое излучение отклоняется в один порядок с эффективностью, близкой к 100% [1–3].

Одним из перспективных применений акустооптики является возможность управляемого объединения двух лучей для суммирования их оптических мощностей. В работе С.Н. Антонова [4] продемонстрировано суммирование мощностей двух однотипных полупроводниковых лазеров с модуляцией полученной мощности акустической волной. Метод позволяет расширить функциональные возможности устройств для лазерной резки и обработки материалов, увеличить скорость нанесения изображений в процессе гравировки и т.п.

В настоящей работе описывается метод объединения лучей с разными длинами волн. Это существенно расширяет круг задач, которые могут быть решены с использованием такой возможности. Например, сведенные лучи, один из которых – мощный, а другой – слабый зондирующий, крайне востребованы в хирургии, офтальмологии и т.п. Двухцветное излучение, состоящее из лучей с одинаковыми мощностями, необходимо для

двухкоординатной лазерной доплеровской анемометрии [5–7], в системах навигации [8] и т.д.

Для решения задачи эффективного объединения лучей с разными длинами волн необходимо найти частоту звука и угол падения лучей на кристалл, при которых оба луча находятся в строгом брэгговском синхронизме с одной акустической волной. Эти условия меняются при изменении длин волн оптических лучей. В настоящей работе описывается методика расчета параметров АО-взаимодействия, обеспечивающего сведение двух лучей с произвольными длинами волн, а также приводятся экспериментальные результаты использования метода на примере сведения лучей с длинами волн 0.514 и 0.633 мкм.

ТЕОРИЯ

Предполагается, что в качестве АО-среды будет использоваться кристалл парателлуриата (TeO_2) – наиболее перспективного на настоящий момент АО-материала благодаря аномально высокому значению величины АО-качества M_2 [1–3]. Эта величина, по сути, является коэффициентом пропорциональности между эффективностью дифракции света и мощностью звука. Анализ дифракции двухцветного излучения на одной акустической волне достаточно подробно проведен в [9]. Выявлено много вариантов такой дифракции, большинство из которых реализуется при распространении света вблизи оптической оси кристалла. Однако надо иметь в виду, что TeO_2 является од-

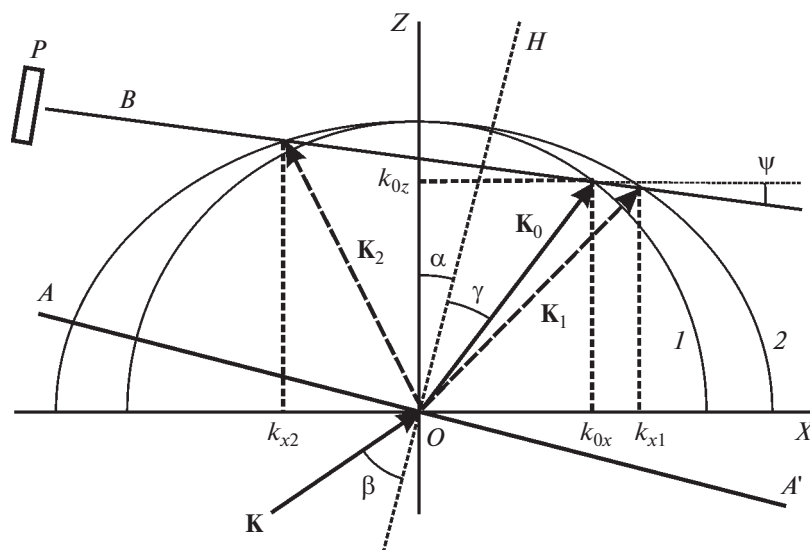


Рис. 1. Векторная диаграмма АО-дифракции в одноосном кристалле: AA' – оптическая грань кристалла; \mathbf{K} – волновой вектор волны, падающей на кристалл; \mathbf{K}_0 – волновой вектор преломленной волны; H – нормаль к грани AA' ; β и γ – углы падения и преломления; α – угол между нормалью H и оптической осью OZ кристалла; 1 и 2 – поверхности волновых векторов кристалла; B – прямая, описывающая направление распространения звуковой волны; P – излучатель звука (пьезопреобразователь); ψ – угол наклона прямой B к оси OX ; k_{0x} , k_{0z} – проекции \mathbf{K}_0 на оси OX и OZ ; k_{x1} , k_{x2} – проекции точек пересечения прямой B с поверхностью 2 на ось OX ; \mathbf{K}_1 , \mathbf{K}_2 – волновые векторы дифрагировавших лучей.

ноосным гиротропным кристаллом. Собственные волны лучей, распространяющихся вблизи его оптической оси, эллиптически поляризованы, и только при отклонении света на углы 4° – 5° от оптической оси волны становятся линейно поляризованными. Поскольку большинство источников лазерного излучения генерирует лучи с линейной поляризацией, предпочтительно выбирать режимы дифракции в кристалле, когда собственные волны кристалла также являются линейно поляризованными. При использовании TeO_2 это предполагает, что нормали к входным и выходным оптическим граням кристалла также должны быть ориентированы под теми же углами к оптической оси. Этим обеспечиваются наилучшие условия ввода и вывода оптического излучения из кристалла. В настоящей работе предполагается и наклон акустической грани, что позволяет варьировать частоту звуковой волны в широких пределах.

Проблему совмещения двух лучей на выходе АО-ячейки будем решать, исходя из обратной задачи, т.е. поиска условий расщепления двухцветного излучения на монохроматические компоненты в процессе АО-взаимодействия, откуда можно определить все параметры, необходимые для эффективного сведения двух лучей с разными длинами волн в единое излучение.

Будем рассматривать анизотропную дифракцию света на звуке, сопровождающуюся сменой поверхностей волновых векторов кристалла [1–3].

Положим для определенности, что в процессе дифракции “обыкновенный” луч дифрагирует в “необыкновенный”. На рис. 1 приведена векторная диаграмма такой дифракции в одноосном положительном кристалле. Волновые поверхности “обыкновенного” и “необыкновенного” лучей обозначены 1 и 2 , соответственно; OZ – оптическая ось кристалла. Оптическая грань, на которую падает входное излучение, обозначена AA' . Нормаль к этой грани, обозначенная H , составляет угол α с осью OZ . Пусть входное оптическое излучение с длиной волны λ и волновым вектором \mathbf{K} , величина которого равна $K = 2\pi/\lambda$, падает на грань AA' под углом β . Полагаем, что \mathbf{K} является “обыкновенным” лучом. Внутри кристалла луч преломляется под углом γ , связанным с β соотношением

$$\sin \gamma = \sin \beta / n_0, \quad (1)$$

где n_0 – показатель преломления “обыкновенного” луча.

Поскольку луч \mathbf{K} является “обыкновенным” лучом, он принадлежит волновой поверхности 1 . Внутри кристалла его волновой вектор равен \mathbf{K}_0 , его величина $K_0 = 2\pi n_0/\lambda$. Поверхности 1 и 2 волновых векторов в кристаллографической системе координат описываются выражениями:

$$k_x^2 + k_z^2 = K_0^2 - \text{“обыкновенный” луч}, \quad (2)$$

$$\frac{k_x^2}{K_e^2} + \frac{k_z^2}{K_0^2} = 1 - \text{“необыкновенный” луч.} \quad (3)$$

Здесь k_x, k_z – проекции волнового вектора света на оси OX и OZ , соответственно; $K_0 = 2\pi n_0/\lambda$, $K_e = 2\pi n_e/\lambda$, где n_0, n_e – главные показатели преломления кристалла.

Проекции K_0 на оси OX и OZ равны:

$$k_{0x} = K_0 \sin(\alpha + \gamma); \quad k_{0z} = K_0 \cos(\alpha + \gamma). \quad (4)$$

Пусть волновой вектор звука, генерируемого пьезопреобразователем P , направлен вдоль прямой B , проходящей через точку (k_{0x}, k_{0z}) и составляющей угол ψ с осью OX . В этом случае прямая B задается уравнением

$$k_z - k_{0z} = \operatorname{tg}\psi(k_x - k_{0x}). \quad (5)$$

Прямая B пересекает поверхности 1 и 2 в четырех точках. Нас будут интересовать только точки пересечения прямой B с поверхностью 2. Для нахождения этих точек необходимо решать совместно уравнения (5) и (2) относительно неизвестных k_x и k_z . Исключив k_z , получим квадратное уравнение относительно k_x :

$$P_1 k_x^2 + 2R_1 k_x + Q_1 = 0. \quad (6)$$

Здесь

$$P_1 = \frac{1}{K_e^2} + \frac{\operatorname{tg}^2\psi}{K_0^2}, \quad R_1 = \operatorname{tg}\psi \frac{b_2}{K_0^2}, \quad Q_1 = \frac{b_2^2}{K_0^2} - 1, \quad (7)$$

где $b_2 = k_{0z} - \operatorname{tg}\psi k_{0x}$.

Определив k_{x1}, k_{x2} из формулы (6) (полагаем $k_{x1} > k_{x2}$), найдем k_{z1}, k_{z2} из соотношения (5). Проекции k_{x1}, k_{x2} приведены на рис. 1. Частоты звука, при которых осуществляется анизотропная дифракция, определяются из соотношений:

$$f_1 = \frac{V}{2\pi} \sqrt{(k_{0x} - k_{x1})^2 + (k_{0z} - k_{z1})^2},$$

$$f_2 = \frac{V}{2\pi} \sqrt{(k_{0x} - k_{x2})^2 + (k_{0z} - k_{z2})^2}, \quad (8)$$

где V – скорость звука.

Отметим, что кристалл TeO_2 обладает сильной акустической анизотропией, поэтому скорость звука в нем зависит от угла ψ . Скорость вычисляется на основе соотношения [3]

$$V^2 = V_t^2 \cos^2\psi + V_z^2 \sin^2\psi, \quad (9)$$

где для TeO_2 $V_t = 0.617 \cdot 10^5$ см/с, $V_z = 2.104 \cdot 10^5$ см/с.

На рис. 1 дифрагировавшие лучи – это \mathbf{K}_1 и \mathbf{K}_2 . Как видно из рисунка, эти лучи отклоняются по разные стороны от падающего излучения \mathbf{K}_0 , причем луч, дифрагировавший на частоте f_1 , отклоняется от преобразователя P , а на частоте f_2 – к преобразователю P .

Приведенная методика позволяет найти оптимальные условия дифракции исходя из предельных параметров любого кристалла. Продемонстрируем методику поиска параметров на примере кристалла TeO_2 . Кристалл обладает многими достоинствами: широким диапазоном прозрачности (0.25–6 мкм), высокими значениями показателей преломления и фотоупругих констант, наличием направлений, в которых звуковая волна распространяется с аномально низкой скоростью (“медленная” волна, $V = 617$ м/с) [10]. Эти характеристики обеспечивают очень высокое значение параметра АО-качества M_2 материала [1–3]. С практической точки зрения, формирование суммарного излучения с наименьшими “паразитными” засветками от побочных недифрагировавших лучей реализуется при больших углах отклонения дифрагировавшего излучения, т.е. при больших частотах звука. Однако сильное увеличение поглощения “медленной” звуковой волны с ростом частоты не позволяет использовать TeO_2 на частотах выше 200 МГц [10]. На практике большинство высокочастотных модуляторов из TeO_2 работает на частотах 100–150 МГц. В настоящей работе параметры дифракции выбраны таким образом, чтобы “рабочая” частота звука оказалась близкой к 130 МГц.

На рис. 2 приведены зависимости частоты звука, вычисленные на основании выражений (8) и (9), от угла падения света β на кристалл. Кривые f_1 и f_2 построены для оптического излучения с длиной волны 0.63 мкм, кривые F_1 и F_2 – для излучения с длиной волны 0.514 мкм. В расчетах полагалось, что дифракция происходит в кристалле TeO_2 , показатели преломления которого равны $n_0 = 2.259$, $n_e = 2.41$ для излучения с длиной волны 0.63 мкм и $n_0 = 2.3115$, $n_e = 2.4735$ для излучения с длиной волны 0.514 мкм [10]. Скорость звука в кристалле вычислялась, согласно формуле (9), в предположении, что $\psi = 6.5^\circ$. Угол наклона α оптической грани был взят равным 11° . При таких значениях ψ и α оптические лучи заведомо распространяются вдали от оптической оси кристалла. На рис. 2 кривые пересекаются между собой. В рамках поставленной задачи наибольший интерес представляет пересечение кривых с разными длинами волн. Таких пересечений два, точки пересечения обозначены A и B . В точке A пересекаются кривые f_2 и F_1 , при этом излучение с длиной волны 0.63 мкм отклоняется по направлению к преобразователю, а излучение с длиной волны 0.514 мкм – от преобразователя. В точке B возникает обратная ситуация, здесь лучи меняются местами. Частоты звука, при которых наблюдается пересечение кривых, примерно равны друг другу и составляют приблизительно 130 МГц. Углы β для точек A и B разные. Это указывает на две возможности сведения лучей с разными длинами волн.

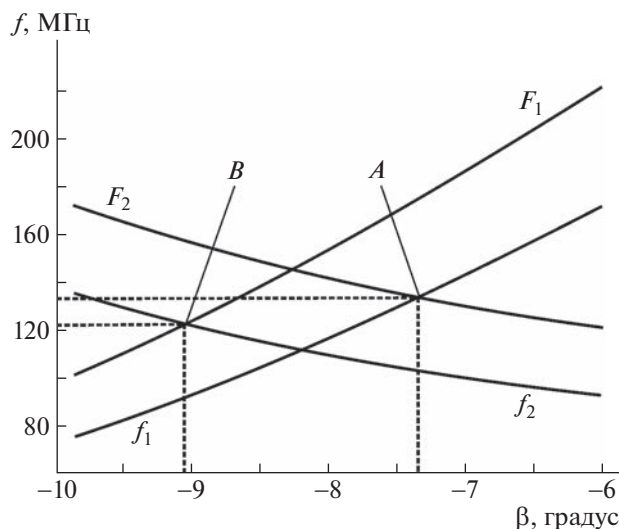


Рис. 2. Зависимости частоты f брэгговской дифракции от угла падения β ; f_1, f_2 – “ветви”, описывающие дифракцию излучения с длиной волны 0.633 мкм; F_1, F_2 – то же для излучения с длиной волны 0.514 мкм; A и B – точки пересечения “ветвей” с разными длинами волн.

Нетрудно определить углы, при которых дифрагировавшие лучи выходят из кристалла. Эти углы, по сути, определяют условие сведения двух лучей посредством АО-дифракции. Заметим, что величины волновых векторов дифрагировавших лучей K_1 и K_2 определяются как:

$$K_1 = \sqrt{k_{x1}^2 + k_{z1}^2}, \quad K_2 = \sqrt{k_{x2}^2 + k_{z2}^2}. \quad (10)$$

Отсюда углы между векторами K_1, K_2 и оптической осью OZ равны:

$$\operatorname{tg}\gamma_1 = \frac{k_{x1}}{k_{z1}}, \quad \operatorname{tg}\gamma_2 = \frac{k_{x2}}{k_{z2}}. \quad (11)$$

Углы падения дифрагировавших лучей на внутреннюю выходную грань кристалла, ориентированную под тем же углом α , что и входная грань, будут равны $(\gamma_1 - \alpha)$ и $(\gamma_2 - \alpha)$. Углы преломления η_1 и η_2 на выходе кристалла определяются из соотношений:

$$\begin{aligned} \sin\eta_1 &= \frac{K_1}{K} \sin(\gamma_1 - \alpha), \\ \sin\eta_2 &= \frac{K_2}{K} \sin(\gamma_2 - \alpha). \end{aligned} \quad (12)$$

На рис. 3 приведены зависимости углов преломления η на выходе кристалла дифрагировавших лучей, отсчитываемых от угла β , в зависимости от угла падения β . Кривые, обозначенные f_1 и f_2 , соответствуют углам отклонения лучей, дифрагировавших на частотах f_1 и f_2 излучения с длиной волны 0.63 мкм. Аналогично кривые F_1 и F_2

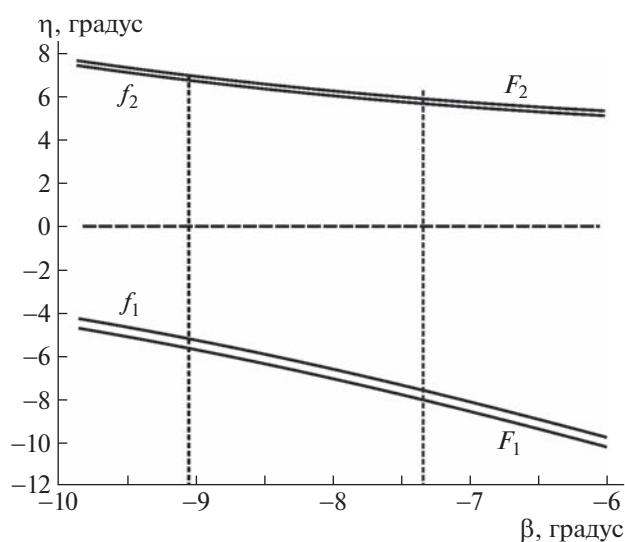


Рис. 3. Зависимости углов преломления η дифрагировавших лучей от угла падения β лучей на кристалл; f_1, f_2 – ветви углов для излучения с длиной волны 0.633 мкм; F_1, F_2 – то же для излучения с длиной волны 0.514 мкм.

описывают углы отклонения лучей с длиной волны 0.514 мкм. Вертикальными пунктирными линиями отмечены углы β , при которых формируются точки пересечения A и B на рис. 2. Из сравнения рис. 2 и 3 можно сделать вывод, что в точке B угол преломления луча F_1 равен минус 6° , угол преломления f_2 равен примерно 7° . Аналогично в точке A угол преломления дифрагировавшего луча F_2 равен 6° , а луча f_1 – минус 7° . Полученные углы определяют условия, при которых надо направить лучи с длинами волн 0.63 мкм и 0.514 мкм на АО-ячейку для осуществления их слияния. На практике можно просто установить “нужный” угол непосредственно между лучами, а ориентацией АО-ячейки добиться их слияния.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для проверки полученных результатов была изготовлена АО-ячейка из TeO_2 с “косыми” срезами. Эскиз чертежа, согласно которому изготавливался кристалл для ячейки, приведен на рис. 4. Кристалл изначально имел форму параллелепипеда, ориентированного вдоль кристаллографических осей $[110], [1\bar{1}0]$ и $[001]$, где $[001]$ – оптическая ось кристалла. Размеры параллелепипеда вдоль указанных осей составляли $13 \times 10 \times 15$ мм. Затем грани (001) “скашивались” на угол 11° , формируя оптические грани OO' , а грань (110) “скашивалась” на угол 6.5° . Эта грань являлась акустической гранью A . К этой грани приваривался пьезопреобразователь P из ниобата лития

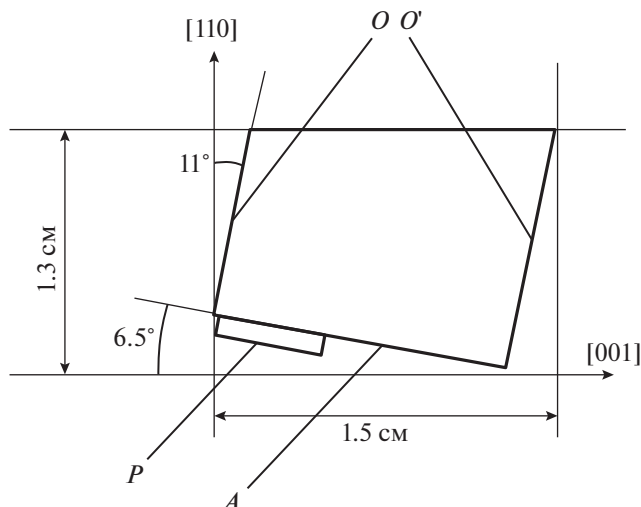


Рис. 4. Эскиз для изготовления АО-кристалла из TeO_2 ; [110], [001] – направления кристаллографических осей; [001] – оптическая ось кристалла; OO' – оптические грани кристалла; A – акустическая грань; P – пьезопреобразователь.

X-среза методом холодной сварки [11]. Размер преобразователя 6×6 мм. Как видно из рисунка, преобразователь P смещен от центра к краю грани. Это связано с сильной акустической анизотропией кристалла, приводящей к “сносу” акустической волны. Смещение преобразователя позволяет избежать нежелательного отражения звука от боковых граней. Толщина преобразователя составила 90 мкм. Звук возбуждался на 5-й гармонике, равной приблизительно 131 МГц, в полосе частот примерно 3 МГц по уровню 3 дБ. На рис. 5 приведена фотография изготовленной АО-ячейки. Размер всей ячейки составил $36 \times 25 \times 25$ мм. Эта ячейка использовалась в последующих экспериментах.

На рис. 6 приведена оптическая схема сведения лучей с разными длинами волн в один луч. Источниками исходных излучений служили аргонный (Ar) и гелий-неоновый (He-Ne) лазеры, генерирующие лучи с длинами волн 0.514 и 0.633 мкм соответственно. Поскольку Ar-лазер генерирует несколько линий в сине-зеленой области спектра, для выделения излучения с длиной волны 0.514 мкм использовался интерференционный фильтр ИФ. После фильтра излучение направлялось непосредственно в АО-ячейку АОМ. Излучение He-Ne-лазера отражалось от зеркала М и направлялось на вход ячейки АОМ под углом φ к излучению Ar-лазера. Оба луча перед входом в ячейку пропускались через поляризатор Р для формирования линейных поляризаций лучей, соответствующих поляризациям “необыкновенных” лучей в кристалле. В нашем случае поляризации лучей должны быть параллельны направлению распространения звука. На АО-ячейку АОМ по-

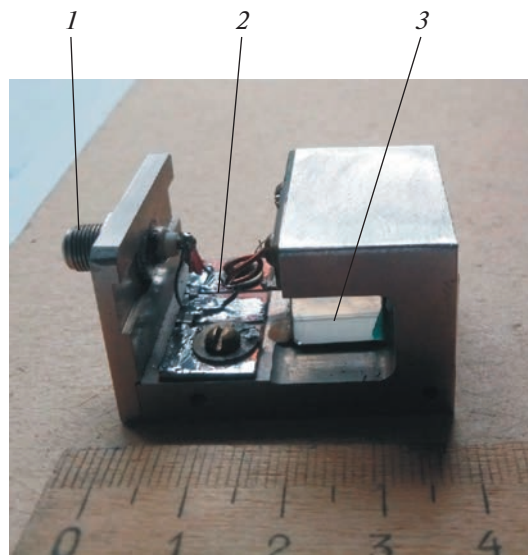


Рис. 5. Фотография изготовленной АО-ячейки. 1 – разъем для входа электрического сигнала; 2 – элементы согласования; 3 – АО-кристалл.

давался электрический сигнал частотой 130 МГц. Угловой юстировкой АО-ячейки мы достигали ситуации, когда на экране S оба дифрагировавших луча “сливались” в одно пятно С. “Слияния” лучей удалось добиться при угле φ между исходными лучами, равном 12° . Этот угол немного отличается от расчетного, равного 13° , что может быть связано с неточной ориентацией кристалла относительно кристаллографических осей, а также с неточностью “скошенных” граней кристалла. Эффективность дифракции каждого луча составила примерно 70%. Путем изменения мощности звука можно увеличить эффективность дифракции одного луча в ущерб эффективности другого. Одновременно получить высокую эффективность обоих лучей, близкую к 100%, невозможно. Это связано с достаточно высокой селективностью дифракции к длине волны света. Из работ [1–3] известно, что эффективность брэгговской дифракции μ определяется выражением

$$\mu = \frac{I_1}{I_0} = \sin^2 \left(\frac{\pi}{\lambda \cos \theta_b} \sqrt{\frac{P_a L}{2 H_a}} M_2 \right), \quad (13)$$

где I_0 и I_1 – интенсивности падающего и дифрагировавшего лучей, соответственно; λ – длина волны света; θ_b – угол Брэгга (поскольку $\theta_b \ll 1$, можно принять $\cos \theta_b \approx 1$); P_a – акустическая мощность; L – длина АО-взаимодействия; H_a – высота акустического “столба”, M_2 – коэффициент АО-качества материала.

Из формулы (13) следует, что невозможно обеспечить одновременную 100%-ную эффективность дифракции для двух разных длин волн λ . В работе [9] показано, что селективность к длине волны су-

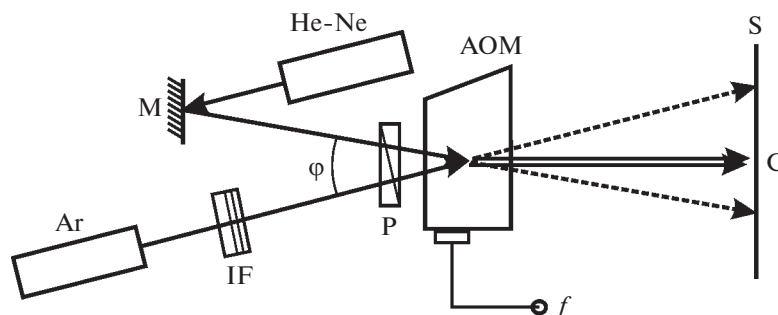


Рис. 6. Оптическая схема эксперимента. Ar и He-Ne – аргонный и гелий-неоновый лазеры; IF – интерференционный фильтр; M – отражающее зеркало; P – поляризатор; АОМ – а.о.-ячейка; f – сигнал, подаваемый на ячейку; φ – угол между входными лучами; S – экран; C – точка сведения двух лучей.

щественно уменьшается (полоса длин волн перекрывает практически весь видимый диапазон), если ограничиться эффективностью дифракции в 90%. Кроме того, существует ряд работ (например, [12–14]), в которых предложены методы существенного уменьшения селективности дифракции к длине волны света, например, путем устранения эффекта перемодуляции. Другими словами, если возникнет потребность существенного уменьшения селективности дифракции, то можно воспользоваться методиками, развитыми в работах [9, 12–14].

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика определения параметров брэгговской дифракции двух лучей с разными длинами волн на одной акустической волне, происходящей в одноосном кристалле. Методика учитывает преломление излучений на произвольно ориентированных оптических гранях, а также предполагает произвольную ориентацию акустической грани относительно кристаллографических осей. Это дает возможность определить наилучшие условия сведения двух лучей в зависимости от предельных параметров кристалла.

2. Согласно методике, определены оптимальные параметры брэгговской дифракции в кристалле TeO_2 для сведения двух лучей с длинами волн 0.514 и 0.633 мкм, взаимодействующих с “медленной” звуковой волной. Оптимальный режим осуществляется при наклоне оптической грани на угол около 11° относительно оптической оси [001] и наклоне акустической грани на угол примерно 6.5° относительно оси [110]. Частота звука при этом равняется 130 МГц.

3. Эксперименты, выполненные с использованием АО-ячейки из TeO_2 , изготовленной в соответствии с вышеназванными параметрами, позволили объединить два луча с длинами волн 0.514 и 0.633 мкм, генерируемыми Ar- и He-Ne-лазерами, в единый луч. Эффективность дифракции каждого излучения составила примерно 70%.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Магдич Л.Н., Молчанов В.Я.* Акустооптические устройства и их применение. М.: Сов. радио, 1978.
2. *Балакшиев В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е.* Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985.
3. *Xu J., Stroud R.* Acousto-optic Devices: Principles, Design and Applications. N.Y.: J. Wiley and Sons, Inc., 1992.
4. *Антонов С.Н.* // ПТЭ. 2021. № 4. С. 51. <https://doi.org/10.31857/S0032816221030162>
5. *Ринкевичус В.С.* Лазерная анемометрия. М.: Энергия, 1978.
6. *Коронкевич В.П., Ханов В.А.* Современные лазерные интерферометры. Новосибирск: Наука, 1985.
7. *Клочков В.П., Козлов Л.Ф., Потыкевич И.В., Соскин М.С.* Лазерная анемометрия, дистанционная спектроскопия и интерферометрия. Справочник. Киев: Наукова думка, 1985.
8. *Kersey A.D., Dandridge A., Burns W.K.* // Electron. Lett. 1986. V. 22. № 18. P. 935. <https://doi.org/10.1049/el:19860637>
9. *Котов В.М.* Акустооптика. Брэгговская дифракция многоцветного излучения. М.: Янус-К, 2016.
10. Акустические кристаллы / Под ред. М.П. Шаскольской. М.: Наука, 1982.
11. *Молчанов В.Я., Китаев Ю.И., Колесников А.И., Нарвер В.Н., Розенштейн А.З., Солодовников Н.П., Шаповаленко К.Г.* Теория и практика современной акустооптики. М.: Изд. дом МИСиС, 2015.
12. *Антонов С.Н., Вайнер А.В., Проклов В.В., Резвов Ю.Г.* // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 6. С. 119. <https://doi.org/10.1134/S1063784209060176>
13. *Антонов С.Н., Вайнер А.В., Проклов В.В., Резвов Ю.Г.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 3. С. 97. <https://doi.org/10.1134/S1063784210030138>
14. *Антонов С.Н., Вайнер А.В., Проклов В.В., Резвов Ю.Г.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 9. С. 104. <https://doi.org/10.1134/S1063784210090173>

ПЛАНАРНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР МАЙКЕЛЬСОНА
НА ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОНАХ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА© 2023 г. В. В. Герасимов^{a,*}, А. К. Никитин^b, А. Г. Лемзяков^a^aИнститут ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11^bНаучно-технологический центр уникального приборостроения РАН
Россия, 117342, Москва, ул. Бутлерова, 15^cНовосибирский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

*e-mail: v.v.gerasimov3@gmail.com

Поступила в редакцию 29.09.2022 г.

После доработки 17.12.2022 г.

Принята к публикации 26.12.2022 г.

Представлены оптическая схема и технические характеристики терагерцового планарного интерферометра Майкельсона на поверхностных плазмонах. Описана методика определения комплексного показателя преломления поверхностных плазмонов ($\tilde{n}_s = n_s + i\kappa_s$) по регистрируемым интерферограммам. Представлены результаты тестовых измерений на плоских поверхностях с золотым напылением, покрытых слоями ZnS толщиной от 0 до 3 мкм, с использованием мощного когерентного излучения Новосибирского лазера на свободных электронах на длине волны $\lambda_0 = 141$ мкм. По результатам измерений найдено значение эффективной диэлектрической проницаемости поверхности напыленного золота, которое оказалось на порядок меньше, чем у кристаллического золота. Путем анализа энергетических потерь в плазмонном интерферометре выполнена оценка его динамического диапазона по мощности излучения (10^6 – 10^8), необходимого для измерений на образцах с разными \tilde{n}_s , а также предложены пути повышения отношения сигнал/шум путем оптимизации элементов оптической схемы и детектора.

DOI: 10.31857/S0032816223030059, EDN: IRMHU

1. ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное освоение терагерцового (ТГц) диапазона электромагнитных волн с частотой от 0.3 до 10 ТГц (что соответствует длинам волн от 1 мм до 30 мкм) началось только в 80-х годах; ранее оно было затруднено отсутствием мощных источников и чувствительных приемников ТГц-излучения. С созданием газовых и полупроводниковых ТГц-лазеров, а затем лазеров на свободных электронах (ЛСЭ) и фемтосекундных лазеров, а также изобретением фотопроводящих дипольных антенн и криогенных болометров развитие ТГц-оптики ускорилось [1].

Важная область применения ТГц-излучения – спектроскопия, поскольку именно в ТГц-диапазоне находятся частоты колебательных и вращательных степеней свободы большого числа органических, полимерных и биологических молекул, а также межмолекулярных связей [2]. Один из разделов спектроскопии – изучение поверхности и ее переходного слоя. Поскольку на ТГц-частотах толщина переходного слоя для большин-

ства задач много меньше длины волны (λ_0) излучения, отраженное поверхностью зондирующее излучение несет в основном информацию об оптических свойствах подложки, а не ее переходного слоя. По этой причине такие известные методы, как отражательно-абсорбционная спектроскопия [3] и эллипсометрия [4, 5], имеют недостаточную чувствительность в ТГц-диапазоне. Эта проблема особенно актуальна при локализации исследуемых объектов на металлической или полупроводниковой подложке, поскольку из-за высокой отражающей способности этих материалов в ТГц-диапазоне интенсивность поля зондирующего излучения в пределах изучаемого слоя при использовании рефлектометрических измерений стремится к нулю [6].

Использование поверхностных плазмонов (ПП) – разновидности поверхностных электромагнитных волн, генерируемых зондирующим излучением на поверхности металлов, – позволяет повысить чувствительность измерений вследствие увеличения как длины взаимодействия из-

лучения со слоем, так и концентрации его поля в приповерхностной области [7]. Поверхностные плазмоны представляют собой комплекс волны плотности электронов проводимости в приповерхностном слое металла и p -поляризованной электромагнитной волны, поле которой экспоненциально затухает с увеличением расстояния от границы раздела “металл–диэлектрик (окружающая среда)”. Поскольку в ИК и ТГц-диапазонах наиболее простой и надежно измеряемой характеристикой ПП является их длина распространения L (расстояние, на котором интенсивность волны уменьшается в $e \approx 2.718$ раза), большее признание получила абсорбционная поверхностная плазмонная спектроскопия [8]. Реже применяют фазовую плазмонную спектроскопию, когда измеряют скачок фазы при зондировании поверхности в условиях поверхностного плазмонного резонанса в видимом диапазоне [9, 10] или набег фазы ПП среднего ИК- [11] и ТГц-диапазона [12] после пробега ими макроскопического расстояния.

Интерферометрия в пучках ПП или объемных волн, порожденных ПП, позволяет объединить возможности амплитудных и фазовых измерений с целью определения комплексного показателя преломления ПП: $\tilde{n}_s = n_s + i\kappa_s$, однозначно связанного (посредством дисперсионного уравнения ПП для данной волноведущей структуры) с диэлектрической проницаемостью металла и оптическими постоянными переходного слоя [7, 8]. Кроме того, плазмонная интерферометрия позволяет исследовать быстропротекающие процессы на проводящей поверхности и может быть эффективно использована для сенсорных применений и в плазмонной микроскопии [9, 10].

Плазмонная интерферометрия нашла широкое применение в оптических сенсорных устройствах видимого диапазона благодаря таким особенностями ПП на этих частотах, как малая длина распространения (что отвечает требованию миниатюризации датчиков) и высокая концентрация поля плазмонов (что обеспечивает высокую чувствительность устройств к изменениям оптических характеристик сенсорного слоя на поверхности металла) [13]. В таких устройствах интерферируют, как правило, широкополосные ПП, генерируемые белым светом на двух параллельных щелях (канавках) в непрозрачном проводящем слое [14]. Распространяющиеся перпендикулярно щелям ПП интерферируют между собой, а результат их взаимодействия анализируют спектрометром, размещенным либо у одной из щелей, либо у поверхности между щелями [15, 16].

Тестовые эксперименты по плазмонной интерферометрии были выполнены и в среднем ИК-диапазоне с применением CO_2 -лазера [17–19]. Пучок лазерного излучения направлялся через прозрачную подложку на край непрозрачного

клиновидного металлического слоя, нанесенного на подложку и покрытого (для большей устойчивости ПП) слоем диэлектрика субволновой толщины. В результате дифракции излучения на крае металлического клина с некоторой эффективностью генерировались ПП на границе “металл–диэлектрик”, а также объемная волна, распространяющаяся в окружающей среде под скользящим углом к поверхности. Поверхностные плазмоны, достигнув противоположного края металлического слоя, дифрагировали на нем и преобразовывались в другую объемную волну, излучаемую с края под некоторым углом к плоскости подложки. В области пересечения обеих объемных волн формировалась интерференционная картина, содержащая информацию о показателе преломления ПП и их коэффициенте затухания.

Возможность создания плазмон-поляритонного интерферометра Маха–Цендера для сенсорных применений в ТГц-диапазоне была рассмотрена в работе [20]. Основное отличие предложенной схемы от известных для видимого диапазона состоит в том, что для обеспечения миниатюрности датчика в качестве материала слоя, направляющего поверхностные плазмон-поляритоны (ППП), был выбран антимонид индия (InSb). Плазменная частота ω_p InSb находится не в ближнем ультрафиолете (как для благородных металлов), а в ТГц-диапазоне [21], что обеспечивает близость частоты ω генерирующего ППП-излучения к ω_p (точнее, $\omega \lesssim \omega_p/\sqrt{2}$), т.е. выполнение условия сравнимости L с λ .

Однако плазмонные интерферометры ТГц-диапазона, содержащие металлическую (а не полупроводниковую) поверхность и поэтому использующие ПП с большой длиной распространения, могут быть эффективно применены: для контроля качества поверхности металлических и металлизированных зеркал макроскопических размеров; для определения эффективной диэлектрической проницаемости металлических покрытий, применяемых в плазмонных ТГц-волноводах, метаповерхностях и дифракционных решетках; для спектроскопии тонких диэлектрических пленок на проводящей поверхности; а также для различных сенсорных применений [22].

Первая схема ТГц-интерферометра Маха–Цендера на поверхностных плазмонах была предложена в работе [23]. В этом устройстве монохроматическое излучение источника до взаимодействия с поверхностью металла разделяется на два пучка: реперный и измерительный. Последний преобразуется в ПП и, после пробега по поверхности некоторого расстояния, попадает на перемещаемое вдоль трека ПП клиновидное зеркало, трансформирующее поверхностную волну в объемную. Объемные волны обоих пучков совмещаются, интерферируют, а интенсивность их ре-

зультулирующего поля регистрируется фотоприемником. Последовательность сигналов приемника, фиксируемых по мере изменения расстояния, проходимого ПП, представляет собой интерферограмму, содержащую информацию об обеих частях комплексного показателя преломления ПП.

Позднее были предложены схемы статических ИК- и ТГц-интерферометров на ПП [24, 25], на основе которых была разработана теория дисперсионной ИК-фурье-спектроскопии [26]. Из-за сложности разделения полезного сигнала ПП и паразитных объемных волн, порождаемых на элементе преобразования и элементах оптической схемы, эксперименты с применением данных схем осуществлены не были.

В некоторых схемах паразитные объемные волны используют в качестве реперного пучка для интерференции с плазмонами. Так, например, в работе [27] реализована динамическая плазменная рефрактометрия проводящей поверхности, в которой интерферировали объемные волны, порождаемые на волноводном элементе преобразования излучения источника в ПП, и поверхностные волны. Благодаря однододовому (TM_0) режиму настройки плоскопараллельного волновода, возникающие из-за дифракции на выходе из него паразитные объемные волны имели узкую диаграмму направленности и распространялись параллельно проводящей поверхности, как и генерируемые волноводом ПП. Как было отмечено авторами, несмотря на оригинальность и простоту, данный метод может быть реализован только для высокоимпедансных поверхностей, для которых фазовая скорость ПП заметно меньше скорости объемной волны в среде над исследуемой поверхностью.

С разработкой и освоением методики отражения и расщепления ПП плоскими зеркалами в ТГц-диапазоне и светоделительными пластинками [28, 29] была предложена схема ТГц-интерферометра Майкельсона на ПП [30], апробированная вскоре с использованием излучения ЛСЭ [31].

Настоящая работа посвящена описанию конструкции макета ТГц-интерферометра Майкельсона на ПП и особенностей выполнения измерений на нем, приведены методика определения комплексного показателя преломления ПП по регистрируемым интерферограммам, а также результаты определения эффективной диэлектрической проницаемости напыленного золота в пределах его скин-слоя по измеренным характеристикам ПП на длине волны 141 мкм.

2. КОНСТРУКЦИЯ ТГЦ-ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАЙКЕЛЬСОНА НА ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОНАХ

В основе функционирования ТГц-интерферометра на ПП, как и классического интерферометра Майкельсона, лежит анализ интерферограммы, но формируемой не объемными волнами, а коллинеарными пучками ПП, направляемых исследуемой поверхностью [30]. Определение действительной части показателя преломления ПП (n_s) осуществляется путем сравнения спектра излучения ЛСЭ со спектром ПП, получаемых в результате фурье-анализа интерферограмм. Мнимая часть (κ_s) определяется величиной затухания интенсивности ПП по мере их распространения по исследуемой поверхности.

Основными проблемами, с которыми мы столкнулись при создании планарного плазмонного интерферометра ТГц-диапазона, являлись необходимость повышения отношения сигнал/шум, увеличение скорости записи интерферограмм, а также уменьшение паразитных засветок приемника. Способы решения этих задач очевидны: 1) использование мощного источника монохроматического ТГц-излучения; 2) повышение эффективности преобразования излучения источника в ПП; 3) уменьшение энергетических потерь ПП в оптической схеме интерферометра; 4) использование чувствительных и достаточно быстрых приемников ТГц-излучения; 5) пространственное разделение паразитных объемных волн от ПП и экранирование приемника от паразитных объемных волн. Способы решения данных задач будут, в той или иной степени, представлены при описании конструкции плазмонного интерферометра в данном разделе.

В качестве источника ТГц-излучения использовался Новосибирский лазер на свободных электронах (НЛСЭ) [32], являющийся на сегодняшний день (наряду с гиротронами) одним из самых мощных. Излучение НЛСЭ представляет собой периодическую последовательность 100-пикосекундных импульсов, следующих с частотой 5.6 МГц; оно линейно поляризовано, полностью когерентно в поперечном сечении пучка, временная когерентность составляет 30–100 пс (в зависимости от режима работы лазера). Характерная средняя мощность излучения, поступающего на вход интерферометра, равна 30–40 Вт (при необходимости ее можно было увеличить до 400 Вт); диаметр гауссова пучка 12 мм. Рабочая длина волны излучения λ_0 была выбрана равной 141 мкм с шириной линии менее 1%.

Поскольку в штатном режиме работы НЛСЭ спектр его излучения нестабилен (длина волны в процессе измерений может смещаться до 0.2 мкм), с целью учета его вариаций одновременно с плазмонной интерферограммой регистрировали и

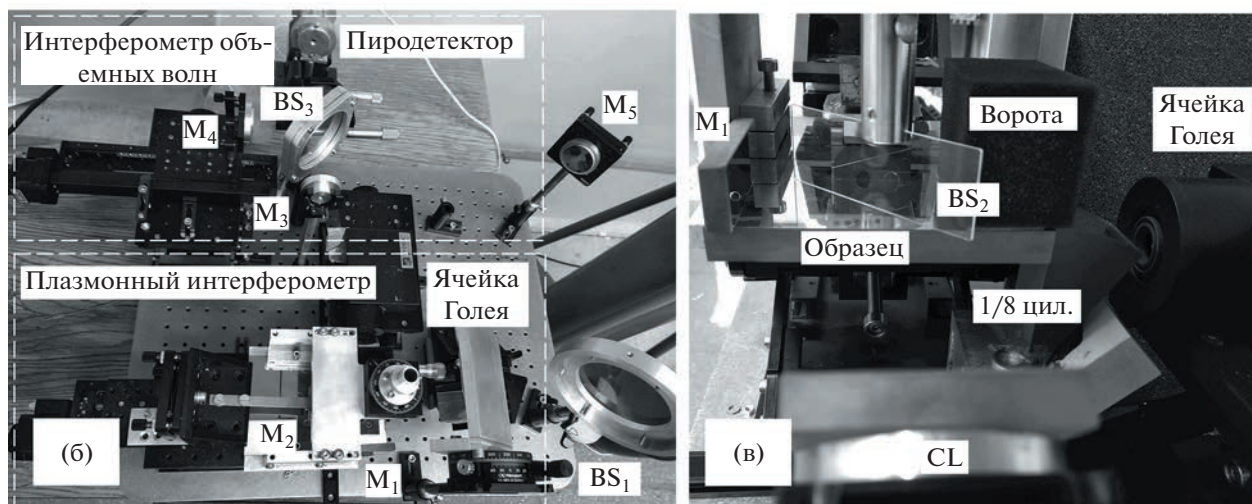
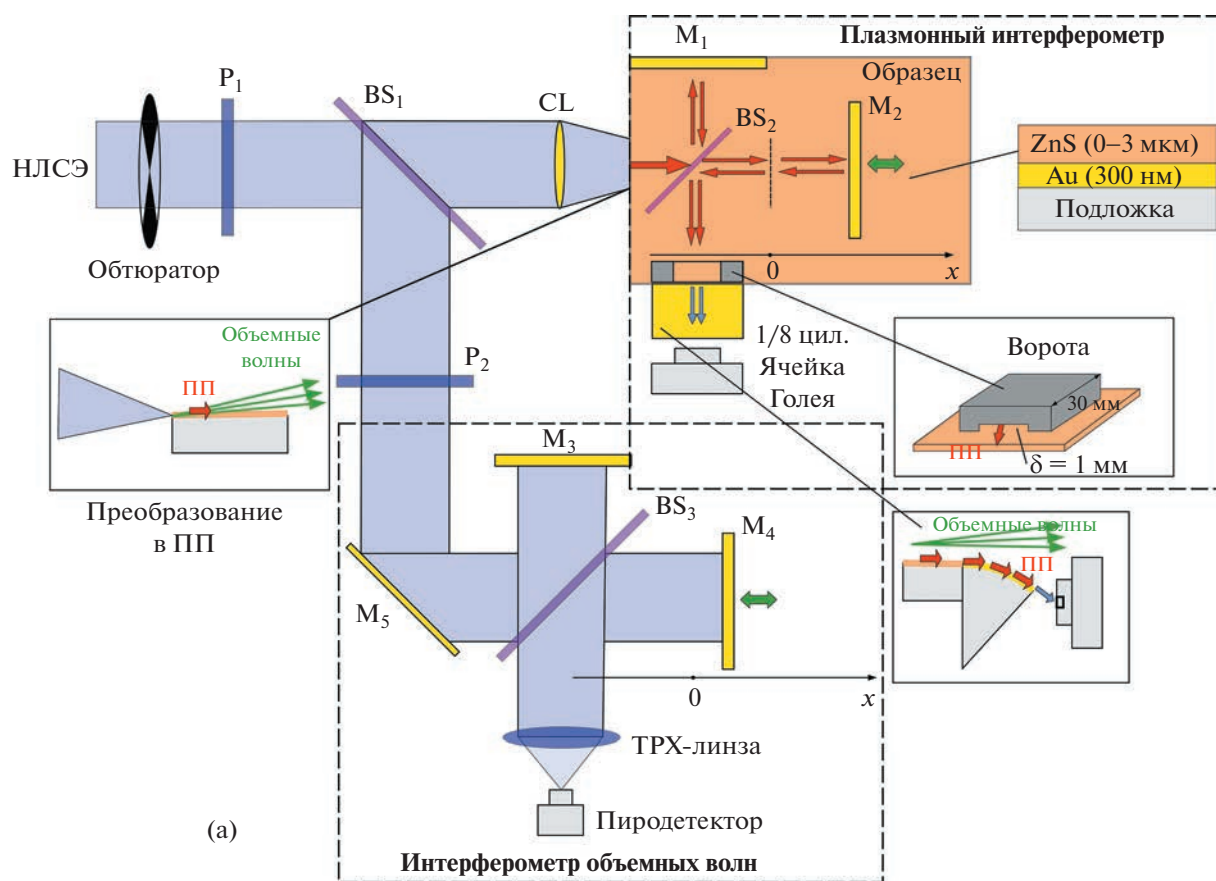


Рис. 1. а – оптическая схема (вид сверху) плазмонного ТГц-интерферометра: P_1, P_2 – поляризаторы; BS_1 – BS_3 – делители пучка; M_1 – M_5 – плоские зеркала; CL – цилиндрическая отражающая линза; ТРХ-линза – линза из материала ТРХ; б, в – фотографии интерферометра: вид сверху (б) и вид на плазмонный интерферометр (в).

интерферограмму, формируемую пучками излучения НЛСЭ. Для этого к схеме плазмонного интерферометра [31] был добавлен интерферометр Майкельсона объемных волн (рис. 1а).

Из пучка излучения НЛСЭ, поступающего на вход установки, с помощью литографического

поляризатора P_1 выделялась p -компонента, соответствующая поляризации ПП. Линейно поляризованное излучение разделялось пленочным 30-микронным полипропиленовым делителем BS_1 на два пучка. Отраженный пучок, интенсивность которого регулировалась поляризатором P_2 , на

правлялся зеркалом M_5 на интерферометр объемных волн, а прошедший пучок фокусировался цилиндрической зеркальной линзой CL с фокусным расстоянием 75 мм на верхнее ребро торца плоской подложки образца, где вследствие дифракции излучение преобразовывалось в ПП. Метод генерации ПП на ребре плоской подложки (“the end-fire coupling technique” [33]) по сравнению с другими известными методами (генерация на дифракционной решетке, волноводе, крае плоского экрана) отличается высокой эффективностью (десятки процентов при условии достаточного перекрытия полей падающей волны и ПП [34]), простотой и малой дисперсией коэффициента преобразования.

В плазмонном интерферометре использовались неподвижное M_1 и подвижное M_2 зеркала (стеклянные пластины размером $40 \times 20 \times 5$ мм с золотым покрытием отражающих граней и защитным слоем ZnS), а в качестве делителя – плоскопараллельная пластинка BS_2 из полиимидного материала Zeonex (TYDEX, Россия) размером $40 \times 25 \times 1$ мм [35], ориентированная под углом 45° к падающему пучку ПП. Нижние грани зеркал и делителя были оптически полированы и плотно прилегали к подложке, обеспечивая оптический контакт с ее поверхностью. В отличие от других известных элементов, используемых для отражения или расщепления ПП (брегговские решетки [36] или геодезические призмы [37], сформированные на поверхности образца), плоские зеркала и делители создают значительно меньше паразитных объемных волн, возникающих при их взаимодействии с ПП [29]. К тому же такие элементы можно свободно переставлять при перестройке интерферометра.

В качестве подложек для тестовых образцов использовались плоские стеклянные пластины $100 \times 150 \times 11$ мм, верхняя грань (100×150 мм) которых была оптически полирована. На нее методом магнетронного распыления осаждался непрозрачный слой золота толщиной 300 нм, поверх которого с помощью электронно-лучевого испарения наносился однородный по толщине слой сульфида цинка (ZnS). Было изготовлено три образца: без покрытия и со слоем ZnS толщиной d , равной 1.0 и 3.0 мкм. Такой выбор образцов был обусловлен существенным различием (согласно расчетам) показателей преломления (n_s) и поглощения (κ_s) ПП на данных образцах, что позволило оценить динамический диапазон интерферометра.

От места генерации до выхода с образца ПП проходили расстояние около 160 мм. На выходе из плазмонного интерферометра совмещенные пучки ПП из обоих плеч переходили на выпуклую поверхность примыкавшего к боковой грани подложки цилиндрического элемента преобразова-

ния ПП в объемные волны. Элемент представлял собой $1/8$ часть цилиндра с радиусом кривизны 60 мм, выпуклая поверхность которого содержала слой золота толщиной 300 нм, покрытый слоем ZnS толщиной 1.0 мкм. Потери ПП (в основном излучательного характера) на цилиндрической поверхности достигали 99%; несмотря на то что при выбранной толщине покрытия они были минимальны [38]. Достигнув противоположного ребра выпуклой грани элемента, ПП дифрагировали на ней и преобразовывались в объемные волны, регистрируемые приемником излучения. Выбор цилиндрического элемента преобразования был обусловлен необходимостью пространственного разделения объемных волн, порожденных ПП на выходном ребре этого элемента, и паразитных объемных волн, возникающих при: 1) преобразовании излучения НЛСЭ в ПП (сопровождаясь образованием дифрагированных объемных волн большой интенсивности) [39]; 2) дифракции ПП на делителе и зеркалах интерферометра [29]; 3) переходе ПП с подложки на выходной элемент преобразования. Кроме того, дополнительным источником паразитных объемных волн являлось рассеяние [40] ПП на шероховатостях и оптических неоднородностях поверхности слоя золота, приводящее к появлению радиационных потерь ПП [41]. Дополнительным и эффективным экраном от паразитных объемных волн служили поролоновые “ворота” (протяженностью 35 мм и с высотой проема 1 мм), размещенные на образце в месте его контакта с выходным элементом преобразования.

Детектирование интерферирующих объемных волн, порождаемых пучками ПП на свободном ребре выходного элемента преобразования, осуществлялось оптоакустическим приемником (ячейка Голя $GC-1T$, TYDEX, Россия), обладающим высокой чувствительностью ($NEP \approx 1.4 \cdot 10^{-10}$ Вт/Гц^{1/2} [42, 43]) и достаточным быстродействием (время отклика приемника 30 мс). Необходимость применения высокочувствительного приемника была обусловлена малой интенсивностью сигнала из-за больших потерь ПП при их дифракции на элементах схемы и затухания ПП при распространении по образцу.

В интерферометре объемных волн пучки теряли энергию незначительно (только при отражении от делителя BS_3), поэтому для регистрации интерферограмм объемных волн использовался менее чувствительный ($NEP \approx 1.9 \cdot 10^{-9}$ Вт/Гц^{1/2}) однопиксельный пироэлектрический приемник МГ-33 (НЗПП “Восток”, Россия) [44, 45], но обладающий большим быстродействием (типичное время нагрева приемника порядка 10 мкс [46], время отклика около 5 мс). Излучение, направляемое на его чувствительный элемент размером

1×1 мм, собиралось ТРХ-линзой (TYDEX, Россия) с фокусным расстоянием 50 мм.

Поскольку использованные приемники могут регистрировать только изменяющийся во времени поток излучения, на входе установки размещали механический obtюратор, модулировавший интенсивность излучения с частотой 100 Гц. Сигналы с каждого приемника регистрировались двумя синхронными детекторами SR-830 (Stanford Research, США) при постоянной времени интегрирования 10 мс (соответствует частоте модуляции). С выходов детекторов сигналы поступали на двухканальный цифровой осциллограф (Handyscope 3, TiePie engineering, Нидерланды), функционировавший в режиме самописца. Измеряемые временные зависимости оцифровывались и записывались в файл.

Подвижные зеркала M_2 и M_4 крепились к платформам моторизированных подвижек (8MT175-50, Standa, Литва), обеспечивающим перемещение зеркал в процессе сканирования вдоль оси x с шагом 2.5 мкм. Скорость сканирования была выбрана максимально возможной (250 мкм/с), при которой детекторы успевали корректно прописывать регистрируемые сигналы. Время записи одной пары интерферограмм, соответствующих смещению подвижных зеркал на 30 мм, составляло около 2 мин.

3. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Перед выполнением измерений в ТГц-диапазоне длин волн оптические схемы обоих интерферометров юстировались по коллимированному лучу диодного лазера ($\lambda = 635$ нм). Юстировка должна проводиться с высокой точностью, необходимой для определения показателя преломления ПП n_s , который на непокрытом металле превышает единицу на величину порядка 10^{-4} . К тому же после смены образца необходимо юстировать плазмонный интерферометр заново, что при соблюдении высокой точности занимает много времени. Чтобы уменьшить время, затрачиваемое на юстировку, и учесть небольшую разъюстированность между интерферометрами, мы проводили измерения в два этапа. Сначала одновременно записывались две интерферограммы (на плазмонном интерферометре и интерферометре объемных волн) по схеме, описанной в разд. 2, когда по образцу распространяются ПП. На втором этапе измерений также одновременно записывались две интерферограммы (на плазмонном интерферометре и интерферометре объемных волн), но на этот раз излучение НЛСЭ в плазмонном интерферометре не преобразовывалось в ПП, а направлялось непосредственно на делитель BS_2 для получения интерферограммы, образованной излучением источника в окружающей среде (воздухе).

Контрольная интерферограмма, записываемая на интерферометре объемных волн, содержала информацию о возможных изменениях спектра генерации НЛСЭ. Таким образом, с учетом двух этапов измерений для каждого образца (различавшихся толщиной слоя ZnS) получали две пары интерферограмм. При этом, для набора статистики, для каждого из образцов измерения повторяли по четыре раза.

Отдельно стоит описать процедуру юстировки плазмонного интерферометра с запуском ПП. Поскольку в оптической схеме интерферометра рождается веер паразитных объемных волн большой интенсивности (при преобразовании излучения источника в ПП и на элементах оптической схемы), некоторая их часть может попадать в детектор, причем по регистрируемым интерферограммам далеко не всегда возможно определить наличие в них паразитного сигнала. При требовании высокой точности измерений это приведет к большим ошибкам. Чтобы проверить, действительно ли регистрируемый приемником сигнал вызван попаданием в него ПП, а не паразитных волн, на разных участках трека ПП в одном из плеч интерферометра размещался поглотитель в виде полосок офисной бумаги размером 10×40 мм и толщиной 0.1 мм, при этом другое плечо полностью перекрывалось поролоновым экраном (сигнал из этого плеча не доходил до приемника). Если после наложения бумаги сигнал уменьшался на одну и ту же величину, независимо от плеча и положения поглотителя на треке ПП, это подтверждало плазмонную природу регистрируемого сигнала. Если же ослабление сигнала зависело от места размещения поглотителя, то это свидетельствовало о попадании на приемник “дифракционных спутников” [39], порождаемых при дифракции ПП на поглотителе.

В качестве иллюстрации в табл. 1 представлено ослабление сигналов ПП как отношение исходного сигнала I_0 в плече к сигналу I после наложения поглотителя. Видно, что в обоих плечах ослабление одинаковое в пределах погрешности измерений. С увеличением толщины покрытия d поглощение ПП возрастает вследствие повышения концентрации поля ПП в приповерхностной области образца (см. второй столбец “Глубина проникновения ПП в воздух”). Для образца с $d = 3.0$ мкм наблюдалось полное гашение полезного сигнала до уровня шума, так как почти все поле поверхностной волны взаимодействовало с поглотителем.

Пример зарегистрированных на образце с $d = 1.0$ мкм плазмонных интерферограмм и интерферограмм объемных волн приведен на рис. 2а. По мере смещения подвижных зеркал интерферометров вдоль оси x амплитуды синусоид вначале возрастают, затем достигают максимума и спа-

Таблица 1. Ослабление сигнала ПП (I_0/I) в плечах интерферометра после наложения бумажного поглотителя

Образец	Глубина проникновения, мм, поля ПП в воздух (экспериментальные данные [41])	Ослабление в плече	
		с подвижным зеркалом M_2	с неподвижным зеркалом M_1
Au ($d = 0$)	0.75	2.5 ± 0.4	2.9 ± 0.4
Au + ZnS ($d = 1.0$ мкм)	0.12	50 ± 8	50 ± 8
Au + ZnS ($d = 3.0$ мкм)	0.08	Гашение сигнала до уровня шума	

дают на завершающем участке сканирования. Это типичный симметричный вид автокорреляционной функции для когерентного источника излучения [47]. Огибающая амплитуды имеет гауссов профиль, ширина которого определяет длину (время) когерентности, составившую в данном эксперименте 30 мм (100 пс), что совпадает с максимальной длительностью импульса излучения НЛСЭ при работе в стабильном режиме.

Далее по полученным интерферограммам с помощью фурье-преобразования вычислялись спектры ПП и излучения НЛСЭ (рис. 2б). Светлыми точками на этом рисунке обозначены результаты расчетов компонент фурье-спектра. Заметим, что количество расчетных точек определяется протяженностью интерферограмм, зависящей от длины когерентности излучения НЛСЭ ($l_{\text{ког}} \approx 30$ мм). Далее спектры аппроксимировались функцией Гаусса вида $f(x) = A \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x - x_c}{w}\right)^2\right] + f_0$ и нор-

мировались на величину $(A + f_0)$. Величина w определяет ширину спектра. Значение параметра x_c , определяющего положение центральной линии спектра, соответствует искомой длине волны. Значение x_c полностью совпадает с результатами прямого (но значительно более трудоемкого) метода расчета длины волны по среднему периоду интерферограммы. На графиках рис. 2б обозначены следующие длины волн (центральные линии спектров): $\lambda_{\text{п1}}$ и $\lambda_{\text{оп2}}$, найденные из интерферограмм на рис. 2а, полученных на плазмонном интерферометре с возбуждением ПП и без такового соответственно; λ_{01} и λ_{02} – соответствующие данным интерферограммам длины волн излучения НЛСЭ в воздухе, определенные с помощью интерферометра объемных волн.

Поскольку комплексный показатель преломления \tilde{n}_s ПП определяется как отношение волнового числа ПП (k_s) к волновому числу излучения источника в вакууме ($k_0 = 2\pi/\lambda_0$):

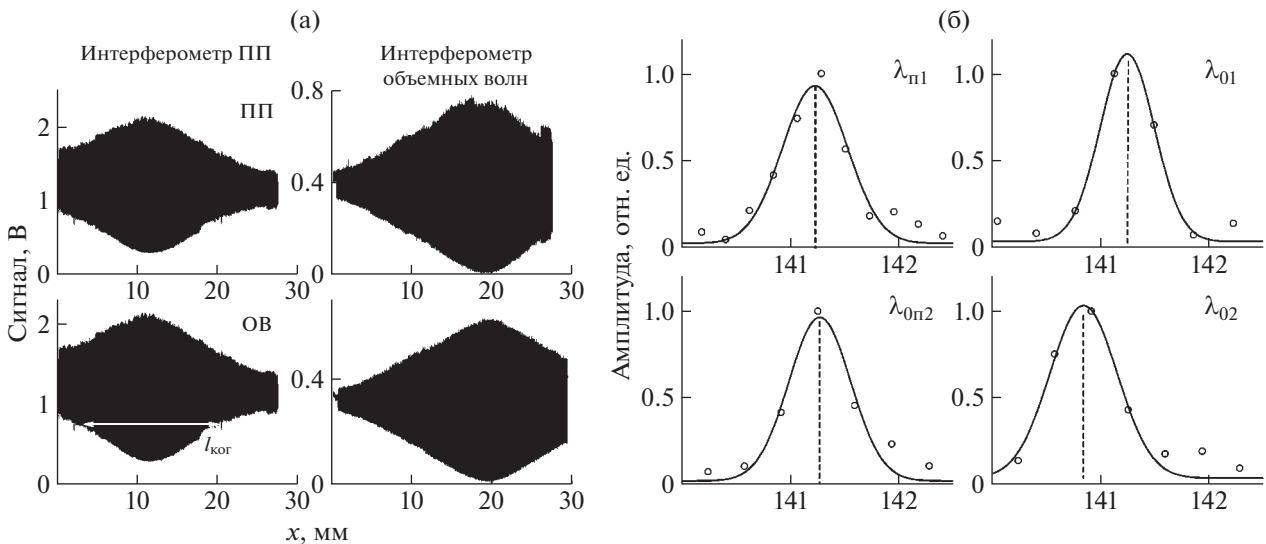


Рис. 2. а – пример интерферограмм, полученных на плазмонном интерферометре (слева) и интерферометре объемных волн (справа) для образца “Au + слой ZnS толщиной 1.0 мкм”: в верхней строке представлены графики с возбуждением ПП, в нижней – без возбуждения ПП; б – фурье-спектры ПП (слева) и генерирующего их излучения НЛСЭ (справа), восстановленные из интерферограмм на рис. 2а, (светлые точки) и аппроксимация спектров функцией Гаусса (сплошная кривая).

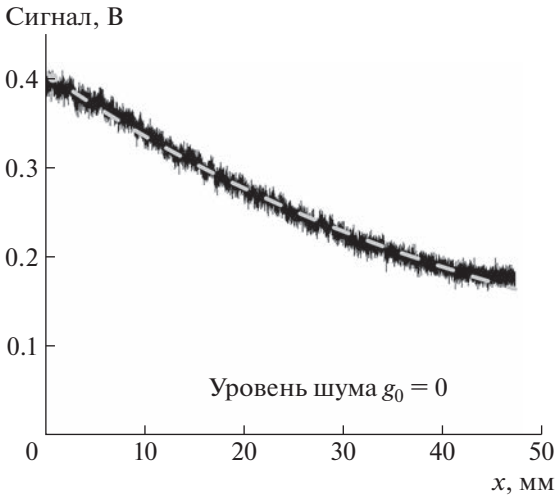


Рис. 3. Затухание интенсивности ПП на образце “Au + слой ZnS толщиной 1.0 мкм” при смещении x зеркала M_2 (см. рис. 1а) в плазмонном интерферометре и закрытом поглотителе неподвижном зеркале M_1 . Серой штриховой линией показан результат экспоненциальной аппроксимации.

$$\tilde{n}_s = \frac{k_s}{k_0} = n_s + i\kappa_s, \quad (1)$$

действительную часть (n_s) можно найти из спектров, представленных на рис. 2б, по следующей формуле:

$$n_s = \left(\frac{\lambda_{n1}/\lambda_{0n2}}{\lambda_{01}/\lambda_{02}} \right) \text{Re}(\tilde{n}_a), \quad (2)$$

где отношение $\lambda_{n1}/\lambda_{0n2}$ определяется выражением (1), а нормировка на $\lambda_{01}/\lambda_{02}$ учитывает смещение спектра излучения НЛСЭ, которое может произойти за время между записями интерферограмм с возбуждением ПП и без него (см. разд. 2). Множитель $\text{Re}(\tilde{n}_a)$ в выражении (2) позволяет учесть тот факт, что лазерное излучение распространяется не в вакууме, а в воздухе с комплексным показателем преломления $\tilde{n}_a = 1.0002726 + i \cdot 0.0000039$ [48, 49]. Для каждого образца по четырем наборам интерферограмм находилось среднее значение n_s .

Чтобы найти значение κ_s , мы измеряли уменьшение интенсивности ПП при смещении подвижного зеркала M_2 (см. рис. 1) в плазмонном интерферометре; при этом неподвижное зеркало M_1 было закрыто поглощающей пластинкой. Характерный вид зависимости, измеренной на образце со слоем ZnS толщиной 1 мкм, показан на рис. 3. Там же изображен результат аппроксимации результатов измерений функцией вида $g(x) = V \exp(-2x/L) + g_0$. В показателе экспоненты учтено, что при смещении зеркала M_2 на x путь ПП увеличивался на $2x$. Уровень шума g_0 изме-

рялся в эксперименте и задавался в качестве параметра аппроксимации (для графика, представленного на рис. 3, уровень шума был практически равен нулю). Для каждого образца находилась средняя длина распространения L_{cp} ПП по результатам нескольких последовательных измерений (в нашем случае было 4 измерения), а величина κ_s вычислялась по формуле [7]

$$\kappa_s = \frac{\lambda_0}{4\pi L_{cp}}. \quad (3)$$

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В табл. 2 представлены значения действительной (без единицы) и мнимой частей показателя преломления ПП, найденные по формулам (2) и (3) для трех образцов. Для сравнения в этой же таблице приведены расчетные значения данных величин, вычисленные решением дисперсионного уравнения ПП для трехслойной структуры “золото–слой ZnS–воздух” [50] при $\lambda_0 = 141$ мкм. Данное дисперсионное уравнение имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & \text{th}(k_0 d \sqrt{\tilde{n}_s^2 - \epsilon_d}) = \\ & = - \frac{\sqrt{\tilde{n}_s^2 - \epsilon_d} \left(\frac{\sqrt{\tilde{n}_s^2 - \epsilon_a}}{\epsilon_a} + \frac{\sqrt{\tilde{n}_s^2 - \epsilon_m}}{\epsilon_m} \right)}{\epsilon_d \left(\frac{\sqrt{\tilde{n}_s^2 - \epsilon_a} \sqrt{\tilde{n}_s^2 - \epsilon_m} + \tilde{n}_s^2 - \epsilon_d}{\epsilon_a \epsilon_m} \right)}, \end{aligned} \quad (4)$$

где d – толщина диэлектрического покрытия; ϵ_m и $\epsilon_a = \tilde{n}_a^2$ – диэлектрические проницаемости металла и окружающей среды, соответственно. В этих расчетах показатель преломления ZnS принимался равным $n_d = 2.943 + i \cdot 0.01$ [21], а диэлектрическая проницаемость золота ϵ_m вычислялась по модели Друде при использовании справочных значений плазменной частоты ($\omega_p = 1.37 \cdot 10^{16} \text{ c}^{-1}$) и частоты столкновений электронов проводимости ($\omega_\tau = 4.05 \cdot 10^{13} \text{ c}^{-1}$) [51]:

$$\epsilon_m(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \omega_\tau^2} + i \frac{\omega_\tau \omega_p^2}{\omega(\omega^2 + \omega_\tau^2)}, \quad (5)$$

где $\omega = 2\pi c/\lambda_0 = 1.34 \cdot 10^{13} \text{ c}^{-1}$ (c – скорость света в вакууме).

Согласно табл. 2, величина κ_s , характеризующая потери ПП при распространении по образцу, в эксперименте заметно больше (особенно при $d = 0$), чем ее расчетное значение. Это можно объяснить тем, что, помимо джоулевых потерь в металле, ПП испытывают радиационные потери на шероховатостях и оптических неоднородностях поверхности [41]. Согласно работе [41], нанесение слоя диэлектрика на поверхность проводника

Таблица 2. Показатели преломления ПП (действительная часть без единицы ($n_s - 1$) и мнимая часть κ_s), рассчитанные при подстановке результатов эксперимента в формулы (2) и (3), а также их расчетные значения

Образец	$n_s - 1, 10^{-4}$		$\kappa_s, 10^{-4}$	
	Эксперимент	Расчет по модели Друде	Эксперимент	Расчет по модели Друде
Au ($d = 0$)	4.9 ± 4	2.7	1.5 ± 0.1	0.014
Au + ZnS ($d = 1.0$ мкм)	14 ± 2	10.5	1.1 ± 0.1	0.4
Au + ZnS ($d = 3.0$ мкм)	98 ± 10 (112 ± 16 [27])	81	3.7 ± 0.1 (6.6 ± 0.7 [27])	1.3

Таблица 3. Значения действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости ϵ_m напыленного золота, найденные по экспериментальным значениям ($n_s - 1$) и κ_s из табл. 2. Здесь также представлены расчетные значения ϵ_m , вычисленные по модели Друде (см. формулу (5)) при $\lambda_0 = 141$ мкм

Образец	Re(ϵ_m)		Im(ϵ_m)	
	Эксперимент	Расчет по модели Друде	Эксперимент	Расчет по модели Друде
Au ($d = 0$)	-800 ± 800	-105000	1700 ± 1500	317000
Au + ZnS ($d = 1.0$ мкм)	-5600 ± 3600		2600 ± 1400	
Au + ZnS ($d = 3.0$ мкм)	-7000 ± 5000		1000 ± 800	

должно приводить к уменьшению радиационных потерь ПП вследствие увеличения отличия показателя преломления n_s ПП от показателя преломления излучения источника в воздухе; причем при достаточно больших толщинах слоя ZnS ($d = 1.0$ мкм и $d = 3.0$ мкм) радиационные потери становятся значительно меньше джоулевых, что должно приводить к совпадению расчетных и экспериментальных значений κ_s . Однако, согласно табл. 2, при $d = 1.0$ мкм и $d = 3.0$ мкм измеренные потери ПП превышают расчетные примерно в три раза. Также можно заметить, что в эксперименте величина ($n_s - 1$) систематически больше ее расчетных значений для соответствующих толщин ZnS. По нашему мнению, такие расхождения эксперимента и теории свидетельствуют о том, что эффективная диэлектрическая проницаемость поверхности металла отличается от рассчитанных по модели Друде ее значений в кристаллическом металле, что, скорее всего, связано с зернистой структурой поверхности слоя напыленного металла и наличием у нее шероховатости.

Для образца с $d = 3.0$ мкм результат для ($n_s - 1$) в пределах погрешности совпадает с данными работы [27], что говорит о достоверности измерений; расчетное же значение κ_s в два раза меньше измеренного, вследствие того что в работе [27] не учитывались радиационные потери ПП.

По экспериментальным значениям ($n_s - 1$) и κ_s для образца с данной толщиной слоя ZnS можно определить эффективную диэлектрическую проницаемость поверхности металла, решив дисперсионное уравнение (4) численным методом. В табл. 3 приведены решения для действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости ϵ_m золотого напыления, найденные по данным табл. 2. Погрешности для ϵ_m соответствуют разбросу решений уравнения (4) с учетом точности определения ($n_s - 1$) и κ_s . В табл. 3 приведены также значения проницаемости золота, вычисленные по модели Друде (см. формулу (5)) с использованием справочных данных кристаллического золота при $\lambda_0 = 141$ мкм. Как видно из таблицы, экспериментальные значения ϵ_m более чем на порядок меньше расчетных. Самое большое отличие (более двух порядков) наблюдается для непокрытого золота ($d = 0$), что связано с тем, что в аналитической модели (уравнение (4)) не учитываются радиационные потери ПП, которые весьма значительны для ПП на проводящей поверхности без покровного слоя диэлектрика. Более или менее близкие друг к другу значения ϵ_m наблюдаются при наличии на металле слоя ZnS с толщиной 1.0 и 3.0 мкм, когда радиационные потери ПП малы. Анализ экспериментальных данных для образцов с разной толщиной покрытия ZnS показал, что для корректного измерения оптических констант поверхности металла необходимо

использовать диэлектрические покрытия достаточной толщины.

5. АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ И СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Стоит обратить внимание на очень большие погрешности экспериментальных значений ϵ_m в табл. 3 (от 54% до 100%). Это обусловлено недостаточной точностью измерения ($n_s - 1$) и κ_s (см. табл. 2), которая в среднем не превышала 10%. Как показал анализ уравнения (4), наибольшие требования к точности относятся к n_s . Чтобы достичь точности определения ϵ_m 20%, необходимо определять n_s с точностью не хуже 10^{-4} (при имеющейся погрешности в 10% для κ_s , которая зависит от отношения сигнал/шум, юстировки и стабильности интенсивности излучения НЛСЭ). Такая точность для n_s может быть достигнута при стабильности источника излучения по длине волны во время записи интерферограммы не хуже 0.01 мкм (для $\lambda_0 = 141$ мкм), при этом ширина линии генерации должна быть на порядок меньше, чем 1.0–1.5 мкм, при работе в обычном режиме. Этого можно достигнуть уменьшением времени измерений и использованием более быстрых и чувствительных детекторов. Например, вместо ячейки Голея можно использовать пирозлектрический детектор (см. рис. 1), что позволит на порядок уменьшить время измерения интерферограммы (до 10 с на одно сканирование). Чтобы повысить чувствительность пиродетектора, можно вместо входного окна из германия (на котором вследствие френелевских потерь теряется более половины падающей мощности) использовать линзу из прозрачного диэлектрика, которая уменьшит потери на отражение и соберет весь пучок объемных волн, порожденных срывающимися с выходного элемента преобразования ПП, на чувствительном элементе приемника. Другой, дополнительный, способ, представляющий интерес и для приложений, – использование более стабильных и компактных, чем ЛСЭ, источников когерентного ТГц-излучения, таких как газовые лазеры [52], лампы обратной волны [53], гиротроны [54] или квантово-каскадные лазеры [55].

Заметим, что существует возможность повышения устойчивости НЛСЭ к временным вариациям длины волны излучения – работа в режиме отрицательной отстройки частоты повторения сгустков свободных электронов от частоты обращения световых импульсов внутри оптического резонатора ЛСЭ, сопровождающаяся понижением средней мощности излучения [56]. При работе ЛСЭ в таком режиме устанавливается стабильный одномодовый режим генерации, ширина линии ко-

торого достигает предельно возможного узкого значения (0.25%) [47], при этом смещение длины волны за 15 мин составляет не более 0.1 от ширины спектра генерируемого излучения (0.04 мкм при $\lambda_0 = 141$ мкм), что близко к желаемой точности. Однако для достижения такого режима генерации необходима длительная и трудоемкая настройка параметров НЛСЭ.

Очень важным параметром, влияющим на точность измерения как n_s , так и κ_s , является соотношение “полезный сигнал/шум”, величина которого пропорциональна полезному сигналу от ПП, доходящих до детектора. В табл. 4 представлены оценки потерь ПП в интерферометре для образцов, использованных в описанных выше экспериментах. Эти потери складываются из потерь при генерации ПП на входе в интерферометр, при распространении по поверхности образца и поверхности цилиндрического элемента преобразования (см. рис. 1а). Здесь не учтены потери при дифракции на делителе, зеркалах и при переходе ПП с образца на элемент преобразования. По величине полных потерь ПП можно судить о динамическом диапазоне комплекса “источник–детектор”, который позволит проводить измерения на плазмонном интерферометре. Он должен составлять не менее 10^4 для образца с минимальными потерями ($d = 1.0$ мкм) и не менее 10^8 для образца с максимальными потерями ПП ($d = 3.0$ мкм). Если на вход интерферометра падает ТГц-излучение со средней мощностью 10 Вт, то порог чувствительности детектора должен быть не хуже 200 нВт, что ненамного превышает порог чувствительности ячейки Голея, используемой совместно с синхронным усилителем (порядка 10 нВт). Поэтому при работе на менее мощных (чем НЛСЭ) источниках ТГц-излучения для регистрации полезного сигнала в интерферометре необходимо использовать более чувствительные детекторы.

Понизить требования к динамическому диапазону (и чувствительности детектора) можно, уменьшая потери ПП в интерферометре. Этого можно достичь двумя способами: 1) уменьшая размер интерферометра до минимальных значений, определяемых размером поперечного сечения пучка плазмонов (в нашем случае он составлял 12 мм); 2) путем использования цилиндрического элемента преобразования с минимальными потерями ПП на его поверхности, которые достигаются при определенном радиусе ее кривизны: увеличение этого радиуса ведет, с одной стороны, к уменьшению радиационных потерь, а с другой – к возрастанию джоулевых потерь вследствие увеличения длины трека ПП на выпуклой поверхности.

Таблица 4. Оценки энергетических потерь в плазмонном интерферометре

Образец	Эффективность генерации ПП	κ_s			Полные потери	Мощность сигнала при $I_0 = 10$ Вт
		на плоской поверхности образца	на делителе ПП	на цилиндрическом элементе преобразования [38]		
Au ($d = 0$)	<0.001	0.14	0.5	0.01	< 10^{-6}	< 10 мкВт
Au+ZnS ($d = 1.0$ мкм)	0.3	0.2			< $2 \cdot 10^{-4}$	< 2 мВт
Au+ZnS ($d = 3.0$ мкм)	<0.001	0.005			< $2 \cdot 10^{-8}$	< 200 нВт

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены оптическая схема и технические характеристики макета терагерцевого планарного интерферометра Майкельсона на ПП. Детально описана методика определения комплексного показателя преломления ПП ($\tilde{n}_s = n_s + i\kappa_s$) по регистрируемым интерферограммам. Интерферометр протестирован на плоских поверхностях с золотым напылением, покрытых слоями ZnS толщиной от 0 до 3.0 мкм, с использованием мощного когерентного излучения НЛСЭ на длине волны $\lambda_0 = 141$ мкм. По найденным значениям \tilde{n}_s была вычислена эффективная диэлектрическая проницаемость ϵ_m поверхности напыленного золота, которая оказалась на порядок меньше, чем у кристаллического золота. Большая погрешность найденных значений ϵ_m связана, в основном, с недостаточной временной стабильностью спектра излучения НЛСЭ. Для практических применений плазмонного интерферометра необходимо использовать более стабильные и компактные источники ТГц-излучения.

Путем анализа энергетических потерь ПП в плазмонном интерферометре дана оценка его динамического диапазона по мощности излучения ($10^6 - 10^8$), требуемого для измерений на образцах с разными \tilde{n}_s , а также предложены способы повышения отношения сигнал/шум путем оптимизации оптических элементов интерферометра и используемого в нем детектора ТГц-излучения.

БЛАГОДАРНОСТЬ

В работе использовалось оборудование ЦКП СЦСТИ на базе УНУ “Новосибирский ЛСЭ” в ИЯФ СО РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

У авторов нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Братман В.Л., Литвак А.Г., Суворов Е.В. // УФН. 2011. Т. 181. № 8. С. 867. <https://doi.org/10.3367/UFNe.0181.201108f.0867>
2. Ghann W., Uddin J. Terahertz Spectroscopy: A Cutting-Edge Technology / Ed. by J. Uddin. London: IntechOpen, 2017.
3. O'Hara J.F., Withayachumnankul W., Al-Naib I. // J. Infrared Millim. and Terahertz Waves. 2012. V. 33. № 3. P. 245. <https://doi.org/10.1007/s10762-012-9878-x>
4. Hofmann T., Herzinger C.M., Boosalis A., Tiwald T.E., Woollam J.A., Schube M. // Rev. Sci. Instrum. 2010. V. 81. 023101. <https://doi.org/10.1063/1.3297902>
5. Азаров И.А., Швец В.А., Прокопьев В.Ю., Дулин С.А., Рыхлицкий С.В., Чопорова Ю.Ю., Князев Б.А., Кручинин В.Н., Кручинина М.В. // ПТЭ. 2015. № 3. С. 71. <https://doi.org/10.7868/S0032816215030039>
6. Naftaly M., Dudley R. // Appl. Opt. 2011. V. 50. № 9. P. 3201. <https://doi.org/10.1364/AO.50.003201>
7. Поверхностные поляритоны. Электромагнитные волны на поверхностях и границах раздела сред / Под ред. В.М. Аграновича и Д.Л. Миллса. М.: Наука, 1985.
8. Майер С.А. Плазмоника: теория и приложения. М., Ижевск: R&C Dynamics, 2011.
9. Никитин А.К., Тищенко А.А. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17(11). С. 76.
10. Huang Y.H., Ho H.P., Wu S.Y., Kong S.K. // Advances in Optical Technologies. 2012. V. 2012. P. 471957. <https://doi.org/10.1155/2012/908976>
11. Silin V.I., Voronov S.A., Yakovlev V.A., Zhizhin G.N. // Intern. J. Infrared and Millim. Waves. 1989. V. 10. № 1. P. 101. <https://doi.org/10.1007/BF01009121>
12. Wang K., Mittleman D.M. // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 96. P 157401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.157401>
13. Gao Y., Xin Z., Gan Q., Cheng X., Bartoli F.J. // Opt. Express. 2013. V. 21. № 5. P. 5859. <https://doi.org/10.1364/OE.21.005859>

14. *Melentiev P.N., Kuzin A.A., Gritchenko A.S., Kalmykov A.S., Balykin V.I.* // Optics Comm. 2017. V. 382. P. 509. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2016.07.061>
15. *Gan Q.Q., Gao Y., Bartoli F.J.* // Optics Express. 2009. V. 17. № 23. P. 20747. <https://doi.org/10.1364/OE.17.020747>
16. *Ming Y., Wu Z., Wu H., Xu F., Lu Y.* // IEEE Photonics Journal. 2012. V. 4 (1). P. 491. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2012.2186562>
17. *Schlesinger Z., Sievers A.J.* // Applied Phys. Letters. 1980. V. 36. № 6. P. 409. <https://doi.org/10.1063/1.91519>
18. *Hanssen L.M., Riffe D.M., Sievers A.J.* // Optics Letters. 1986. V. 11. № 12. P. 782. <https://doi.org/10.1364/OL.11.000782>
19. *Петров Ю.Е., Алиева Е.В., Жижин Г.Н., Яковлев В.А.* // ЖТФ. 1998. Т. 68. № 3. С. 64.
20. *Ma Y., Nguyen-Huu N., Zhou J., Maeda H., Wu Q., Eldlio M., Pistora J., Cada M.* // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2017. V. 23. № 4. P. 4601607 <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2017.2660882>
21. Handbook of optical constants of solids. V. 1 / Ed by *E.D. Palik*. Academic Press, 2016.
22. *Pandey S., Gupta B., Chanana A., Nahata A.* // Advances in Physics. 2016. V. 1. № 2. P. 176. <https://doi.org/10.1080/23746149.2016.1165079>
23. *Жижин Г.Н., Никитин А.К., Балашов А.А., Рыжова Т.А.* Патент РФ на изобретение № 2318192 // Оpubл. 27.02.2008. Бюл. № 6.
24. *Богомолов Г.Д., Жижин Г.Н., Кирьянов А.П., Никитин А.К.* // Известия РАН. Сер. физ. 2009. Т. 73. № 4. С. 562.
25. *Никитин А.К., Князев Б.А., Герасимов В.В., Хасанов И.Ш.* Патент РФ на изобретение № 2653590 // Оpubл. 11.05.2018. Бюл. № 14.
26. *Жижин Г.Н., Кирьянов А.П., Никитин А.К.* // Оптика и спектроскопия. 2012. Т. 112. № 4. С. 597.
27. *Gerasimov V.V., Knyazev B.A., Nikitin A.K., Nikitin V.V., Rijova T.A.* // Discrete and Continuous Models and Applied Computational Science. 2013. № 2. P. 191. <https://journals.rudn.ru/miph/article/view/8543>
28. *Герасимов В.В., Князев Б.А., Никитин А.К.* // Квантовая электроника. 2017. Т. 47. № 1. С. 65. <https://doi.org/10.1070/QEL16178>
29. *Gerasimov V.V., Nikitin A.K., Lemzyakov A.G., Azarov I.A., Milekhin I.A., Knyazev B.A., Bezus E.A., Kadomina E.A., Doskolovich L.L.* // JOSA (B). 2020. V. 37. Is. 5. P. 1461. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.386331>
30. *Никитин А.К., Хитров О.В.* Патент РФ на изобретение № 2709600 // Оpubл. 18.12.2019. Бюл. № 35.
31. *Gerasimov V.V., Nikitin A.K., Khitrov O.V., Lemzyakov A.G.* // 46-th Intern. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz). Chengdu, China (August 29–September 3) 2021. P. 1. <https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz50926.2021.9567134>
32. *Shevchenko O.A., Vinokurov N.A., Arbuзов V.S., Chernov K.N., Davidyuk I.V., Deichuly O.I., Dementyev E.N., Dovzhenko B.A., Getmanov Ya.V., Gorbachev Ya.I., Knyazev B.A., Kolobanov E.I., Kondakov A.A., Kozak V.R., Kozurev E.V. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. P. 228. <https://doi.org/10.3103/S1062873819020278>
33. *Stegeman G.I., Wallis R.F., Maradudin A.A.* // Optics Letters. 1983. V. 8. № 7. P. 386. <https://doi.org/10.1364/OL.8.000386>
34. *Kotelnikov I.A., Gerasimov V.V., Knyazev B.A.* // Phys. Rev. (A). 2013. V. 87. Art. ID 023828. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.87.023828>
35. *Islam M.S., Nine J., Sultana J., Cruz A.L.S., Dinovitser A., Ng B.W., Ebendorff-Heidepriem H., Losic D., Abbott D.* // IEEE Access. 2020. V. 8. P. 97204. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2996278>
36. *Nazarov M., Garet F., Armand D., Shkurinov A., Coutaz J.-L.* // C. R. Physique. 2008. V. 9. P. 232. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2008.01.004>
37. *Князев Б.А., Никитин А.К.* Патент РФ № 2547164 // Оpubл. 10.04.2015. Бюл. № 10.
38. *Knyazev B.A., Gerasimov V.V., Nikitin A.K., Azarov I.A., Choporova Yu.Yu.* // J. Opt. Soc. Am. (B). 2019. V. 36. P. 1684. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.36.001684>
39. *Герасимов В.В., Князев Б.А., Никитин А.К.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 21. С. 93.
40. *Zayats A.V., Smolyaninov I.I., Maradudin A.A.* // Physics Reports. 2005. V. 408. P. 131. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2004.11.001>
41. *Gerasimov V.V., Knyazev B.A., Lemzyakov A.G., Nikitin A.K., Zhizhin G.N.* // J. Opt. Soc. Am. (B). 2016. V. 33. P. 2196. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.33.002196>
42. *Минин И.В., Минин О.В.* // Вестник СГУГИТ. 2022. Т. 26. № 4. С. 160. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2021-26-4-160-175>
43. http://www.tydexoptics.com/ru/products/thz_devices/golay_cell/
44. <http://www.nzpp.ru/product/gotovye-izdeli/fotopriemnye-ustroystva/>
45. *Паулиш А.Г., Дорожкин К.В., Суляев, Гусаченко А.В., Морозов А.О., Пыргаева С.М.* // Сб. трудов конференции “Актуальные проблемы радиофизики АПР 2019”. Томск, 2019. С. 482. <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000709334>
46. *Зубов В.А.* Методы измерения характеристик лазерного излучения. М.: Наука, 1973.
47. *Kubarev V.V., Kulipanov G.N., Kolobanov E.I., Matveenko A.N., Medvedev L.E., Ovchar V.K., Salikova T.V., Scheglov M.A., Serebnyakov S.S., Vinokurov N.A.* // Nucl. Instrum. and Methods. 2009. V. A603. P. 25. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.12.122>
48. Handbook: Physical Data / Ed. by I.S. Grigoryev and E.Z. Meilikhov. М.: Energoatomizdat, 1991.
49. *Mathar R.J.* // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2007. V. 9. P. 470. <https://doi.org/10.1088/1464-4258/9/5/008>
50. *Burke J.J., Stegeman G.I., Tamir T.* // Phys. Rev. (B). 1986. V. 33. № 8. P. 5186. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.33.5186>

51. *Ordal M.A., Long L.L., Bell R.J., Bell S.E., Bell R.R., Alexander R.W., Ward C.A.* // *Appl. Opt.* 1983. V. 22. P. 1099.
<https://doi.org/10.1364/AO.22.001099>
52. *Jiu Zhi-Xian, Zuo Du-Luo, Miao Liang, Qi Chun-Chao, Cheng Zu-Hai* // *Chinese Phys. Lett.* 2010. V. 27. P. 024211.
<https://doi.org/10.1088/0256-307X/27/2/024211>
53. *Kozlov G., Volkov A.* // In: *Grüner G. Millimeter and Submillimeter Wave Spectroscopy of Solids. Topics in Applied Physics*, V. 74. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007.
<https://doi.org/10.1007/BFb0103420>
54. *Idehara T., Sabchevski S.P., Glyavin M., Mitsudo S.* // *Appl. Sci.* 2020. V. 10. P. 980.
<https://doi.org/10.3390/app10030980>
55. *Wen B., Ban D.* // *Progress in Quantum Electronics.* 2021. V. 80. Art. ID 100363.
<https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2021.100363>
56. *Кубарев В.В.* Дисс. ... докт. физ.-мат. наук. Новосибирск: ИЯФ им. Г.И. Будкера. 2016.

ПРЕЦИЗИОННЫЙ ДАТЧИК ПОЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ ЛАЗЕРНОГО СИНТЕЗА МИКРОСТРУКТУР НА ТРЕХМЕРНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

© 2023 г. М. А. Завьялова^{а,*}, А. В. Солдатенко^а, С. А. Кокарев^а

^аКонструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН
Россия, 630058, Новосибирск, ул. Русская, 41

*e-mail: zavyalovama@gmail.ru

Поступила в редакцию 22.07.2022 г.

После доработки 13.10.2022 г.

Принята к публикации 19.10.2022 г.

Представлены результаты компьютерного моделирования прецизионного датчика положения на основе ножа Фуко для автоматической фокусировки излучения в ходе высокоскоростных лазерных технологических процессов, приведены результаты его внедрения и испытания на промышленных предприятиях в составе круговых лазерных записывающих систем. Данный датчик встраивается в лазерные комплексы для микроstructuring поверхности оптических материалов и позволяет определять их положение с высоким разрешением (погрешность не превышает 0.1 мкм).

DOI: 10.31857/S003281622302012X, EDN: UXQXIW

ВВЕДЕНИЕ

Прецизионная микро- и нанообработка оптических материалов позволяет создавать принципиально новые и усовершенствовать существующие элементы фотоники и оптоэлектроники [1–3]. Точное позиционирование лазерного луча при использовании фокусирующей оптики с большой апертурой дает возможность контролировать формируемую топологию рельефа (ширину и глубину зон). Для этого в оптические каналы лазерных технологических комплексов внедряют бесконтактные оптические датчики контроля положения поверхности обрабатываемых материалов. В работе [4] проведен обзор таких датчиков и сделан вывод, что при использовании фокусирующих объективов с малым рабочим отрезком (менее 1 мм) требуется встраивание датчика в оптический тракт технологического лазера. Поэтому коммерчески доступные датчики, имеющие свою оптическую систему “закрытого” типа, не могут быть использованы в лазерных установках, в которых излучение фокусируется до размеров, сравнимых с их длиной волны. К бесконтактным датчикам контроля положения поверхностей предъявляются следующие требования: высокое быстродействие (до 1 МГц), разрешение (погрешность не должна превышать 0.1 мкм), возможность контроля положения сферических (выпуклых или вогнутых) поверхностей, приемлемые массогабаритные характеристики, а также совместимость оптических схем датчиков с опти-

ческими схемами лазерных рабочих каналов. Таким образом, задача разработки методов автоматического контроля положения плоских и криволинейных поверхностей с высоким разрешением (менее 1 мкм) в ходе лазерных технологических процессов представляется актуальной.

В настоящее время используется достаточно много различных схем оптических бесконтактных датчиков контроля положения поверхностей [5–7]. Как правило, тот или иной вариант выбирается под конкретную лазерную технологическую установку с учетом материалов, на поверхности которых будет осуществляться лазерная запись, погрешности позиционирования, рабочего диапазона и скорости записи.

В данной работе представлены программное моделирование, оптимизация оптической схемы, результаты исследования и внедрения датчика автоматической фокусировки (ДАФ) на основе ножа Фуко, который используется в круговых лазерных записывающих системах (КЛЗС) для синтеза микроструктур на плоских и криволинейных поверхностях оптических материалов.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКИ НА ОСНОВЕ НОЖА ФУКО ДЛЯ КРУГОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ЗАПИСЫВАЮЩИХ СИСТЕМ

В течение многих лет на ведущих отечественных и зарубежных научных и промышленных

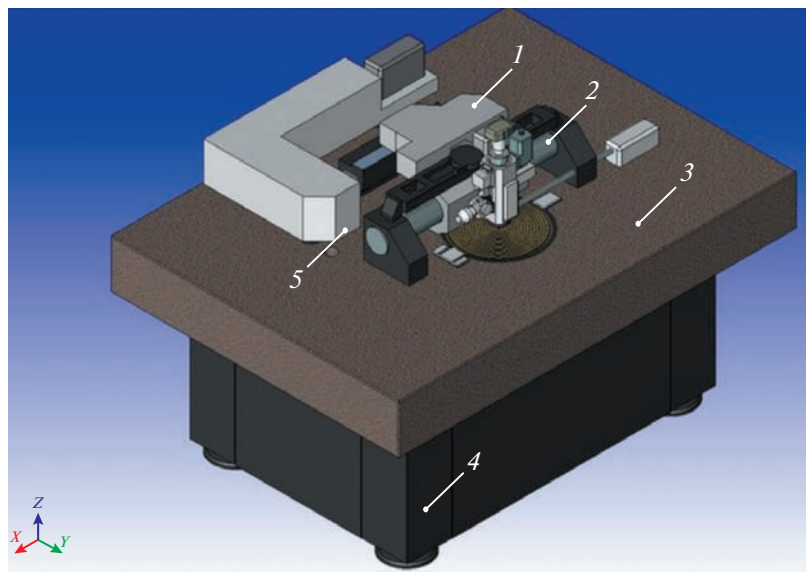


Рис. 1. Модель круговых лазерных записывающих систем нового поколения. 1 – мобильный оптический канал с технологическим лазером № 1 (длина волны 405 нм); 2 – каретка радиального перемещения; 3 – гранитное основание; 4 – система виброзащиты; 5 – технологический лазер № 2 (длина волны 532 нм).

предприятиях успешно функционируют КЛЗС, разработанные в Конструкторско-технологическом институте научного приборостроения и Институте автоматизации и электрометрии СО РАН (г. Новосибирск, Россия) [8]. Важным элементом КЛЗС, определяющим ее характеристики, является ДАФ на основе ножа Фуко. С использованием такого датчика на КЛЗС синтезируются прецизионные оптические элементы на плоских и криволинейных поверхностях.

Рассмотрим структурную схему КЛЗС. Как правило, такие системы имеют в своем составе технологический лазер (один или несколько) и полностью мобильный оптический канал 1 (рис. 1), который целиком размещается на каретке радиального перемещения 2. Гранитное основание 3 с системой виброзащиты 4 предназначено для размещения оптомеханического блока и снижения влияния вибраций на точностные характеристики его составных частей. В состав КЛЗС нового поколения также может входить второй технологический лазер 5 для реализации одновременно нескольких технологий микроструктурирования поверхности оптических прозрачных сред.

Принцип действия КЛЗС основан на формировании сфокусированным лазерным лучом изображения на вращаемой стеклянной подложке, на которую нанесен либо фоторезист, либо кремний, либо хром, в режиме кругового растрового сканирования. Подложка размещена на высокопрецизионном шпинделе, управляемом шпиндельным приводом. С помощью микроскопа записи, в состав которого входят датчик авто-

матической фокусировки и видеоузел, с высокой точностью поддерживается фиксированное расстояние между микрообъективом и поверхностью подложки в вертикальном направлении Z . Радиальное смещение R лазерного луча обеспечивается высокоточной кареткой на аэростатическом подшипнике, на которой размещены лазер, акустооптический модулятор и головка микроскопа записи. Смещение R измеряется лазерным интерферометром (модель RLE-10-SX-CX, RENISHAW). Высокая точность синтеза элементов топологии достигается благодаря применению прецизионных систем управления.

В КЛЗС [8] для синтеза микрорельефа дифракционных оптических элементов на криволинейных поверхностях используется ДАФ, который обеспечивает автоматический поиск поверхности записи, ее захват и последующее удержание в зоне наилучшей фокусировки микрообъектива. Основной функцией ДАФ является совмещение без участия оценочных действий оператора плоскости наилучшей фокусировки лазерного пучка с поверхностью обрабатываемой детали. ДАФ используется в оптическом канале лазерной технологической установки с короткофокусным объективом и состоит из чувствительного элемента – датчика расстояния – и привода, смещающего объектив. Также в его состав входит пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор – устройство с обратной связью, которое формирует управляющий сигнал, являющийся суммой трех слагаемых: первое из них пропорционально разности входного сигнала и сигнала

обратной связи (сигнал рассогласования), второе слагаемое является интегралом сигнала рассогласования, третье – производная сигнала рассогласования. ДАФ обеспечивает высокоскоростное зондирование поверхности и за счет обратной связи позволяет обеспечивать постоянный зазор между объективом и поверхностью.

Рабочий микрообъектив для КЛЗС имеет большую числовую апертуру ($NA = 0.65$). При этом глубина фокуса для длины волны $\lambda = 532$ нм составляет ± 0.5 мкм. Поэтому во время записи скрытых изображений в пленках светочувствительных материалов их поверхность должна оставаться в пределах глубины фокуса, чтобы формировались линии одинаковой ширины с одинаковым уровнем засветки рабочим излучением. В составе КЛЗС рабочий микрообъектив закреплен на электромагнитном приводе, который путем перемещения микрообъектива вверх/вниз обеспечивает постоянное расстояние до поверхности в пределах приемлемого диапазона. Поскольку шпиндель, на котором закреплена заготовка, вращается со скоростью порядка 10 оборотов/с, привод обрабатывает смещения поверхности в режиме реального времени. Его частотная характеристика составляет несколько кГц.

На привод поступает управляющий сигнал, пропорциональный коэффициенту отражения от поверхности заготовки зондирующего лазерного излучения. В основу принципиальной схемы ДАФ положена оптическая схема, описанная в работе [9]. Схема содержит полупроводниковый лазер (модель FCM-0640-PM-025-R-M-1-A-5, фирма Fiblaser Technology Co., Китай) с волоконным коллимированным выводом излучения ($\lambda = 640$ нм), светоделительное зеркало, рабочий микрообъектив с числовой апертурой 0.65, нож Фуко (стальная пластина с заостренным краем), линзу ($f = 40$ мм), фокусирующую отраженное от поверхности заготовки излучение на двухэлементный фотоприемник ФД19-КК. В качестве меры измерения расстояния до объекта используется неравномерность распределения интенсивности отраженного света на элементах фотоприемника. Когда поверхность находится в фокусе, отраженный пучок коллимируется и линза (рис. 2) фокусирует световой пучок в центр двоечного фотодиода, который дает разностный сигнал

$$I_{\text{раз}} = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad (I_1 \text{ и } I_2 - \text{сила тока соответственно с}$$

элементов фотоприемника K_1 и K_2), равный нулю. Если поверхность сместилась от микрообъектива, то отраженный пучок будет сходящимся (рис. 2а), освещая только фотодиод K_1 . В этом случае значение $I_{\text{раз}}$ будет положительным, и привод подвинет микрообъектив к поверхности. В слу-

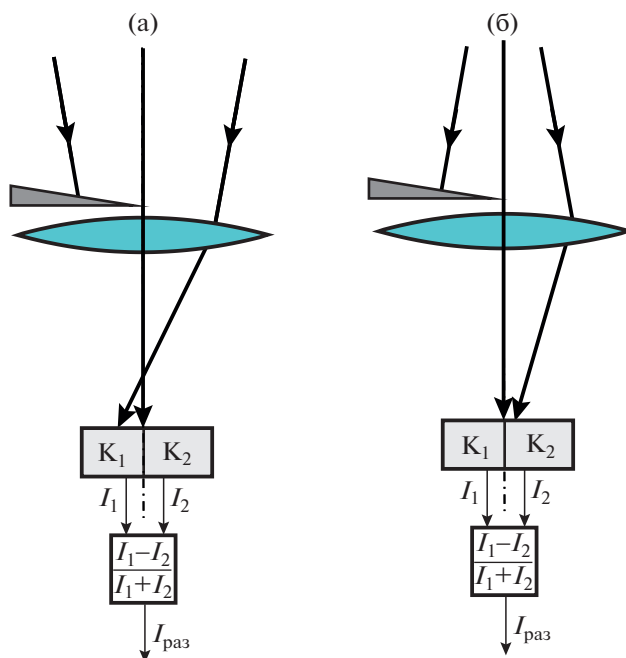


Рис. 2. Ход лучей при смещении рабочей заготовки относительно микрообъектива: а – смещение от микрообъектива (сходящийся пучок); б – смещение к микрообъективу (расходящийся пучок). I_1 и I_2 – сила тока соответственно с элементов фотоприемника K_1 и K_2 .

чае, если поверхность сместилась к объективу, отраженный пучок отклоняется таким образом, что будет засвечен фотодиод K_2 (рис. 2б). Это приводит к отрицательному значению $I_{\text{раз}}$. В этом случае привод сместит микрообъектив таким образом, чтобы значение $I_{\text{раз}}$ равнялось нулю.

В ходе эксплуатации ранних версий КЛЗС, использующих ДАФ подобного типа, была обнаружена их дестабилизация при записи информации на криволинейных поверхностях, а именно: на разных радиусах сферической поверхности сигнал с ДАФ ошибочно определял смещение поверхности и требовалась его предварительная калибровка. Кроме того, при автоматическом поиске и захвате поверхности заготовки фокальная плоскость определялась ошибочно и происходило столкновение микрообъектива с заготовкой. Поэтому была проведена оптимизация ДАФ с целью обеспечения его бесперебойной работы как в процессе автоматического поиска фокальной плоскости, так и во время записи без предварительной калибровки. Для этого была создана модель данного датчика в программном пакете для расчета оптических систем Zemax, построен график аналитической зависимости сигнала с датчика от смещения поверхности (плоской или сферической).

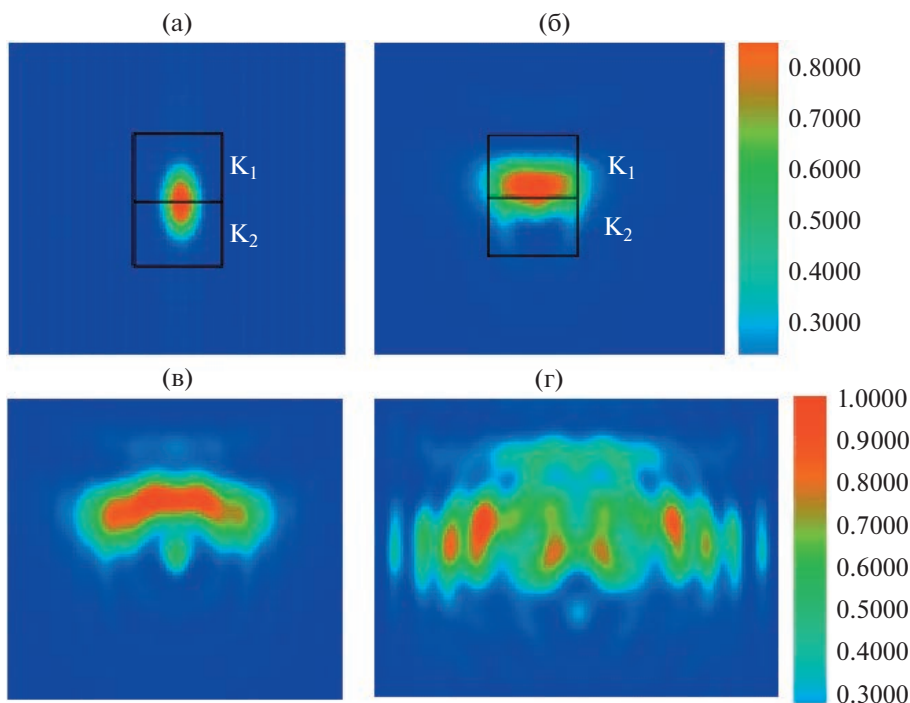


Рис. 3. Дифракционные изображения пятен в плоскости двухэлементного (K_1, K_2) фотоприемника при совпадении плоскости обрабатываемой детали с фокальной плоскостью микрообъектива (а) и при смещении поверхности на 5 (б), 10 (в), 15 мкм (г).

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА ДАТЧИКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКИ НА ОСНОВЕ НОЖА ФУКО

Модель двухэлементного фотоприемника была реализована путем специальной программной расшифровки изображений пятен с помощью инструмента Diffraction Image Analysis на основе функции Optical Transfer Function (OTF). OTF учитывает дифракционные эффекты, влияющие на формирование изображения.

В результате моделирования смещения поверхности в схеме ДАФ была получена серия дифракционных изображений пятен (рис. 3), программная обработка которых позволила построить зависимость разностного сигнала $I_{раз}$ от смещения поверхности (плоской или криволинейной) (рис. 4). Для этого полученное изображение экспортировалось в программный пакет Excel: отдельно вычислялось среднее значение яркости пикселей в верхней части изображений пятен и отдельно – в нижней. Тем самым моделировалась работа двухэлементного фотоприемника, в котором измеряются два сигнала I_1 и I_2 . По полученным значениям I_1 и I_2 вычислялся результирующий сигнал $I_{раз}$. Обозначим параметр Δz_{af} (см. рис. 4) в качестве рабочего диапазона датчика автофокусировки при смещении контролируемой поверхности в направлении от фокальной плоскости рабочего микрообъектива на величину

z , т.е. когда $\Delta z_{af} = f + z$ (где f – фокусное расстояние микрообъектива). Этот параметр требует подробного рассмотрения, так как при больших смещениях поверхности, $z > \Delta z_{af}$, возможен сбой в работе датчика автофокусировки. Ошибочное определение смещения поверхности приведет к столкновению микрообъектива с обрабатываемой поверхностью.

В результате моделирования было выявлено влияние на рабочий диапазон Δz_{af} положения ножа Фуко, а именно расстояния L между ножом и рабочим микрообъективом (рис. 5а). На рис. 5 показан ход лучей в случае смещения поверхности заготовки к рабочему микрообъективу (рис. 5б) и от него (рис. 5в). Видно, что в зависимости от расходимости пучка излучение фокусируется либо на верхней, либо на нижней части двухэлементного фотоприемника.

Однако при больших смещениях поверхности в направлении от микрообъектива ($+\Delta z$) отраженный пучок может сфокусироваться в плоскости ножа Фуко и, далее, на верхнем квадранте K_1 (см. рис. 5г). Это приведет к инверсии сигнала и ошибочному определению направления смещения, поскольку в этом случае $I_1 > I_2$. Поэтому для увеличения рабочего диапазона нож Фуко нужно располагать как можно ближе к микрообъективу, т.е. уменьшать либо параметр L (см. рис. 5), либо расстояние между линзой и микрообъективом.

Как показали проведенные расчеты (табл. 1), при уменьшении этого расстояния от 180 мм (такое расстояние изначально было заложено при проектировании КЛЗС) до 50 мм рабочий диапазон увеличивается в 10 раз – с 20 до 200 мкм. Рабочий диапазон оценивался по графику, представленному на рис. 4.

Большое влияние на результат измерения оказывает также наклон поверхности, по которой осуществляется запись. Были проанализированы графики зависимости разностного сигнала $I_{раз}$ (рис. 6) при смещении поверхностей с разными углами наклона (5° , 7° , 9° и 10°), полученные в результате программного моделирования оптической схемы датчика в программе Zemax.

В результате моделирования выявлен критический угол наклона поверхности для микрообъектива с числовой апертурой 0.65, равный 8° , при котором происходит инверсия разностного графика. Это дает ошибочный сигнал смещения поверхности, при котором датчик автофокусировки срабатывает неверно, и возможно столкновение рабочего микрообъектива и поверхности заготовки. Следует отметить, что при наклоне поверхности уменьшается диапазон измеряемых смещений. Так, при угле наклона 8° он сокращается более чем в два раза. Это связано с тем, что в данном случае нож Фуко перекрывает не половину отраженного пучка, а его меньшую часть, и пучок попадает на обе части фотоприемника. Это приводит к уменьшению разностного сигнала и изменению его знака. Зная предельный угол наклона, исходя из диаметра заготовки можно определить ее максимально допустимый радиус кривизны: $R = D/(2\sin\alpha)$, где D – диаметр заготовки, α – угол наклона касательной к сферической поверхности.

Как было показано выше, в двухканальной схеме КЛЗС используется лазерное излучение с длинами волн 405 и 532 нм. Зондирующее излучение, используемое в ДАФ, имеет длину волны 640 нм. Для стандартных микрообъективов с числовой апертурой 0.65 величина хроматизма положения в диапазоне указанных длин волн достигает нескольких микрометров. Соответственно, для точной фокусировки в одной плоскости лазерных пучков с тремя разными длинами волн необходимо менять расходимость излучения каждого лазера. При этом расчеты показали, что излучение в ДАФ должно быть строго коллимированным для оптимальной работы на криволинейных поверхностях. Это связано с тем, что в случае зондирования расфокусированным пучком сферической поверхности последняя влияет на расходимость пучка при отсутствии аксиального смещения заготовки (рис. 7).

Этот вывод подтверждается приведенным на рис. 8 графиком зависимости ошибки определе-

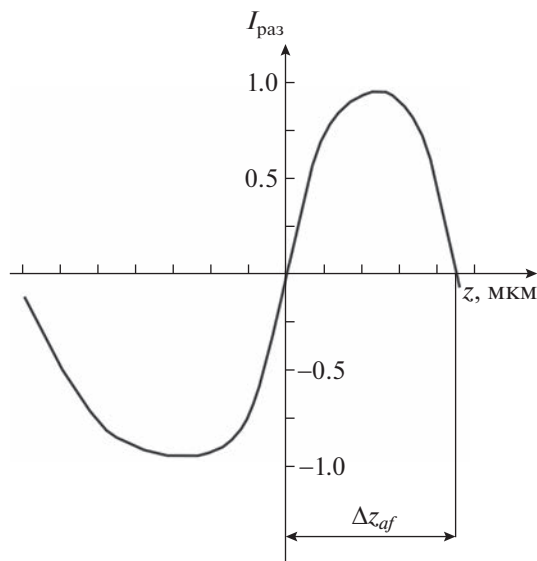


Рис. 4. Аналитическая зависимость сигнала на двухэлементном фотоприемнике от смещения поверхности.

ния смещения заготовки от положения зондирующего пучка относительно центра сферы при разных значениях расфокусировки излучения ДАФ (смещение относительно фокальной плоскости 5, 7 и 10 мкм). Из графиков видно, что с увеличением расфокусировки растет ошибка определения смещения сферы вдоль оси z при смещении зондирующего излучения относительно ее центра в плоскости x, y .

Результаты, полученные при моделировании ДАФ в программе Zemax, использовались при настройке КЛЗС. Зондирующее излучение ДАФ ($\lambda_r = 658$ нм) коллимировалось, а расходимости волновых фронтов излучений технологических лазеров ($\lambda_b = 405$ нм и $\lambda_g = 532$ нм) изменялись для точного совмещения плоскостей наилучшей фокусировки рабочего микрообъектива.

На основании результатов, полученных в ходе программного моделирования оптической схемы ДАФ в программе Zemax, был спроектирован микроскоп записи для КЛЗС (рис. 9). Он входит в

Таблица 1. Результаты расчета рабочего диапазона ДАФ

Расстояние между микрообъективом и ножом Фуко, мм	Расчетный рабочий диапазон ДАФ Δz_{af} , мкм
180.3	20
150	63
100	96
50	200

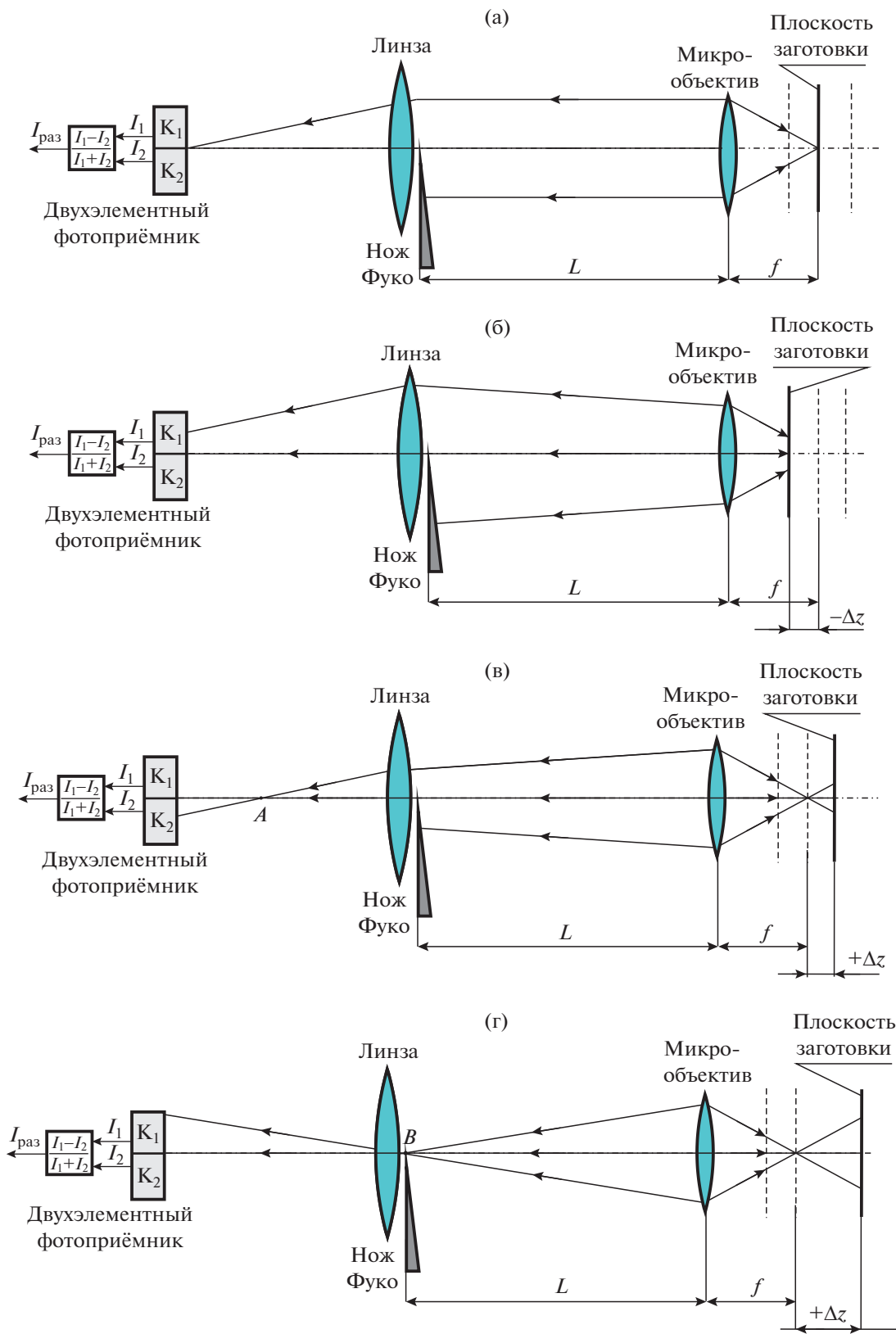


Рис. 5. Оптическая схема датчика автоматической фокусировки на основе ножа Фуко (после микрообъектива показан обратный ход лучей): **а** – без смещения; **б** – при смещении плоскости заготовки к микрообъективу; **в** – при смещении плоскости заготовки от микрообъектива; **г** – при смещении плоскости заготовки от микрообъектива при значении Δz , превышающем 200 мкм.

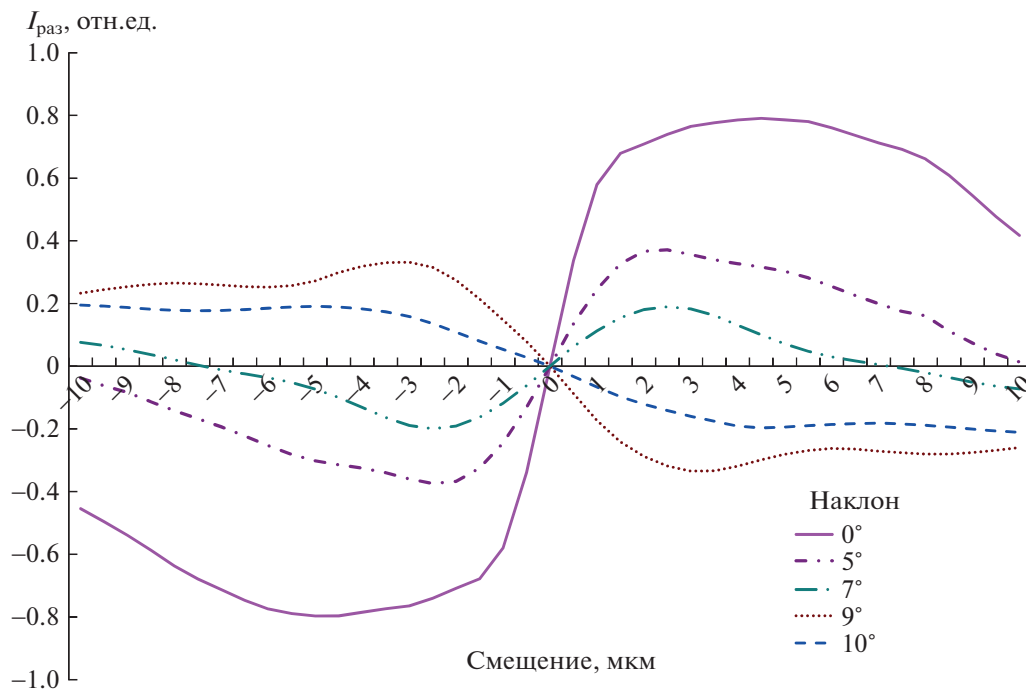


Рис. 6. График зависимости сигнала с двухэлементного фотоприемника от смещения поверхности при разных углах ее наклона.

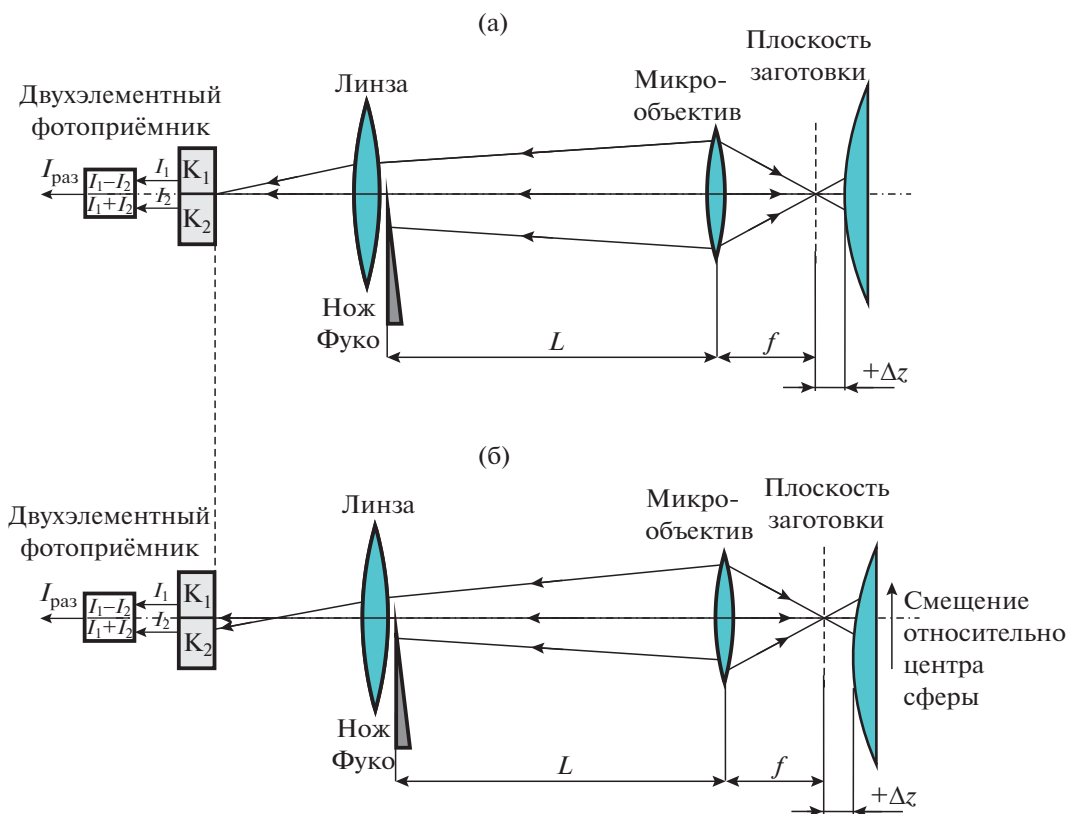


Рис. 7. Обратный ход лучей в схеме ДАФ с использованием расфокусированного зондирующего излучения: а – при нахождении в центре криволинейной поверхности; б – при смещении относительно центра криволинейной поверхности.

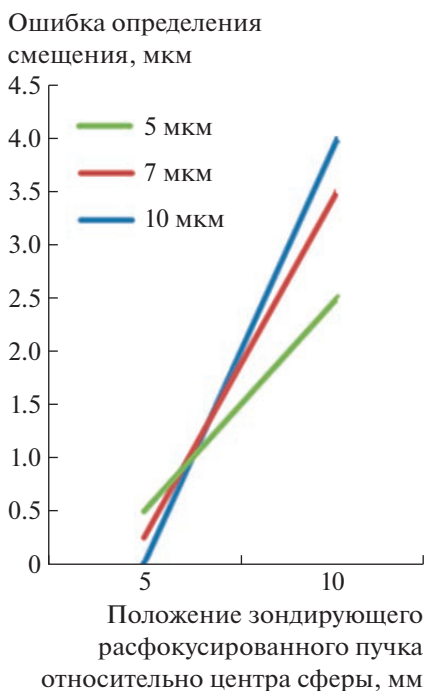


Рис. 8. Зависимость ошибки определения смещения сферической заготовки (радиус 250 мм) от положения зондирующего пучка относительно центра сферы при значениях расфокусировки: 5, 7 и 10 мкм.

состав оптического канала записи КЛЗС и предназначен для автоматической фокусировки выходного записывающего пучка в пятно диаметром порядка 0.5 мкм, а также для обеспечения визуализации и контроля записи при тестировании светочувствительного материала.

В состав микроскопа записи входят оптические элементы из схемы ДАФ, поворотное *1* и дихроичные *3, 4* зеркала, светоделитель *6*, линзы *2, 8, 9*, двухэлементный фотоприемник ФД19-КК (*7*), а также видеокамера для контроля и визуализации записи.

Система контроля и визуализации записи предназначена для автоматического считывания результатов записи в режимах поиска центра вращения заготовки и тестирования светочувствительного материала. В качестве подсвечивающего луча используются три пучка лазеров с длинами волн, равными $\lambda = 405, 532, 648$ нм, с уровнем мощности, лежащим ниже порога чувствительности материала записи. В режиме контроля записи отраженный от контролируемой поверхности подсвечивающий пучок света собирается выходным микрообъективом *5*, проходит через дихроичное зеркало *4* и светоделитель *6* и направляется линзами *8* и *9* на видеокамеру (3 Mp, Tucsen).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕКТА ДАТЧИКОМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКИ

Оценка погрешности позиционирования микрообъектива осуществлялась экспериментально по величине сигнала рассогласования с ДАФ. На рабочем столе шпинделя с помощью вакуумного прижима была закреплена стандартная стеклянная подложка ППХ 102×102А ТУ11-79. С помощью индикаторной головки на радиусе 45 мм измерялся полный размах биения поверхности подложки за один оборот шпинделя. Подложка юстировалась таким образом, чтобы величина этих биений *l* достигала ± 5 мкм. Затем шпиндель раскручивался до скорости 10 оборотов/с. Сначала измерялся размах сигнала рассогласования $\Delta Dif = V_1$ с выхода ДАФ при отключенном ПИД-регуляторе. Согласно рис. 10а, величина V_1 составила 2100 отн.ед.

Затем включался ПИД-регулятор системы ДАФ и снова измерялся размах сигнала рассогласования $\Delta Dif = V_2$. Согласно рис. 10б, его значение не превысило 150 отн.ед.

Погрешность автофокусировки ΔAF вычислялась как $\Delta AF = lV_2/V_1$ и составила $\Delta AF = 0.7$ мкм. Отсюда можно сделать вывод, что ДАФ подавляет амплитуду биения подложки в 14 раз. На практике используются стандартные подложки для фотолитографии с плоскостностью не более 1–3 мкм. В этом случае погрешность автофокусировки составляет не более 0.1 мкм, что значительно меньше глубины фокусировки записывающего микрообъектива.

Стабильность работы датчика автофокусировки вкпе со всеми устройствами, осуществляющими контроль перемещения сфокусированного луча и положения заготовки (угловой датчик – модель RON886, фирма-производитель Heidenhain; лазерный энкодер – модель RLE10-SX-XD, фирма-производитель Renishaw), проверялась в ходе экспериментальных исследований разработанных КЛЗС. Для этого были синтезированы дифракционные структуры на поверхности стеклянных подложек методом прямой лазерной записи профиля в фоторезисте с последующим переносом профиля в стекло с помощью ионно-плазменного травления [10]. Ошибка волнового фронта при изготовлении бинарных дифракционных линз с помощью КЛЗС на основе полупроводникового лазера не превышает $\lambda/100$, что свидетельствует о высоких технических характеристиках КЛЗС.

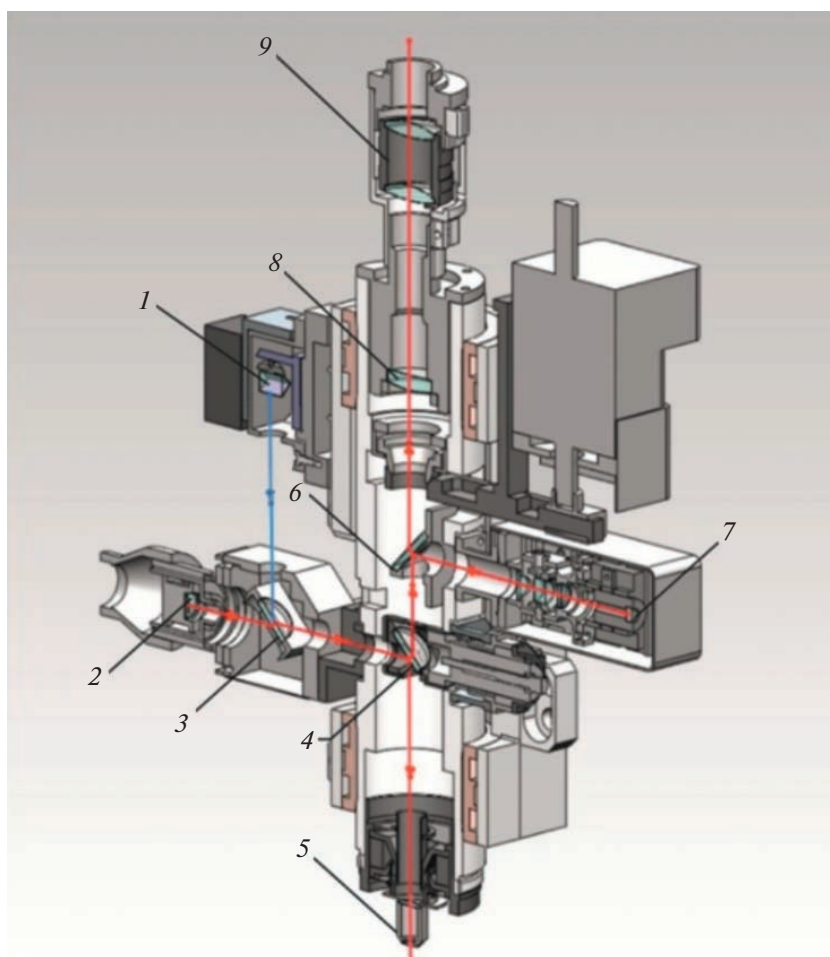


Рис. 9. Конструкция микроскопа записи для круговой лазерной записывающей системы. 1 – поворотное зеркало; 3, 4 – дихроичные зеркала; 5 – микрообъектив; 6 – светоделитель; 7 – двухэлементный фотоприемник ФД19-КК; 2, 8, 9 – линзы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ оптической схемы датчика автоматической фокусировки на основе ножа Фуко с использованием программы Zemax для проектирования оптических систем. Установлено, что инверсия разностного сигнала на фотоприемнике и ошибочное определение смещения возникают из-за фокусировки излучения в плоскости ножа Фуко. Показано, что путем изменения расстояния между ножом Фуко и рабочим микрообъективом можно увеличивать или уменьшать рабочий диапазон датчика.

Выявлено, что при угле наклона поверхности более 8° происходят инверсия разностного сигнала датчика автоматической фокусировки и уменьшение рабочего расстояния более чем в два раза. Это накладывает ограничения на радиус кривизны оптической поверхности, на которой происходит запись микро- и наноструктур.

Показано, что в двухканальной схеме лазерного фотопостроителя для компенсации продольной хроматической aberrации микрообъектива необходимо менять расхожимость рабочих излучений с длинами волн 405 и 532 нм для фокусировки пятен в плоскости наилучшей фокусировки зондирующего излучения датчика автоматической фокусировки на основе ножа Фуко ($\lambda = 658$ нм).

На основании компьютерного моделирования датчика автоматической фокусировки на основе ножа Фуко был спроектирован и изготовлен микроскоп записи для круговых лазерных записывающих систем. Предложенные авторами технические решения были использованы при разработке коммерческих моделей круговых лазерных записывающих систем.

Проведены испытания разработанного датчика в составе круговой лазерной записывающей системы, в результате которых установлена погрешность определения положения поверхности

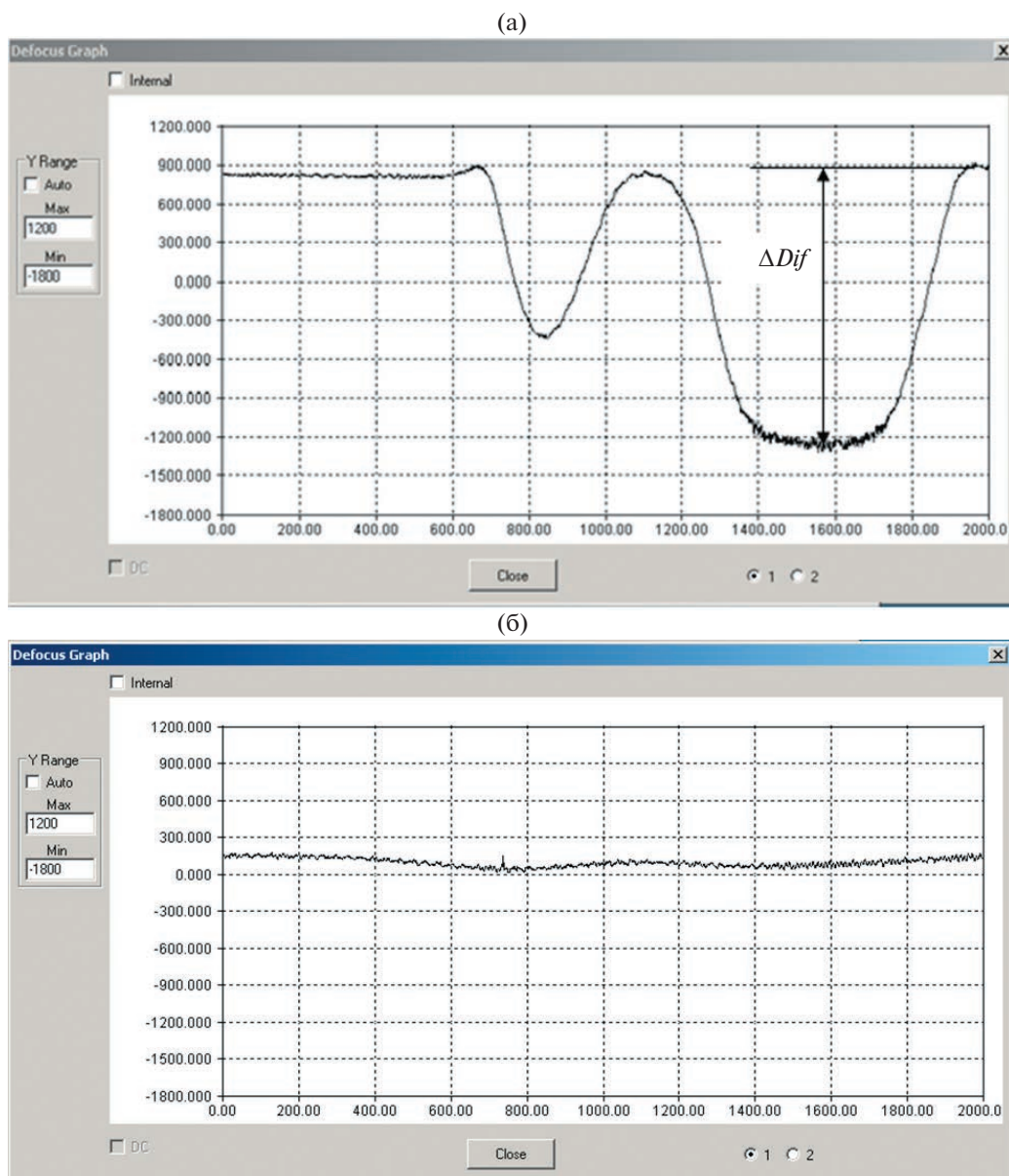


Рис. 10. Сигнал рассогласования $\Delta D_{if} = V_1$ с выхода ДАФ при: **а** – отключенном ПИД-регуляторе; **б** – включенном ПИД-регуляторе.

(не более 0.1 мкм). Погрешность данного датчика оценивалась в совокупности с погрешностями датчиков, входящих в состав лазерных круговых записывающих систем. Для этого были синтезированы бинарные дифракционные линзы и измерена ошибка волнового фронта, которая не превысила $\lambda/100$.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки России в части проекта АААА-А21-121011490030-4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Skidanov R.V., Ganchevskaya S.V., Vasil'ev V.S., Blank V.A.* // J. Opt. Technol. 2022. № 89. P. 132–136. <https://doi.org/10.1364/JOT.89.000132>
2. *Gerhard C.* Optics Manufacturing: Components and Systems. CRC Press. 2017. P. 325. ISBN: 9781351228367. <https://doi.org/10.1201/9781351228367>
3. *Полещук А.Г., Корольков В.П., Вейко В.П., Заколдаев Р.А., Сергеев М.М.* // АвтOMETрия. 2018. № 2. С. 3. <https://doi.org/10.15372/AUT20180201>
4. *Завьялова М.А.* Дис. ... канд. техн. наук, Новосибирск: Новосиб. гос. техн. ун-т, 2021.

5. Radtke D., Zeitner Uwe D. // Optics Express. 2007. V. 15. № 3. P. 1167.
<https://doi.org/10.1364/OE.15.001167>
6. Taisheng Wang, Weixing Yu, Dengying Zhang, Chunrong Li, Hongxin Zhang, Wenbin Xu, Zhijun Xu, Hua Liu, Qiang Sun, Zhenwu Lu // Optics Express. 2010. V. 18. № 24. P. 25102.
<https://doi.org/10.1364/OE.18.025102>
7. Luo J., Liang Y., Yang G. // Optical Engineering. 2011. V. 50 (7). P. 073601.
<https://doi.org/10.1117/1.3597327>
8. Верхогляд А.Г., Завьялова М.А., Качкин А.Е., Кокарев С.А., Корольков В.П. // Датчики и системы. 2015. № 9–10. С. 45.
9. Handbook of Optics. MacGraw-Hill Companies. Inc. 1995. V. I. P. 31.14.
10. Chugui Yu.V., Verkhoglyad A.G., Zavyalov P.S., Sysoev E., Kulikov R.V., Vykhristyuk I.A., Zavyalova M.A., Poleshchuk A.G., Korolkov V.P. // Int. J. of Automation Technology. 2015. V. 9. № 5. P. 515.

РЕГИСТРАЦИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВЕ МИКРОКАНАЛЬНЫХ ПЛАСТИН

© 2023 г. Ю. М. Яρμοшенко^а, И. Э. Кантур^{а,*}, В. Е. Долгих^а, Т. В. Кузнецова^{а,б}

^аИнститут физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН
Россия, 620108, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

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

*e-mail: il.kantur@mail.ru

Поступила в редакцию 31.07.2022 г.

После доработки 13.10.2022 г.

Принята к публикации 15.01.2023 г.

Описана система регистрации рентгеновского изображения, состоящая из детектора, содержащего две микроканальные пластины, из оптического объектива и цифровой видеокамеры. На рентгеновском флуоресцентном спектрометре с изогнутым кристаллом кварца и с горизонтальной фокусировкой методом Иоганна получены изображения К-спектров Са, Тi, Мn, Fe, Со. Измерения выполнены с использованием детекторов с коэффициентами усиления 10^6 , 10^7 и двух видеокамер, имеющих разные характеристики и размеры пикселей. Достигнута высокая скорость измерения спектров с приемлемой статистикой. Измерение спектров продублировано на одномерном позиционном детекторе.

DOI: 10.31857/S003281622303028X, EDN: CXDTEL

ВВЕДЕНИЕ

В стандартных лабораторных источниках рентгеновского излучения, маломощных по сравнению с синхротронными, помимо детекторов рентгеновского излучения на основе полупроводниковых технологий, используются двумерные детекторы с микроканальными пластинами (МКП). Они имеют ряд преимуществ при работе в лабораторных условиях, поскольку обладают не только высоким пространственным разрешением и эффективностью, но и большим временем эксплуатации при малой мощности рентгеновского излучения и относительно невысокой ценой. Отметим несколько ключевых работ из более чем 50-летней истории создания детекторов на основе МКП. В комбинации с волоконной оптикой и сцинтиллятором МКП впервые была использована для регистрации электронов. Одним из первых был сконструирован двумерный детектор рентгеновского изображения, созданный в 1976 г. в Center for Astrophysics, Harvard College Observatory, and Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, Massachusetts 02138 [1]. Он состоял из МКП, фотокатода и проволочной сетки с диаметром проволоки 100 мкм в качестве двумерного позиционно-чувствительного детектора. Квантовая эффективность МКП варьировалась от 29% при 0.28 кэВ до 5% при 3 кэВ. Этот детектор обеспечивал рентгеновское

изображение в фокальной плоскости телескопа. С разными фотокатодами детектор мог использоваться для регистрации однофотонного изображения в ультрафиолетовом, видимом и ближнем ИК-диапазонах. Во всех случаях при очень низком темновом счете скорость регистрации событий достигала 10^4 с^{-1} .

Через 10 лет в Англии был сконструирован детектор также на основе МКП [2]. В нем применялась технология линии задержки. Детектор работал в области длин волн 12–30 Å, был установлен в плоскости фокусировки кристалла радиусом 25 см спектрометра Иоганна и использовался для регистрации экспериментальных спектров при диверторной инжекции на токамаке (DITE).

В работе [3] описан двумерный позиционный детектор размером 160 × 100 мм для спектроскопии высокотемпературной плазмы. Пространственное разрешение для одного измерения составляет 200 мкм, а для другого — 2–5 мм. Интегральная нелинейность составляет 0.08% для первого и 1% для второго измерения. В статье [4] представлена разработка рентгеновского пиксельного детектора с зарядовой связью (MPCCD — multi-port charge-coupled device) для экспериментов с рентгеновским лазером на свободных электронах. Хорошо известно применение МКП-детекторов для наблюдения изображения в инфракрасном излучении. В по-

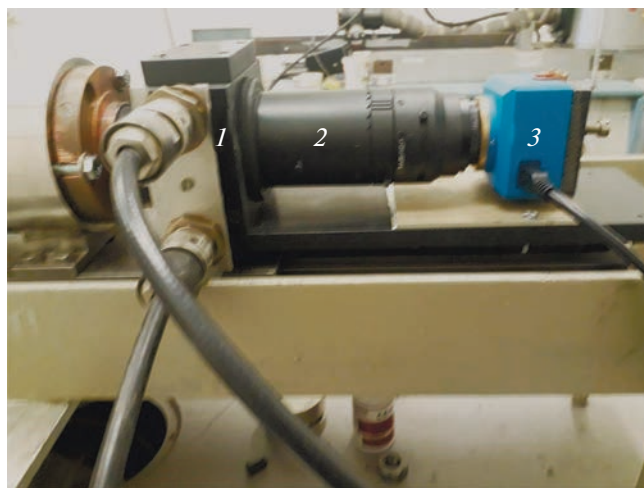


Рис. 1. Система регистрации. 1 – детектор в диэлектрическом кожухе, 2 – объектив TAMRON, 3 – цифровая видеокамера BMR-1400HM-U.

следние годы отечественными специалистами созданы системы наблюдения на основе МКП-детекторов в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне. Выбор УФ-частоты обеспечивается специальными фильтрами и для регистрации излучения в однофотонном режиме использована быстродействующая электроника [5].

При изучении рентгеновского излучения часто возникает проблема регистрации спектрального распределения низкой интенсивности с подходящей статистикой и пространственным разрешением. На спектральных приборах, установленных в синхротронных каналах, сравнительно легко достигаются требуемые параметры статистики и энергетического разрешения. Однако далеко не всегда такие приборы доступны рядовому экспериментатору. Нашей целью является создание такого оборудования, которое доступно для проведения исследований непосредственно в лаборатории.

ДЕТЕКТОР И РЕГИСТРАЦИЯ СПЕКТРОВ

Представляемый в данной статье детектор на основе МКП предназначен для регистрации рентгеновского излучения в условиях его малой интенсивности в области длин волн 0.1–0.7 нм в дифрактометрах и рентгеновских спектрометрах. Фирма Hamamatsu [6] предлагает серию близких по конструкции детекторов для измерения изображения в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах. Наша система регистрации состоит из детектора рентгеновского излучения “Циркон Р”, оптического объектива и видеокамеры, связанной с компьютером (рис. 1). Опытные образцы детектора “Циркон Р” разработаны во Владикавказском технологическом центре “Баспик”

при участии НИЦ “Курчатовский институт”–ВИАМ и авторов этой статьи. “Циркон Р” применялся для регистрации рентгеновских спектров в различных диапазонах длин волн: от $\text{CaK}_{\beta 1}$ ($\lambda = 3.089 \text{ \AA}$; $E = 4.012 \text{ кэВ}$), TiK_{α} ($\lambda = 2.75 \text{ \AA}$; $E = 4.5 \text{ кэВ}$) до CoK_{α} ($\lambda = 1.66 \text{ \AA}$; $E = 7.46 \text{ кэВ}$).

Рентгеновское характеристическое излучение возбуждалось в образце чистых металлов Ti, Mn, Fe, Ni, Co. Применяемый рентгеновский спектрометр с фокусировкой по Иоганну [7, 8] предназначен для измерений рентгеновских спектров в широком диапазоне длин волн с энергией фотонов 2–10 кэВ. Для разложения в спектр в зависимости от условий эксперимента использованы кристаллы кварца с плоскостями отражения $(10\bar{1}1)$, $(10\bar{1}0)$ и $(13\bar{4}0)$ и соответствующими радиусами изгиба $R_1 = 140 \text{ см}$, $R_2 = 150 \text{ см}$, $R_3 = 128 \text{ см}$. Рентгеновский спектрометр регистрирует вторичное характеристическое излучение образцов. Для возбуждения флуоресцентного излучения применяется рентгеновская трубка БХВ-9 с рениевым анодом в режиме работы 24 кВ, 20 мА. В рабочем объеме спектрометра поддерживается давление порядка 10^{-3} Торр.

После разложения вторичного рентгеновского излучения в спектр кристаллом-анализатором характеристическое излучение попадает в детектор “Циркон Р”, расположенный на круге Роуланда. С точки зрения оптической фокусировки кристалл-анализатор, на который направлено флуоресцентное рентгеновское излучение образца, является фактически источником излучения для детектора. Расстояние от этого источника до входного окна детектора, в зависимости от выбора образца, изменяется и составляет около 1 м. Отрицательный потенциал V_1 на входном бериллиевом окне запирает обратное движение электронов, положительный потенциал V_2 ускоряет поток электронов в однородном электрическом поле (рис. 2а). На рис. 2б представлен фрагмент реальной МКП. Фотоны, проникая через бериллиевое окно толщиной 150 мкм, возбуждают в МКП поток электронов, который формирует изображение на люминоформном экране внутри детектора (рис. 2а). Это изображение фокусируется оптическим объективом. Задний фокус объектива совпадает с плоскостью видеокамеры на основе прибора с зарядовой связью (ПЗС). Ось индивидуального канала МКП (рис. 2) по отношению к поверхности пластины расположена под углом смещения (углом, образованным осью канала и осью, перпендикулярной поверхности пластины). Диаметр индивидуального канала МКП в детекторах равен 5 мкм. Угол смещения выбирается с учетом эффективности обнаружения излучения, предотвращения прохождения падающих фотонов через каналы и простран-

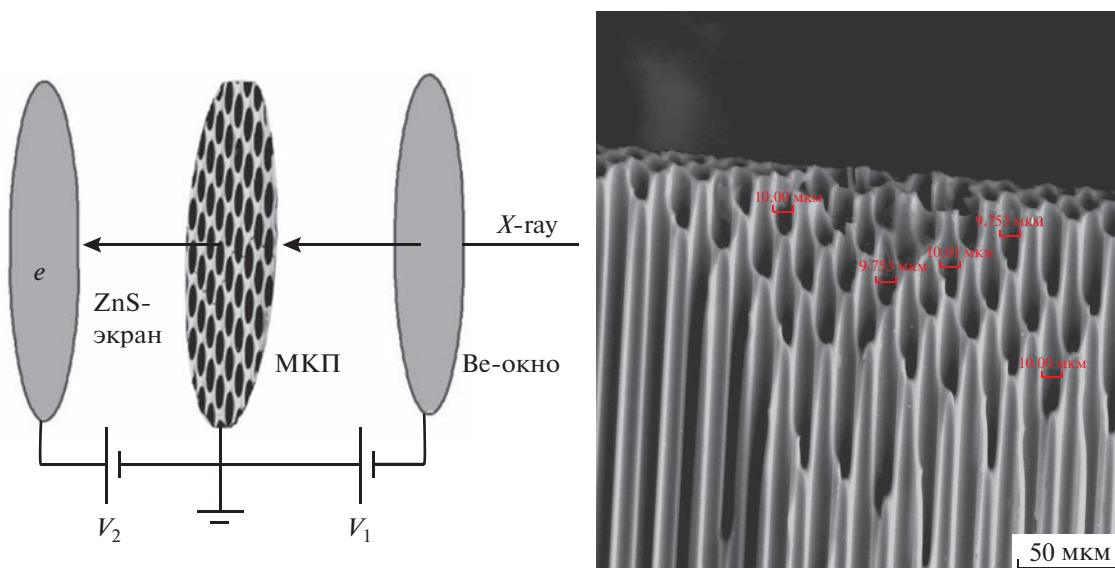


Рис. 2. а – МКП и принципиальная схема детектора; б – микрофотография фрагмента МКП.

ственного разрешения. Оптимальное значение угла смещения обычно составляет от 5° до 15° .

Существенное влияние на качество полезного сигнала всей системы регистрации оказывает шум, связанный с работой самого детектора и видеокамеры. Шум детектора определяется величиной темнового тока. Темновой ток в детекторе обусловлен в основном ионизацией остаточных газов, локальных разрядов в сильном электрическом поле и остаточной фотоэмиссией, создаваемой сцинтилляцией конструктивных частей МКП. Источники темнового тока, вызванные локальным разрядом, устраняются путем оптимизации условий изготовления МКП и улучшения структуры сборки и материалов. Во всяком случае, типичные МКП имеют очень низкий темновой ток, который составляет менее 0.5 пА/см^2 при напряжении питания 1 кВ. Тем не менее, в случаях, когда уровень входного сигнала чрезвычайно мал, например 10 с^{-1} , работа в режиме стробирования эффективна, поскольку МКП работает только при поступлении сигналов. Поскольку отдельные каналы МКП являются независимыми, пространственное разрешение МКП зависит от диаметра каналов и расстояния между ними в двух измерениях. Пространственное разрешение также зависит от расстояния между МКП и люминофорным экраном, а также от ускоряющего напряжения. Электроны, умноженные в МКП, попадают на люминофорный экран и конвертируются в видимый свет. Изображение фокусируется объективом на поверхности ПЗС в камере. Предельное разрешение определено наименьшим количеством регистрируемых фотонов. В этих условиях предельное разрешение достигает 20–25 мкм (от 40 до 50 пар линий/мм) при коэффициенте усиления

1000. В случае двух сопряженных МКП пространственное разрешение ниже по сравнению с одной МКП. Причина этого заключается в том, что электроны, размноженные в канале МКП первой ступени, распространяются на несколько каналов МКП последней ступени при входе в нее. Однако основной вклад в шум дает видеокамера.

На рис. 3, 4 представлены соответственно результаты измерений рентгеновских эмиссионных спектров в виде изображений и графиков зависимости интенсивности от энергии. Время накопления спектров с одинаковой статистикой при использовании двумерного детектора сокращено по крайней мере в 10^2 раз по сравнению с одномерным позиционным детектором (оригинальный детектор собственного изготовления) при равном пространственном разрешении.

Одномерный позиционный детектор по конструкции принципиально не отличается от детектора, представленного в работе [9]. В этом детекторе “рабочим телом” – источником полезного сигнала – является газовая смесь $\text{Ag}(10\%)+\text{CH}_4$, протекающая через него. Детектор [9] имеет Ве-окно и содержит вольфрамовую нить длиной несколько сантиметров, расположенную перпендикулярно направлению распространения рентгеновского излучения. Рентгеновское излучение, попадая в объем детектора, порождает вторичные электроны (продукт ионизации, в основном CH_4), которые под действием электрического поля устремляются к вольфрамовой нити. Сигнал, распространяющийся вдоль нити, регистрируется на ее концах. Разность фаз или времен является аналогом координаты.

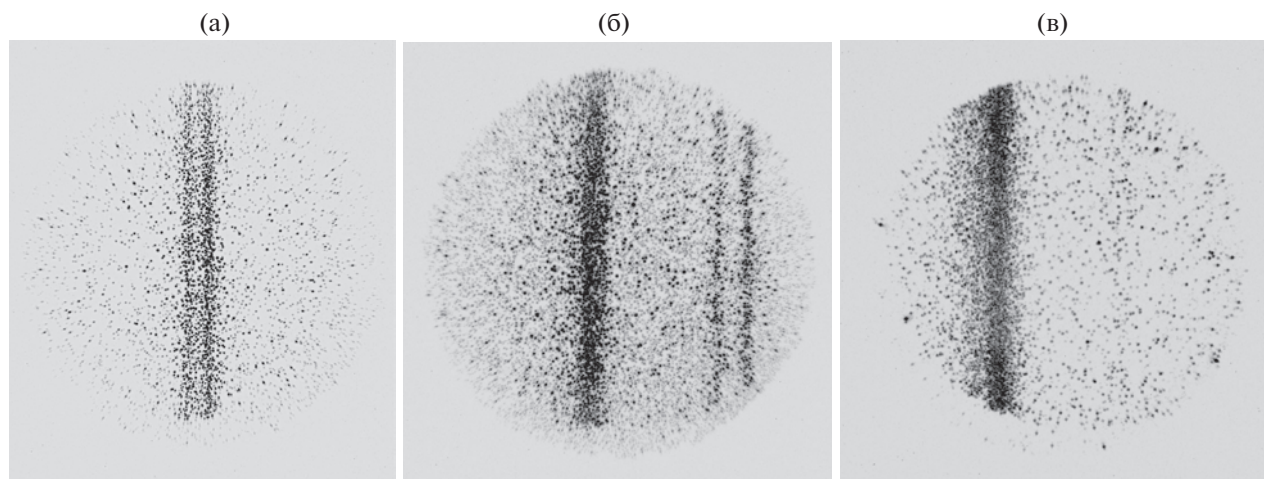


Рис. 3. Результаты измерений рентгеновских эмиссионных спектров: **а** – $TiK_{\alpha 1,2}$ -спектр, кристалл-анализатор с плоскостью отражения $(10\bar{1}1)$; **б** – $TiK_{\beta 1,3}$ -спектр титана и “примесного” $NiK_{\alpha 1,2}$, кристалл-анализатор с плоскостью $(10\bar{1}0)$; **в** – $CoK_{\beta 1,3}$ -спектр, кристалл-анализатор с плоскостью отражения $(13\bar{4}0)$.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для изучения качества регистрации изображения и спектров в нашем распоряжении было два детектора с разными коэффициентами усиления и две видеокамеры. Как предполагает производитель, коэффициент усиления детектора “Циркон 1” $K_1 = 10^7$, а детектора “Циркон 2” $K_2 = 10^6$. Оба детектора содержат по две сопряженные МКП. Видеокамеры – BMR-1400HM-U (№ 1) и ZWO 485 MC (№ 2) – относятся к бюджетному ряду. Ниже приведены характеристики видеокамер.

BMR-1400HM-U (№ 1). Камера оснащена ПЗС-фотоприемником (2/3”) (ICX285AL), размер одного пикселя составляет 6.45×6.45 мкм. Тип разложения прогрессивный. Соотношение сторон фотоэлектронного преобразователя 4 : 3. Разрешающая способность матрицы более 1000 ТВЛ. Пороговая чувствительность 0.012 лк, предельная чувствительность 0.001 лк. Динамический диапазон более 69 дБ, отношение сигнал/шум составляет 64 дБ.

ZWO 485 MC (№ 2). Максимальная емкость пикселя 13 000 e (электронов). Цветная матрица Sony IMX485 с обратной засветкой имеет высокую квантовую эффективность, которая составляет примерно 85% на длине волны 530 нм. Матрица также имеет относительно высокую квантовую эффективность, примерно 44% от максимальной, в инфракрасной области (в области длин волн 800–850 нм). Размеры пикселя равны 2.9×2.9 мкм при рабочей области 11.13×6.26 мм (диагональ 12.86 мм). Формат матрицы соответствует стандарту 4K 16 : 9 с разрешением 38409×2160 пикселей (8.28 мегапикселя). Разрядность АЦП равна 12 бит (4096 уровней).

Важными характеристиками ПЗС-камер являются отношение сигнал/шум, скорость передачи кадров, временное разрешение, размер пикселя и пространственное разрешение, спектральный диапазон, квантовый выход и динамический диапазон.

Сравнение экспериментальных результатов, полученных в различных комбинациях пары детектор–камера, показало (рис. 4), что качество изображения и соответствующих спектров значительно выше для детектора “Циркон 1” с коэффициентом усиления $K_1 = 10^7$. На рис. 4 выделены участки графиков, практически идентичные для выбранной камеры. При этом аналогичный участок для другой камеры будет отличаться. Это означает, что каждая камера обладает индивидуальной характеристикой (шума), которая частично воспроизводится в процессе измерений. Кроме того, для небольшой части пикселей наблюдается аномальная интенсивность при отсутствии освещения ПЗС-матрицы. Эту информацию легко использовать для исправления спектра. Структура фона частично обусловлена выбором конкретной камеры. Неравномерный шум имеет тепловое происхождение и при этом также связан с технологией изготовления ПЗС-чипа, расположенного в камере. Для учета шума мы используем стандартные алгоритмы частотного анализа методом фурье-преобразования экспериментальных спектров и ограничения частотного интервала. Эта процедура применяется индивидуально для каждого эксперимента и камеры. Управление процессами измерения, наблюдения и обработки экспериментальных результатов выполняется при помощи визуального интерфейса [10]. Программа формирует массив, содержащий инфор-

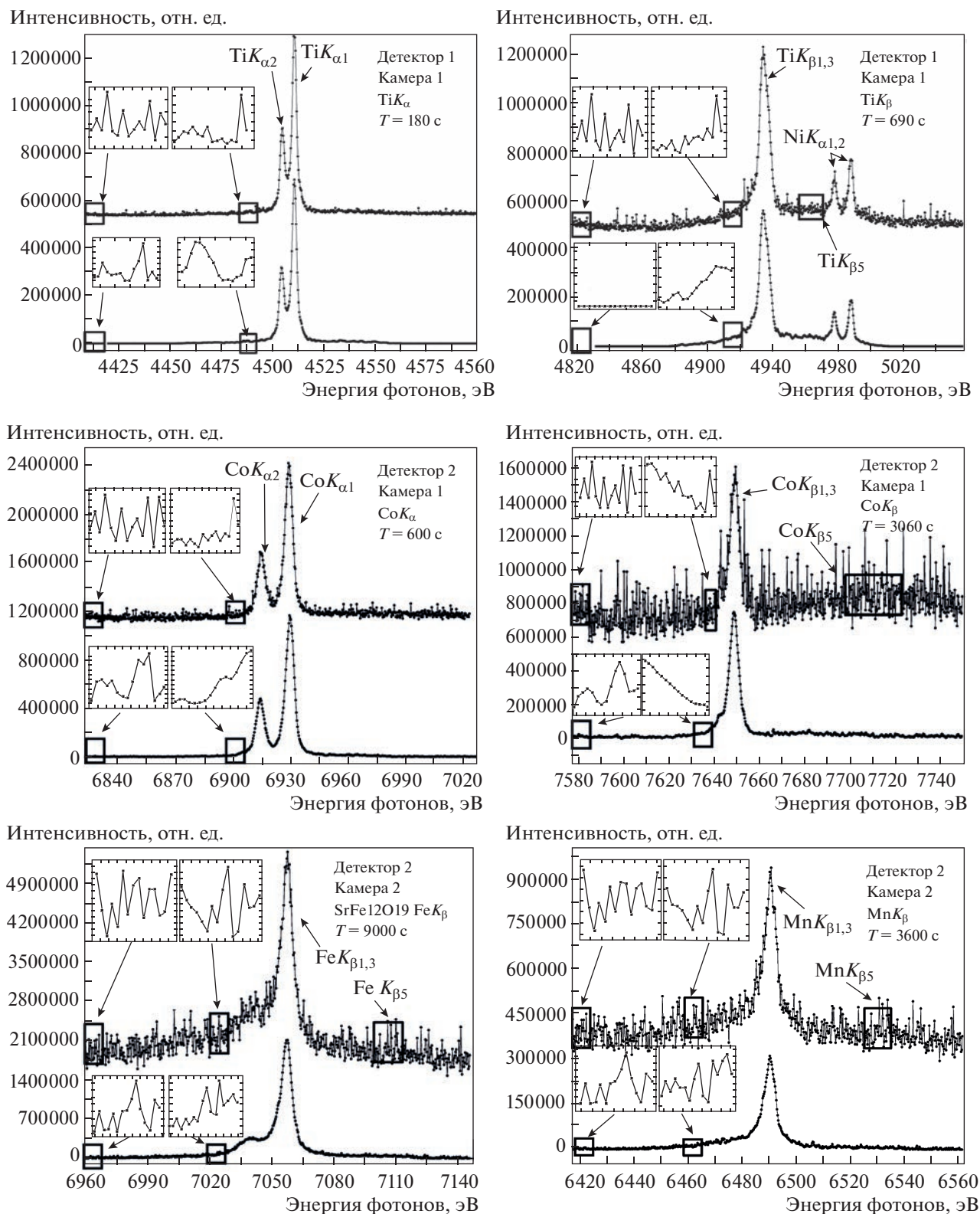


Рис. 4. Спектры, измеренные при использовании различных комбинаций пар “детектор–видеокамера”. Верхняя кривая – спектр с шумами, нижняя – после фильтрации.

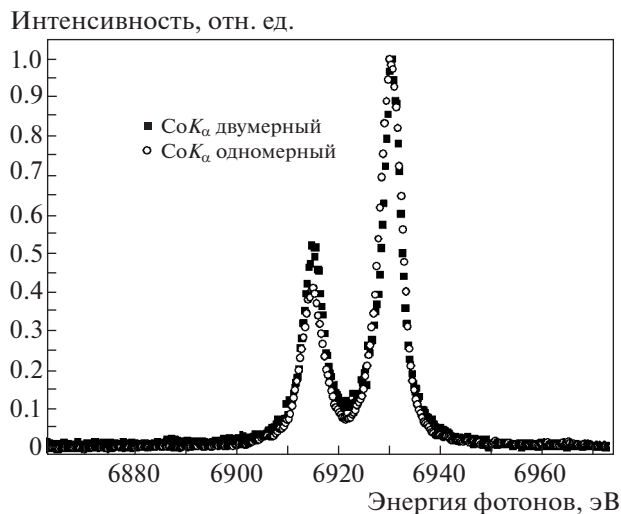


Рис. 5. Сравнение CoK_{α} -спектров, полученных с помощью одномерного позиционного и двумерного детекторов.

мацию об интенсивности каждого пикселя в изображении. Далее применяется программный фильтр для минимизации влияния дефектов и шумов на изображение. После такой обработки проводятся суммирование интенсивности по координате X пикселя в изображении и калибровка по энергии фотонов, после чего выводится окончательный график зависимости интенсивности от относительных единиц от энергии фотонов.

На рис. 4 приведены спектры в двух вариантах: полученные в результате накопления в течение указанного времени (верхняя кривая) и после применения программного фильтра (нижняя кривая). Размерность интенсивности на рисунке привязана к количеству электронов (электронно-дырочных пар), которые накоплены в пикселе ПЗС за цикл измерений, размерность определена емкостью пикселя и величиной двоичного кода передачи из камеры в компьютер. В наших измерениях величина кода составляла 12 двоичных разрядов. Например, емкость пикселя камеры № 2 составляет 13000 e , а 12 разрядов соответствуют десятичному числу 4096 условных уровней контраста изображения. Один уровень серого соответствует около 3 e . Поэтому интенсивность фактически измеряется в e — количестве электронов. В настоящее время на рынке появляются новые модели камер, для которых производитель обещает существенное понижение их собственных шумов путем использования встроенной системы охлаждения до температуры ниже $0^{\circ}C$.

МАСШТАБ ПО ЭНЕРГИИ ФОТОНОВ

Энергетический масштаб зависит от условий эксперимента и выбора камеры. При съемке ка-

мерой № 1 $\Delta E/\Delta N \approx 0.15$ эВ, где E — энергия фотонов, N — число пикселей. Например, для дублета $CoK_{\alpha 1,2}$ $\Delta E = 15$ эВ или 96 пикселей, $\Delta E/\Delta N = 0.156$ эВ. На всех графиках, полученных с помощью первой камеры, масштаб уменьшен в два раза. При съемке камерой № 2 масштаб на графиках уменьшен в три раза и $\Delta E/\Delta N \approx 0.3$ эВ. Линейный размер междублетного расстояния $CoK_{\alpha 1,2}$ спектра равен $96 \cdot 6.45$ мкм ≈ 620 мкм. Уменьшение масштаба не приводит в конкретных условиях съемки к ухудшению разрешения и равносильно увеличению размера пикселя. Это важно для выбора камеры, поскольку от размера пикселя в ПЗС критически зависят характеристики шума, который уменьшается с увеличением пикселя. Поэтому для изучения спектров вполне пригодны камеры с размером пикселя примерно 10 мкм. На рис. 5 совмещены спектры $CoK_{\alpha 1,2}$, полученные с помощью линейного позиционного и двумерного детекторов в одинаковых условиях фокусировки. Они практически совпадают по форме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрирована работа системы регистрации рентгеновских спектров и изображений, в состав которой входят детектор, оптический объектив и цифровая камера. При проведении измерений использовались два детектора: “Циркон 1” и “Циркон 2” — соответственно с коэффициентами усиления 10^7 и 10^6 .

Проведенные эксперименты продемонстрировали более высокую эффективность применения детекторов на основе МКП для регистрации рентгеновских спектров по сравнению с одномерным позиционным детектором. В среднем время накопления спектров с одинаковой статистикой сократилось в 10^2 раз.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность научному сотруднику Лаборатории цветных сплавов ИФМ УрО РАН Н.В. Николаевой за получение микрофотографий МКП на сканирующем микроскопе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственных заданий Минобрнауки России (темы: “Спин”, г.р. № 122021000036-3; “Электрон”, г.р. № 122021000039-4) и при частичной финансовой поддержке гранта № 20-02-00541 Российского фонда фундаментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kellogg E., Henry P., Murray S., van Speybroeck L., Bjorkholm P. // Rev. Sci. Inst. 1976. V. 47. Iss. 3. P. 282. <https://doi.org/10.1063/1.1134632>
2. Duval B.P., Bateman J.E., Peacock N.J. // Rev. Sci. Inst. 1986. V. 57. Iss. 8. P. 2156. <https://doi.org/10.1063/1.1138715>
3. Thorn D., Beiersdorfer P. // Rev. Sci. Inst. 2004. V. 75. Iss. 10. P. 3937. <https://doi.org/10.1063/1.1789251>
4. Takashi Kameshima, Shun Ono, Togo Kudo, Kyosuke Ozaki, Yoichi Kirihara, Kazuo Kobayashi, Yuichi Inubushi, Makina Yabashi, Toshio Horigome, Andrew Holland, Karen Holland, David Burt, Hajime Murao, Takaki Hatsui // Rev. Sci. Inst. 2014. V. 85. Iss. 3. P. 033110. <https://doi.org/10.1063/1.4867668>
5. Белов А.А., Егоров В.В., Калинин А.П., Коровин Н.А., Родионов А.И., Родионов И.Д., Степанов С.Н. // Датчики и системы. 2012. № 12. С. 58.
6. Hamamatsu MCP documentation. https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/MCP_assembly_TMCP0003E.pdf
7. Johann H.H. // Zeitschrift für Physik. 1931. V. 69. № 3/4. P. 185.
8. Блохин М.А. Методы рентгеноспектральных исследований. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1959. С. 154.
9. Dolgikh V.E., Cherkashenko V.M., Kurmaev E.Z., Gaganov D.A., Ovchinnikov E.K., Yarmoshenko Yu.M., Toporkova T.P. // ПТЭ. 1985. № 1. С. 186.
10. Кантур И.Э., Долгих В.Е., Ярмошенко Ю.М., Кузнецова Т.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022660528 // Оpubл. 06.06.2022.

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

УДК 520.272.5:520.274

**ШИРОКОПОЛОСНАЯ ПРИЕМНАЯ СИСТЕМА
ДЛЯ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

© 2023 г. Ю. В. Векшин^а, М. Б. Зотов^{а,*}, А. С. Лавров^а, И. А. Поздняков^а,
Е. Ю. Хвостов^а, В. К. Чернов^а

^аИнститут прикладной астрономии РАН
Россия, 191187, Санкт-Петербург, наб. Кутузова, 10

*e-mail: zmb@iaaras.ru

Поступила в редакцию 01.08.2022 г.

После доработки 21.09.2022 г.

Принята к публикации 10.11.2022 г.

Рассмотрены основные принципы работы и особенности конструкции разработанной в ИПА РАН широкополосной приемной системы, работающей на ортогональных линейных поляризациях в диапазоне частот 3–16 ГГц с шириной полосы выходных частот 2 ГГц. Приведены результаты измерений параметров приемной системы и характеристик радиотелескопа РТ-13, оснащенного разработанной приемной системой.

DOI: 10.31857/S0032816223020283, EDN: GUDDL U

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наиболее современным инструментом для оперативного определения параметров вращения Земли и решения важнейших глобальных геодезических и геофизических задач является глобальная радиоинтерферометрическая сеть VGOS (VLBI Global Observing System) [1]. Точность определения параметров вращения Земли в значительной степени определяется точностью измерения задержки прихода сигнала космического радиосточника на удаленные радиотелескопы, которая существенно зависит от ширины полос принимаемых сигналов и их расположения. В ходе развития технологии приема сигнала с использованием радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) сформировалось два основных вида приемных систем, обеспечивающих либо многодиапазонный прием сигналов в нескольких частотных каналах, либо широкополосный прием сигналов в непрерывной полосе частот.

Радиоинтерферометр нового поколения на основе радиотелескопов РТ-13 комплекса “Квазар-КВО” оснащается двумя типами приемных систем – либо трехдиапазонной, либо широкополосной – для возможности проведения совместных наблюдений с разными обсерваториями сети VGOS [2]. Главной особенностью трехдиапазонной приемной системы является возможность одновременного приема шумовых сигналов от космических источников в трех диапазонах частот: S (2.2–2.6 ГГц), X (7.0–9.5 ГГц) и Ka (28–34 ГГц) –

в обеих круговых поляризациях [2]. Отличительной особенностью широкополосной системы является возможность обеспечить работу радиотелескопов РТ-13 в непрерывном диапазоне частот 3–16 ГГц, принимая сигналы двух ортогональных линейных поляризаций.

В данной статье представлены результаты разработки широкополосной приемной системы (ШПС), описаны основные принципы ее работы и результаты измерений, полученные в процессе опытной эксплуатации.

**ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ШПС
И ОСОБЕННОСТИ ЕЕ КОНСТРУКЦИИ**

Выбор частотного диапазона широкополосной приемной системы был достаточно подробно описан в работе [4], поэтому в данной статье уделим больше внимания описанию принципов работы ШПС. На рис. 1 показана функциональная схема ШПС, а на рис. 2 приведены блок-схема и внешний вид одного из основных узлов системы – широкополосного криогенного приемного фокального блока (ШКПФБ).

Электромагнитное излучение от космического источника, сфокусированное антенной, через радиопрозрачное вакуумное окно 1 попадает на широкополосный облучатель 2, расположенный внутри криостата 3 ШКПФБ (см. рис. 2). Широкополосный облучатель [5] представляет собой четырехребневый рупор, способный работать в диапазоне 3–16 ГГц и принимать две линейные

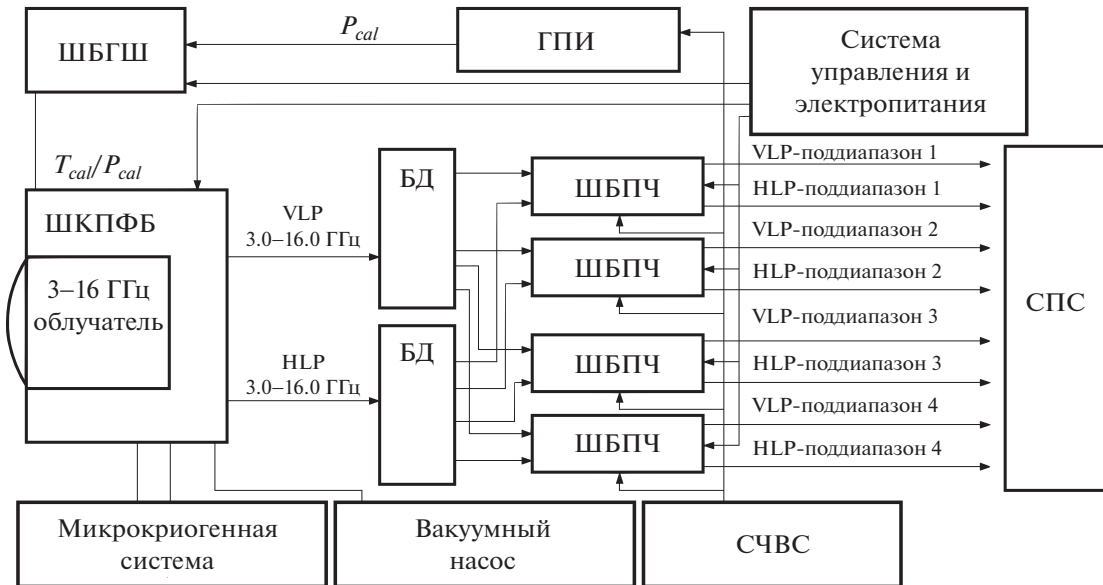


Рис. 1. Функциональная схема широкополосной приемной системы радиотелескопа РТ-13 РСДБ-комплекса “Кварзар-КВО”. ШКПФБ – широкополосный криогенный приемный фокальный блок; ШБГШ – широкополосный блок генератора шума; БД – блок делителей; ШБПЧ – широкополосный блок преобразователей частоты; ГПИ – генератор пикосекундных импульсов фазовой калибровки; СЧВС – система частотно-временной синхронизации; СПС – система преобразования сигналов; VLP и HLP – вертикальная и горизонтальная линейные поляризации; T_{cal} и P_{cal} – сигналы амплитудной и фазовой калибровок.

ортогональные поляризации. Усиление сигналов, разделенных по поляризациям, обеспечивается охлаждаемыми малошумящими усилителями 4. В каждом из каналов, соответствующих вертикальной и горизонтальной поляризациям, перед усилителями установлены направленные ответвители 5, с помощью которых принимаемые сигналы смешиваются с сигналами амплитудной (T_{cal}) и фазовой (P_{cal}) калибровок, поступающими в тракт от широкополосного блока генератора шума (ШБГШ) [6].

В ШКПФБ применены корпусированные широкополосные усилители LNF-LNC4_16C производства фирмы Low Noise Factory. Они построены на основе транзисторных гетероструктур с высокой подвижностью электронов (InP HEMT) по технологии МИС (монокристаллическая интегральная схема). Их шумовая температура не превышает 10 К во всем диапазоне частот 3–16 ГГц [7].

Размещение облучателя внутри ШКПФБ и охлаждение его до криогенных температур значительно снижают собственные шумы системы. Однако установка облучателя в металлический корпус криостата требует применения радиопрозрачного укрытия с минимальным поглощением электромагнитных сигналов во всей полосе принимаемых частот. Принимаемое в ШКПФБ вакуумное окно куполообразной формы выполнено из пенополистирола, покрытого двумя слоями пленок с разными характеристиками: лавсановой (полиэтилентерефталат) толщиной 0.02 мм,

укрытой тефлоновой (ПТФЭ) толщиной 0.1 мм. Такое окно позволяет выдерживать давление атмосферы при величине остаточного давления 10^{-7} Па в полости криостата. Для снижения нагрева тепловым излучением все элементы ШКПФБ (см. рис. 2а) укрыты азотным экраном 6, а со стороны облучателя теплоперехват обеспечивает инфракрасный фильтр, представляющий собой многослойную конструкцию из тефлоновых пленок толщиной 0.1 и 0.2 мм.

Для криостатирования облучателя и малошумящих усилителей применяется двухступенчатый микроохладитель RDK-408S (7) с уровнем охлаждения 10 К на второй ступени, входящий в состав гелиевой микрокриогенной системы с воздушным охлаждением производства SHI Cryogenics. Ее работа основана на замкнутом газовом цикле Джибфорда–МакМагона. Основные рабочие характеристики для микроохладителя: хладпроизводительность на 2-й ступени 5.4 Вт при 10 К, 35 Вт при 45 К на 1-й ступени, минимальная температура криостатирования 7 К.

На первой ступени микроохладителя 8 размещены азотный экран 6 и тепловая развязка СВЧ-кабелей 9, на второй ступени микроохладителя 10 расположены малошумящие усилители, облучатель и направленные ответвители. Вакуумирование полости криостата обеспечивается двухступенчатым вакуумным насосом Value VRD-16 через вакуумный вентиль 11. Остаточное давление составляет $4 \cdot 10^{-2}$ Па. Измерение давления в по-

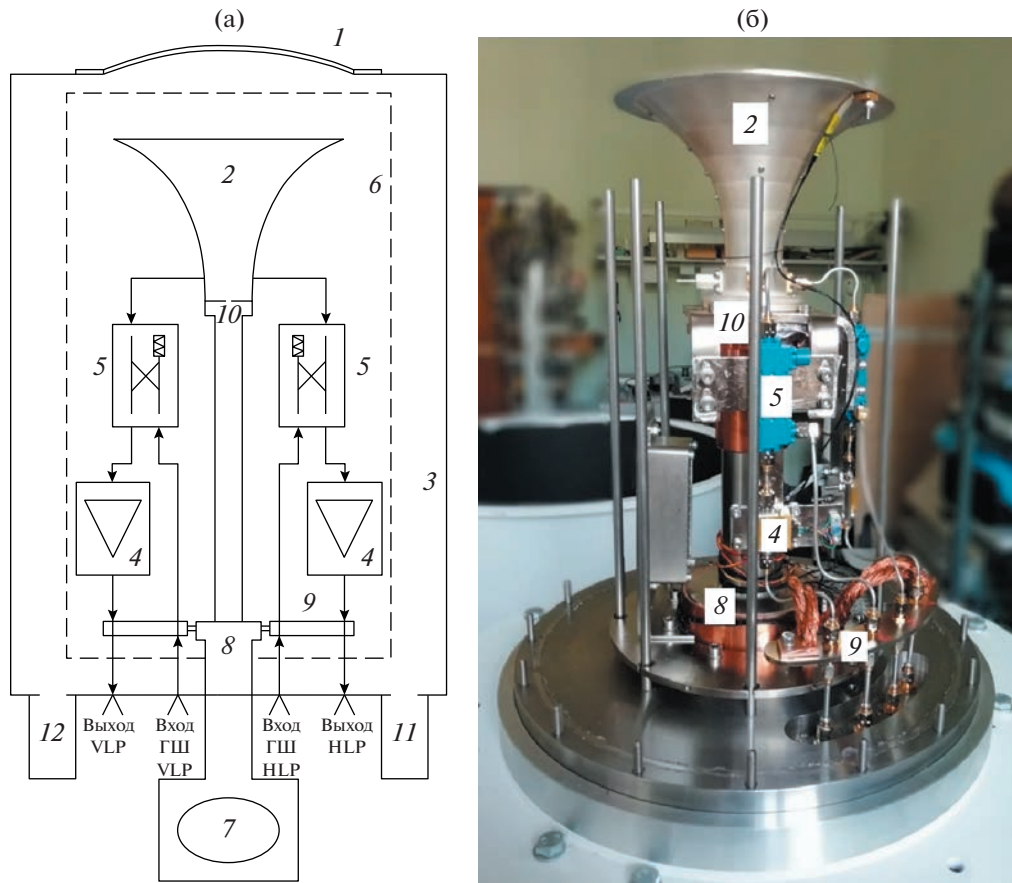


Рис. 2. Широкополосный криогенный приемный фокальный блок: **а** – функциональная схема блока; **б** – внешний вид блока без криостата. 1 – вакуумное окно, 2 – облучатель, 3 – криостат, 4 – охлаждаемые малошумящие усилители, 5 – направленный ответвитель, 6 – азотный экран, 7 – микроохладитель, 8 – первая ступень микроохладителя, 9 – тепловая развязка СВЧ-кабелей, 10 – вторая ступень микроохладителя, 11 – вакуумный вентиль, 12 – вакуумный датчик.

лости криостата осуществляется при помощи вакуумного датчика Пирани 12.

Температура 1-й ступени стабилизируется на уровне не выше 40 К, температура облучателя – не выше 20 К, температура малошумящих усилителей – не выше 15 К. График выхода ШКПФБ на криогенный режим показан на рис. 3. Время выхода ШКПФБ на криогенный режим составило менее 3 ч от запуска вакуумного насоса до стабилизации температуры на основных узлах ШКПФБ. Измерения проводились с помощью диодных датчиков температуры DT-670 производства Lake Shore в соответствующих точках.

Коэффициент усиления ШКПФБ составляет около 38 дБ с неравномерностью не более ± 2 дБ в диапазоне 3–16 ГГц (рис. 4, кривая 1). Шумовая температура ШКПФБ в диапазоне 3–16 ГГц изменяется от 21 К на нижних частотах до 37 К на верхних (рис. 4, кривая 2). Основной вклад в увеличение шумовой температуры ШКПФБ вносят элементы, расположенные перед охлаждаемыми малошумящими усилителями, такие как ответви-

тель, облучатель, соединяющие их отрезки коаксиального кабеля, а также вакуумное окно и инфракрасный фильтр. Имея небольшие собственные потери, они дают существенный прирост эквивалентной шумовой температуры, приведенной к входу элемента, установленного за ними. Например, для частоты 9.5 ГГц собственные шумы охлаждаемого малошумящего усилителя, пересчитанные на вход через ослабление всех элементов, установленных перед ним, увеличатся почти на 3 К. Охлажденный ответвитель с подключенными к нему кабелями имеет вклад в шумовую температуру около 3.4 К. Охлажденный до 20 К облучатель имеет шумовую температуру 2.5 К, а вакуумное окно, находящееся при комнатной температуре, добавляет еще около 3.5 К. Инфракрасный фильтр выполнен из радиопрозрачного материала и имеет очень малую толщину (0.2 мм), соответственно потери сигнала оцениваются в сотые доли децибела. Находясь при температуре порядка 80 К, инфракрасный фильтр вносит несущественный вклад (порядка 0.5 К) в общую шу-

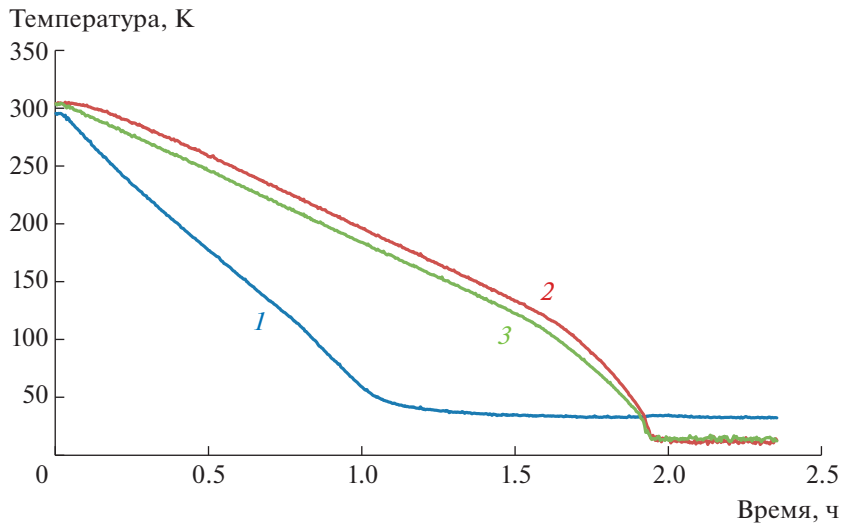


Рис. 3. График выхода широкополосного криогенного приемного фокального блока на криогенный режим: 1 – температура 1-й ступени, 2 – температура облучателя, 3 – температура малошумящих усилителей.

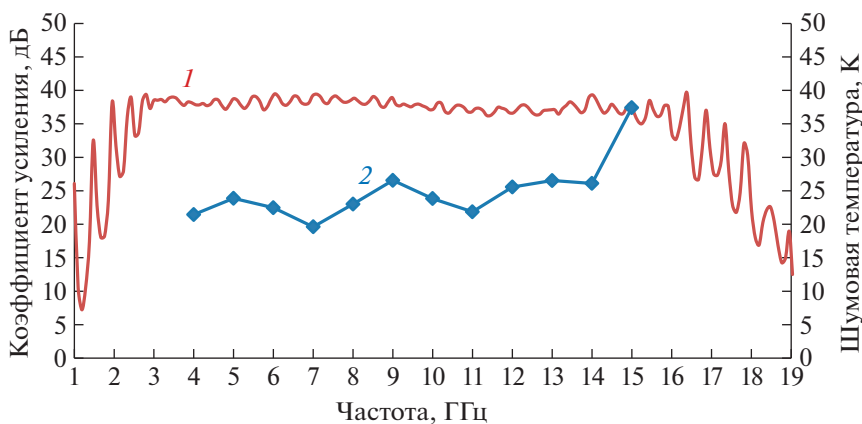


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления (1) и шумовой температуры (2) от частоты для широкополосного криогенного приемного фокального блока.

мовую температуру ШКПФБ. Таким образом, для приведенной частоты расчетное значение шумовой температуры ШКПФБ равно 20.4 К при шумовой температуре охлаждаемого малошумящего усилителя 8 К. С ростом частоты потери в диэлектрике возрастают, что обуславливает тренд на увеличение шумовой температуры. Точка 1-дБ компрессии по входу (уровень входной мощности, при котором коэффициент усиления уменьшается на 1 дБ от своего постоянного значения) для ШКПФБ составляет –52 дБм.

С выхода ШКПФБ сигналы, соответствующие вертикальной и горизонтальной поляризациям, поступают на блоки делителей (БД), где разделяются на четыре равных сигнала (см. рис. 1). Коэффициент передачи БД составляет 5 дБ. Затем сигналы, соответствующие вертикальной и гори-

зонтальной поляризациям, попарно поступают на входы четырех широкополосных блоков преобразователей частоты (ШБПЧ). Функциональная схема блока представлена на рис. 5.

В ШБПЧ осуществляются усиление, фильтрация и двойное преобразование частоты сигналов обеих поляризацій. В каждом ШБПЧ из диапазона 3–16 ГГц входного СВЧ-сигнала выбирается участок полосы частот шириной 2 ГГц (поддиапазон), который преобразуется к промежуточной полосе частот (ПЧ) 0–2 ГГц. При этом первое преобразование в полосу ПЧ₁ осуществляется с помощью перестраиваемого в полосе 27–38 ГГц гетеродина Г₁. Полосно-пропускающий фильтр (ППФ, 22–24 ГГц) задает рабочую полосу и подавляет зеркальный канал, расположенный достаточно далеко. Второе преобразование осу-

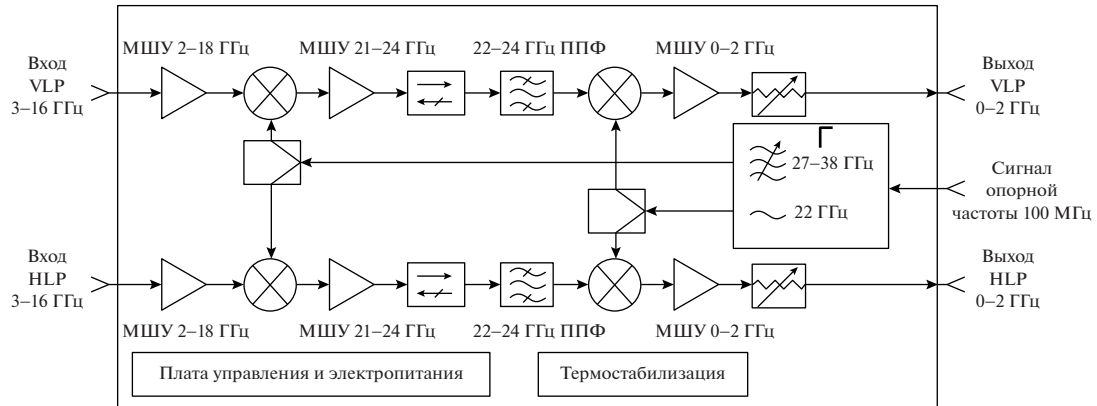


Рис. 5. Функциональная схема широкополосного блока преобразователей частоты. МШУ – малошумящий усилитель; ППФ – полосно-пропускающий фильтр; Г – гетеродин; VLP и HLP – вертикальная и горизонтальная линейные поляризации.

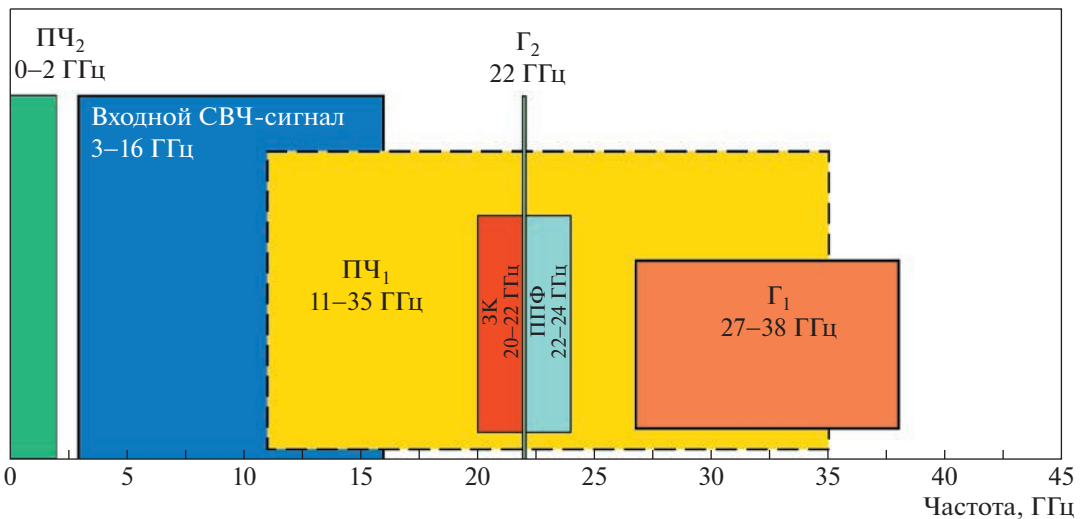


Рис. 6. Частотные преобразования широкополосного блока преобразователей частоты. Γ_1 – перестраиваемый гетеродин 27–38 ГГц; Γ_2 – фиксированный гетеродин 22 ГГц; ППФ – полосно-пропускающий фильтр 22–24 ГГц; ПЧ₁ и ПЧ₂ – промежуточная частота после первого и второго преобразования соответственно; ЗК – зеркальный канал.

шествляется на фиксированной частоте 22 ГГц гетеродина Γ_2 и обеспечивает преобразование в необходимую полосу ПЧ₂ 0–2 ГГц (см. рис. 6).

Коэффициент усиления ШБПЧ составляет не менее 45 дБ во всей полосе входных частот 3–16 ГГц (рис. 7). Точка 1-дБ компрессии по выходу ШБПЧ составляет 13 дБм. Для увеличения динамического диапазона в ШБПЧ предусмотрена регулировка коэффициента усиления с помощью аттенюатора в диапазоне 0–31 дБ с шагом 1 дБ. Зеркальный канал и комбинационные составляющие ослабляются более чем на 35 дБ. Шумовая температура ШБПЧ не превышает 2000 К (во всем рабочем диапазоне входных частот 3–16 ГГц), что, с учетом коэффициентов усиления ШКПФБ (38 дБ) и БД (5 дБ), дает вклад не более

0.1 К в шумовую температуру ШПС. Среднеквадратичное отклонение вносимых фазовых шумов ШБПЧ в диапазоне отсроек 10 Гц–10 МГц не превышает 2.5° , что даст снижение отношения сигнал/шум корреляционного отклика радиointерферометра не более 0.1%.

Широкополосный блок генератора шума обеспечивает формирование сигналов амплитудной и фазовой калибровок в полосе частот 3–16 ГГц. Источником амплитудного калибровочного сигнала служит генератор шума на лавинно-протонном диоде M41318 производства НПП “Исток”. В тракте ШБГШ размещен направленный ответвитель, через который происходит ввод внешнего сигнала фазовой калибровки от генератора пикосекундных импульсов (ГПИ). Амплиту-

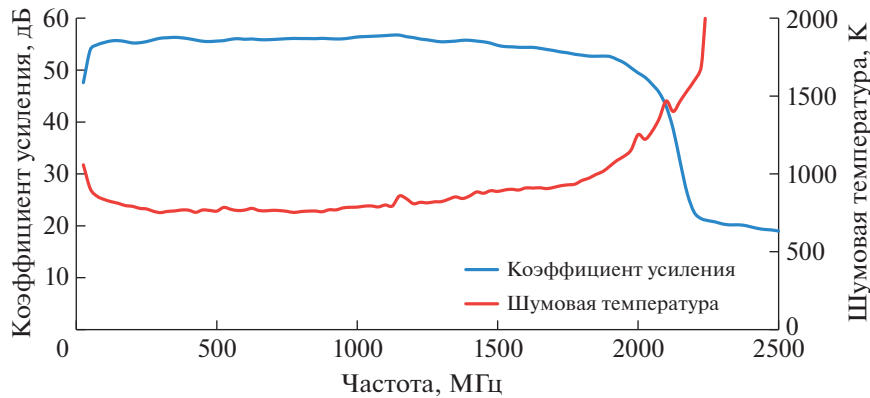


Рис. 7. Зависимость коэффициента усиления и шумовой температуры от частоты для широкополосного блока преобразователей частоты (для полосы входных частот 8–10 ГГц).

ды сигналов фазовой и амплитудной калибровок регулируются цифровыми 5-разрядными аттенюаторами. С помощью широкополосного резистивного делителя сигнал разделяется на два идентичных канала, соответственно для обеспечения калибровки VLP и HLP канала ШПС. Спектральная плотность мощности шума сигнала амплитудной калибровки составляет не менее 7000 К, что, с учетом переходного ослабления направленного ответвителя (20 дБ), обеспечивает уровень калибровочного сигнала не менее 70 К на входе ШКПФБ (при нулевом ослаблении аттенюатора).

Синхронизация гетеродинов приемных каналов осуществляется от системы частотно-временной синхронизации (СЧВС) РСДБ-радиотелескопа. На выходе ШПС имеет 8 сигналов ПЧ – по

четыре для горизонтальной и вертикальной линейных поляризаций (см. рис. 1). Эти сигналы поступают на систему преобразования сигналов (СПС) [8] для последующей регистрации. Основные параметры широкополосной приемной системы РТ-13 приведены в табл. 1.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Центральным элементом системы управления и электропитания является концентратор Ethernet. Он объединяет все блоки ШПС в единое информационное пространство, объединенное с локальной вычислительной сетью радиотелескопа РТ-13. Управление ШПС и контроль параметров ее работы осуществляются с помощью специального программного обеспечения, расположенного на центральном компьютере управления РТ-13.

Блок питания обеспечивает ШБПЧ и ШБГШ первичным питающим напряжением +24 В, а также выполняет ряд функций управления и диагностики. Каждый выход для питания может быть включен или выключен независимо от остальных. По каждому выходу ведется контроль тока потребления. Блок питания имеет дополнительный интерфейс для обмена данными с промышленным измерителем вакуума. Кроме того, блок питания осуществляет контроль температуры и влажности воздуха в полости ШПС с помощью внешнего датчика, а также управление вакуумным клапаном.

Блок питания входных усилителей осуществляет питание блоков делителей и охлаждаемых малошумящих усилителей, расположенных в ШКПФБ. Также блок питания входных усилителей осуществляет контроль температур ключевых узлов ШКПФБ: облучателя, малошумящих усилителей и первой ступени микроохладителя.

Таблица 1. Основные параметры широкополосной приемной системы РТ-13

Параметр	Значение
Рабочий диапазон входных частот, ГГц	3–16
Рабочий диапазон выходных частот, ГГц	0.05–2.05
Поляризации	2 линейные ортогональные
Количество каналов	8 (по 4 для каждой поляризации)
Шумовая температура (средняя), К	25
Коэффициент усиления, дБ	93
Диапазон регулировки коэффициента усиления, дБ	31
Точка 1-дБ компрессии по выходу, дБм	13
Температура, К, облучателя и малошумящих усилителей не более	20

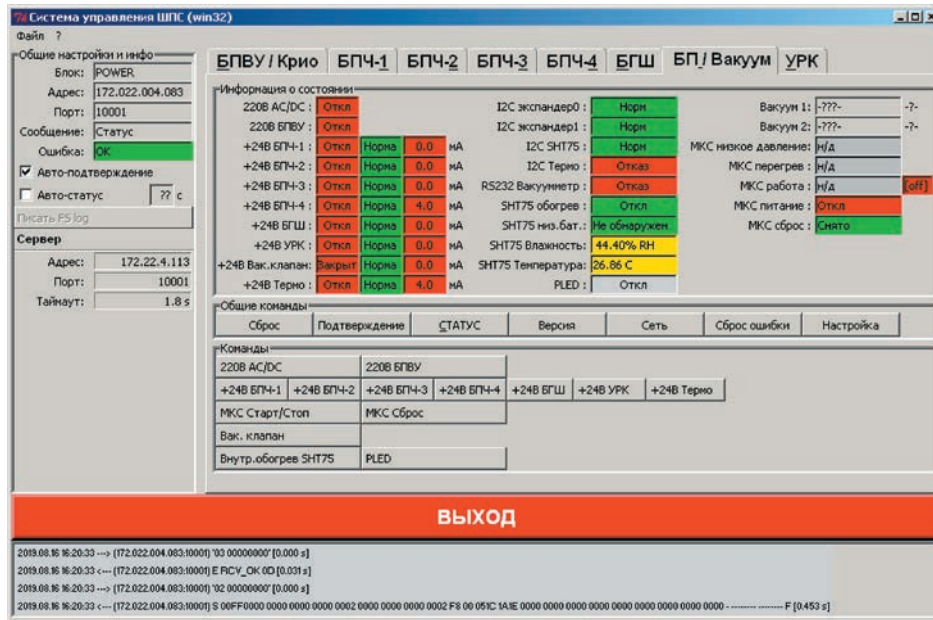


Рис. 8. Окно программы управления широкополосной приемной системы.

Управление и питание блоков обеспечивается платами системы управления и электропитания, расположенными в каждом блоке. Платы имеют интерфейс Ethernet и ряд источников питания для обеспечения работы блоков. Например, изменение частоты гетеродина в ШБПЧ осуществляется путем обмена данными между платой и гетеродином по интерфейсу SPI. Также в блоках расположены датчики для контроля температуры основных СВЧ-узлов.

Для упорядочивания обмена данными между устройствами ШПС и центральным компьютером управления РТ-13 разработан протокол обмена данными. Аппаратная идентификация устройств осуществляется средствами контроллеров Ethernet автоматически по MAC-адресам с помощью протокола ARP. Обмен информацией между устройствами осуществляется по протоколу UDP пользовательской надстройкой, обеспечивающей гарантированную доставку сообщений с контролем их целостности. На программном уровне устройства идентифицируются по их уникальным IP-адресам.

Для управления ШПС и контроля работы ее узлов используется программа управления ШПС. Она написана на языке Python 2.7 с использованием библиотеки для создания графических интерфейсов TkInter.

Программа имеет интуитивно понятный графический интерфейс (см. рис. 8). Каждая вкладка элемента notebook соответствует блоку ШПС. С помощью кнопок и полей ввода оператор может передавать команды блокам ШПС и изменять такие их настройки, как частота гетеродина, ослаб-

ление аттенуаторов и т.п. Ответные сообщения блоков расшифровываются и выводятся на экран в виде индикаторов, сообщающих состояние узлов блоков ШПС и измеренные датчиками значения различных параметров. Для удобства оператора введена простая система цветовой маркировки индикаторов, которая помогает быстро обнаруживать отказы узлов и выход параметров работы за пределы допустимых значений.

Наличие в составе системы управления и электропитания большого количества разнообразных датчиков, контролирующих параметры работы узлов ШПС, обуславливает ее широкие возможности по диагностике неисправностей.

Одной из наиболее распространенных неисправностей, возникающих в радиоэлектронной аппаратуре, является обрыв, возникающий в цепях вследствие той или иной причины. Следствием обрыва в одном из элементов узла является уменьшение потребления тока этим узлом. В системе управления и электропитания широко используются датчики тока. Они определяют как потребление тока блоками ШПС в целом, так и потребление отдельных узлов этих блоков. Благодаря этому можно установить не только неисправный блок, но и какой узел неисправен в пределах одного блока.

ШПС предполагается использовать в обсерваториях РСДБ-сети "Квазар-КВО", разнесенных друг от друга на расстояния в тысячи километров. Исходя из этого, важным условием является возможность дистанционного контроля параметров и диагностики неисправностей ШПС, в том числе с использованием сети Internet. Это позволяет

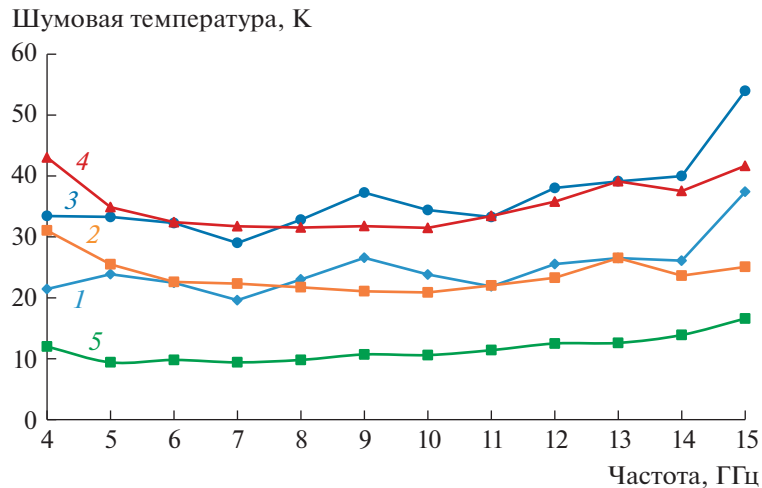


Рис. 9. Результаты измерений шумовой температуры PT-13 с широкополосной приемной системой (зенит): 1 – $T_{пр}$, HLP; 2 – $T_{пр}$, VLP; 3 – $T_{сист}$, HLP; 4 – $T_{сист}$, VLP; 5 – расчет T_a . HLP и VLP – каналы горизонтальной и вертикальной линейных поляризаций.

экономить значительные финансовые и временные ресурсы, которые специалисты затратили бы при необходимости непосредственной диагностики аппаратуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ШПС НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ РТ-13

ШПС была установлена и испытана на радиотелескопе РТ-13 обсерватории “Светлое”. Измерены параметры РТ-13 с ШПС в диапазоне 3–16 ГГц путем перестройки гетеродина с шагом 1 ГГц, ширина полосы выходных частот – 2 ГГц. Первая точка соответствует полосе 3–5 ГГц, а последняя – 14–16 ГГц, на графиках результатов измерений приведены центральные частоты полос. Шумовая температура $T_{пр}$ ШПС и сигнал амплитудной калибровки T_{cal} были измерены по методу двух отсчетов [9]. В качестве “холодной” нагрузки использовалась антенная система установленного в зенит радиотелескопа, а в качестве “теплой” – радиопоглощающий материал, помещенный на поверхность вакуумного окна криостата ШПС. Температура радиопоглощающего материала контролировалась с помощью пирометра. Шумовая температура антенны T_a РТ-13 в зените рассчитывалась по методике, приведенной в работе [10], как интеграл по сфере от произведения расчетной нормированной диаграммы направленности антенны и яркостных температур грунта и неба на основе метеоданных (температура, влажность, давление). Шумовая температура системы радиотелескопа $T_{сист} = T_{пр} + T_a$ на заданном угле места РТ-13 определялась по измеренному значению калибровки T_{cal} . На рис. 9 представлены расчет T_a в зените (график 5), результаты измерений

шумовой температуры $T_{пр}$ ШПС для каналов горизонтальной HLP (график 1) и вертикальной VLP (график 2) поляризаций, результаты измерений шумовой температуры системы $T_{сист}$ для каналов HLP и VLP (графики 3 и 4) в зените. Шумовая температура $T_{пр}$ в большей части диапазона 5–14 ГГц не превышает 27 К, а в диапазоне 3–16 ГГц – 37 К. Шумовая температура $T_{сист}$ в диапазоне 5–14 ГГц не превышает 40 К, а в диапазоне 3–16 ГГц – 54 К.

Эквивалентная плотность потока системы (SEFD) и коэффициент использования поверхности антенны (КИП) определялись по сигналу радиосточника CasA, согласно формулам, приведенным в работе [11]. Результаты измерений представлены на рис. 10 и 11. SEFD РТ-13 с ШПС (см. рис. 10) в большей части диапазона 5–14 ГГц не превышает 1700 Ян, а в диапазоне 3–16 ГГц – 2100 Ян. КИП РТ-13 с ШПС (см. рис. 11) составляет 0.5–0.7 (ниже, чем с трехдиапазонной приемной системой (0.7–0.8), [11]), что связано с особенностями широкополосного облучателя. Данные расчета КИП 13-метрового радиотелескопа с аналогичным облучателем, Quad-Ridged Horn (QRFH), приведенные в работе [12], представлены графиком 3 на рис. 11. Как видно из рисунка, КИП соответствует расчетному. Это свидетельствует о достоверности независимых измерений шумовых температур и SEFD радиотелескопа, из которых рассчитывается КИП. Ширина диаграммы направленности РТ-13 соответствует расчетной и меняется от 22' до 5' при изменении центральной частоты с 3.5 до 15.5 ГГц.

Стоит отметить, что добиться предельных параметров во всем широком диапазоне частот приемной системы крайне сложно. Неблагоприятная

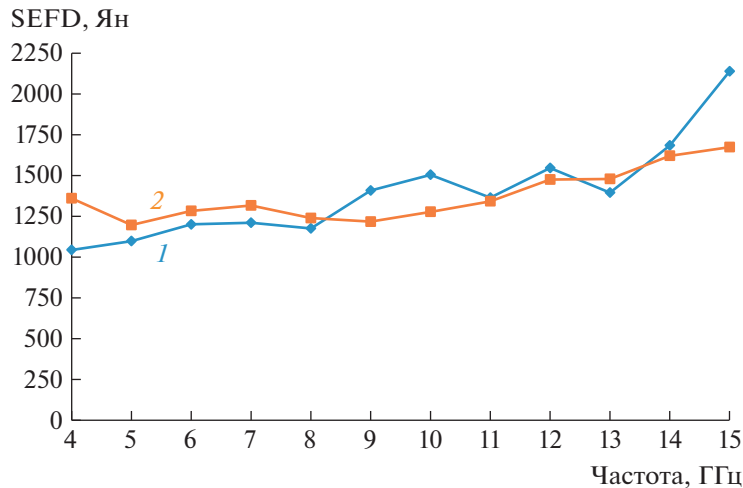


Рис. 10. Результаты измерений системной эквивалентной плотности потока RT-13 с широкополосной приемной системой по источнику CasA (угол места 55°): 1 – HLP; 2 – VLP. HLP и VLP – каналы горизонтальной и вертикальной линейных поляризаций.

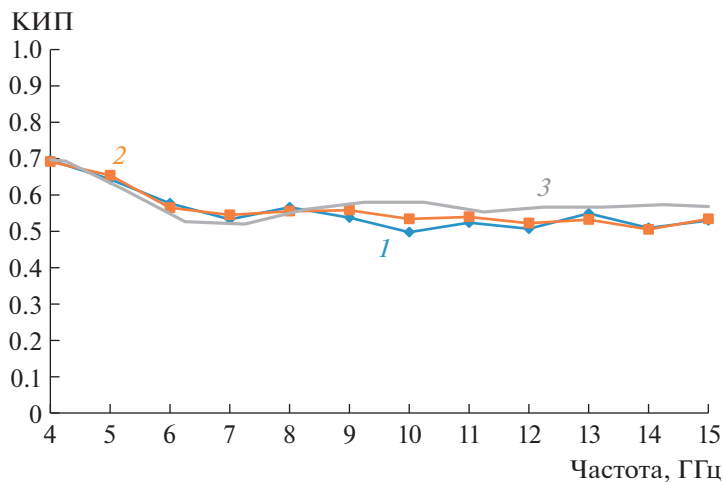


Рис. 11. Результаты измерений коэффициента использования поверхности антенны RT-13 с широкополосной приемной системой по источнику CasA (угол места 55°): 1 – HLP; 2 – VLP; 3 – расчет Onsala. HLP и VLP – каналы горизонтальной и вертикальной линейных поляризаций.

помеховая обстановка, а также конструктивные особенности широкополосной приемной системы приводят к ухудшению параметров на краях рабочего диапазона частот. В табл. 2 обобщены данные измерений параметров RT-13 с широкополосной приемной системой для полос 5–14 и 3–16 ГГц. Набор параметров для полосы 5–14 ГГц характеризует качество приемной системы, а для полосы 3–16 ГГц позволяет оценить ухудшение параметров при переходе к более широкой полосе, обусловленное конструктивными и технологическими трудностями работы в широкой полосе частот.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ИПА РАН разработана, изготовлена и испытана широкополосная приемная система, способная осуществлять прием сигналов от космических источников в двух ортогональных линейных поляризациях в диапазоне частот 3–16 ГГц с шириной полосы выходных частот 2 ГГц. В 2020 году ШПС была установлена на радиотелескоп RT-13 в обсерватории “Светлое”. Возможность работы ШПС в поддиапазонах шириной 2 ГГц в пределах входной полосы удобна для оценки характеристик антенной системы RT-13 и исследования излучения космических радиоисточников.

Таблица 2. Результаты измерений параметров радиотелескопа РТ-13 с широкополосной приемной системой

Характеристика	Значение в диапазонах 5–14 ГГц (3–16 ГГц)	
	HLP	VLP
Поляризация		
Шумовая температура приемника, К	27 (37)	27 (31)
Шумовая температура системы, К	40 (54)	39 (43)
Эквивалентная плотность потока системы, Ян	1700 (2100)	1620 (1680)
Коэффициент использования поверхности антенны	0.5–0.7	0.5–0.7

В обсерватории “Светлое” проведены радиометрические измерения параметров широкополосной приемной системы в составе радиотелескопа РТ-13 во всем рабочем диапазоне частот 3–16 ГГц. Шумовая температура приемной системы в большей части диапазона 5–14 ГГц не превышает 27 К, а SEFD радиотелескопа РТ-13 с приемной системой — 1700 Ян. На краях диапазона 3–16 ГГц параметры ухудшаются до 37 К и 2100 Ян соответственно.

Полученные результаты позволяют говорить о возможности проведения успешных радиоинтерферометрических наблюдений на радиотелескопах РТ-13 в составе РСДБ-комплекса “Квазар-КВО” в диапазоне частот 3–16 ГГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Petrachenko B., Niell A., Behrend D., Corey B., Böhm J., Charlot P., Collioud A., Gipson J., Haas R., Hobiger T., Koyama Y., MacMillan D., Malkin Z., Nilsson T., Pany A. et al.* // Progress Report of the VLBI2010 Committee. NASA Technical Memorandum. NASA/TM-2009-214180. 2009.
- Инатов А.В.* // УФН. 2013. Т. 183. № 7. С. 769–777. <https://doi.org/10.3367/UFN.0183.201307i.0769>
- Chernov V., Evstigneev A., Evstigneeva O., Ivanov D., Ipatov A., Ipatova I., Khvostov E., Lavrov A., Mardyshev V., Pozdnyakov I., Vekshin Y., Zotov M.* // Труды ИПА РАН. 2017. Вып. 41. С. 79.
- Евстигнеев А.А., Векшин Ю.В., Евстигнеева О.Г., Зотов М.Б., Лавров А.С., Мардышкин В.В., Поздняков И.А., Хвостов Е.Ю., Шахнабиев И.В.* // Труды ИПА РАН. 2018. Вып. 46. С. 50. <https://doi.org/10.32876/ApplAstron.46.50-56>
- Роев А.А., Чернов В.К.* // Труды ИПА РАН. 2015. Вып. 32. С. 59.
- Evstigneev A., Evstigneeva O., Khvostov E., Lavrov A., Mardyshev V., Pozdnyakov I.* // Труды ИПА РАН. 2017. Вып. 41. С. 49.
- https://lownoisefactory.com/wp-content/uploads/2022/03/Inf-lnc4_16c.pdf
- Кольцов Н.Е., Маршалов Д.А., Носов Е.В., Федотов Л.В.* // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2014. № 1. С. 34.
- ГОСТ 8.475-82. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Стандартный коэффициент шума и эквивалентная шумовая температура усилительных и приемных устройств. Методика выполнения измерений.
- Чернов В.К.* // Тезисы докладов Восьмой всероссийской конференции “Фундаментальное и прикладное координатно-временное обеспечение” (КВНО-2019). 15–19 апреля 2019 г. СПб.: ИПА РАН, 2019. С. 192.
- Vekshin Yu., Chernov V., Ivanov D., Kharinov M., Khvostov E., Mardyshev V., Mikhailov A.* // Труды ИПА РАН. 2017. Вып. 41. С. 135.
- Flygare J., Pantaleev M., Conway J., Lindqvist M., Helldner L., Dahlgren M., Hass R., Forkman P.* // IVS-2018 General Meeting Proceedings. NASA/CP-2019-219039. 2019. P. 4246.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 53.084:57.087

ЛЮМИНОМЕТР. ПРИНЦИП РАБОТЫ, УСТРОЙСТВО И РЕКОМЕНДАЦИИ ПРИ СБОРКЕ

© 2023 г. Р. В. Малышев^{а,*}, Е. В. Силина^{а,**}

^аИнститут биологии Коми научного центра УрО РАН
Россия, 167982, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28

*e-mail: malrus@ib.komisc.ru

**e-mail: silina@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 13.07.2022 г.

После доработки 14.10.2022 г.

Принята к публикации 10.11.2022 г.

Описано устройство и принцип работы люминометра, предназначенного для определения концентрации пероксида водорода в водных растворах посредством измерения интенсивности светового потока. Обозначены ключевые моменты, на которые следует обратить внимание при изготовлении прибора. Описаны результаты лабораторных испытаний, согласно которым в диапазоне концентраций пероксида водорода от 0.12 до $1.95 \cdot 10^{-6}$ М сохраняется линейная зависимость ($r^2 = 0.97$) интенсивности сигнала от концентрации H_2O_2 . Представлены результаты измерения содержания пероксида водорода в листьях пшеницы в процессе деэтиоляции.

DOI: 10.31857/S0032816223020234, EDN: GTQJWI

ВВЕДЕНИЕ

Хемилюминесценция (Хл) – процесс излучения квантов света в видимом диапазоне при протекании химической реакции. В основе этого явления лежит образование продукта химического взаимодействия, один из электронов которого находится на более высоком энергетическом уровне и стремится вернуться на основной энергетический уровень, реализуя избыточную энергию в виде светового излучения. Процесс Хл имеет важное прикладное значение и используется для наблюдения за сложными химическими и биологическими процессами путем регистрации излучаемого света.

В 40-х годах XX столетия немецкие ученые В. Лангенбек и У. Руге впервые использовали процесс Хл для определения содержания пероксида водорода (H_2O_2) в водных растворах [1]. Метод основан на реакции взаимодействия люминола (5-амино-2,3-дигидро-1,4-фталазиндион) и H_2O_2 в присутствии катализатора. Авторы наблюдали свечение, которое оценивали визуально в темной комнате. В настоящее время регистрацию Хл проводят с помощью специальных приборов – люминометров. Данное оборудование применяется достаточно широко и характеризуется высокой чувствительностью и исключительной специфичностью [2–5].

На рынке представлен широкий ассортимент люминометров как узкоспециализированных:

3M Clean-Trace NG (3M PELTOR, Великобритания), EnSURE™ Touch (HYGIENA, Великобритания), Lumat LB 9508 (“Berthold technologies”, Германия), так и более универсальных, например Lum-100 (МГУ, Россия), AutoLumatPlus LB 953 (“Berthold Technologies”, Германия). Следует отметить, что данное оборудование относится к дорогостоящим. Например, цена люминометра Lumat LB 9508 находится в диапазоне от 0.5 до 1.3 млн рублей. Зачастую приобретение прибора из каталога является затруднительным, в результате исследователь лишается возможности получения оригинальных данных и вынужден применять менее селективные методы. Выходом из сложившейся ситуации является самостоятельное изготовление люминометра. Однако, кроме привлечения квалифицированных специалистов, необходима подробная информация об устройстве и изготовлении люминометра. К сожалению, в настоящее время в свободном доступе данная литература отсутствует.

В настоящей работе представлены рекомендации по изготовлению люминометра, описаны его конструкция и результаты лабораторных испытаний.

КОНСТРУКЦИЯ ПРИБОРА И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СБОРКЕ

Предлагаемая нами конструкция люминометра реализована в виде единого модуля (рис. 1), ра-

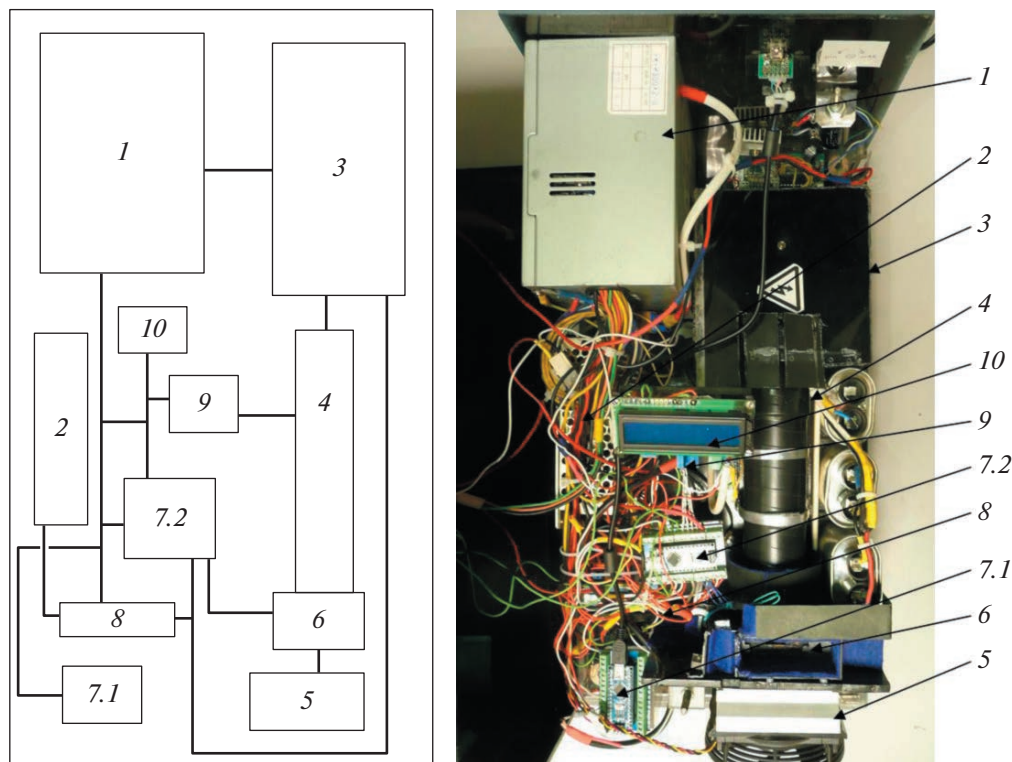


Рис. 1. Блок-схема и внутреннее расположение блоков люминометра (вид сверху). 1 – источник питания основных компонентов схемы; 2 – источник питания термостата; 3 – высоковольтный источник питания ФЭУ; 4 – ФЭУ; 5 – термостат; 6 – кюветодержатель; 7.1 – ведущий микроконтроллер (master); 7.2 – ведомый микроконтроллер (slave); 8 – блок реле; 9 – блок усилителя сигнала с ФЭУ; 10 – информационное табло (LCD-дисплей 1602).

бота которого обеспечивается следующими функционально объединенными блоками.

Детектор малых световых потоков. Ключевым элементом люминометра является детектор светового излучения – фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), реализованный на основе ФЭУ-39А (Россия) и резисторного делителя (рис. 2). Выбор

данной модели ФЭУ связан с оптимальным сочетанием габаритных размеров, стабильности работы, высокой световой анодной чувствительности ($S_a = 1000 \text{ А/лм}$) и низкого соотношения шум/сигнал.

Высоковольтный источник питания ФЭУ. Для обеспечения работы ФЭУ нами выбран источник постоянного высокого напряжения, состоящий из

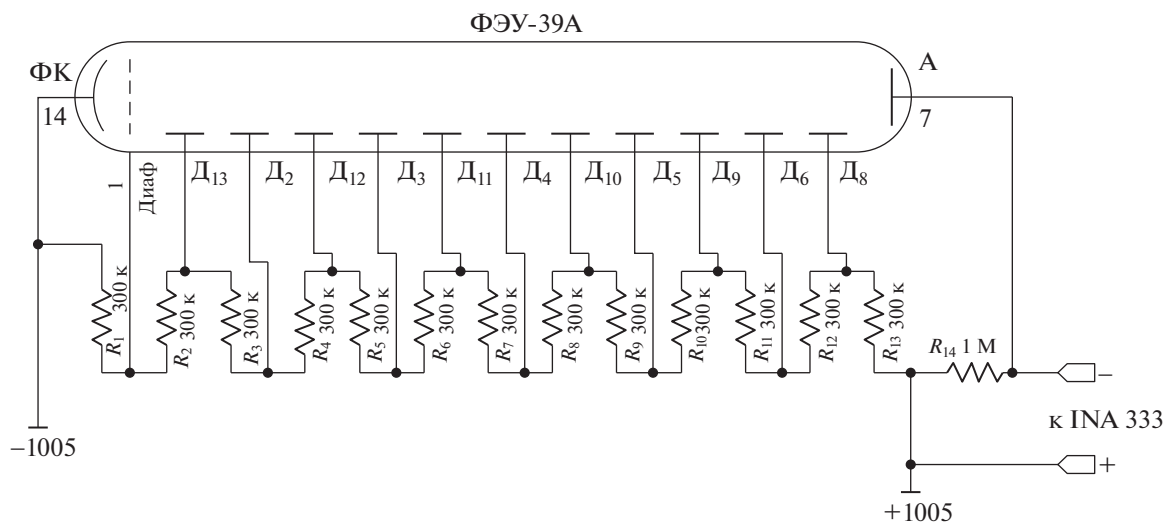


Рис. 2. Принципиальная схема подключения резисторного делителя к ФЭУ-39А. ФК – фотокатод, Д – диод, А – анод.

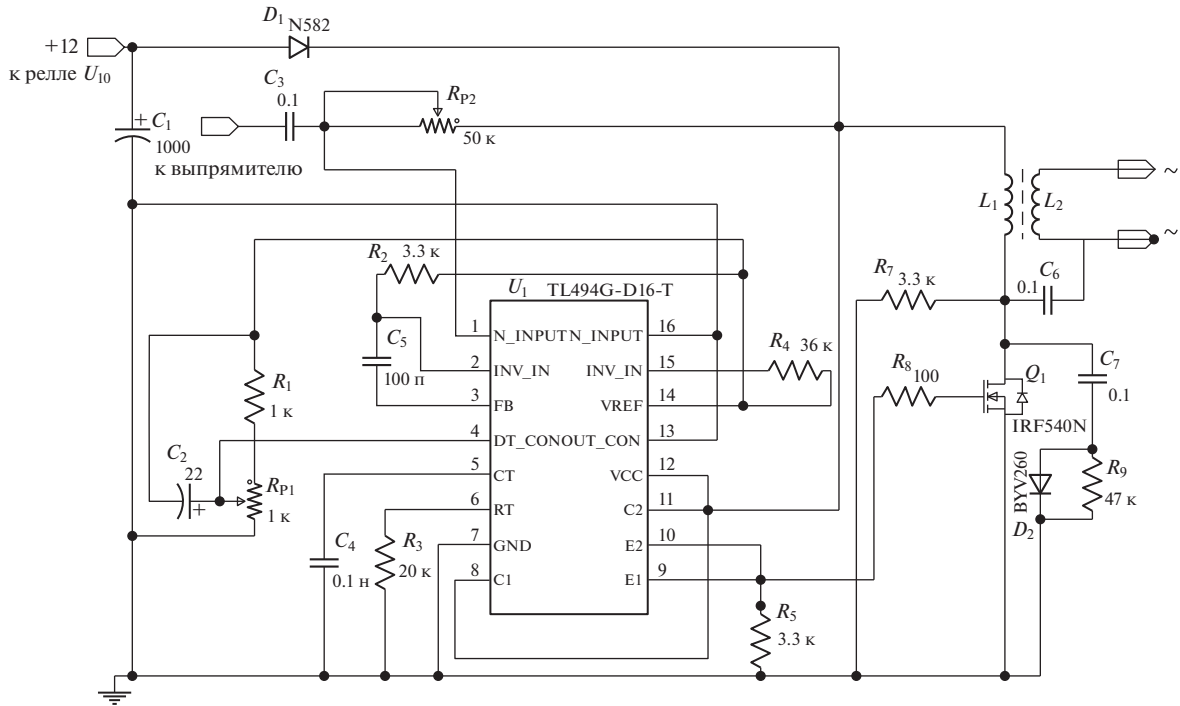


Рис. 3. Принципиальная схема высоковольтного источника питания.

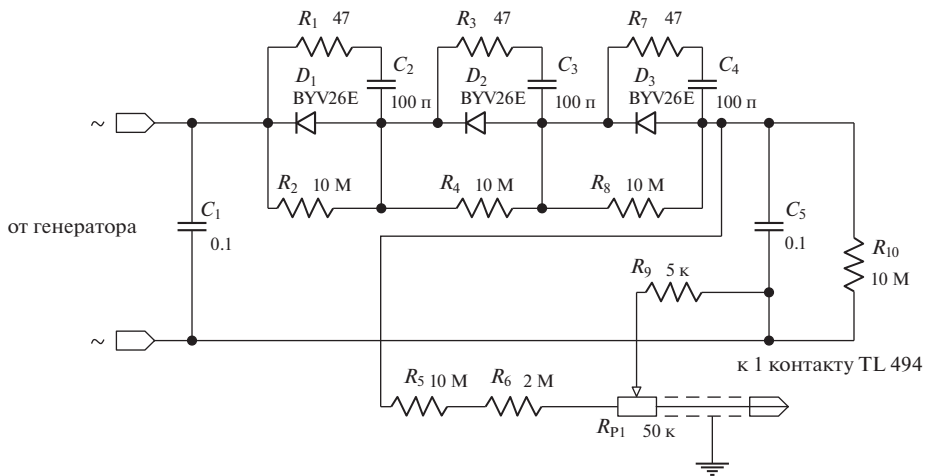


Рис. 4. Принципиальная схема высоковольтного выпрямителя.

источника высокого переменного напряжения, выпрямителя и удвоителя напряжения. Источник высокого переменного напряжения собран по схеме обратного импульсного источника питания с обратной связью на микросхеме TL494 (рис. 3). Высокочастотный трансформатор изготовлен на основе ферритового сердечника (ХЕРЕХ Е 140166 хРВ-5 class 130 (b)). Для повышения стабильности напряжения питания ФЭУ в высоковольтном блоке питания реализована обратная связь посредством контроля высокого напряжения на выходе высо-

ковольтного выпрямителя (рис. 4). Настройка обратной связи осуществляется подстроечными резисторами (R_{P2} на рис. 3 и R_{P1} , на рис. 4). Для снижения нагрузки на высокочастотный трансформатор и повышения надежности работы импульсного блока в схеме использован удвоитель напряжения, обеспечивающий питание ФЭУ (рис. 5). Данная конструкция высоковольтного источника питания позволяет поддерживать напряжение питания ФЭУ в заданных пределах 950 ± 10 В.

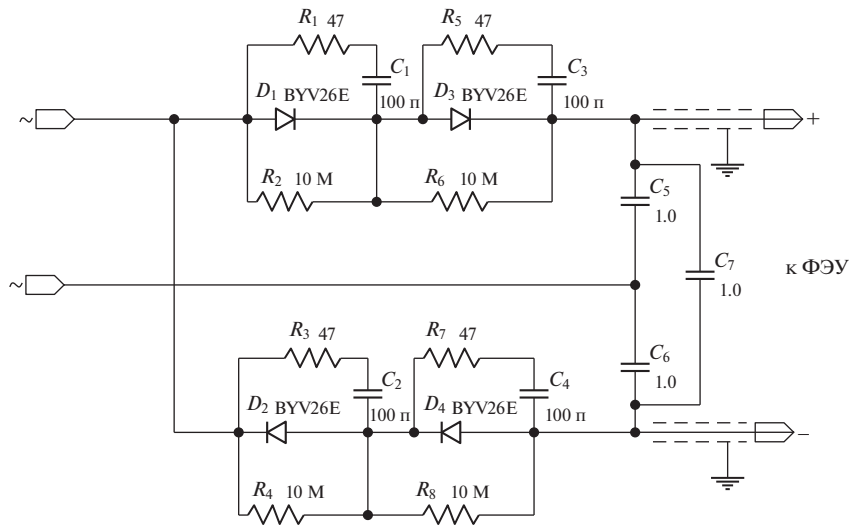


Рис. 5. Принципиальная схема высоковольтного удвоителя напряжения.

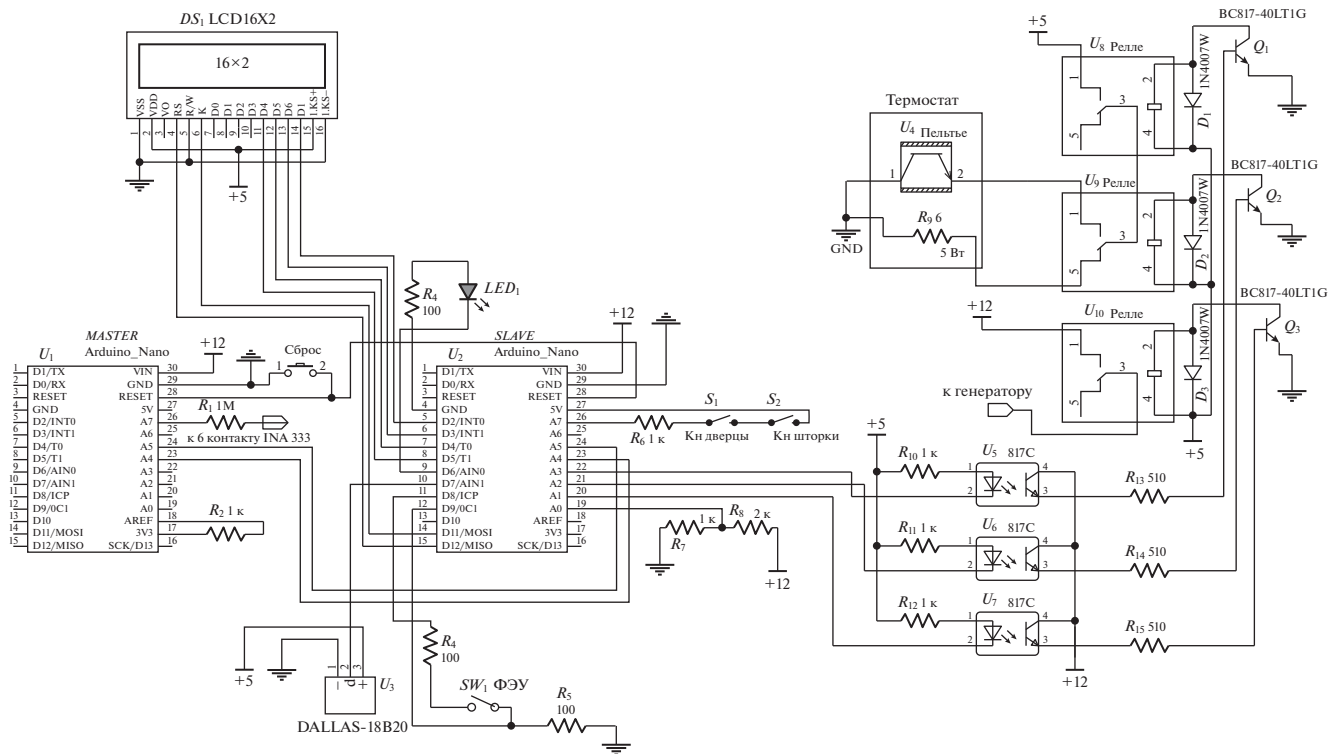


Рис. 6. Принципиальная схема блока микроконтроллеров, блока реле и термостата.

Источник питания основных компонентов схемы предназначен для обеспечения работы блока микроконтроллеров, блока усилителя сигнала, блока реле, LCD-дисплея и высоковольтного источника питания ФЭУ. Реализован данный источник питания на основе блока питания персонального компьютера (ПК) мощностью 300 Вт. Применение блока питания от ПК наиболее рационально, поскольку это решение удовлетворя-

ет таким требованиям, как компактность, мощность, наличие шин питания 5 и 12 В.

Источник питания термостата. В качестве источника питания термостата использован импульсный блок NES-50-5 (“Mean well”, Тайвань).

Кюветодержатель выполнен из медных пластин, к которым жестко прикреплены элемент Пельтье и керамический резистор.

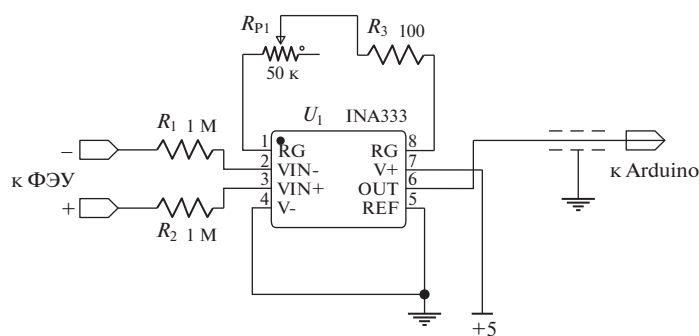


Рис. 7. Принципиальная схема усилителя сигнала ФЭУ на базе INA 333.

Блок микроконтроллеров состоит из двух плат “Arduino nano” (Китай) (рис. 6). Плата ведущего микроконтроллера (master) оцифровывает и передает поступивший сигнал в ПК по USB-интерфейсу. Кроме оцифровки и передачи сигнала, в задачи ведущего микроконтроллера входит прием от ПК и передача на ведомый микроконтроллер (slave) значений температуры термостата. Плата ведомого микроконтроллера отвечает за контроль параметров прибора и его аварийное отключение.

Блок усилителя сигнала. В качестве усилителя использован инструментальный усилитель INA 333 (“Texas Instruments”, США, рис. 7).

Блок реле состоит из трех нормально замкнутых 1-канальных модулей реле “Arduino” (U8, U9, U10 на рис. 6) и необходим как коммуникационное устройство для управления нагрузкой (блок питания термостата, термостат, высоковольтный источник питания).

Информационное табло. Использован LCD-дисплей (модель 1602, Китай), основная функция которого – информирование оператора о параметрах работы прибора.

Термостат используется для поддержания заданного температурного режима в кювете. Он содержит следующие компоненты: кюветодержатель, охладитель – элемент Пельтье (U4 на рис. 6), нагреватель – керамический резистор (R_9 на рис. 6).

В процессе разработки конструкции и принятия решения о расположении блоков следует, в первую очередь, отталкиваться от расположения центральной части прибора: термостата, кюветодержателя, детектора. В нашем случае данные компоненты расположены горизонтально в одну линию. Такое расположение блоков позволяет улучшить эргономику прибора (отсутствие выступающих частей), торцевое расположение ФЭУ по отношению к позиции кюветы в кюветодержателе нивелирует риск попадания рабочих растворов на высоковольтную часть детектора.

Близкое расположение блоков неминуемо повышает их взаимовлияние, в связи с этим важно

обеспечить защиту от помех. Реализация помехозащищенности заключается в экранировке проводников цифровых и аналоговых сигналов, а также в светозащите детектора. Дополнительно для защиты ФЭУ в приборе необходимо применять механическую “шторку”, с помощью которой оператор закрывает торцевую фотоприемную часть ФЭУ перед открытием дверцы. Шторка является важным элементом схемы прибора, благодаря которому обеспечивается непрерывность работы ФЭУ.

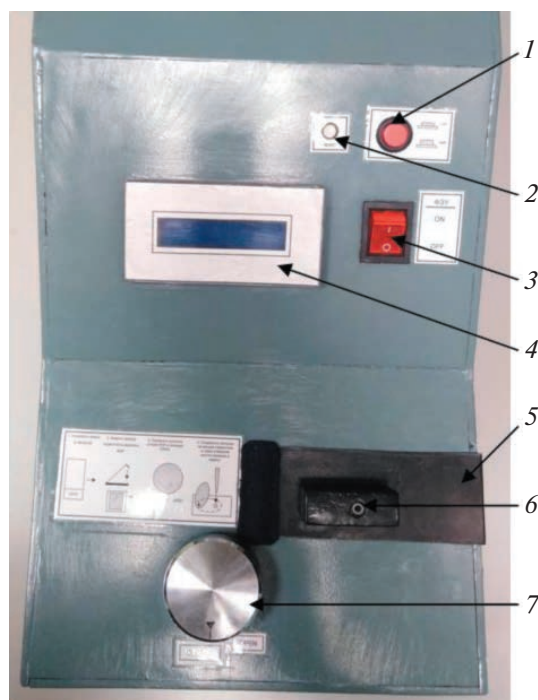


Рис. 8. Внешний вид люминометра (вид сверху). 1 – кнопка включения прибора, 2 – кнопка перезагрузки микроконтроллеров, 3 – переключатель включения ФЭУ, 4 – информационное табло (LCD-дисплей), 5 – крышка блока кюветодержателя и термостата, 6 – отверстие для внесения растворов, 7 – рукоятка управления шторкой.

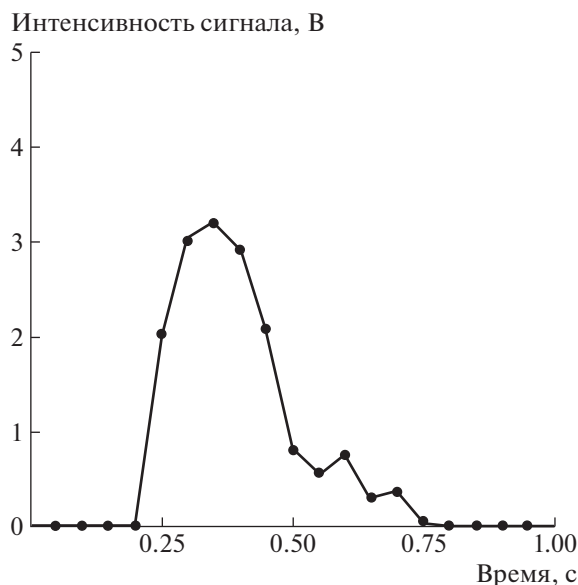


Рис. 9. Изменение интенсивности сигнала в процессе хемилюминесцентной реакции.

Для снижения влияния скачков напряжения на работу ФЭУ питание детектора осуществляется от отдельного источника. При сопряжении низковольтных и высоковольтных блоков для исключения высоковольтного пробоя следует использовать высокоомные сопротивления (R_1 на рис. 6 и R_1, R_2 на рис. 7).

Применение в приборе двух микроконтроллеров, работающих в режиме master-slaver, позволяет разгрузить ведущий микроконтроллер и увеличить скорость передачи информации в ПК.

Для повышения стабильности работы необходимо обеспечить выравнивание потенциалов между блоками прибора посредством использования для питания общего отрицательного контакта, что уже реализовано в источнике питания основных компонентов схемы. Выравнивание потенциалов между высоковольтными и низковольтными блоками осуществляется посредством высоковольтного конденсатора C_5 (см. рис. 3).

В конструкции прибора предусмотрена возможность внесения жидких сред в кювету в процессе измерения (рис. 8, отверстие для внесения растворов). Канал для внесения растворов выполнен из пластикового капилляра, изогнутого в форме колена. Коленчатая форма канала предотвращает засветку ФЭУ в момент внесения раствора в кювету.

АЛГОРИТМ РАБОТЫ ПРИБОРА

Рассмотренная конструкция прибора, внешний вид которого представлен на рис. 8, предполагает следующий алгоритм работы. Запуск источника пи-

тания основных компонентов обеспечивает включение ведущего и ведомого микроконтроллеров и усилителя сигнала с ФЭУ. На этапе инициализации микроконтроллеров проходит самотестирование прибора, и при обнаружении ошибки микроконтроллер (slave) останавливает запуск прибора и информирует оператора об ошибке на экране LCD-дисплея. В случае положительного результата самотестирования блок микроконтроллеров через блок реле дает разрешение на запуск источника питания термостата и выполнение программы термостатирования, подается питание на ФЭУ, осуществляется передача данных в порт "mini-usb" и на информационное табло. Ведомый микроконтроллер включает реле питания высоковольтного источника, подающего напряжение на ФЭУ. Образованная на контактах ФЭУ разность потенциалов фиксируется блоком усилителя сигнала с ФЭУ и передается на ведущий микроконтроллер, который в свою очередь оцифровывает сигнал и отправляет его в порт USB ПК. Выходной сигнал ФЭУ является конечной величиной измерения потока фотонов и выражается в вольтах. Для визуализации и фиксации поступающих данных от прибора, а также для установки температуры термостата и временного периода приема данных используется оригинальное программное обеспечение.

На рис. 9 представлен типичный вид изменения интенсивности сигнала на экране ПК при взаимодействии H_2O_2 и люминола. Интенсивность сигнала резко возрастает на начальной фазе и, достигнув максимума, медленно снижается. Площадь фигуры, ограниченная функцией, описывающей сигнал, и осью абсцисс, равна сумме дискретных величин сигнала (точки на графике) и пропорциональна концентрации H_2O_2 .

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Для оценки пределов обнаружения H_2O_2 была получена градуировочная зависимость площади фигуры под графиком функции сигнала от концентрации H_2O_2 (рис. 10). Градуировочные концентрации H_2O_2 (0.12, 0.24, 0.48, 0.97, $1.95 \cdot 10^{-6}$ М) были выбраны нами по результатам ранее проведенных тестовых измерений. Растворы H_2O_2 известной концентрации вносили в кварцевую кювету, которую устанавливали в кюветодержатель. Далее в кювету через отверстие для внесения растворов вливали 1 см^3 смеси люминола ($2.26 \cdot 10^{-4}$ М) и пероксидазы ($1 \cdot 10^{-6}$ М). Измерения проводили в шестикратной аналитической повторности. Рассчитанные значения площадей усредняли и использовали для построения градуировочной зависимости (см. рис. 10). Методом наименьших квадратов была рассчитана линейная регрессия, описываемая уравнением $y = 255.74x - 32.907$, ко-

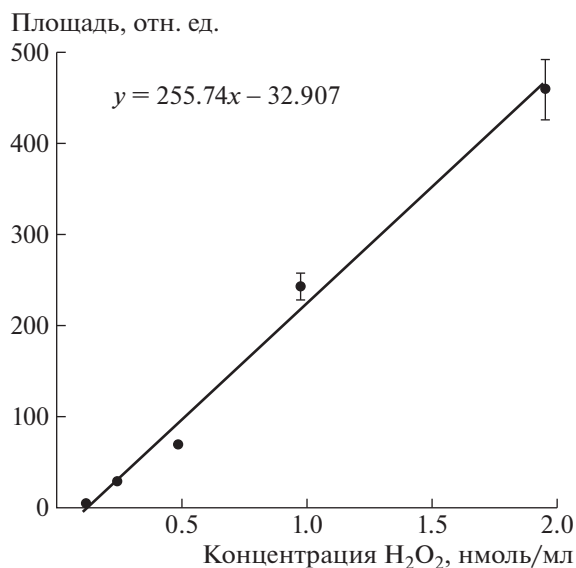


Рис. 10. Градуировочная зависимость площади фигуры под графиком функции сигнала от концентрации H₂O₂ (измерения проведены при 20°C).

эффицент корреляции регрессионной зависимости составил 0.97. Статистическая значимость уравнения проверена с помощью коэффициента детерминации и критерия Фишера. Установлено, что параметры модели статистически значимы. Полученная оценка уравнения регрессии позволяет использовать его для расчета концентрации H₂O₂ в водных растворах.

В качестве модельного объекта для тестирования люминометра использовали этиолированные листья мягкой пшеницы сорта Иргина (*Triticum aestivum* L.) в процессе деэтиоляции на непрерывном свете. Измерения концентрации H₂O₂ показали, что четырехчасовое воздействие света интенсивностью 190 мкмоль/(м² · с) на этиолированные листья стимулировало повышение концентрации H₂O₂ в 1.5 раза — до 15 · 10⁻⁶ моль/г сухой массы (рис. 11). По мере формирования фотосинтетического аппарата листа на свету содержание H₂O₂ снижалось, и спустя сутки уровень содержания H₂O₂ составлял 7 · 10⁻⁶ моль/г сухой массы. Полученные значения и динамика изменения концентрации H₂O₂ в процессе деэтиоляции листа пшеницы сопоставимы с имеющимися в литературе данными [6].

Проверку на специфичность проводили путем предварительного инкубирования растительного образца с каталазой (“Sigma”, США) — ферментом, разлагающим H₂O₂ до воды. Последующее введение в кювету раствора люминола не вызвало хемилюминесцентную реакцию.

Таким образом, нами представлена информация о конструкции люминометра, даны рекомен-

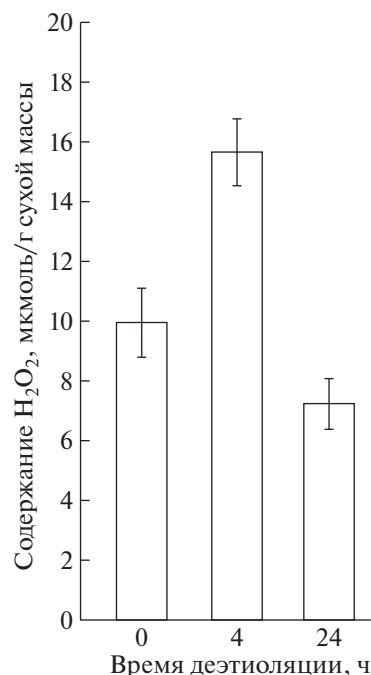


Рис. 11. Изменение содержания пероксида водорода в листьях пшеницы в процессе деэтиоляции (измерения проведены при 20°C).

дации по самостоятельной сборке прибора и приведены результаты лабораторных испытаний. Установлено, что изготовленный люминометр применим для измерения содержания H₂O₂ в водных растворах в диапазоне от 0.1 до 2 · 10⁻⁶ М. Технические характеристики прибора позволяют оценивать содержание H₂O₂ в растительных образцах, полученные значения сопоставимы с данными, имеющимися в литературе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках темы госбюджетных НИОКР “Фотосинтез, дыхание и биоэнергетика растений и фототрофных организмов: физиолого-биохимические, молекулярно-генетические и экологические аспекты” (№ 122040600021-4).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей и животных в качестве объектов исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Цаплев Ю.В.* Хемилюминесцентное определение пероксида водорода // В кн. Люминесцентный анализ. М.: Наука, 2015. Глава 8. С. 228–244.
2. *Бабко А.К., Дубовенко Л.И., Луковская Н.М.* Хемилюминесцентный анализ. Киев: Киевская книжная фабрика Октябрь, 1966.
3. МУК 4.1.966-99* Методы контроля. Химические факторы. Определение общего железа в питьевой и пресной воде хемилюминесцентным методом. Дата введения 2000-06-01.
4. *Образцов И.В., Годков М.А.* // Молекулярная медицина. 2013. № 4. С. 3.
5. *Ибрагимова Д.А., Камиль О.М., Янькова Т.В., Яштулов Н.А., Зайцев Н.К.* // Химия и технология органических веществ. 2017. Т. 12. № 6. С. 71.
<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2017-12-6-71-76>
6. *Garmash E.V., Velegzhaninov I.O., Grabelnych O.I., Borovik O.A., Silina E.V., Voinikov V.K., Golovko T.K.* // Journal of Plant Physiology. 2017. V. 215. P. 110.
<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2017.05.023>

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

УДК 550.837.21

**МНОГОКАНАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ГИДРОЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ
ПРИ НАБЕГАНИИ ВОЛН НА БЕРЕГОВУЮ ЛИНИЮ ОЗЕРА БАЙКАЛ**

© 2023 г. Ю. Б. Башкуев^а, Д. Б. Аюров^а, А. Д. Шунков^{а,*}

^аИнститут физического материаловедения СО РАН
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

*e-mail: timofe37@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.07.2022 г.

После доработки 03.10.2022 г.

Принята к публикации 06.10.2022 г.

На береговой линии оз. Байкал, вблизи с. Горячинск, проведены испытания установки для исследования взаимосвязи между волновыми гидродинамическими и электрическими процессами. Рассмотрены аппаратура и методика измерений. Представлены результаты измерений при различных условиях волнового процесса. Физика явления относится к классу гидроэлектрокинетических эффектов. Фильтрационное естественное электрическое поле связано с движением набегающей байкальской волны в пористом песке. При движении пресной воды в пористой среде образуется электрическое поле.

DOI: 10.31857/S0032816223020040, EDN: UXMPQP

ВВЕДЕНИЕ

В весенне-осенний и летний периоды года на береговой линии пресноводного оз. Байкал наблюдаются различные гидродинамические явления, характерные для больших акваторий. В штормовую погоду высота волн достигает 1–1.5 м и более. Эти волны при накатывании на песчаные пляжи вызывают различные физические процессы и явления. С движением воды в пористых средах связано появление естественного электрического (фильтрационного) поля. Такие поля широко распространены в природе и могут быть измерены методом естественного поля [1]. Нас заинтересовало взаимодействие гидродинамических и электромагнитных явлений при набегаии волн на береговую линию песчаных пляжей оз. Байкал. В 2017–2021 гг. на песчаной береговой

линии оз. Байкал у с. Горячинск проведены эксперименты по исследованию физики гидроэлектродинамического эффекта [2].

Фильтрационные поля относятся к классу электрокинетических явлений, открытых профессором Московского университета Фердинандом Фридрихом Рейссом в 1809 г. в Москве [3, 4]. Сами фильтрационные поля известны в физике и физической химии под названием “потенциалы течения” или “потенциалы протекания” [3, 4]. Когда жидкость движется в пористой среде, в ней образуется электрическое поле. На границе сухого песка (непроводящей среды) с жидкостью в капиллярах образуется двойной электрический слой в результате взаимодействия твердой и жидкой фаз. Возникает задача измерения разности потенциалов (напряжения) естественного элек-

Таблица 1. Характеристики регистратора “Байкал-7HR”

Параметр	Значение
Разрядность АЦП	24 бита
Тип входа канала	6 дифференциальных каналов, 44 кОм, 4700 пФ
Частота дискретизации	50, 100, 200, 500, 1000, 2000 Гц
Динамический диапазон и энергопотребление	±2.5 В; 1.2 Вт (запись), 0.6 Вт (в режиме ожидания) при 12 В
Стабильность внутреннего генератора	±2 · 10 ⁻⁷
Точность синхронизации	±1 мкс

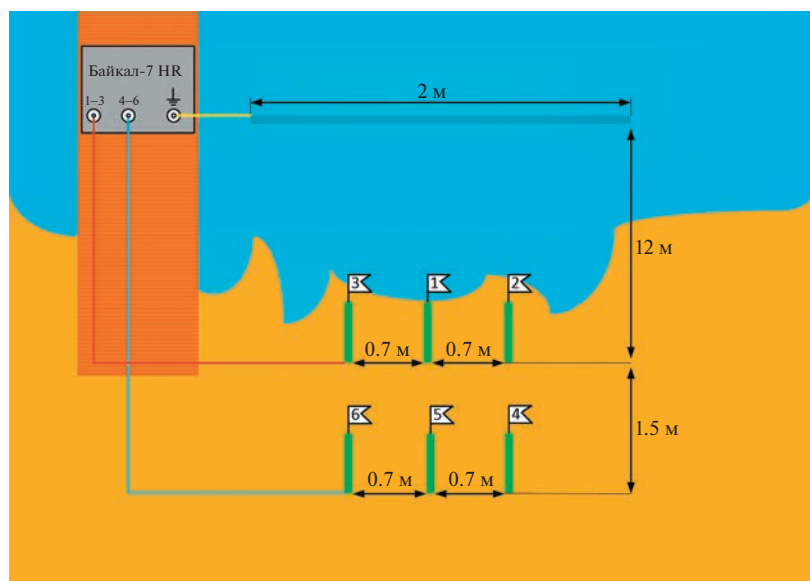


Рис. 1. Схема 6-канальной измерительной установки для регистрации гидроэлектродинамического (электрокинетического) фильтрационного эффекта.

трического (фильтрационного) поля. Для ее решения нами предложена, разработана и введена в эксплуатацию многоканальная установка для наблюдения электрического поля электрокинетической природы, генерируемого волнами на береговой линии оз. Байкал.

Возбуждение электрокинетических эффектов на дне морского мелководья поверхностными

волнами рассмотрено в работах [5–7]. Возможность оценки свойств земной коры по наблюдениям электрического поля электрокинетической природы, генерируемого приливными деформациями в зоне разрывного нарушения, рассмотрена в работе [8]. Особенность нашего исследования состоит в том, что исследование электрокинетического эффекта проведено впервые на крупном пресноводном оз. Байкал.



Рис. 2. Конфигурация размещения измерительных электродов на песчаном пляже береговой линии озера Байкал.

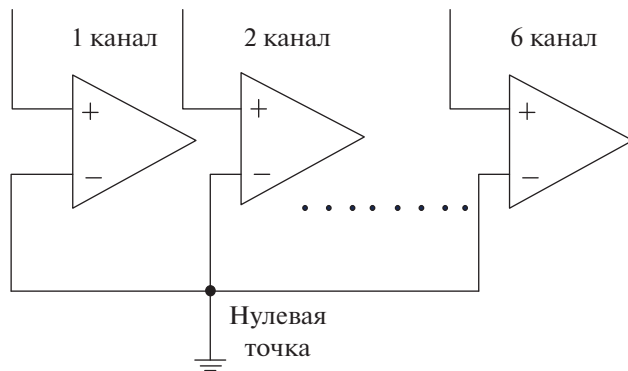


Рис. 3. Схема коммутации инверсных входов измерительных каналов.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В качестве экспериментальной площадки для полевых испытаний многоканальной установки был выбран песчаный берег оз. Байкал вблизи с. Горячинск. Аппаратура должна установить количественную связь между волновыми гидродинамическими и электрическими процессами на береговой линии оз. Байкал. Для измерения естественных электрических полей и обеспечения наблюдений его пространственно-временных изменений аппаратура должна иметь более одного регистрирующего канала и общую синхронизацию временных процессов по всем каналам. Таким требованиям отвечает многоканальный геофизический регистратор “Байкал-7HR” [9], имеющий

шесть независимых каналов. Встроенный GPS-модуль обеспечивает стабильность работы тактового генератора и получение точного времени. Основные характеристики прибора приведены в табл. 1.

Измерительная установка испытана в августе 2021 года. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки для регистрации гидроэлектродинамического эффекта. Шесть электродов заземлены по указанной геометрии в песчаный грунт берега и периодически заливаются водой.

Регистратор “Байкал-7HR”, установленный на пирсе, измеряет разность потенциалов между погруженным в воду стальным шестом длиной 2 м и диаметром 12 мм и шестью разнесенными в пространстве электродами. Расстояние между первым рядом электродов и заводненным шестом составляет 12 м. Данная схема установки измерительных электродов соответствует геофизическому методу естественного поля [3].

В качестве измерительных электродов используются полые медные трубки диаметром 12 мм и длиной 300 мм (рис. 2). На электроды нанесены насечки с шагом 50 мм для контроля уровня заглубления. Коммутация электродов и регистратора осуществляется с помощью провода марки ШВВП 3 × 0.75, к одному концу которого припаян кольцевой наконечник для подключения к измерительным электродам, а на другом конце установлен разъем 2PM22КПН10Г1В1 для подключения к регистратору. Питание регистратора

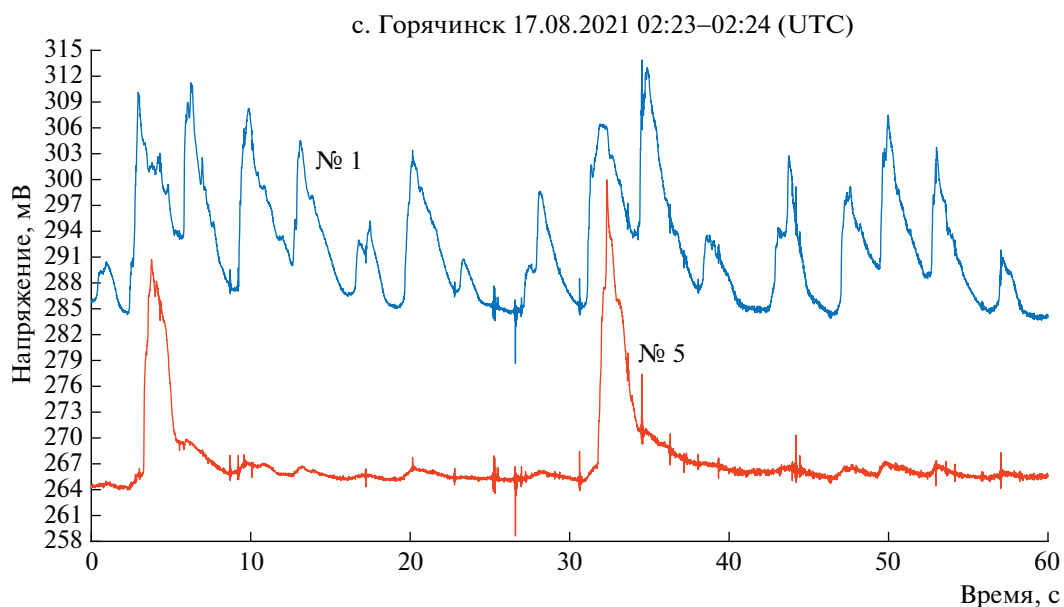


Рис. 4. Изменения разности потенциалов ΔU , полученной с электродов № 1 и № 5 в течение 60-секундного интервала во время среднего по силе волнения на оз. Байкал 17.08.2021 г. (разнос между электродами 12–13.5 м).

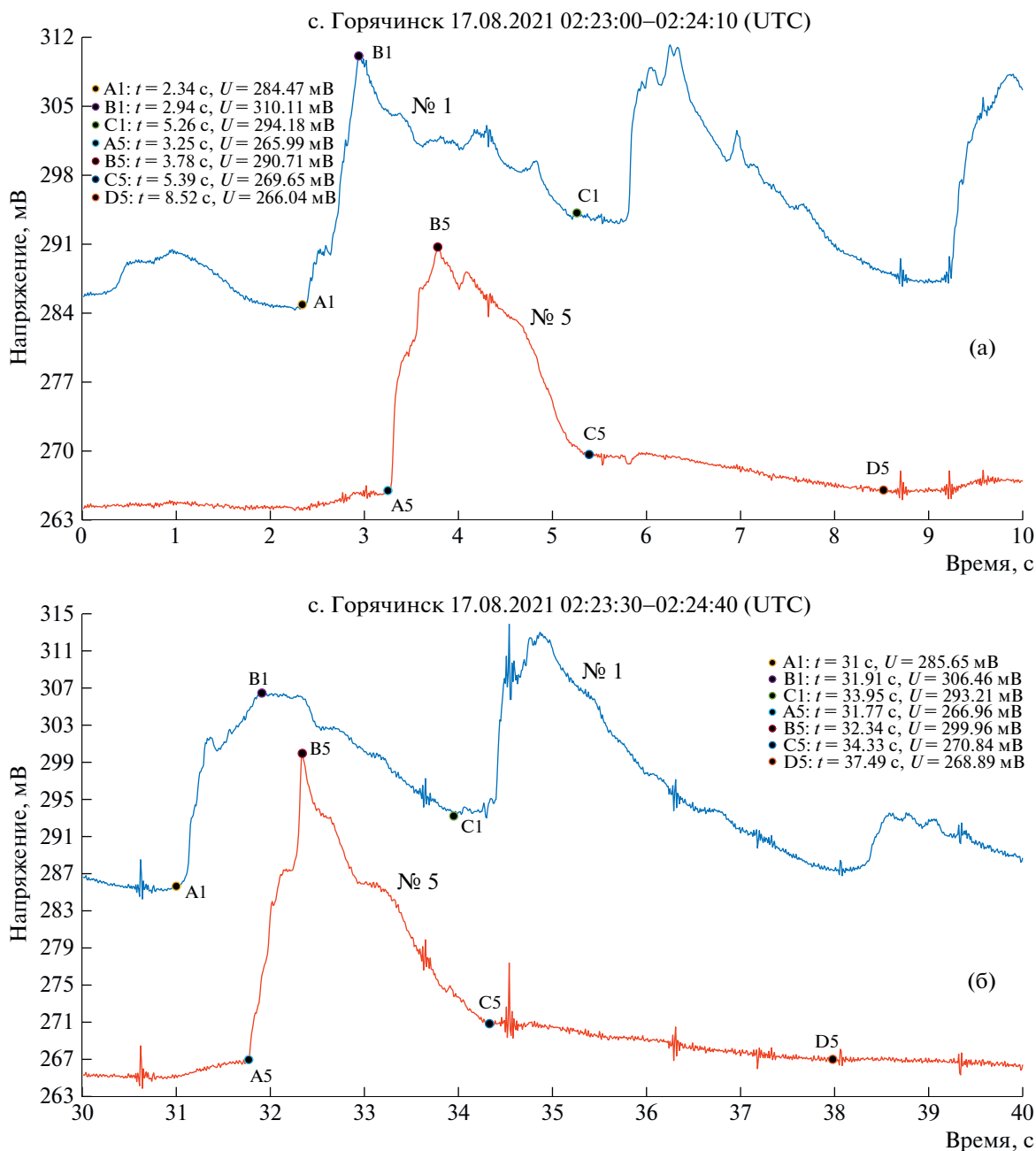


Рис. 5. Изменения разности потенциалов ΔU , полученной с электродов № 1 и № 5 в течение 10-секундных интервалов: а – 0–10 с, б – 30–40 с – во время среднего по силе волнения на озере Байкал 17.08.2021 г. (разнос между электродами 12–13.5 м).

осуществляется от 12-вольтовой аккумуляторной батареи через разъем 2PM18КПН7Г.

В процессе отработки метода в полевых условиях с целью удобства использования схема коммутации в разьеме 2PM22КПН10Г1В1 была изменена так, что все инверсные входы каналов были объединены в один узел. Этот узел принимался за “нулевую точку” (рис. 3), относительно которой измерялось напряжение.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 4 представлена динамика волнового гидродинамического процесса на 60-секундном интервале (разность потенциалов ΔU) во время среднего волнения, 2–3 балла.

На рис. 5а, 5б показаны изменения разности потенциалов ΔU в интервалах времени 0–10 с (рис. 5а) и 30–40 с (рис. 5б), полученной с элект-

тров № 1 и № 5 во время среднего по силе волнения на оз. Байкал 17.08.2021 г.

Передний фронт импульсного процесса характеризует накатывание волны на пологий, относительно сухой берег. Процесс покрытия водой электрода № 1 (см. рис. 5а) длится примерно 0.6 с. Амплитуда импульса достигает 25 мВ. Передний фронт на электроде № 5 длится 0.53 с, а его амплитуда равна 24.7 мВ. На рис. 5а амплитуда переднего фронта волны на электроде № 5 достигает 33 мВ. Стеkanie воды с электрода № 5 продолжается примерно 5.5–7.5 с. Процесс стекания можно разбить на две фазы: 1) быстрое стекание (точки В5–С5) длительностью примерно 2 с и 2) медленное стекание (точки С5–D5) длительностью 4–6 с, в котором участвует весь объем песчаного грунта на глубину погружения электродов 150 мм.

Минимумы импульсного процесса соответствуют времени, когда электроды № 1–6 не покрыты водой. На всех каналах волнового процесса видны резкие синхронные импульсы, порожденные молниевыми разрядами. Они служат временными реперными точками. По задержке импульсов и расстоянию между электродами можно определить скорость фронта волны. Так, на рис. 5а скорость набегающей волны по контрольным точкам А1 и А5 равна 1.65 м/с, по точкам В1, В5 – 1.76 м/с.

В эксперименте 2021 г. применена новая геометрия установки. Электроды № 4, № 5 и № 6 установлены параллельно электродам № 1 и № 2 на линии с электродом № 3 на расстоянии 1.5 м. Образуется некоторая “решетка” электродов, позволяющая определять направление фронта байкальской волны. Отработана новая методика 6-канальной регистрации гидродинамического процесса при расположении “нулевой точки” регистратора “Байкал-7HR” под водой на расстоянии 12–13.5 м от берега. Предложена новая геометрия установки электродов. Физика явления относится к классу гидроэлектродинамических (электрокинетических) эффектов [4, 5]. Пере-

мение зарядов жидкостью эквивалентно течению некоторого тока I . Новизна и практическая значимость работы состоит в том, что впервые обнаружен гидроэлектродинамический эффект на береговой линии оз. Байкал, который может быть использован при разработке аппаратуры для оценки параметров волновых гидродинамических процессов в больших пресноводных водоемах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена по госбюджетному проекту “Развитие фундаментальных основ распространения СНЧ-СДВ-ДВ-СВ и УКВ-радиоволн в неоднородных импедансных каналах” (0270-2021-0004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов А.С. Электроразведка методом естественного электрического поля. Л.: Недра, 1980.
2. Bashkuev Yu.B., Auyrov D.B., Buyanova D.G. // 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. Proceedings of SPIE 10833. 2018. <https://doi.org/10.1117/12.2504549>
3. Григоров О.Н. Электрокинетические явления: курс лекций Ленингр. гос. ун-та им. А.А. Жданова. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1973.
4. Карбаинова С.Н., Пикула Н.П., Анисимова Л.С., Катюхин В.Е., Романенко С.В. Поверхностные явления и дисперсные системы. Томск: Изд. ТПУ, 2000. С. 65–81.
5. Егоров И.В., Пальшин Н.А. // Океанология. 2015. Т. 55. № 3. С. 461.
6. Пальшин Н.А., Яковлев Д.В., Яковлев А.Г., Егоров И.В., Гераскин А.И. // XVIII Международная научная конференция (школа) по морской геологии. М.: ГЕОС, 2009. Т. 5. С. 105.
7. Сергеев В.А., Шарфарец Б.П. // Научное приборостроение. 2018. Т. 28. № 2. С. 25.
8. Алексеев Д.А., Гохберг М.Б. // Физика Земли. 2018. № 3. С. 106.
9. Seismic Signal Recorder Baykal-7HR. Technical manual”. 2011. http://sensors.ru/1_products/Manuals/BY-7hr_Manual_en.pdf (07 June 2018)

МЕТОД ПРОВЕДЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ТОНКИХ ПРОВОЛОК

© 2023 г. О. И. Аксенов^{a,*}, А. А. Фукс^{a,b}, Н. А. Волков^a, А. С. Аронин^a

^aИнститут физики твердого тела РАН

Россия, 142432, Черноголовка Московской обл., ул. Академика Осипяна, 2

^bНациональный исследовательский университет “Высшая школа экономики”

Россия, 109028, Москва, Покровский бульвар, 11

*e-mail: oleg_aksenov@inbox.ru

Поступила в редакцию 01.09.2022 г.

После доработки 08.09.2022 г.

Принята к публикации 23.10.2022 г.

В рамках данной работы разработан новый метод усталостных испытаний на растяжение тонких микропроводов и проволок, соответствующий ГОСТ 25.502-79. Разработанный метод проверен на аморфных микропроводах состава $\text{Fe}_{77,5}\text{Si}_{7,5}\text{B}_{15}$ в стеклянной изоляции. Установлено, что режим деформирования в интервале напряжений от 0 до 700 МПа соответствует долговечному использованию исследованных микропроводов (миллионы циклов). Кроме того, изученные микропровода способны выдержать сотни тысяч циклов растяжения при напряжениях от 700 до 1100 МПа.

DOI: 10.31857/S0032816223020015, EDN: UXDSHZ

ВВЕДЕНИЕ

Тонкие аморфные микропровода являются перспективным материалом для проектирования на их основе датчиков деформации. Данные материалы проявляют прямую корреляцию магнитных свойств и доменной магнитной структуры с механическими напряжениями (как остаточными, возникающими в результате изготовления, так и внешними). Из литературы известно, что бистабильное перемагничивание, эффект гигантского магнитного импеданса и явление ферромагнитного резонанса в микропроводах строго коррелируют с их напряженно-деформированным состоянием [1–4]. Несмотря на широкие перспективы применения таких материалов в качестве датчиков деформации, практически отсутствует информация о прочности микропроводов при воздействии динамических нагрузок, что является критичным параметром таких устройств. Это может быть обусловлено как высокой прочностью аморфных материалов в целом (единицы гигапаскаль) [5], так и сложностью проведения усталостных испытаний тонких проволок. Большинство существующих методик усталостных испытаний таких объектов предусматривает исследование проволок диаметром порядка единиц и десятых долей миллиметра в соответствии с ГОСТ 25.502-79 [6]. Однако диаметр тонких аморфных микропроводов составляет единицы или десятки микрон. Кроме того, интерес пред-

ставляет проведение многоцикловых усталостных испытаний на растяжение микропроводов, покрытых стеклянной изоляцией. В таком виде, в частности, изготавливаются микропровода методом Улитовского–Тейлора, имеющие широкое распространение. По этим причинам многие существующие методики усталостных испытаний [7] могут быть применены лишь с модификациями, учитывающими малый диаметр исследуемых объектов.

Целью данной работы являлась разработка простого и эффективного метода усталостных испытаний тонких микропроводов в стеклянной изоляции с учетом ГОСТ 25.502-79.

ЭКСПЕРИМЕНТ И ОБСУЖДЕНИЕ

Циклические испытания на растяжение/сжатие были выполнены в соответствии с ГОСТ 25.502-79 и проводились на пяти уровнях нагрузки, начиная с напряжения, соответствующего 0.95 предела прочности материала. Предел прочности материала определялся путем приложения статической растягивающей нагрузки, при которой исследуемый образец разрушался. Определенные пределы прочности осуществлялось на пяти одинаковых образцах с дальнейшим усреднением результата. Испытания проводились с частотой 1 Гц на трех образцах на точку для каждого деформированного состояния. База испытаний составляла 10^7 циклов. В качестве тестовых образцов ис-

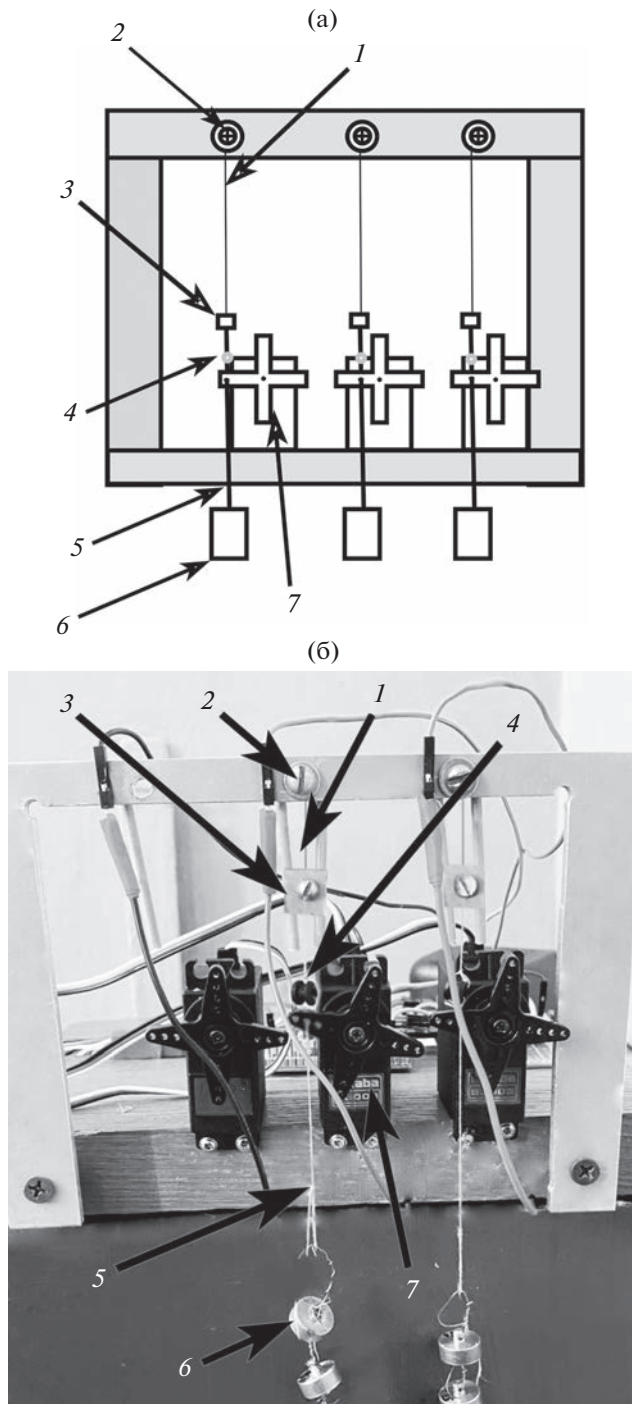


Рис. 1. Установка для циклической деформации микропроводов: **а** – схема установки; **б** – общий вид тестовой сборки установки в процессе работы. 1 – микропровод; 2 – винтовой фиксатор; 3 – нижний винтовой фиксатор; 4 – ограничитель; 5 – нить; 6 – груз; 7 – сервопривод.

пользовали микропровода состава $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ диаметром 16.5 мкм, покрытые стеклянной оболочкой толщиной 3.2 мкм. Длина микропровода составляла 4 см.

Для проведения усталостных испытаний была разработана экспериментальная установка, схема и общий вид которой представлены на рис. 1.

Согласно рис. 1, микропровод крепится между двумя винтовыми фиксаторами в подвешенном состоянии. Каждый фиксатор включает в себя винт, гайку и круглую шайбу. Микропровод зажимается между шайбой и металлической рамой установки. Внутренние части шайбы и рамы покрыты ПВХ пленкой для минимизации повреждения микропровода при зажиме. Масса нижнего фиксатора пренебрежимо мала в сравнении с пределом прочности исследуемых микропроводов и соответствует нагрузке 40 МПа (предел прочности микропроводов находился на уровне 2.1–2.2 ГПа). Согласно рис. 1б, ниже всех верхних фиксаторов размещены направляющие, препятствующие колебанию исследуемого образца в горизонтальном направлении и его кручению. К нижнему фиксатору крепится капроновая нить, пропущенная через отверстие в крестообразной насадке сервопривода. К другому концу капроновой нити крепится груз как добавочная нагрузка к массе фиксатора.

При вращении вала сервопривода по часовой стрелке из положения 180° в положение 135° ограничитель снимает нагрузку с микропровода. Заметим, что в текущей конфигурации установки, даже в момент снятия растягивающей нагрузки, на микропровод действует напряжение 40 МПа, вызванное силой тяжести от нижнего фиксатора. Использование более жесткой нити 5 (см. рис. 1а) может обеспечить полное снятие нагрузки с микропровода за счет подъема нижнего фиксатора и жесткости самой нити. Дальнейшее движение сервопривода против часовой стрелки приводит к повторному приложению нагрузки. В момент, когда нагрузка прикладывается к микропроводу, оси нити и микропровода совпадают.

При снятии нагрузки наблюдалось незначительное отклонение оси нити (на 1°–2°), ось микропровода оставалась неподвижной. Микроконтроллер осуществлял счет каждого акта приложения и снятия нагрузки и выводил количество циклов нагрузки/разгрузки на lcd-дисплей. На рис. 1б также видны пары проводов с разъемом (“female”) и штекером (“male”), закрепленные слева от винтовых фиксаторов. В случае обрыва микропровода между верхним и нижним фиксаторами нижний фиксатор оказывался в свободном состоянии и размыкал контакт между проводами. Это приводило к прекращению счета числа циклов нагрузки на разрушенном микропроводе и остановке соответствующего сервопривода. Значение числа циклов для разрушенного микропровода сохранялось на lcd-дисплее. Частоту и базу испытаний можно при необходимости ва-

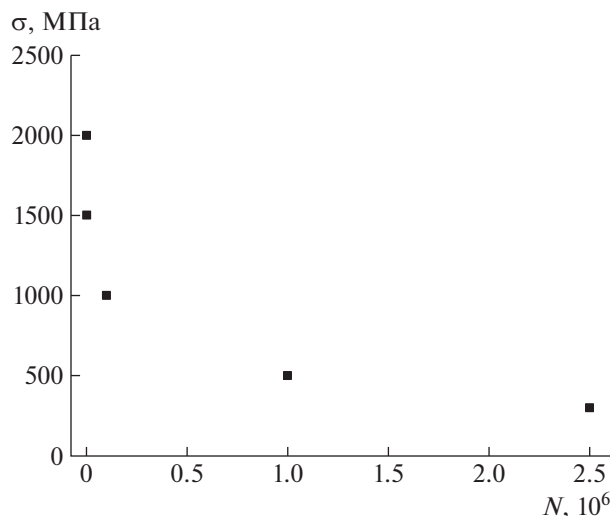


Рис. 2. Зависимость растягивающих напряжений от числа циклов нагрузки/разгрузки до разрушения. Величина ошибок измерения меньше размера точки на графике по любой из осей.

рыровать программно. Общее время проведения усталостных испытаний составляло 2.5 месяца.

В силу того что испытанию подвергались микропровода в стеклянной оболочке, величина напряжений, приходящихся на металлическую часть провода, оценивалась в соответствии с [8]:

$$\sigma_{\text{ж}} = mg / (S_{\text{ж}} + S_{\text{ст}} E_{\text{ст}} / E_{\text{ж}}), \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{ж}}$ – напряжения в металлической части провода; m – масса груза; g – ускорение свободного падения; $S_{\text{ж}}$ – площадь поперечного сечения металлической части провода; $S_{\text{ст}}$ – площадь поперечного сечения стеклянной оболочки; $E_{\text{ст}}$ и $E_{\text{ж}}$ – модули Юнга стеклянной и металлической частей провода соответственно. Модуль Юнга металлической части микропровода принят равным 154 ГПа. Модуль Юнга стеклянной оболочки состава Рухек составляет 64 ГПа [9].

На рис. 2 приведена зависимость растягивающих напряжений от числа циклов нагрузки/разгрузки до разрушения.

Согласно рис. 2, при приложении нагрузки до 700 МПа наблюдается значительная устойчивость микропроводов к многоциклового воздействию нагрузки/разгрузки (сотни тысяч и миллионы циклов). При приближении нагрузок к напряжению разрушения (около 2 ГПа) наблюдается порядка 1000 циклов нагрузки/разгрузки до наступления разрушения. Величина ошибки измерения напряжений в металлической части микропровода составляет не более 50 МПа. Величина ошибки измерения числа циклов нагрузки/разгрузки составляет около 720.

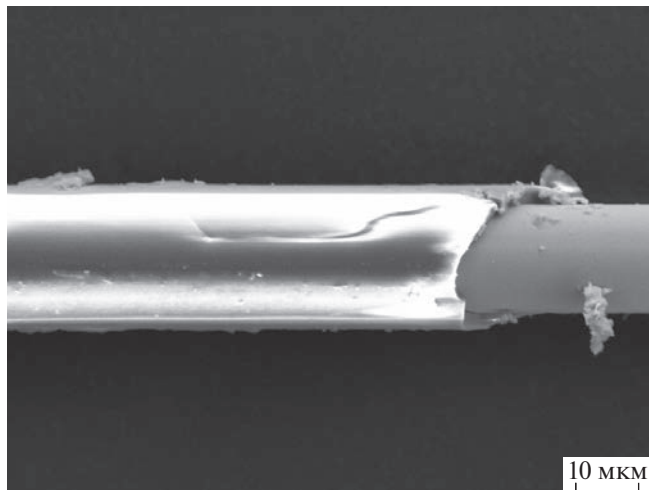


Рис. 3. СЭМ-изображение места разрушения микропровода после 2.5 миллиона циклов нагрузки/разгрузки растягивающим напряжением 300 МПа.

Микропровода, подвергнутые разрушению при многоциклового нагрузке/разгрузке, исследовались методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе Zeiss Supra 50VP. На рис. 3 представлено характерное СЭМ-изображение микропровода после разрушения.

На рис. 3 показано изображение той части микропровода, которая была зажата фиксатором в процессе нагружения. Стеклянная оболочка после разрушения микропровода оставалась целой и была удалена непосредственно перед съемкой изображения для определения диаметра провода и толщины оболочки. Изменение уровня растягивающих напряжений (от 40 до 2000 МПа) не приводило к разрушению стеклянной оболочки на проводе, закрепленном под фиксаторами. Во всех случаях разрушение происходило вблизи центральной части микропровода. На рис. 4 представлено характерное изображение места разрушения микропровода.

Согласно рис. 4, разрушение происходило под углом $\approx 45^\circ$ к оси микропровода и приложенной растягивающей нагрузке. При этом стеклянная оболочка претерпевала разрушение лишь в области разрушения металлической части провода.

ВЫВОДЫ

Таким образом, если рассматривать микропровод в стеклянной изоляции в качестве чувствительного элемента датчика деформации, то устойчивым режимом циклического приложения/снятия растягивающей нагрузки можно считать интервал напряжений от 0 до 700 МПа. Важно отметить, что такой режим деформирования микропровода соответствует его долговечному

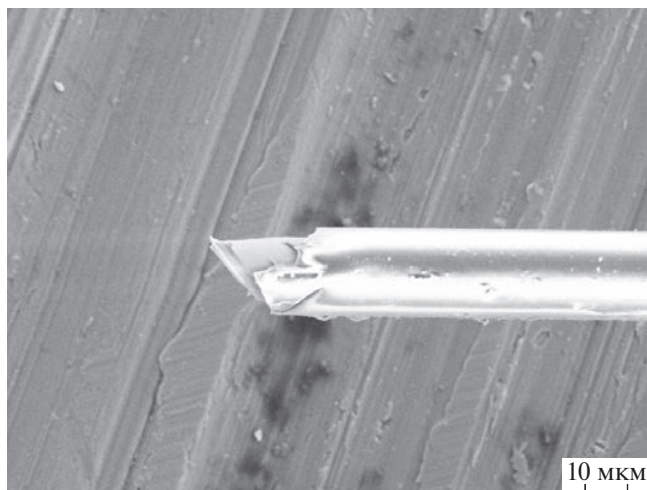


Рис. 4. СЭМ-изображения торца микропровода после разрушения растягивающей нагрузкой.

использованию. В диапазоне от 700 до 1100 МПа исследованный в рамках данной работы микропровод может выдержать сотни тысяч циклов нагружения/разгрузки, прежде чем будет разрушен.

Разработанный в рамках данной работы метод циклического деформирования микропроводов может быть использован не только для тонких аморфных проволок, но и кристаллических проволок, а также для проволок большего диаметра. Реализованный метод прост в исполнении и легко масштабируется для одновременного испытания трех и более проволок, что позволяет ускорить получение результатов многоциклового деформации.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vazquez M., Gomez-Polo C., Chen D.-X., Hernando A.* // IEEE Transactions on Magnetics. 1994. V. 30. P. 907. <https://doi.org/10.1109/20.312442>
2. *Churyukanova M., Kaloshkin S., Shuvaeva E., Stepashkin A., Zhdanova M., Aronin A., Aksenov O., Arakelov P., Zhukova V., Zhukov A.* / Journal of Alloys and Compounds. 2018. V. 748. P. 199. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.02.342>
3. *Vazquez M., Andenote-Engelvin A.-L.* // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2009. V. 321. P. 2066. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2008.10.040>
4. *Aksenov O.I., Abrosimova G.E., Aronin A.S., Orlova N.N., Churyukanova M.N., Zhukova V.A., Zhukov A.P.* // Journal of Applied Physics. 2017. V. 122. P. 235103. <https://doi.org/10.1063/1.5008957>
5. *Luborsky F.* Amorphous Metallic Alloys. London: Butterworths, 1983.
6. ГОСТ 25.502-79 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. М. Стандартинформ, 2005.
7. *Костин П.П.* Физико-механические испытания металлов, сплавов интерметаллических материалов. М.: Машиностроение, 1990.
8. *Аксенов О.И., Орлова Н.Н., Аронин А.С.* // ПТЭ. 2019. № 5. С. 135. <https://doi.org/10.1134/S0032816219050136>
9. *Bansal N.P., Doremus R.H.* Handbook of Glass Properties. Amsterdam: Elsevier LTD, 1986.

АДАПТАЦИЯ ГИДРОБАЛЛИСТИЧЕСКОГО СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ МАЛОГАБАРИТНЫХ МЕТАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

© 2023 г. А. Н. Ищенко^а, В. В. Буркин^а, В. З. Касимов^а, А. С. Дьячковский^а, А. В. Чупашев^а,
А. Ю. Саммель^а, К. С. Рogaев^{а, *}, А. Д. Сидоров^а, И. В. Майстренко^а,
Л. В. Корольков^а, В. А. Бураков^а, Н. М. Саморокова^а

^аНаучно-исследовательский институт прикладной математики и механики
Томского государственного университета
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 36, стр. 27

*e-mail: rogaev@ff.tsu.ru

Поступила в редакцию 01.08.2022 г.

После доработки 02.11.2022 г.

Принята к публикации 26.11.2022 г.

На основе баллистического проектирования выполнена оценка габаритов метательной установки с длиной ускорительного канала 20 см. Проведена адаптация гидробаллистического стенда к проведению испытаний малогабаритных метательных установок. С использованием малогабаритной метательной установки реализованы режимы входа в воду ударников через воздушный участок и непосредственно из ускорительного канала.

DOI: 10.31857/S0032816223020192, EDN: GTCEVV

ВВЕДЕНИЕ

Исследование влияния друг на друга группы суперкавитирующих ударников с использованием одной метательной установки возможно только при их одновременном старте. Основные результаты одновременного группового старта и последующего суперкавитирующего движения близкорасположенных ударников приведены в работах [1–6]. Для исследования группового движения ударников, стартующих с задержками относительно друг друга, требуется применение нескольких метательных установок, которые позволяют не только обеспечить заданную задержку старта ударников, но и на старте планировать траекторию их движения.

Основным требованием к метательным установкам, ориентированным на исследования группового метания близкорасположенных ударников с заданным запаздыванием их старта, является минимизация их габаритных размеров, что позволяет размещать установки, а следовательно, и ударники наиболее близко друг к другу. При этом гидробаллистический стенд [7] должен быть адаптирован к таким метательным установкам и иметь возможность исследовать вход ударника в воду через воздушный участок между срезом ускорительного канала и поверхностью воды либо непосредственно в воду при выходе из ускорительного канала. В первом случае вариант компоновки стенда позволяет исследовать вход в воду ударников через воздушную

прослойку, во втором – предназначен для исследования старта калиберных ударников непосредственно в воду.

Целью данной работы является оценка возможностей малогабаритных метательных установок и адаптация гидробаллистического стенда к их испытаниям.

БАЛЛИСТИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Предварительная оценка возможных габаритов метательной установки проводилась с учетом данных, полученных в результате баллистического проектирования для ускорительных каналов калибрами 6, 8 и 10 мм под ударники массой до 80 г в скоростном диапазоне от 300 до 500 м/с и с ограничением максимального давления уровнем 400 МПа. Баллистическое проектирование выполнено в соответствии с работой [8]. Основные параметры установки изменялись в следующих пределах:

- объем камеры заряжания метательной установки от 3.5 до 22 см³;
- метаемая (ускоряемая) масса от 10 до 80 г;
- длина ускорительного канала до 100 см.

При проведении расчетов внутрибаллистических характеристик выстрела использовались параметры зерненого одноканального пороха. Типичные результаты расчетов в виде зависимости

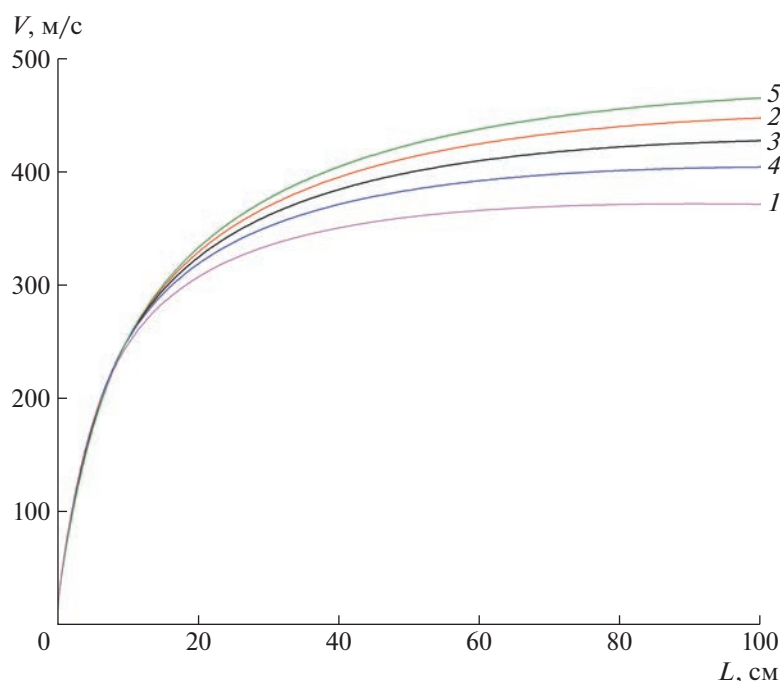


Рис. 1. Зависимость дульной скорости метаемой сборки от длины ускорительного канала для различных значений диаметра ствола $d_{ст}$, массы сборки m и объема камеры заряжения W_0 : 1 — $d_{ст} = 6$ мм, $m = 28.1$ г, $W_0 = 3.4$ см³; 2 — $d_{ст} = 6$ мм, $m = 28.1$ г, $W_0 = 6.7$ см³; 3 — $d_{ст} = 8$ мм, $m = 50.0$ г, $W_0 = 10$ см³; 4 — $d_{ст} = 10$ мм, $m = 78.0$ г, $W_0 = 12.5$ см³; 5 — $d_{ст} = 10$ мм, $m = 78.0$ г, $W_0 = 21.8$ см³.

дульной скорости от длины ускорительных каналов калибрами 6, 8 и 10 мм при различных объемах камеры заряжения приведены на рис. 1. Расчеты показали, что в установках с ускорительными каналами рассмотренных калибров требуемые характеристики по величине дульной скорости могут быть достигнуты с использованием метательных установок при длине ускорительного канала до 20 см, и они практически не зависят от объема камеры заряжения. Выполненное баллистическое проектирование показало перспективность метательной установки с длиной ускорительного канала до 20 см. Оценочные габариты такой установки находятся в пределах 150–300 мм, что позволяет разместить ее в пришлюзовой камере гидробаллистического стенда.

КОНСТРУКЦИЯ СТЕНДА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 2а показана схема стенда, использующего баллистические установки длиной до 500 см для исследования высокоскоростного суперкавитирующего движения в экстремальных режимах. Данный гидробаллистический стенд позволяет реализовать групповой пушечный старт суперкавитирующих ударников с дульной скоростью, близкой к скорости звука в воде. В частности, в работе

[1] опубликованы результаты по разработке методики исследования высокоскоростного движения группы суперкавитирующих ударников в воде при одновременном старте со скоростью в диапазоне 1000–1100 м/с. В работе [4] представлены результаты для скоростей 1400–1500 м/с.

На рис. 2б приведена схема размещения одного экземпляра малогабаритной метательной установки, реализованная в рамках адаптации гидробаллистического стенда. В вакуумном глушителе соосно стенду смонтирована пришлюзовая камера, которая в зависимости от целей эксперимента может заполняться водой. Малогабаритная метательная установка монтируется в пришлюзовой камере, ось ускорительного канала несколько выше оси гидробаллистического стенда, это вынужденное техническое решение, вызванное необходимостью предусмотреть возможность установки двух малогабаритных метательных установок.

Внешний вид малогабаритной метательной установки показан на рис. 3. Для справки, у пистолетов длина ствола может достигать 200 мм, дульная скорость находится в пределах 300 м/с, давление в канале ствола может достигать 250 МПа. В нашем случае масса метаемого ударника, который может быть изготовлен из сплава ВНЖ, значительно превышает массу стандартных изделий. В связи с этим требуется обеспечить функциони-

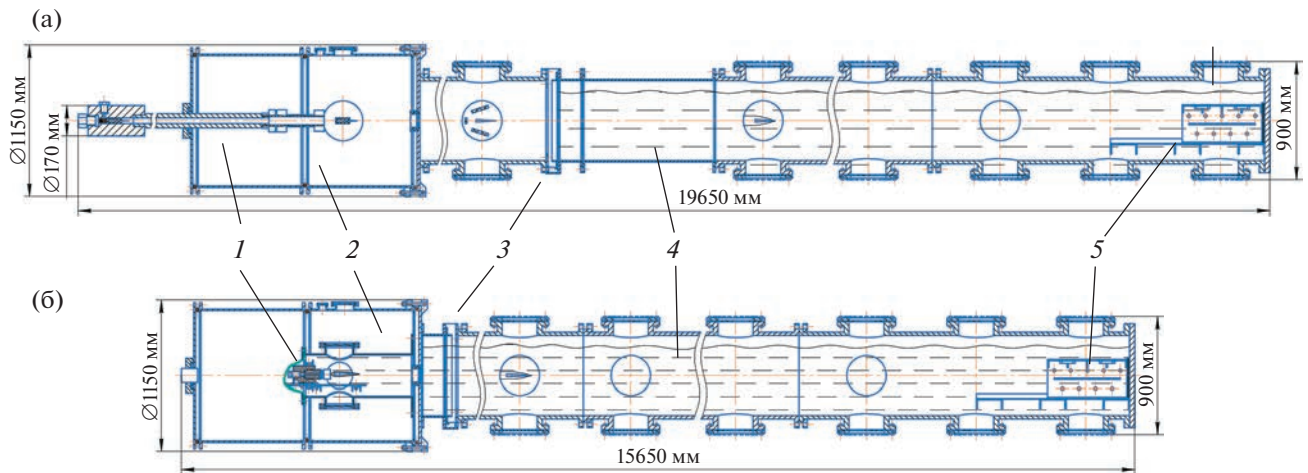


Рис. 2. Схема гидробаллистического стенда с размещением: **а** – установки для исследования высокоскоростного суперкавитирующего движения в экстремальных режимах [7]; **б** – малогабаритной метательной установки. 1 – метательная установка, 2 – вакуумный глушитель, 3 – шлюз, 4 – гидробаллистическая труба, 5 – пулеприемник.

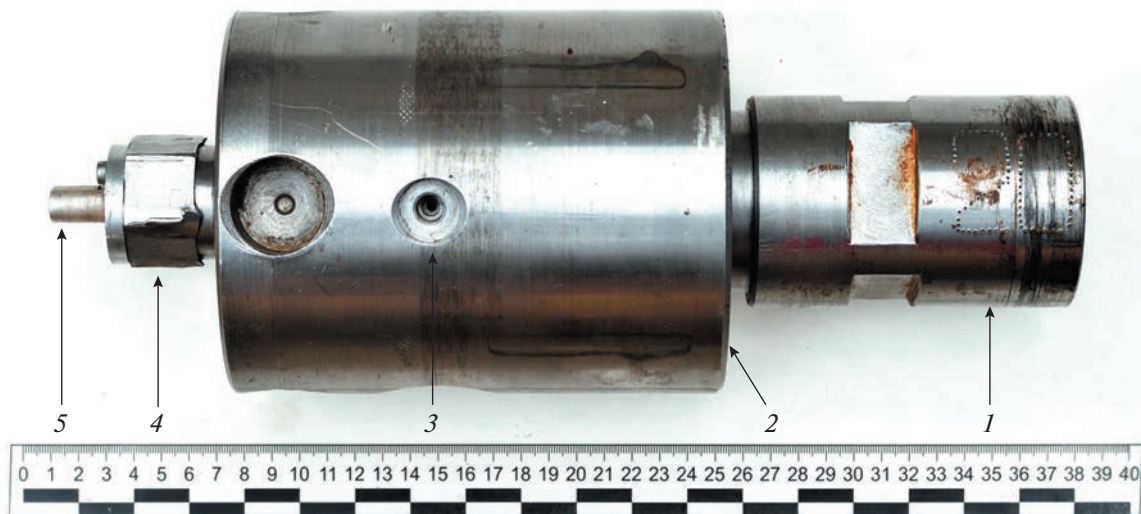


Рис. 3. Внешний вид малогабаритной метательной установки с длиной ускорительного канала 20 см: 1 – ускорительный канал, 2 – камера заряжания, 3 – гнездо установки датчика давления, 4 – винтовой затвор, 5 – разъем цепи инициирования.

рование малогабаритной метательной установки при рабочих давлениях до 600 МПа. Детали, испытывающие повышенные нагрузки (см. рис. 3): ускорительный канал 1, камера заряжания 2, винтовой затвор 3 – изготовлены из стали марки ОХНЗМФА со значительным запасом по прочности. Для инициирования заряда взрывчатого вещества используется электрокапсюльная втулка ЭКВ-30, установленная в винтовом затворе. Конструкция винтового затвора разборная, предусмотрена возможность смены электрокапсюльной втулки и, при необходимости, центрального электрода цепи инициирования. Разъем 5 цепи

инициирования показан на рис. 3. Использование электрокапсюльной втулки в качестве запала обеспечит техническую возможность с достаточной точностью синхронизировать моменты старта при групповом пуске, а также регулировать задержку инициирования при необходимости.

Камера заряжания 2 имеет гнездо 3 для установки датчика давления 2Т6000. Пьезоэлектрический датчик 2Т6000 регистрирует динамику изменения давления в камере заряжания в ходе эксперимента. Для преобразования сигналов (зарядов) датчика давления используется аппаратура регистрации давления “Нейва 10000”. Последующая

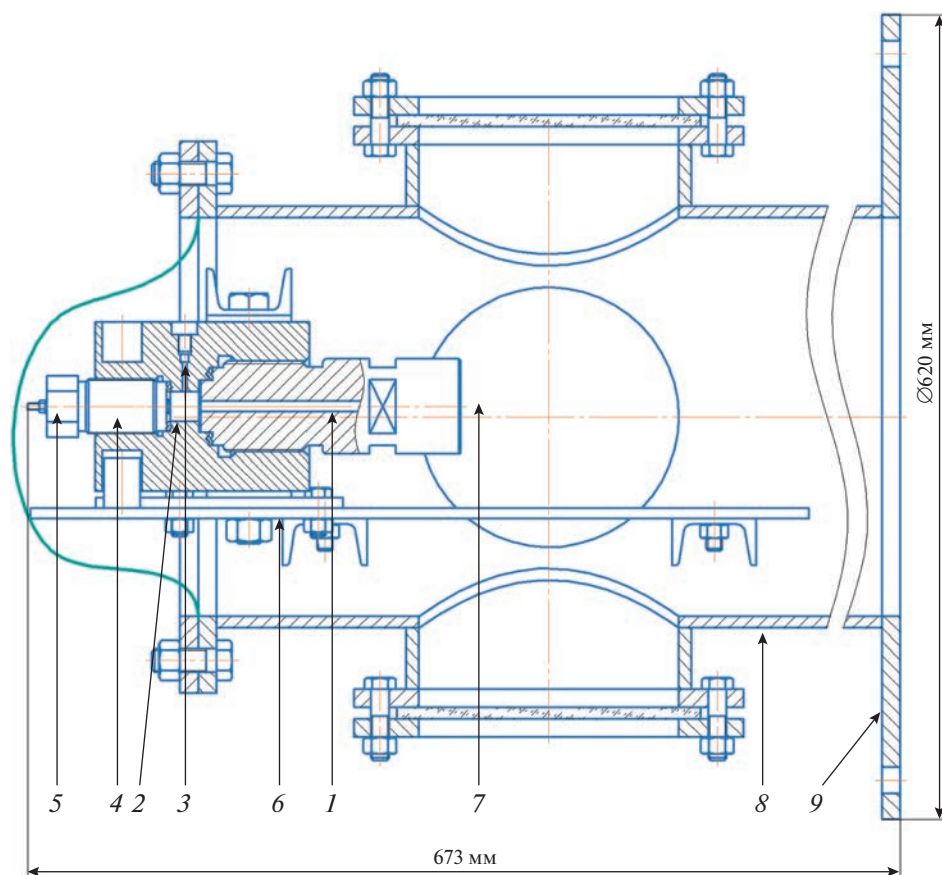


Рис. 4. Эскиз размещения малогабаритной метательной установки с длиной ускорительного канала 20 см на гидробаллистическом стенде: 1 – ускорительный канал, 2 – камера заряжания, 3 – гнездо установки датчика давления, 4 – винтовой затвор, 5 – разъем цепи иницирования, 6 – устройство крепления метательной установки, 7 – иллюминатор пришлюзовой камеры, 8 – пришлюзовая камера, 9 – фланец крепления к гидробаллистической трассе.

обработка полученных результатов позволяет скорректировать условия заряжания для достижения требуемых скоростей метаемых ударников. Ускорительный канал 1 гладкий без нарезов, он вкручивается в камеру заряжания. Конструкцией предусмотрено использование упорной резьбы и обтюрирующего медного кольца.

Эскиз размещения одного экземпляра малогабаритной метательной установки с длиной ускорительного канала 20 см в пришлюзовой камере гидробаллистического стенда приведен на рис. 4. Пришлюзовая камера в зависимости от цели исследований позволяет реализовать следующие варианты старта:

- метаемая сборка, включающая в себя подкалиберный ударник (ударники), выходя из ускорительного канала, попадает в воздушный участок, после чего метаемый ударник, освобождаясь от ведущих устройств, через съемный шлюз-разделитель переходит в трассу с водой;

- калиберный ударник после выхода из ускорительного канала проходит воздушный участок и, далее, попадает в трассу с водой;

- калиберный метаемый ударник, выходя из ускорительного канала, попадает непосредственно в трассу с водой (при этом воздушный участок заполнен водой).

В конце водного участка трассы суперкавитирующий ударник взаимодействует с мишенью и в случае ее пробития попадает в мишенный блок. Конструкция пришлюзовой камеры позволяет установить два экземпляра описанной малогабаритной метательной установки с расстоянием 200 мм между осями ускорительных каналов.

Малогабаритная метательная установка в комплекте с адаптированным гидробаллистическим стендом испытана для двух вариантов ударников: калиберного ударника, входящего в воду через воздушный участок, и калиберного ударника, непосредственно входящего в воду из ускорительного канала. Соответствующие фоторегистрограммы приведены на рис. 5. Конструкцией гидробаллистического стенда предусмотрена возможность использования фоторегистраторов с зеркальной разверткой, высокоскоростных видеокамер, импульсных осветителей и различного вспомогательного оборудования.

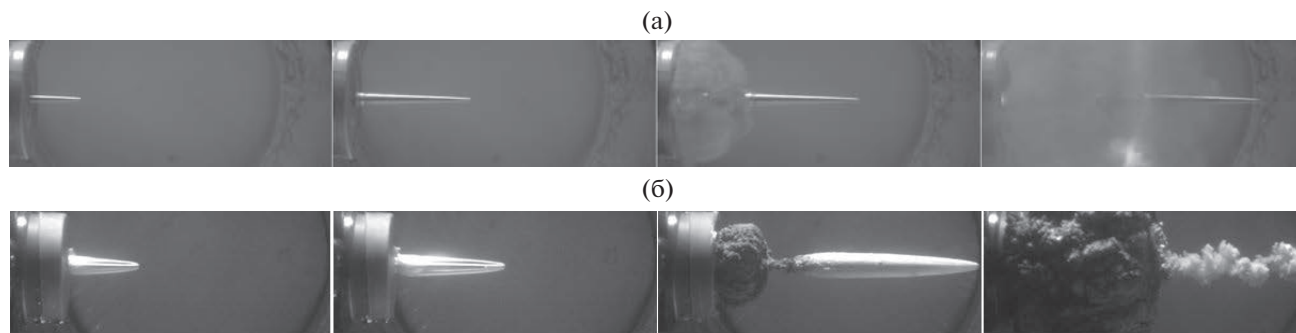


Рис. 5. Выход ударника из ускорительного канала метательной установки: со скоростью 372 м/с в воздушный участок (а); со скоростью 391 м/с в воду (б).

Выполненные эксперименты показали возможность старта ударников из состояния покоя с требуемой скоростью порядка 300–400 м/с при использовании малогабаритной метательной установки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено баллистическое проектирование нескольких вариантов метательных установок, позволившее выбрать длину ускорительного канала установки с учетом требования минимизации ее габаритов. Подтверждена возможность применения методов баллистического проектирования для минимизации габаритов метательных установок. С использованием малогабаритной метательной установки реализованы режимы входа в воду ударников непосредственно на срезе ускорительного канала и через воздушный участок.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-19-00233, <https://rscf.ru/project/19-19-00233/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ищенко А.Н., Афанасьева С.А., Буркин В.В., Дьячковский А.С., Чупашев А.В.* // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. Вып. 20. С. 47. <https://doi.org/10.1134/S1063785019100225>
2. *Ищенко А.Н., Буркин В.В., Касимов В.З., Афанасьева С.А., Дьячковский А.С., Рогаев К.С.* // Инженерно-физический журнал. 2020. Т. 93. № 2. С. 451. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02138-z>
3. *Ищенко А.Н., Афанасьева С.А., Бондарчук С.С., Буркин В.В., Дьячковский А.С., Хабибуллин М.В., Чупашев А.В.* // Инженерно-физический журнал. 2020. Т. 93. № 3. С. 661. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02188-3>
4. *Афанасьева С.А., Бондарчук И.С., Буркин В.В., Дьячковский А.С., Ищенко А.Н., Рогаев К.С., Саммель А.Ю., Сидоров А.Д., Степанов Е.Ю., Чупашев А.В.* // Инженерно-физический журнал. 2021. Т. 94. № 6. С. 1528. <https://doi.org/10.1007/s10891-021-02429-z>
5. *Буркин В.В., Дьячковский А.С., Ищенко А.Н., Скибина Н.П., Фарапонов В.В., Чупашев А.В.* // Инженерно-физический журнал. 2022. Т. 95. № 1. С. 115. <https://doi.org/10.1007/s10891-022-02459-1>
6. *Ищенко А.Н., Буркин В.В., Дьячковский А.С., Чупашев А.В., Саммель А.Ю., Рогаев К.С., Сидоров А.Д.* // Письма в ЖТФ. 2022. Т. 48. Вып. 1. С. 8. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2022.01.51870/18978>
7. *Буркин В.В., Ищенко А.Н., Майстренко И.В., Фуфацев В.М., Дьячковский А.С., Бураков В.А., Корольков Л.В., Степанов Е.Ю., Чупашев А.В., Рогаев К.С., Саммель А.Ю., Сидоров А.Д.* Патент на изобретение № 2683148 РФ, G01M 10/00 (2006.01), F41F 3/07 (2006.01) // Оpubл. 26.03.2019. Бюл. № 9.
8. *Хоменко Ю.П., Ищенко А.Н., Касимов В.З.* Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999.

МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ БЕЗЖИДКОСТНЫЙ ГЕЛИЕВЫЙ КРИОСТАТ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА ДЛЯ МЕССБАУЭРОВСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

© 2023 г. С. С. Старчиков^а, К. О. Фунтов^а, В. А. Заяханов^{а,*}, К. В. Фролов^а,
М. Г. Клёнов^б, И. Ю. Бондаренко^б, И. С. Любутин^а

^аИнститут кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН
Россия, 119333, Москва, Ленинский просп., 59

^бООО “Криогенные приборы”
Россия, 123060, Москва, ул. Расплетина, 11, к. 2

*e-mail: zayakhanov.vladimir@gmail.com

Поступила в редакцию 12.10.2022 г.

После доработки 18.10.2022 г.

Принята к публикации 26.11.2022 г.

Одной из проблем при использовании криостатов замкнутого цикла для прикладных и фундаментальных научных исследований остается передача механических вибраций на исследуемый образец. Особенно это актуально для мессбауэровской спектроскопии и оптических методов исследований, так как в таком случае это приводит к уширению спектральных линий. В данной работе представлены различные инженерные подходы для снижения механических вибраций, передаваемых на образец, в криостатах замкнутого цикла, в частности, при проведении мессбауэровской спектроскопии. Проведен анализ уширения спектральных линий эталонного поглотителя – фольги α -Fe, а также выполнено сравнение спектров высококачественного монокристалла FeVO_3 до и после модернизации криостата. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых или усовершенствовании существующих криостатов.

DOI: 10.31857/S003281622302026X, EDN: GTURMM

ВВЕДЕНИЕ

Мессбауэровская (ядерная γ -резонансная) спектроскопия является уникальным методом исследования твердых тел, позволяющим проводить изучение фазового состава, магнитных и электронных сверхтонких взаимодействий, волн спиновой и зарядовой плотности, фазовых переходов в условиях криогенных температур и при высоких давлениях в камерах с алмазными наковальнями [1–9]. Очень часто исследуемые эффекты проявляются при температурах существенно ниже комнатной, что требует наличия криостатов и хладагентов, таких как жидкий азот и гелий.

Можно выделить два основных типа коммерческих исследовательских криостатов: 1) криостаты, в которых для получения температур ниже 77 К необходимо обеспечить подвод (подачу) жидкого гелия, и 2) криостаты замкнутого цикла (безжидкостные) на основе криокулеров, в которых используется только газообразный гелий. К первому типу относятся заливные и проточные криостаты. Пример мессбауэровского криостата первого типа представлен в работе [10]. В настоящее время научные группы стремятся использо-

вать криостаты второго типа – безжидкостные криостаты, которые не требуют такого дорогого и невозполнимого ресурса, как жидкий гелий [11, 12]. Это экономическое преимущество безжидкостных криостатов становится ключевым при длительных измерениях (дни, недели, месяцы), что особенно актуально при мессбауэровских исследованиях. В таких криостатах обычно используются одноступенчатые и двухступенчатые криокулеры на основе цикла Гиффорда–МакМагона и на основе цикла пульсационной трубы. Недостатком криокулеров на основе замкнутого цикла Гиффорда–МакМагона [13] являются механические вибрации, вызванные циклическим возвратно-поступательным движением вытеснителя, имеющего значительную массу. В криокулерах на основе пульсационной трубы вибрации возникают из-за периодической прокачки охлаждающего газа при высоком давлении. Даже небольшие вибрации (на уровне единиц микрометров) вызывают заметное уширение экспериментальных мессбауэровских спектров и могут приводить к серьезным ошибкам при их анализе и интерпретации.

Для борьбы с вибрациями обычно применяют несколько стандартных решений, суть которых

состоит в минимизации или полном исключении механического контакта между головкой криокулера (далее – криоголовка), которая является основным источником вибраций, и исследуемым образцом при одновременном обеспечении максимальной теплопередачи от образца к криоголовке [11, 12, 14, 15]. Для этого используют: 1) гибкие металлические соединители, обеспечивающие одновременно хороший тепловой контакт и минимальную передачу вибраций, или 2) газообразный гелий в качестве теплообменного газа [16–18]. Во втором случае необходимо следить за температурой и давлением газа, так как конденсированные капли гелия могут приводить к механическому контакту вибрирующих частей криоголовки и держателя образца. Также для борьбы с вибрациями целесообразно утяжелять или жестко фиксировать отдельные узлы установки, использовать активные или пассивные вибродемпфирующие опоры (основания), а для механического разделения блока криоголовки и узла крепления образца применять металлические или резиновые сильфоны [11]. Контроль и визуализацию вибраций можно осуществлять с помощью систем на основе интерферометров и акселерометров [11, 17] или непосредственно по уширению линий в мессбауэровском спектре эталонного поглотителя [16, 18].

В работе [16] предложена оригинальная конструкция криостата, в которой вибрирующий блок криокулера жестко крепится на специальной башне к потолку помещения. Проведенный во всем диапазоне рабочих температур анализ ширины линий мессбауэровского спектра показал, что такая конструкция позволяет полностью избавиться от уширений. Однако большим недостатком такой конструкции является ее громоздкость, сложность сборки и юстировки.

Большинство производителей мессбауэровских и оптических криостатов замкнутого цикла, таких как LakeShore (Janis), США, CryoIndustries of America Inc., США, ICEoxford, Великобритания, Advanced Research Systems Inc., США, Montana Instruments, США, Attocube systems AG, Германия, ООО “Криогенные приборы”, Россия, использует стандартные решения по минимизации вибраций.

В одной из распространенных конструкций мессбауэровских криостатов, которую используют, например, LakeShore (Janis), CryoIndustries of America Inc, а также авторы работы [18], криостат конструктивно разделен на две основные части, одна из которых изолирована от вибраций, присутствующих в другой части. Одна из частей – это непосредственно криоголовка, смещенная с криостатом и являющаяся источником вибраций, а вторая – стол, на котором установлен спектрометр и к которому крепится подвес с об-

разцом, опускаемый в шахту криостата (см., например, рис. 1). При этом стол не касается криостата и вибраций не создает. Для минимизации вибраций, передаваемых по полу, используются пневмоопоры и/или вибродемпфирующие основания. Верхняя часть крепления подвеса с держателем образца (шток) отделяется от криоголовки мягкой эластичной виброизолирующей манжетой из гофрированной резины. Этот узел является ключевым при передаче вибраций, и от его виброизоляционных свойств в первую очередь зависит уровень вибраций на подвешенном образце. Используемые в работе [18] методы борьбы с вибрациями недостаточны, так как при температуре $T = 5$ К уширение линий составляет 10–15% по сравнению со спектром, полученным при выключенном криокулере. Отметим, что производители (LakeShore (Janis), CryoIndustries of America Inc., ICEoxford, Advanced Research Systems Inc.) не всегда сообщают об уровне уширения линий в спектре при наиболее низких рабочих температурах, а вопрос влияния износа криоголовки на уширение спектральных линий практически не исследован.

Данная работа посвящена модернизации конструкции безжидкостного гелиевого криостата замкнутого цикла, ранее описанного в работе [18]. В статье описаны изменения, внесенные в исходную конструкцию криостата, а также приведены данные о влиянии износа криоголовки на уширение линий. Для оценки уширения линий проведены мессбауэровские измерения на стандартном поглотителе – фольге α -Fe – и на высококачественных монокристаллах FeVO_3 до и после модернизации криостата.

ИСХОДНАЯ КОНСТРУКЦИЯ КРИОСТАТА

Устройство криостата, разработанного в работе [18], показано на рис. 1а. Криоголовка 1, модель SHI RDK-408D2, работающая на цикле Гиффорда–МакМагона, имеет две ступени охлаждения: холодопроизводительность первой ступени 40 Вт при температуре 43 К, второй ступени – 1 Вт при 4.2 К. В качестве рабочего тела используется газообразный ^4He высокой чистоты (99.99999%). Время захолаживания до 4.2 К на второй ступени криоголовки составляет 1 ч 10 мин. В ходе тестовых экспериментов [18] удавалось получить температуру 2.7 К на второй ступени криоголовки. Производитель криокулера (фирма SHI) рекомендует проводить обслуживание (замену подвижных частей криоголовки) каждые 10000 ч работы и заменять адсорбер в отдельно стоящем компрессоре каждые 20000 ч.

Криоголовка 1 захолаживает экран 2 и внутреннюю изотермическую шахту 3. В шахте располагается штوك 4, выполненный в виде трубки из

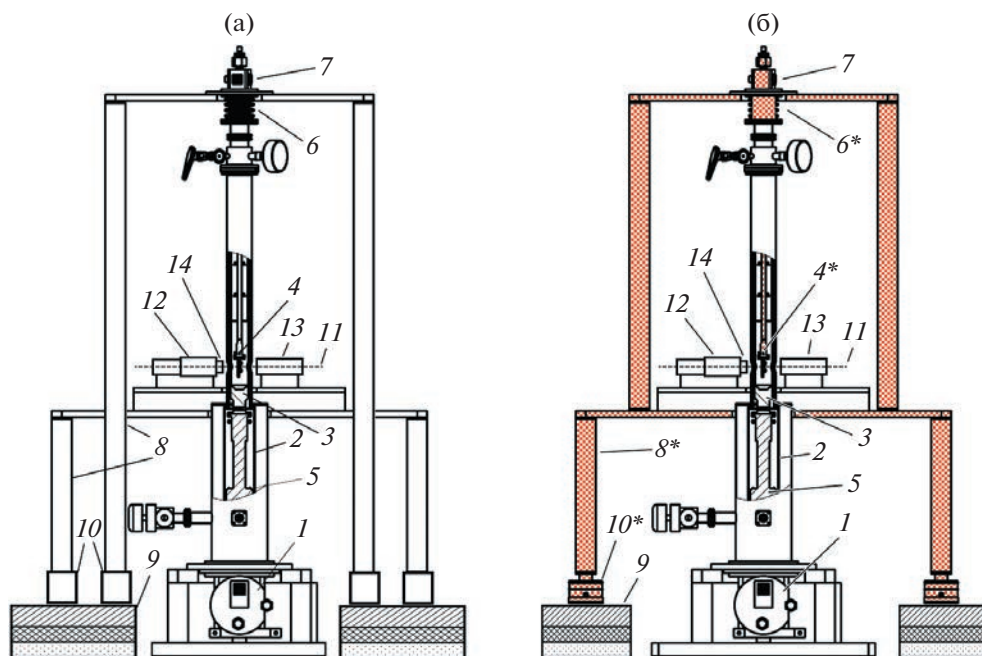


Рис. 1. Схемы исходного (а) и модернизированного (б) криостатов. Основные элементы исходного криостата: 1 – криоголовка; 2 – экран; 3 – шахта; 4 – шток с держателем образца; 5 – холодная ловушка; 6 – гофрированная резиновая манжета; 7 – разъем подключения датчика температур и нагревателя; 8 – два стола (на одном расположен мессбауэровский спектрометр, на втором закреплен шток); 9 – вибродемпфирующие основания, состоящие из слоя песка, слоя эластомерной резины и металлической плиты; 10 – металлические опоры; 11 – оптическая ось криостата и мессбауэровского спектрометра; 12 – модулятор; 13 – детектор; 14 – источник γ -квантов. На рисунке (б) красной штриховкой отмечены измененные узлы в модернизированном криостате: 4* – шток с шарнирным подвесом; 6* – гофрированная резиновая манжета с проставочными кольцами; 8* – измененный стол; 10* – пневмоопоры.

нержавеющей стали $\varnothing 10$ мм, на нижнем конце которой смонтирован медный держатель образца. Шток оснащен латунными тепловыми экранами, установленными вдоль его длины через каждые 7 см. В верхней части шток закреплен на отдельно стоящем столе 8, не касающемся криоголовки и криостата (см. рис. 1а).

На держателе образца расположены измеряющий спай термопары Cu/CuFe и резистивный нагреватель (сопротивлением $R = 10$ Ом). Выводы контактных проводов термопары и нагревателя размещены сверху штока в коммутационном разьеме 7. Соединение шахты и штока осуществляется с помощью виброизолирующей манжеты из гофрированной резины 6.

Процесс охлаждения образца состоит в следующем. Шток 4 с держателем исследуемого образца помещается в изотермическую камеру шахты 3. Перед включением криокулера осуществляется откачка шахты до 10^{-5} атм и вакуумного кожуха второй ступени криостата до 10^{-8} атм. Остаточный газ в вакуумном кожухе криостата вокруг второй ступени криоголовки адсорбируется холодной ловушкой 5 с активированным углем (см. рис. 1а). После охлаждения второй ступени криоголовки примерно до 3 К (а образца на штоке до 140 К) в шахту добавляется теплообменный газ –

гелий технической чистоты (99.8%). Это позволяет охладить образец до 4–5 К без прямого механического контакта с криоголовкой. Контроль и удержание температуры осуществлялись с помощью терморегулятора tSTAT 310x (RTI Cryo systems) [19].

В работе использовался стандартный мессбауэровский спектрометр MS-1104Em. В состав спектрометра входит источник γ -квантов 14, закрепленный на модуляторе 12, и детектор 13. Источник γ -излучения $^{57}\text{Co}(\text{Rh})$ располагался вне криостата и находился при комнатной температуре. В качестве стандартного поглотителя применялась фольга α -Fe толщиной 25 мкм, отожженная в водороде. Спектрометр размещен на спектрометрическом столе 8. В этом случае мессбауэровский спектрометр и шток 4 с образцом механически “развязаны” от вибрирующей криоголовки 1. Окна криостата, через которые проходит γ -излучение, выполнены из майлара толщиной 100 мкм.

В нашей лаборатории время наработки криокулера составило около 40 000 ч за 12 лет эксплуатации. После 25 000 ч работы заменялся адсорбер в компрессоре, но не проводилась замена или обслуживание движущихся частей криоголовки. Перед модернизацией криостата контрольные измерения ширины линий мессбауэровского

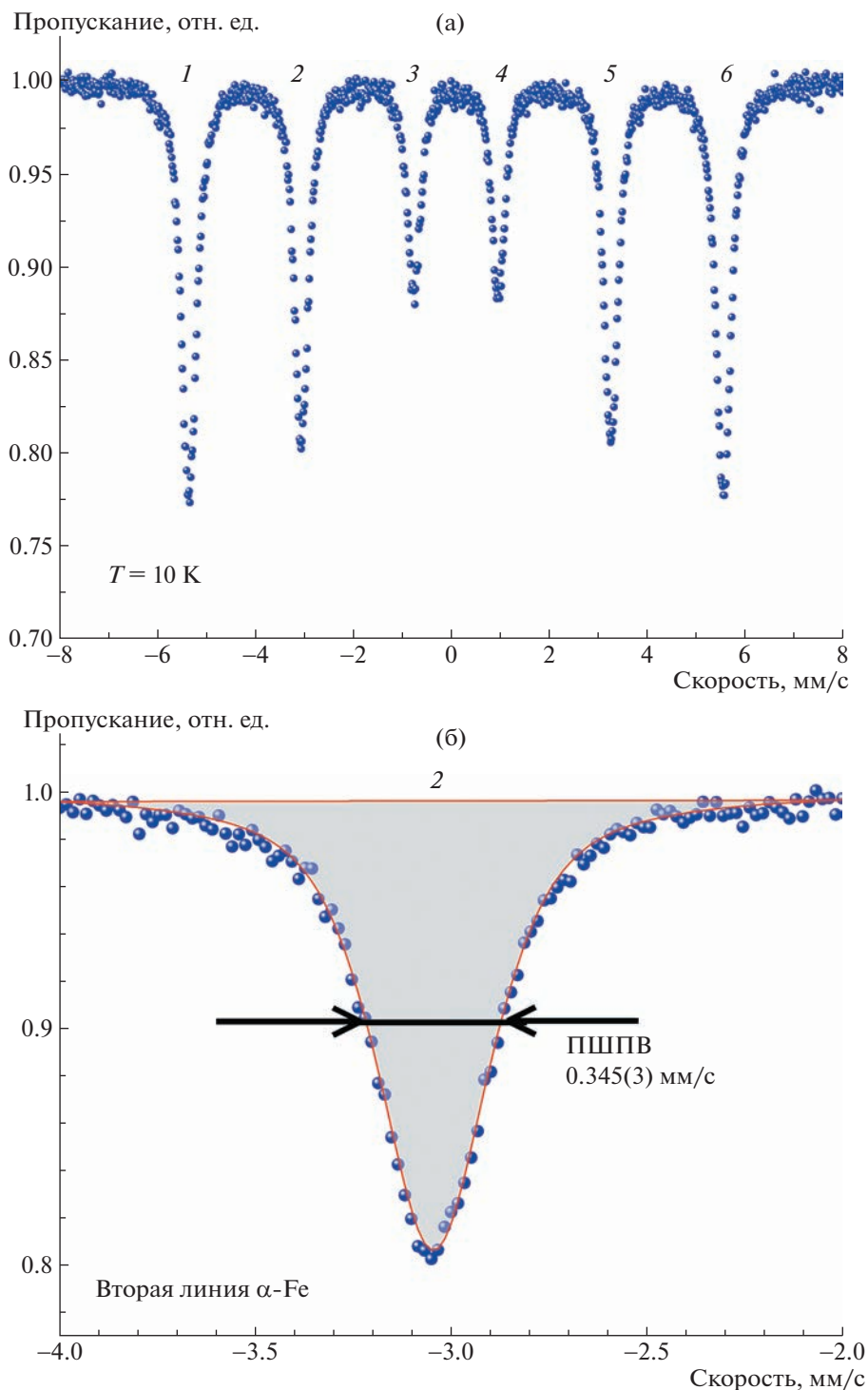


Рис. 2. а – мессбауэровский спектр α -Fe при $T = 10$ К, измеренный перед модернизацией криостата; б – ширина 2-й резонансной линии в спектре. Цифры соответствуют номерам спектральных линий.

спектра выполнены на стандартном поглотителе α -Fe.

Получены следующие результаты. С выключенным криокулером при комнатной температуре ширины второй и пятой линий мессбауэров-

ского секстета составили 0.267(1) мм/с. При работающем криокулере и минимальном давлении обменного газа (не более 10^{-2} атм) удавалось получить на образце температуру $T = 10$ К. При этом ширины второй и пятой спектральных ли-



Рис. 3. Внешний вид гофрированной резиновой манжеты (позиция *b* на рис. 1), обеспечивающая вакуумное соединение криостата и верхней части штока. Давление гелия в шахте криостата 0.1 атм. Манжета не прижимается к внутренней вставке и не передает вибрации на шток с образцом благодаря установленным металлическим кольцам внутри.

ний составили 0.345(3) мм/с (рис. 2). Это значение соответствует уширению 30% по сравнению со спектром, полученным при выключенном криокулере (при $T = 295$ К), что в два раза выше уширения, полученного в работе [18] при $T = 4.2$ К на начальном этапе эксплуатации криоголовки.

Для получения температур ниже 10 К требовалось увеличить количество обменного газа, напускаемого в шахту, что увеличивало ширину спектральных линий вплоть до 0.40 мм/с при 7 К (уширение 48%).

Таким образом, после 40000 ч эксплуатации криоголовка позволяла получать температуры ниже 5 К только при существенном уширении линий. Мы считаем, что увеличение уширения линий мессбауэровского спектра вызвано повышенным износом подвижных частей криоголовки и связано с изменением интенсивности и характера вибрации.

Учитывая наш опыт эксплуатации криостата и результаты других научных групп по криосистемам замкнутого цикла в целом, мы предложили усовершенствовать конструкцию криостата, чтобы понизить аппаратные уширения до минимума.

МОДЕРНИЗИРОВАННАЯ КОНСТРУКЦИЯ КРИОСТАТА

В рамках модернизации существенно переработана конструкция штока, столов для размещения спектрометра и крепления штока, установлены окна криостата из майлара с напылением алюминия для минимизации теплового излучения, заменен ряд узлов криостата (в частности, криоголовка).

Для снижения вклада собственных колебаний спектрометрический стол и стол с креплением штока были объединены в единую конструкцию (рис. 1б). Металлические опоры 10 (см. рис. 1а) были заменены на пневмоопоры 10^* (см. рис. 1б). Давление во всех четырех пневмоопорах регулируется и поддерживается постоянным (3 атм) с помощью компрессора Jas 1203. Наши испытания показали, что давление в пневмоопорах стабильно в течение трех месяцев. Для улучшения виброизолирующих свойств новой конструкции стола использовались дополнительные утяжелители (свинцовые блоки), при помощи которых спектр собственных частот стола смещался из зоны спектра частот вибрации криоголовки. Помимо этого, применение дополнительных утяжелителей позволило сместить работу пневматических виброопор в зону частот, где их изолирующие свойства максимальны. Оценка изолирующих свойств пневмоопор проводилась в управляющей программе мессбауэровского спектрометра, ко-



Рис. 4. Фотография нового штока (а) и увеличенное изображение держателя образца (б).

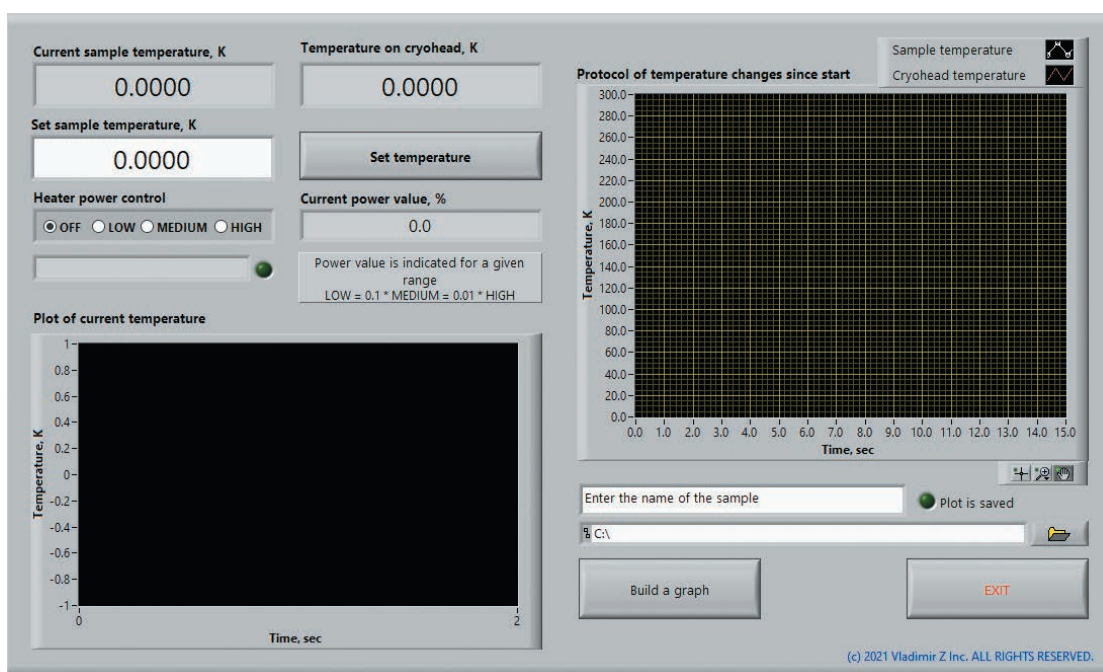


Рис. 5. Окно программы, управляющей терморегулятором.

торая позволяет отслеживать отклонения от заданного закона движения источника излучения. В модернизированной конструкции криостата удалось добиться отсутствия периодических отклонений, связанных с циклическим движением массивного вытеснителя, т.е. связанных с работой криоголовки.

При откачке газа из камеры криостата в старой конструкции [18] манжета б (см. рис. 1а) деформировалась и прижималась к внутренней вставке, тем самым она теряла часть своих виброизолирующих свойств. Для предотвращения этого эффекта в каждый виток манжеты были установлены проставочные металлические кольца диаметром 60 мм, что позволило исключить прижим манжеты к внутренней вставке и, следовательно, передачу вибрации на штوك с образцом (рис. 3). При этом виброизолирующие свойства манжеты в осевом направлении остались практически такими же. Устранение деформирования манжеты оказалось очень актуальным, так как при работе практически во всем диапазоне температур давление в шахте ниже атмосферного (вакуум или разреженный гелий).

Конструкция штока в криостате была полностью изменена. Фотография нового штока представлена на рис. 4. Основным отличием от старой конструкции является применение шарнирного подвеса в верхней части штока.

Шарнирный подвес ослабляет механическое взаимодействие между подвешенным образцом и верхней частью штока, а именно позволяет штоку

занимать строго вертикальное положение в шахте криостата и снижает связь между жесткой, зажатой в узле крепления на столе верхней частью штока и его нижней частью с держателем образца. Это устраняет возможность отклонения от вертикали основной части штока, что в противном случае привело бы к значительным его колебаниям в зоне образца. Таким образом снижена чувствительность системы к неидеальной установке стола относительно вертикали и горизонтали, а также относительно криостата, кроме того, уменьшены вибрации на образце, особенно по осям X и Y.

На рис. 4 показаны утяжелители из нержавеющей стали, установленные в нижней части штока. Для получения температур ниже 5 К необходимо добавление обменного газа в шахту до давлений выше 0.1 атм. При таком давлении обменный газ может раскачивать шток с шарнирным подвесом, поэтому предполагается, что установка утяжелителей для увеличения массы штока может минимизировать колебания.

Общая масса трех утяжелителей составила 117 г. Однако эксперименты показали, что наличие грузов на штоке в разных позициях не дало положительного эффекта уменьшения уширения резонансных линий, но при этом негативно сказалось на скорости захлаживания. Поэтому было решено отказаться от установки грузов на штоке.

В новой модели штока медный держатель образца дополнительно покрывался золотом для защиты от воздействия окружающей среды и улучшения теплового контакта. В держателе образца

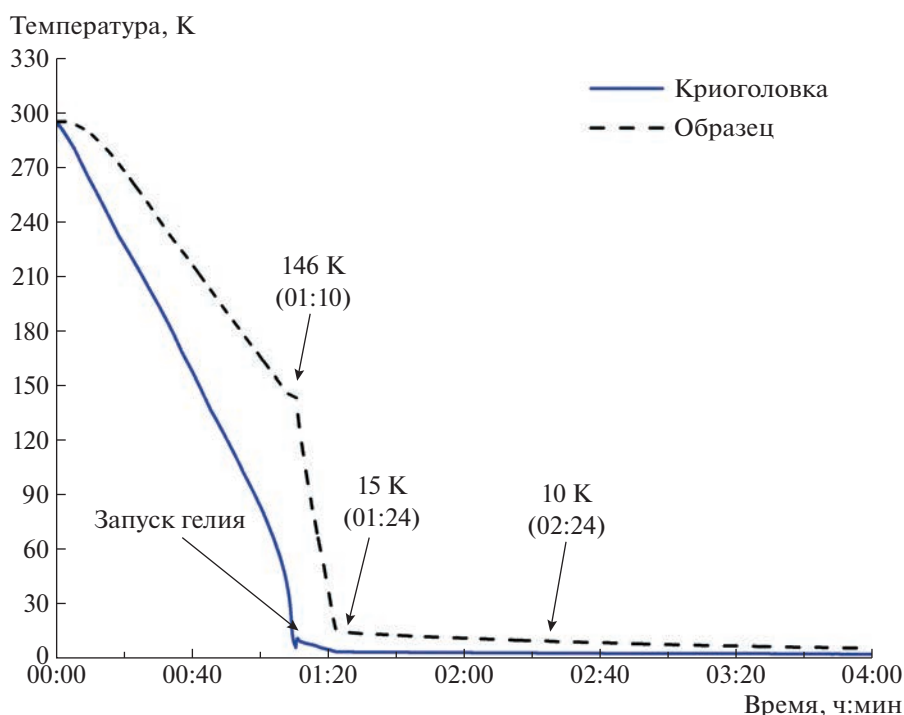


Рис. 6. Кривые захлаживания криостата на второй ступени криоголовки (сплошная линия) и образца (штриховая линия).

(см. рис. 4б) выполнено цилиндрическое углубление — посадочное гнездо $\varnothing 14$ мм и глубиной 2 мм — для размещения свинцовых коллиматоров и мессбауэровского поглотителя. На втулке держателя образца смонтированы нагреватель (нихромовая проволока, 10 Ом) и датчик температуры, которые используются для регулирования и измерения температуры образца. В конструкции [18] в качестве датчика температуры использовалась термопара Cu/CuFe, которая в новой конструкции штока была заменена на датчик температуры Serpox CX-1050-CU-NT-1.4L (рекомендованный к использованию в условиях радиоактивного излучения для измерений в широком диапазоне рабочих температур, 0.1–420 К, с высокой точностью — до 5 мК при 4.2 К) [20]. Использование этого датчика позволяет повысить точность удержания температуры исследуемого образца от 0.1 К (Cu/CuFe) до 0.003 К (Serpox) при температуре 5 К, а также проводить мессбауэровские измерения в диапазоне температур до 420 К. Дополнительно в основании шахты размещены угольный датчик температуры (ТВО) и нагреватель (50 Ом), позволяющий греть непосредственно шахту. Датчик температуры и нагреватель (проволока из нихрома) установлены на 2-й ступени криоголовки.

Управление температурой осуществляется с помощью двухканального терморегулятора Lakeshore 335, к которому подключены датчики температуры и нагреватели на штоке и на второй ступени криоголовки.

ПРОГРАММА АВТОМАТИЗАЦИИ ПОДДЕРЖАНИЯ И КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Разработана программа автоматизации поддержания и контроля температуры исследуемого образца в среде LabVIEW от National Instruments. Чтобы установить эту программу, пользователь должен скопировать проект, размещенный по адресу https://github.com/LabviewFSRC/Labview/blob/main/tStat2021_eng.vi

Для запуска программы на компьютере должны быть установлены среда разработки Labview 2016 и ОС Windows 10. Программа позволяет дистанционно контролировать требуемую температуру образца, мощность и режимы работы нагревателя, отображать на экране монитора текущие температуры на образце и на второй ступени криоголовки. Все изменения температуры отображаются на графике, который автоматически сохраняется в файл. В программе также реализована возможность автоматического отключения нагревателя в случае повышенных температур, когда появляется угроза повреждения оптических окон криостата.

Интерфейс программы интуитивно понятен и представлен на рис. 5. В поле “Set sample temperature” вводится требуемая температура и подтверждается нажатием кнопки “Set temperature”. Далее необходимо активировать нагреватель, выбрав режим мощности “Low”, “Medium” или

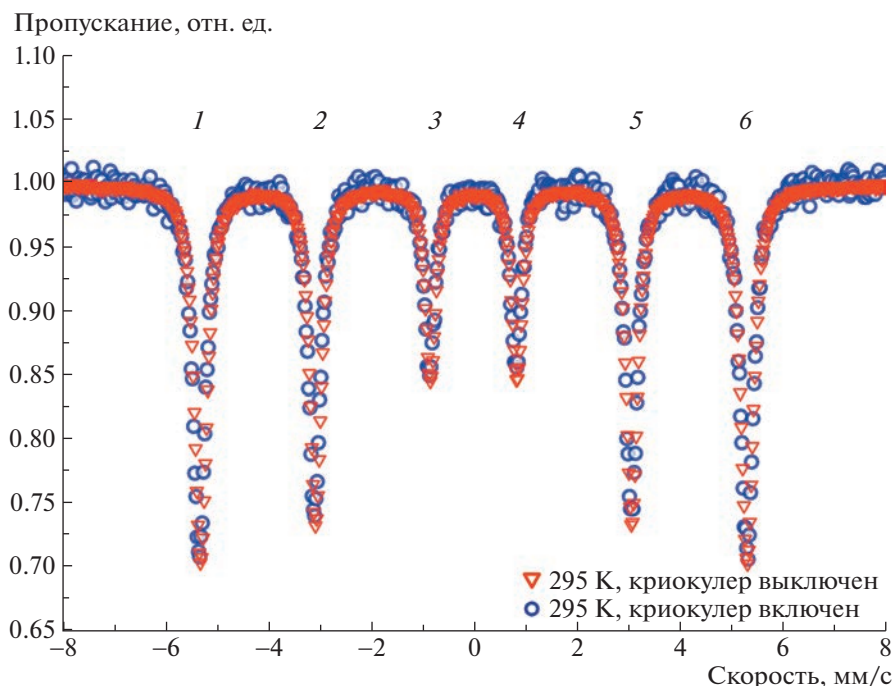


Рис. 7. Мессбауэровские спектры α -Fe при $T = 295$ K при включенном (кружки) и выключенном (треугольники) криокулере. Цифры соответствуют номерам спектральных линий.

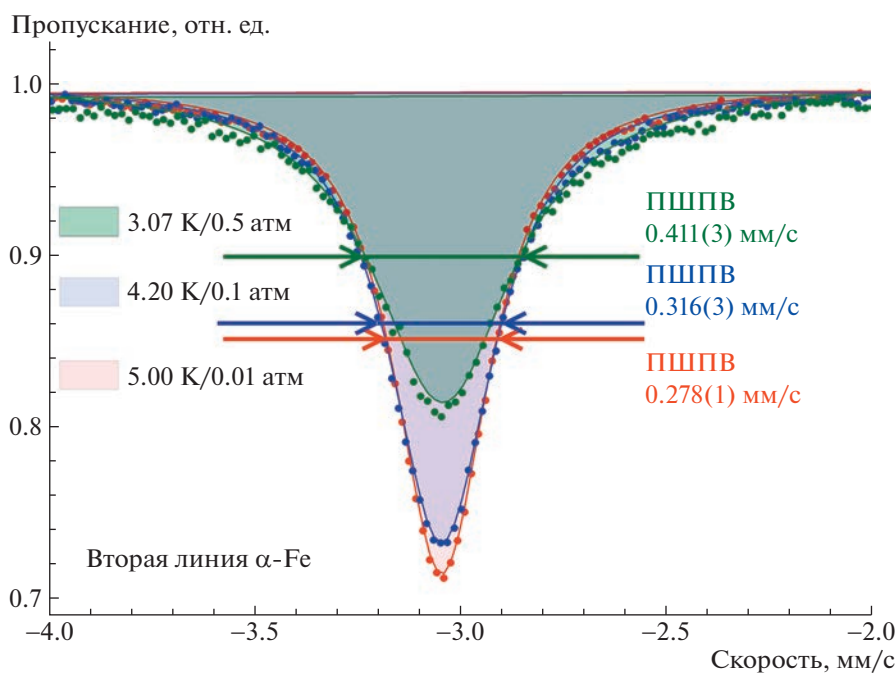


Рис. 8. Ширина 2-й резонансной линии в шестилинейном мессбауэровском спектре α -Fe при различных температурах и давлениях теплообменного газа.

Таблица 1. Ширина 2-й резонансной линии в шестилинейном мессбауэровском спектре α -Fe при различных температурах и разном давлении теплообменного газа. Уширения линий указаны относительно спектра при 295 К с выключенным криокулером

Температура/давление	Модернизированный криостат		Исходный криостат [18]	
	Ширина линий, мм/с	Уширение линий, %	Ширина линий, мм/с	Уширение линий, %
295 К с выкл. кулером / 1 атм	0.267 ± 0.001	—	0.2474	—
295 К с вкл. кулером / 10^{-5} атм	0.276 ± 0.005	4	—	—
5.00 К/ 10^{-2} атм	0.278 ± 0.001	4	0.3226	15.1
4.20 К/ 10^{-1} атм	0.316 ± 0.003	14	0.3913	39.6
3.07 К/0.5 атм	0.411 ± 0.003	53	—	—

“High” в зависимости от величины заданной температуры. При этом загорится зеленый указатель, соответствующий работающему нагревателю. В окне программы отображаются два графика изменения температуры со временем: на левом графике — за последние 15 мин, а на правом — за все время с момента запуска программы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ КРИОСТАТА ПОСЛЕ МОДЕРНИЗАЦИИ

Температурные характеристики

Графики изменения температуры от времени на второй ступени криоголовки и на образце при захлаживании криостата показаны на рис. 6. Тестовые эксперименты показали, что необходимое время для достижения температуры 4.2 К на второй ступени криоголовки составляет 1 ч 10 мин (сплошная линия на рис. 6). Захлаживание образца (штриховая линия на рис. 6) осуществляется поэтапно. На первом этапе образец охлаждается до $T \approx 140$ – 150 К в предварительно откачанной до давления $P \approx 10^{-5}$ атм шахте без добавления теплообменного газа за время около 70–80 мин со скоростью 2.5 К/мин. Если нет необходимости получения более низких температур образца, то уже на этом этапе можно в диапазоне 146–420 К стабилизировать температуру и приступать к измерениям.

Если необходимы измерения при более низких температурах, то в шахту подается теплообменный газ (гелий) до давления $P \approx 10^{-2}$ атм. На рис. 6 (в скобках) приведено время подачи газа 1 ч 10 мин. Дальнейшее снижение температуры образца до 10 К происходит в течение примерно 1 ч 14 мин. Таким образом, весь цикл охлаждения образца до 10 К занимает около 2 ч 24 мин.

Проверка уширения линий в мессбауэровских спектрах

Отметим, что толщина поглотителя влияет на наблюдаемую ширину Γ резонансных линий в мессбауэровском спектре [16]. Для “тонкого” поглотителя ширина линий должна быть близка к $2\Gamma_0$, где Γ_0 — естественная ширина линии, определяемая по времени жизни возбужденного состояния ядра (для ^{57}Fe она составляет 0.097 мм/с). Однако мессбауэровские измерения на таком “тонком” поглотителе могут занимать длительное время, что неэффективно. Поэтому мы использовали “толстый” поглотитель α -Fe с толщиной, близкой к оптимальной, чтобы минимизировать время накопления спектра и при этом добиться хорошего качества спектра. Далее по тексту приведены спектры одного и того же поглотителя α -Fe без корректировки на толщину поглотителя и нерезонансный фон.

На рис. 7 приведены мессбауэровские спектры стандартного поглотителя фольги α -Fe (толщиной 25 мкм) внутри криостата, полученные при включенном и выключенном криокулере при $T = 295$ К. Спектры были аппроксимированы псевдо-Войт-синглетными линиями с помощью программы SpectrRelax [21]. Установлено, что при включенном и выключенном состояниях криокулера ширины линий на полувысоте (ПШПВ) и интенсивности резонансных линий спектра совпадают (см. рис. 7). Это указывает на хорошую виброизоляцию мессбауэровского спектрометра и исследуемого образца от криокулера.

Далее, при включенном криокулере были проведены низкотемпературные тестовые мессбауэровские измерения для того же калибровочного образца α -Fe при температурах 3.07, 4.20, 5.00, 295.00 К. Полученные ширины линий на полувысоте при низких температурах сравнивались с таковыми при 295.00 К при выключенном криокулере.

На рис. 8 показана 2-я резонансная линия в шестилинейном мессбауэровском спектре при

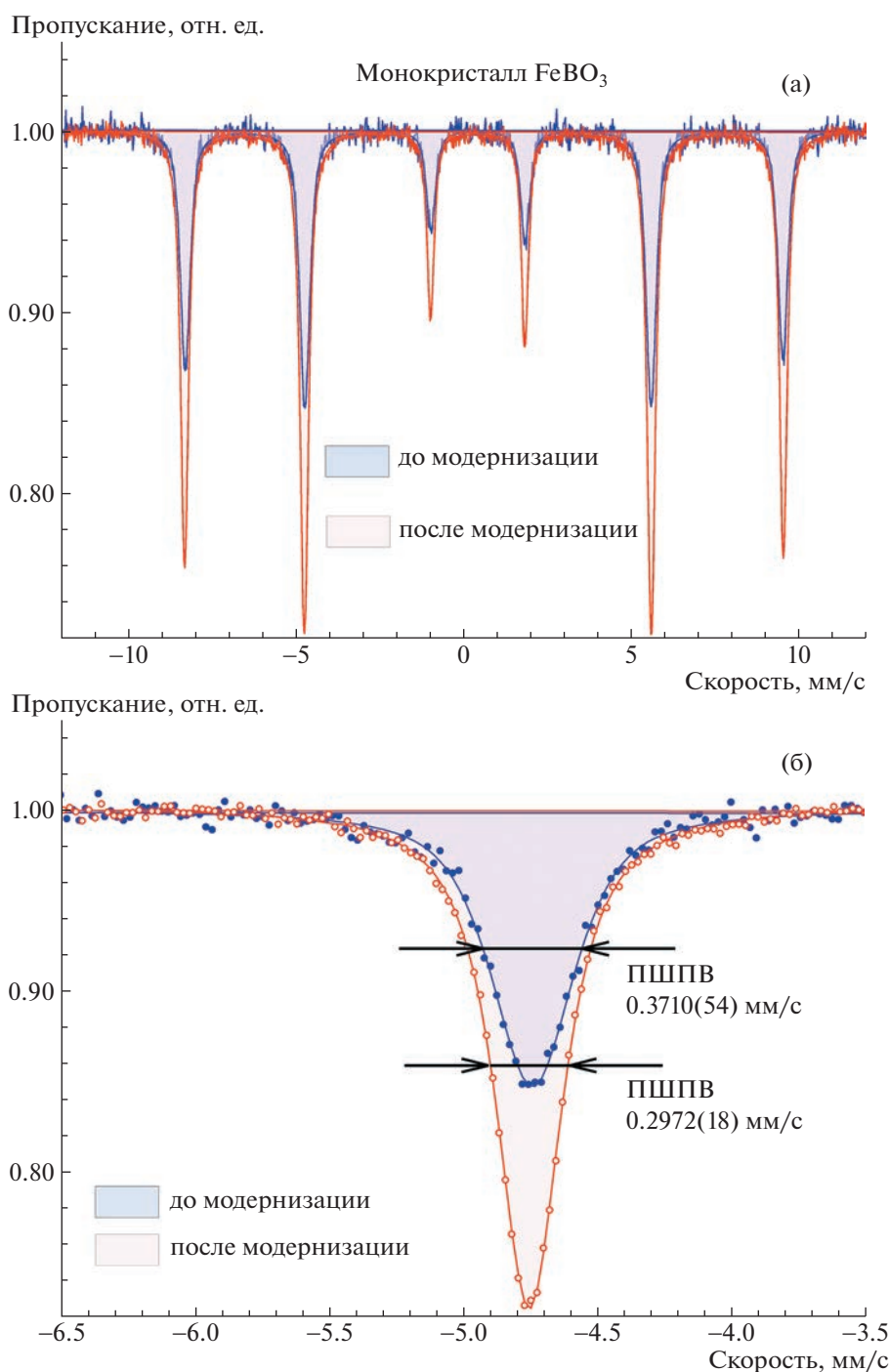


Рис. 9. а – мессбауэровские спектры монокристалла FeBO_3 при $T = 295$ К, измеренные до и после модернизации криостата; б – ширина 2-й резонансной линии в спектре.

различных температурах. В этом эксперименте при минимальном давлении теплообменного газа образец охлаждался до 5.00 К. Уширение линии при этом осталось таким же, как и при 295.00 К (в пределах 4%), и сравнимо со статистической погрешностью измерений. Для получения более низких температур необходимо добавить тепло-

обменный газ в шахту с образцом. На величину уширения линий существенное влияние оказывает давление теплообменного газа (табл. 1). Сравнивая величину уширения в модернизированной и исходной конструкциях стола и штока (см. табл. 1), мы видим, что в новой конструкции удалось получить более низкие уширения линий,

чем в исходной. Так, при 4.20 К и давлении газа $P = 0.1$ атм уширения линий составили 14% вместо 40%.

Таким образом, в результате модернизации мессбауэровского криостата удалось существенно снизить уровень вибраций образца и уменьшить величину уширения линий в спектре в 3 раза. Также установлено, что длительные мессбауэровские измерения (более месяца) не повлияли на уширение линий во всем диапазоне температур.

В качестве примера использования возможностей криостата на рис. 9 приведены экспериментальные спектры монокристалла FeVO_3 толщиной около 120 мкм. Исследуемые нами кристаллы были выращены по технологии раствор–расплав [22]. Кристаллы FeVO_3 являются уникальными монокристаллами рентгеновского излучения для получения одиночной резонансной линии мессбауэровского излучения на синхротронных установках, и поэтому к их структурному качеству и совершенству предъявляются очень высокие требования. Полученные из мессбауэровских спектров значения параметров сверхтонкого взаимодействия ядер ^{57}Fe в кристаллах FeVO_3 имеют важное значение для прикладных синхротронных применений этих кристаллов. Поэтому аппаратные уширения линий должны быть сведены к минимальным. С помощью модернизированного криостата проведены мессбауэровские измерения монокристалла FeVO_3 при температурах от 5.30 до 350.00 К с высокой точностью поддержания температуры [23].

Анализ спектров до и после модернизации показал существенное улучшение параметра ширины линии на полувысоте и интенсивности. Это заметно упрощает анализ мессбауэровских спектров, улучшает разрешение линий в спектре (что особенно важно при температурах вблизи магнитного перехода), а также экономит время эксперимента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена модернизация конструкции криостата замкнутого цикла, предназначенного для мессбауэровских исследований в диапазоне температур 3–420 К. Модернизация включала в себя разработку и установку нового штока с держателем исследуемого образца с применением шарнирного подвеса, установку нового стола для спектрометра и штока, модификацию виброизолирующей манжеты из гофрированной резины, замену криоголовки. Создана программа tStat-2021 для автоматизации управления температурой исследуемого образца. В результате модернизации уширение резонансных мессбауэровских

линий при низкотемпературных измерениях, до 5 К, удалось уменьшить с 15% до 4%.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны к.ф.-м.н. П.Г. Наумову за помощь и обсуждение результатов работы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-29-12016/21-мк, в части мессбауэровских исследований кристалла FeVO_3 . Пусконаладочные работы модернизированного мессбауэровского криостата и ядерно-резонансные измерения стандартных поглотителей были выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по государственному заданию ФНИЦ “Кристаллография и фотоника”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li X., Zhu K., Pang J., Tian M., Liu J., Rykov A.I., Zheng M., Wang X., Zhu X., Huang Y., Liu B., Wang J., Yang W., Zhang T. // Appl. Catal. B Environ. 2018. V. 224. P. 518.
<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.11.004>
2. Tombácz E., Turcu R., Socoliuc V., Vékás L. // Biochem. Biophys. Res. Commun. 2015. V. 468. № 3. P. 442.
<https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2015.08.030>
3. Oshtrakh M.I. // Cell Biochem. Biophys. 2019. V. 77. № 1. P. 15.
<https://doi.org/10.1007/s12013-018-0843-8>
4. Chuev M.A., Cherepanov V.M., Deyev S.M., Mischenko I.N., Nikitin M.P., Polikarpov M.A., Panchenko V.Y. // AIP Conference Proceedings. 2010. V. 1311. P. 322.
<https://doi.org/10.1063/1.3530033>
5. Rusakov V.S., Pokatilov V.S., Sigov A.S., Matsnev M.E., Gubaidulina T.V. // JETP Lett. 2014. V. 100. № 7. P. 463.
<https://doi.org/10.1134/S0021364014190102>
6. Kuzmann E., Homonnay Z., Klencsár Z., Szalay R. // Molecules. 2021. V. 26. № 4. P. 1062.
<https://doi.org/10.3390/molecules26041062>
7. Maksimova A.A., Klencsár Z., Oshtrakh M.I., Petrova E.V., Grokhovsky V.I., Kuzmann E., Homonnay Z., Semionkin V.A. // Hyperfine Interact. 2016. V. 237. № 1. P. 33.
<https://doi.org/10.1007/s10751-016-1218-4>
8. Sumanov V.D., Aksonov D.A., Drozhzhin O.A., Presniakov I., Sobolev A.V., Glazkova I., Tsirlin A.A., Rupasov D., Senyshyn A., Kolesnik I.V., Stevenson K.J., Antipov E., Abakumov A.M. // Chem. Mater. 2019. V. 31. № 14. P. 5035.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.9b00627>
9. Shen G., Mao H.K. // Reports Prog. Phys. 2017. V. 80. № 1. P. 016101.
<https://doi.org/10.1088/1361-6633/80/1/016101>
10. Williams J.M. // Cryogenics (Guildf). 1975. V. 15. № 6. P. 307.
[https://doi.org/10.1016/0011-2275\(75\)90077-6](https://doi.org/10.1016/0011-2275(75)90077-6)

11. *Micke P., Stark J., King S.A., Leopold T., Pfeifer T., Schmöger L., Schwarz M., Spieß L.J., Schmidt P.O., Crespo López-Urrutia J.R.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2019. V. 90. № 6. P. 065104.
<https://doi.org/10.1063/1.5088593>
12. *Ekin J.* Experimental techniques for low-temperature measurements: cryostat design, material properties and superconductor critical-current testing. NY.: Oxford U. Press, 2006. ISBN 978-0-19-857054-7.
<https://doi.org/10.1063/1.2743130>
13. *Gifford W.E.* Advances in Cryogenic Engineering. Boston, MA: Springer US, 1966. P. 152–159.
14. *D'Addabbo A., Bucci C., Canonica L., Di Domizio S., Gorla P., Marini L., Nucciotti A., Nutini I., Rusconi C., Welliver B.* // *Cryogenics (Guildf)*. 2018. V. 93. P. 56.
<https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2018.05.001>
15. *Ikushima Y., Li R., Tomaru T., Sato N., Suzuki T., Haruyama T., Shintomi T., Yamamoto A.* // *Cryogenics (Guildf)*. 2008. V. 48. № 9–10. P. 406.
<https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2008.04.001>
16. *Boolchand P., Lemon G.H., Bresser W.J., Enzweiler R.N., Harris R.* // *Rev. Sci. Instrum.* 1995. V. 66. № 4. P. 3051.
<https://doi.org/10.1063/1.1145528>
17. *Olivieri E., Billard J., De Jesus M., Juillard A. Leder A.* // *Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* 2017. V. 858. P. 73.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.03.045>
18. *Наумов П.Г., Любутин И.С., Фролов К.В., Демидов Е.И.* // *ПТЭ*. 2010. № 5. С. 158.
19. Криомагнитные системы tSTAT310x. URL: http://cryo.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=72&lang=ru.
20. *Courts S.S.* // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2017. V. 278. № 1. P. 012076.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/278/1/012076>
21. *Matsnev M.E., Rusakov V.S.* // *AIP Conference Proceedings*. 2012. V. 1489. P. 178.
<https://doi.org/10.1063/1.4759488>
22. *Yagupov S., Strugatsky M., Seleznyova K., Mogilenec Y., Snegirev N., Marchenkov N.V., Kulikov A.G., Eliovich Y.A., Frolov K.V., Ogarkova Y.L., Lyubutin I.S.* // *Cryst. Growth Des.* 2018. V. 18. № 12. P. 7435.
<https://doi.org/10.1021/acs.cgd.8b01128>
23. *Lyubutin I.S., Snegirev N.I., Chuev M.A., Starchikov S.S., Smirnova E.S., Lyubutina M.V., Yagupov S.V., Strugatsky M.B., Alekseeva O.A.* // *J. Alloys Compd.* 2022. V. 906. P. 164348.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164348>

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ МИНИАТЮРНЫЙ ТЕРМОСТАТ С ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

© 2023 г. В. А. Зеленков^а, М. Е. Лебедев^{а,*}, А. С. Рудый^а, А. Б. Чурилов^а

^аЯрославский государственный университет им. П.Г. Демидова
Россия, 150003, Ярославль, ул. Советская, 14

*e-mail: m.e.lebedev@ya.ru

Поступила в редакцию 12.08.2022 г.

После доработки 07.09.2022 г.

Принята к публикации 20.10.2022 г.

Описана конструкция лабораторного твердотельного термостата на элементах Пельтье с диапазоном рабочих температур от -50 до $+90^{\circ}\text{C}$, выполненного на современной элементной базе. Образцами могут быть пленки, фрагменты кремниевых пластин с исследуемыми структурами и другие миниатюрные объекты с литеральными размерами до 15×15 мм. Толщина образцов ограничивается теплопроводностью их материала и может достигать 3 мм.

DOI: 10.31857/S0032816223020313, EDN: GUGOXL

1. ВВЕДЕНИЕ

Большинство исследований в области материаловедения сопряжено с проведением температурных измерений или термостатированием образцов. Наиболее востребованный диапазон температур определяется условиями эксплуатации исследуемых материалов и составляет от -50 до $+100^{\circ}\text{C}$. При этом серийные термостаты и криостаты обеспечивают поддержание температуры лишь в какой-то части этого диапазона. Это связано с фазовыми переходами или изменением агрегатного состояния теплоносителей, в качестве которых обычно используются вода, масло, сухой лед и жидкий азот. Для термостатов с теплоносителем характерна высокая инерционность, которая тем больше, чем выше теплоемкость теплоносителя и точность термостатирования. Кроме того, такие термостаты достаточно громоздки и неудобны в эксплуатации.

Твердотельные термостаты на эффекте Пельтье свободны от всех перечисленных выше недостатков, но не обеспечивают такой точности термостатирования, как жидкостные. Это связано с тем, что тепловой контакт между образцом и твердотельным термостатом существенно хуже, чем при обтекании исследуемого образца жидким и даже газообразным теплоносителем. Для твердотельных воздушных термостатов погрешность поддержания температуры 0.1°C считается очень хорошим показателем и находится на уровне лучших образцов. Большинство прикладных исследований или опытно-конструкторских разработок ориентировано на промышленный (инду-

стриальный) диапазон температур — от -40 до $+85^{\circ}\text{C}$. При этом для температурных испытаний или решения исследовательских задач вполне достаточно точности 0.1°C . Поэтому для небольших плоских образцов размерами менее $15 \times 15 \times 0.5$ мм в указанном диапазоне целесообразно использовать воздушные твердотельные термостаты на эффекте Пельтье. Ниже приведено описание конструкции опытного образца лабораторного твердотельного термостата на элементах Пельтье с диапазоном рабочих температур от -50 до $+90^{\circ}\text{C}$ и точностью термостатирования $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$.

2. КОНСТРУКЦИЯ ТЕРМОСТАТА

Цель разработки состояла в конструировании и изготовлении лабораторного образца воздушного твердотельного термостата для исследования температурных зависимостей характеристик различных материалов, в частности зарядно-разрядных характеристик тонкопленочных электродов, твердых электролитов и литий-ионных аккумуляторов, в промышленном диапазоне температур. Термостат выполнен по симметричной схеме, представленной на рис. 1, которая обеспечивает наиболее эффективный теплообмен рабочей зоны термостата с окружающей средой. Для удобства загрузки образца термостат выполнен разъемным и состоит из верхней и нижней частей. Каждая часть содержит четырехступенчатый модуль Пельтье, внешняя поверхность которого находится в тепловом контакте с ребристым радиатором с принудительным охлаждением. Для измерения температуры термостатируемой по-

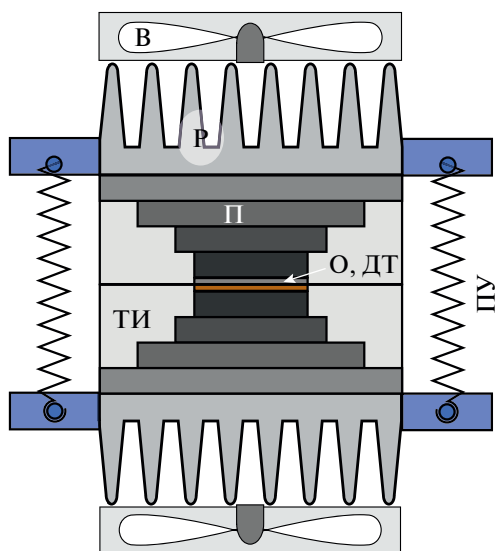


Рис. 1. Схема камеры термостата. В – вентилятор; Р – радиатор; П – 4-ступенчатый модуль Пельтье; О – образец; ДТ – датчики температуры; ТИ – теплоизоляция; ПУ – прижимное устройство.

верхности служат 2 датчика – термометр сопротивления и термистор. Датчики закреплены при помощи теплопроводящего клея в пазах медной пластины, которая служит для выравнивания температуры по поверхности образца. Для минимизации конвективного теплообмена на боковой поверхности свободное пространство внутри термостата заполнено пенополиуретаном. Вокруг образца сохраняется небольшой зазор, объем которого не превышает 0.1 см^3 . При низких температурах в зазоре может образовываться сначала конденсат, а потом и иней. Однако количество конденсата столь мало, что это не сказывается на точности электрических измерений и не приводит к деградации исследуемых образцов.

Для охлаждения образца до -50°C требуется несколько каскадов элементов Пельтье. В данном случае использовались четырехступенчатые термоэлектрические охладители TEC4-24603. Для нагревания служат те же элементы Пельтье, на которые подается напряжение обратной полярности. Поскольку элементы Пельтье не позволяют работать при температуре выше 130°C , верхний диапазон рабочих температур термостата был ограничен величиной 90°C .

Недостатком предложенной компоновки термостата является несимметричное распределение тепловых потоков между его верхней и нижней частями. Это обусловлено различным тепловым сопротивлением элементов Пельтье, разбором коэффициентов термо-ЭДС термостолбиков, а также теплообменом на боковых поверхностях. По этой причине на поверхностях термостатируемого образца всегда будет присутствовать не-

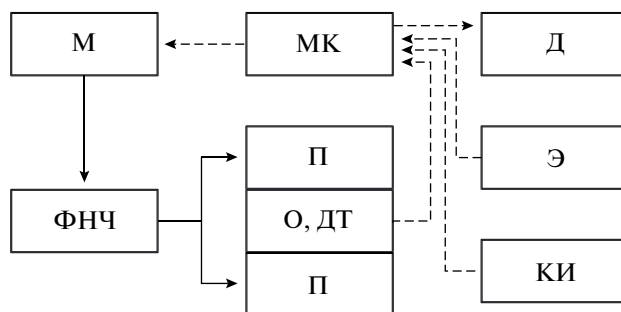


Рис. 2. Блок-схема термостата. МК – микроконтроллер; М – H-мост; ФНЧ – фильтр нижних частот; П – элементы Пельтье; О – образец; ДТ – датчики температуры; Д – дисплей; КИ – компьютерный интерфейс. Сплошными линиями показаны силовые соединения, штриховыми – слаботочные аналоговые или цифровые каналы.

большой перепад температур. Для устранения этого перепада и повышения точности термостатирования была разработана схема управления термостатом, описание которой приведено ниже.

3. СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕРМОСТАТОМ

Блок-схема контура управления термостатом представлена на рис. 2. Контур состоит из микроконтроллера МК, который управляется пользователем посредством энкодера Э. Микроконтроллер считывает показания датчиков температуры ДТ, расположенных по две стороны от образца О. Программное обеспечение микроконтроллера позволяет контролировать показания датчиков температуры, напряжение питания и наличие обрыва в силовой цепи или в цепи вентиляторов. Микроконтроллер фильтрует сигналы датчиков температуры, рассчитывает и формирует управляющий сигнал в пропорционально-интегрально-дифференцирующем регуляторе (ПИД-регуляторе). Широтно-импульсно модулированный (ШИМ) сигнал, заполнение которого регулируется микроконтроллером, передается на H-мост (М). H-мост выполняет функции усилителя тока и переключателя полярности питания элементов Пельтье. Между выходом H-моста и элементами Пельтье (П) установлен фильтр нижних частот ФНЧ, практически превращающий силовой ШИМ-сигнал в постоянное напряжение.

При разработке устройства испытывались различные датчики температуры: NTC-терморезисторы, миниатюрные термометры сопротивления типа Pt1000 производства “Honeywell” (на примере 700-102ВАА-В00 [1]) и термопары К-типа. Каждый из этих датчиков имеет свои достоинства и недостатки. Термометры сопротивления имеют линейную характеристику, но недостаточно чувствительны, тогда как термисторы имеют высокую чувствительность, но нелинейные ха-

рактики. Как показали испытания, наиболее точных и гарантированных от сбоев результатов можно достичь при одновременном использовании терморезистора и термометра сопротивления. Так, наиболее точными датчиками температуры для заявленного диапазона измерений являются термометры сопротивления Pt1000. Однако их максимальная точность достигается на отрезке от -50 до $+50^{\circ}\text{C}$ и составляет $\pm(0.1+0.0017|T|)^{\circ}\text{C}$ для класса точности АА [2]. Таким образом, термостат обеспечивает поддержание температуры от -50 до $+20^{\circ}\text{C}$ в режиме охлаждения и от 20 до 90°C в режиме нагрева с точностью не хуже $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$.

Для оцифровки сигнала термометра сопротивления используется модуль на основе микросхемы MAX31865 [3]. Модуль обеспечивает возможность использования 2-, 3- или 4-проводной схемы подключения к датчику. Поскольку расстояние от платы управления до термостата мало и составляет около 30 см, для подключения термометра используется двухпроводная схема. Для оцифровки сигнала термистора служит встроенный в микроконтроллер АЦП с разрешением 10 бит. Сигналы от обоих датчиков температуры фильтруются с помощью медианного фильтра, проверяются на попадание в допустимый диапазон температур и сравниваются. В случае обрыва или короткого замыкания в тракте любого из датчиков микроконтроллер выводит предупреждение и продолжает работу с оставшимся датчиком.

Для усиления ШИМ-сигнала микроконтроллера, а также для переключения режимов “нагрев”/“охлаждение” используется модуль H-моста на микросхеме VN2SP30 [4]. Микросхема позволяет коммутировать токи до 30 А, диапазон ее рабочих напряжений составляет 5.5–16 В. У микросхемы имеется вход ШИМ-сигнала PWM; входы для выбора полярности подключения нагрузки IN_A , IN_B ; выход датчика тока CS; вход для включения микросхемы “Enable”. Современные полевые транзисторы, на основе которых выполнена микросхема, в открытом и закрытом состояниях имеют сопротивления, весьма близкие к идеальным. Скорость переключения транзисторов невелика — до сотен герц, поэтому выделение тепла микросхемой минимально. Для ее охлаждения достаточно установить на нее пассивный радиатор с площадью 50 см². Хотя регулировка напряжения на модуле Пельтье с помощью ШИМ допустима и применяется некоторыми авторами [5, 6], в нашем случае она не используется. Напряжение с выхода H-моста поступает на модуль Пельтье через фильтр нижних частот, что положительно отражается на точности термостатирования.

4. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕРМОСТАТОМ

Программа для микроконтроллера написана в популярной среде Arduino и представлена на рис. 3. Микроконтроллер семейства Atmega 8 может быть смонтирован на макетной плате, распаян на специально разработанной плате или использоваться в составе платы Arduino. Применение платы Arduino удобно тем, что во многих версиях таких плат имеется USB-интерфейс, упрощающий связь с ЭВМ для отладки. В частности, описываемый в статье термостат использует плату Arduino Nano, установленную на макетной плате. Вывод интересующей нас информации и ввод команд осуществляются через последовательный интерфейс UART посредством имеющегося на плате USB-UART-преобразователя. В программе предусмотрено переключение режима между ручным и программным управлением. Переключение выполняется командой по последовательному порту. При отсутствии подключения к ЭВМ микроконтроллер работает в ручном режиме. Благодаря микроконтроллеру блок управления может осуществлять автоматическое термоциклирование по алгоритму, который задается программой ЭВМ. Скорости нагрева/охлаждения ограничены только точностью термостатирования, что позволяет проводить измерения в квазистационарном режиме.

Для обработки сигнала от термометра сопротивления используется библиотека “Adafruit_MAX31865” [7]. Поскольку модуль на микросхеме MAX31865 имеет цифровой выход, задействовать аналоговые входы микроконтроллера для этой задачи не требуется. Фильтрация медианного фильтром выполняется с помощью библиотеки “GyverFilter”. На сайте [8] представлено множество прикладных библиотек для работы с микроконтроллерами. Для формирования ШИМ-сигнала используется библиотека “GyverPID”. В качестве обратной связи используются значения температуры после фильтрации, а выходной сигнал передается на 8-битный ШИМ-выход.

В библиотеке “GyverPID” предусмотрен пример обучения управлением ШИМ — программа управляет силовым устройством для изменения сигнала обратной связи в заранее установленных пределах. При этом программа выводит пользователю рассчитанные коэффициенты преобразования: P (пропорциональный), I (интегральный), D (дифференциальный). Наиболее точных результатов можно добиться, если отдельно подобрать коэффициенты для режимов нагрева и охлаждения и переключать их в программе автоматически в зависимости от выбранной пользователем температуры. Поскольку при охлаждении увеличение выходной мощности вызывает уменьшение сигнала обратной связи, програм-

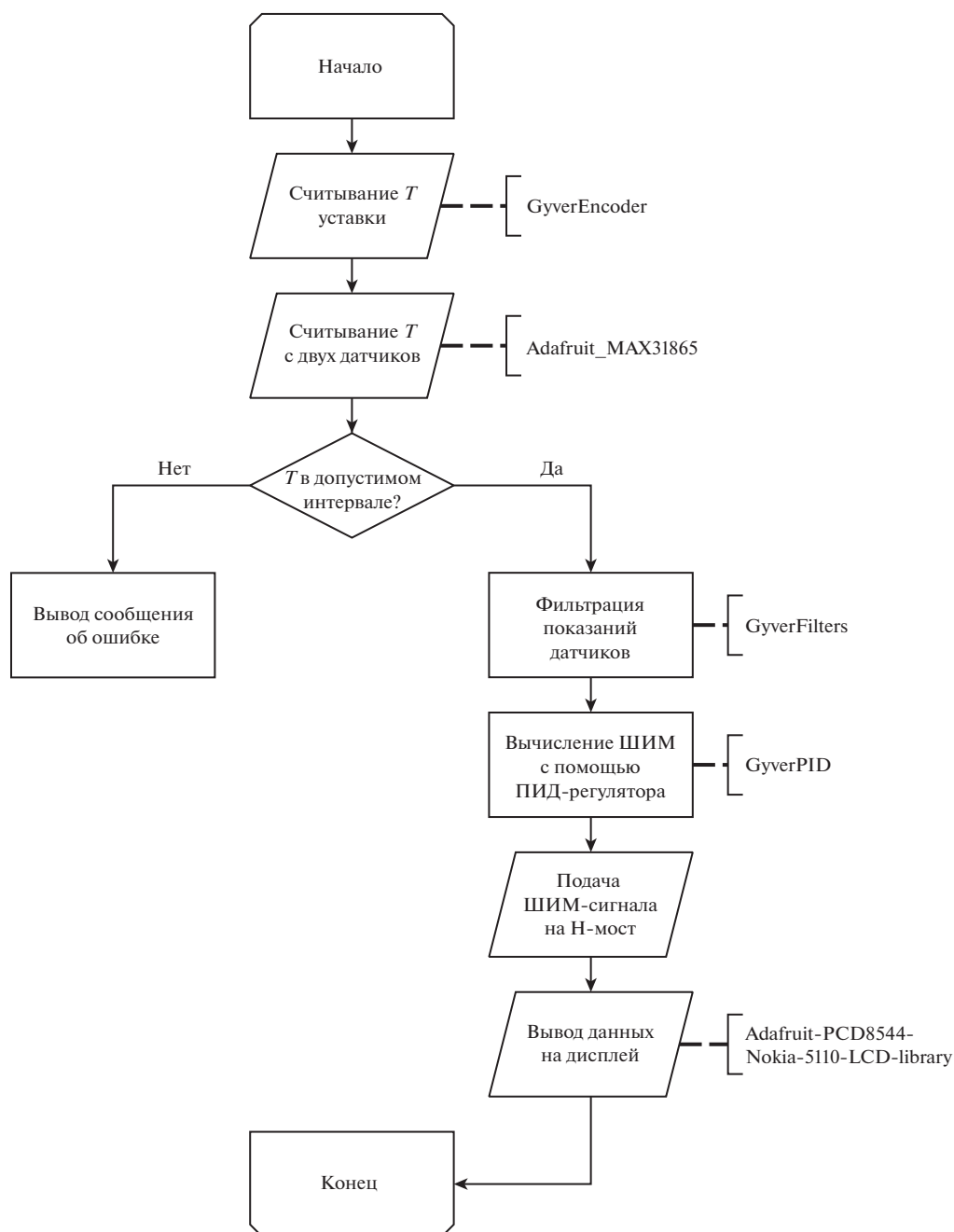


Рис. 3. Блок-схема управляющей программы. В комментариях указаны названия библиотек, использованных для тех или иных задач.

мой используется режим “REVERSE”, а при нагревании – “NORMAL”.

Сигнал энкодера обрабатывается с помощью библиотеки “GyverEncoder”. Отметим, что энкодер считывает не абсолютное, а относительное положение, поэтому в программе сигнал с энкодера обрабатывается в любое время, когда есть изменение, с помощью прерываний.

Экран для вывода информации на блоке управления может иметь различное исполнение:

он может быть графическим или знаковосинтезирующим и иметь различный размер. Авторы использовали дисплей из серии Nokia 5110. Дополнительно на блок управления можно установить сигнальные светодиоды “питание”, “в процессе”, “готов”, “ошибка”. Опционально может быть установлен звуковой сигнализатор, что позволит оперативно определять текущее состояние прибора и избавит от необходимости непрерывно следить за дисплеем и индикаторами.

5. ИСПЫТАНИЯ ТЕРМОСТАТА

Термостат испытывался в составе трех лабораторных установок:

- стенда для исследования механизмов переноса заряда в твердом электролите LiPON;
- стенда для исследования температурной зависимости зарядно-разрядных характеристик твердотельных тонкопленочных литий-ионных аккумуляторов (ТТЛИА);
- установки для исследования температурной зависимости импеданс-спектров ТТЛИА и их функциональных слоев.

В качестве примера ниже рассмотрен случай использования термостата для исследования механизмов переноса заряда в твердом электролите LiPON методом релаксации поляризации через внешнюю нагрузку. Исследования проводились в интервале температур от -50 до $+25^\circ\text{C}$ на специальном стенде, состоящем из блока переключения режимов “заряд/разряд” исследуемого образца, источника питания, цифрового осциллографа Hantek 6104 BD и термостата. Исследовались тестовые структуры Ti|LiPON|Ti, состоящие из пленки твердого электролита LiPON (500 нм), находящейся между титановыми токоотводами (100 нм). Структуры наносились магнетронным распылением на кремниевую пластину толщиной 400 мкм. В качестве контактов использовалась медная фольга, которая приклеивалась к титановым контактным площадкам токопроводящим клеем. Неровности, образованные в местах контактов, выравнивались теплопроводящей пастой.

Тестовые структуры, предварительно заряженные до напряжения 1 В, разряжались через внешнюю нагрузку разного номинала при различных температурах. Экспериментальные кривые разряда тестовой структуры Ti|LiPON|Ti через внешнюю нагрузку 1 кОм в интервале температур от -50 до $+25^\circ\text{C}$ показаны на рис. 4. Полученные кривые позволяют выявить механизмы поляризации твердого электролита, преобладающие в том или ином интервале температур, а также определить ток сквозной проводимости (ток утечки). Методом подгонки параметров математической модели релаксации поляризации было определено время релаксации миграционно-диффузионной поляризации. Последняя представляет собой перенос ионов и нейтральных атомов лития в LiPON и содержит информацию о коэффициенте диффузии лития.

В результате проведенных испытаний были подтверждены заявленные выше характеристики термостата. Следует отметить стабильность работы прибора при измерениях зарядно-разрядных характеристик ТТЛИА. Поскольку один цикл заряд/разряд при малых значениях тока может занимать несколько часов, точность термостатирования в этом случае играет важную роль. С помо-

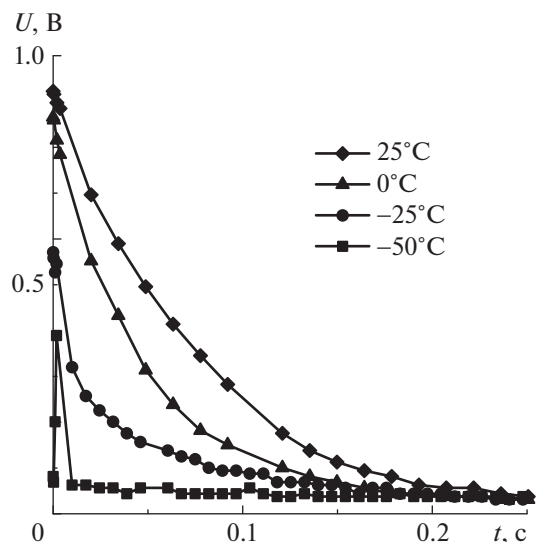


Рис. 4. Кривые разряда тестовой структуры Ti|LiPON|Ti через сопротивление 1 кОм.

щью термостата также были исследованы температурные зависимости емкости ТТЛИА и определены энергии активации носителей заряда в функциональных слоях ТТЛИА.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный твердотельный воздушный термостат (рис. 5) может найти применение как при решении широкого спектра исследовательских задач, так и при проведении испытаний различных материалов и устройств. В составе лабораторных стендов прибор использовался для исследования процессов переноса заряда в функциональных слоях ТТЛИА и измерения их зарядно-разрядных характеристик. С его помощью были получены новые данные о температурной зависимости емкости ТТЛИА и механизмах поляризации твердотельного электролита LiPON. В результате испытаний была подтверждена точность термостатирования 0.2°C . В перспективе конструкция термостата может быть адаптирована для проведения магнитных измерений и калибровки датчиков температуры. Введение оптоволоконной зоны термостатирования позволит исследовать свойства миниатюрных светодиодов, фотоэлектронных устройств и т.д.

Применяемые в термостате электронные компоненты и приемы программирования могут быть использованы для разработки твердотельных воздушных термостатов различных конструкций и назначения. На рынке имеется широкий выбор одноплатных компьютеров, совместимых со всеми цифровыми модулями, описанными в работе. При необходимости оцифровки аналогового сигнала потребуются внешние АЦП, например, типа

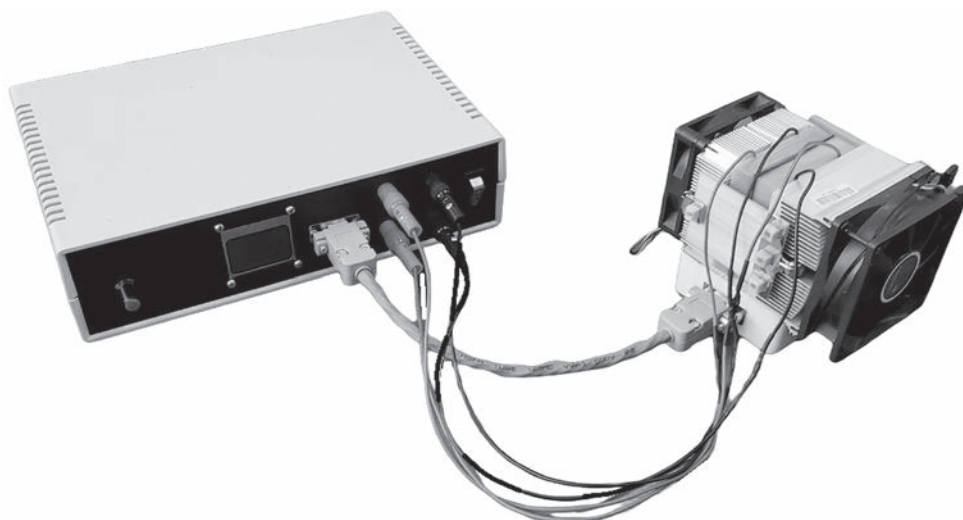


Рис. 5. Внешний вид термостата.

ADS1115 или AD7705. Имеющийся канал связи по последовательному порту позволяет сделать устройство более автономным с доступом по локальной сети и, следовательно, через Интернет. Программисты, знакомые с написанием веб-интерфейсов или графических интерфейсов, могут создать компьютерный интерфейс пользователя или же встроить управление термостатом в имеющуюся программу управления стендом. Устройство легко масштабируется. Скорость ШИМ и разрядность могут быть увеличены как программными, так и аппаратными методами, если это потребуется, например, при термостатировании образцов малой теплоемкости.

Тем не менее, рассмотренный вариант реализации системы управления термостатом не свободен от недостатков, основным из которых является тепловая инерционность сборки модулей Пельтье. Собственно недостатком инерционность становится только в узком интервале температур, вблизи комнатной, когда теплообмен с окружающей средой не так эффективен. Этот недостаток легко устраняется следующим классическим приемом – последняя ступень каждой сборки модулей Пельтье делается с независимым управлением. В результате нагрев или охлаждение в пределах 5°C осуществляется подачей напряжения только на последние ступени модулей Пельтье. Для этого требуется дополнительный силовой канал, что повышает возможности тонкой регулировки температуры, но несколько усложняет схему управления. Поскольку в рассматриваемом случае такая точность не требовалась, этот прием не использовался.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания ЯргУ им. П.Г. Демидова № 0856-2020-0006 на оборудовании ЦКП “Диагностика микро- и наноструктур”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 700 Series Platinum RTDs: электронный ресурс. URL: <https://www.infinite-electronic.ru/datasheet/27-700-102AAC-B00.pdf> (дата обращения 19.07.2022)
2. Термосопротивления: теория // Хабр – сообщество IT специалистов. URL: <https://habr.com/ru/company/efo/blog/312898/> (дата обращения 19.07.2022)
3. MAX31865 RTD-to-Digital Converter: электронный ресурс. URL: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX31865.pdf> (дата обращения 19.07.2022)
4. VNH2SP30-E – Automotive fully integrated H-bridge motor driver: электронный ресурс. URL: <https://www.pololu.com/file/0J52/vnh2sp30.pdf> (дата обращения 19.07.2022)
5. Selvaraj S.P., Dhashnamoorthy S., Dhurun M., Kishore V. // International Research Journal of Engineering and Technology. 2020. V. 7. № 3. P. 2242.
6. Peltier Element Efficiency: электронный ресурс. URL: <https://www.meerstetter.ch/customer-center/compendium/71-peltier-element-efficiency> (дата обращения 19.07.2022)
7. Adafruit MAX31865: электронный ресурс. URL: https://github.com/adafruit/Adafruit_MAX31865 (дата обращения 19.07.2022)
8. Alex Gyver Technologies: электронный ресурс. URL: <https://alexgyver.ru/> (дата обращения 19.07.2022)

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ В ЛАБОРАТОРИЯХ

УДК 621.31+621.37

ЭЛЕКТРОННЫЙ РЕГУЛЯТОР ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

© 2023 г. А. Ф. Васильев, И. В. Негинский, А. Л. Якимец

Поступила в редакцию 28.09.2022 г.
После доработки 24.11.2022 г.
Принята к публикации 26.11.2022 г.

DOI: 10.31857/S0032816223020271, EDN: GTWEKM

При проведении экспериментальных исследований довольно часто возникает необходимость плавной регулировки амплитуды сетевого напряжения. В частности, подобная задача возникает при определении тангенса угла диэлектрических потерь, при измерении которого необходимо равномерно увеличивать прикладываемое переменное напряжение от нуля до заданного значения [1, 2]. С этой задачей с успехом справляются лабораторные автотрансформаторы (ЛАТР) с механической регулировкой. Однако использование такого устройства в составе автоматической установки представляет определенные трудности, среди которых: необходимость электропривода для подвижного контакта ЛАТР, значительная инерционность перестройки напряжения, а также существенные массогабаритные характеристики трансформатора. Помимо этого, ЛАТР является довольно дорогостоящим прибором и склонен к выходу из строя при интенсивном использовании из-за механического повреждения провода движущимся контактом ЛАТР. Также известны регуляторы переменного напряжения с переключаемыми обмотками [3], но подобные конструкции не могут обеспечить плавного изменения выходного напряжения. Электронные регуляторы с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) часто имеют высокое значение коэффициента гармоник [4] или недостаточный диапазон изменения выходного напряжения [5].

Разработанное нами устройство лишено вышеперечисленных недостатков и обеспечивает плавное изменение амплитуды выходного переменного напряжения от нуля до уровня входного

напряжения. Управление устройством осуществляется внешним ШИМ-сигналом.

Принципиальная электрическая схема регулятора переменного напряжения приведена на рис. 1. Основой прибора является униполярный чопперный преобразователь, собранный на составных MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect-Transistor) транзисторах T_5 – T_8 . Для устранения проникновения высокочастотных помех во входную и выходную цепи используются LC-фильтры.

Управление устройством осуществляется ШИМ-сигналом, имеющим частоту 30–50 кГц, который поступает на формирователь управляющих импульсов. Управляющий сигнал подается на вход компаратора $DA_{1,1}$, напряжение с выхода которого через эмиттерный повторитель T_1 , T_2 поступает на вход линий задержки, собранных на RC-цепочках и компараторах $DA_{2,1}$, $DA_{2,2}$. Линия задержки обеспечивает формирование двух противофазных сигналов управления силовыми ключами, исключая появление сквозных токов. Полученные сигналы управления поступают на оптически развязанные драйверы ключей DA_3 , DA_4 , питание которых осуществляется модульными DC/DC конверторами U_1 , U_2 . Благодаря этому цепи управления и формирования не имеют гальванической связи с силовой частью схемы.

Для защиты регулятора напряжения от превышения выходным током заданного значения используется холловский измеритель тока (DA_5), включенный в выходную цепь. Напряжение с выхода измерителя после детектора поступает на вход компаратора $DA_{1,2}$, сравнивающего полученное напряжение с опорным, которое формирует-

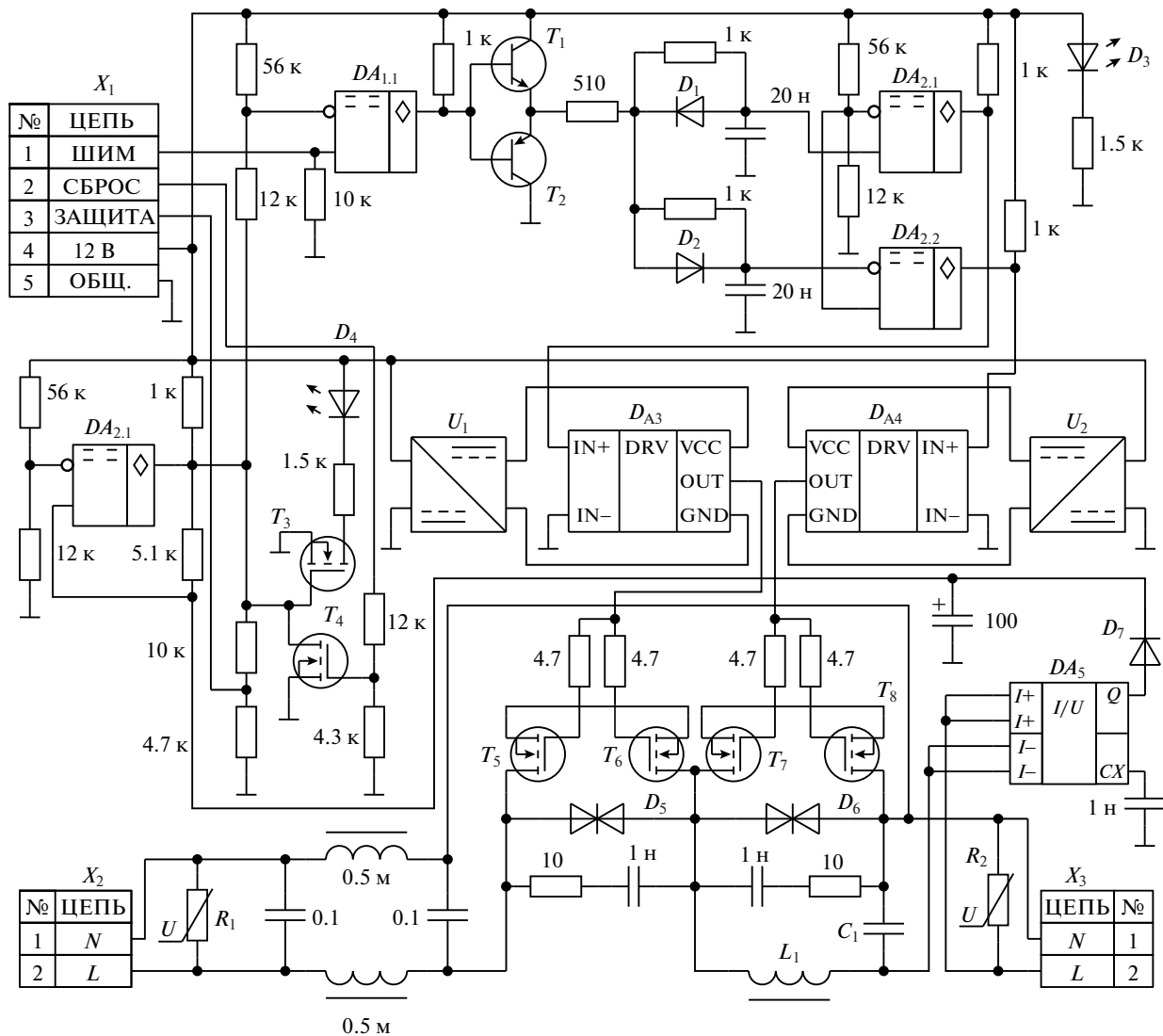


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема электронного регулятора. DA_1 и DA_2 – LM2903, DA_3 и DA_4 – HCPL-3120, DA_5 – ACS712; T_1 – BC847, T_2 – BC556, T_3 и T_4 – 2N7000, T_5 – T_8 – BUZ90AF; D_1 и D_2 – 1N5395, D_3 и D_4 – GNL-3012ED, D_5 и D_6 – 1,5KE200CA; R_1 , R_2 – B72220-S; U_1 , U_2 – преобразователи напряжения 12–12.

ся резистивным делителем. Сигнал с выхода компаратора отключает управляющий ШИМ-сигнал и поступает на выход устройства для обработки внешним устройством. Информация о срабатывании защиты индицируется светодиодом D_4 , подключенным к стоку транзистора T_3 . Защита регулятора является триггерной, и ее сбросить можно выключением напряжения питания либо внешним управляющим сигналом, подаваемым на затвор транзистора T_4 .

Светодиод D_3 предназначен для индикации подачи на устройство напряжения питания. Диоды D_5 , D_6 являются защитными. Выходная мощ-

ность прибора определяется параметрами ключевых транзисторов и параметрами выходного фильтра (L_1 , C_1).

На рис. 2 представлены осциллограммы фрагментов выходного сигнала, измеренных в точках до выходного фильтра (I) и на выходе устройства (2).

Напряжение на выходе описываемого регулятора является гармоническим и может изменяться в диапазоне от нуля до уровня входного напряжения, при этом коэффициент гармоник выходного сигнала зависит от типа используемой нагрузки, уровня выходного напряжения и не превышает 2%, его типовое значение составляет 1%. Частота регулируемого напряжения лежит в

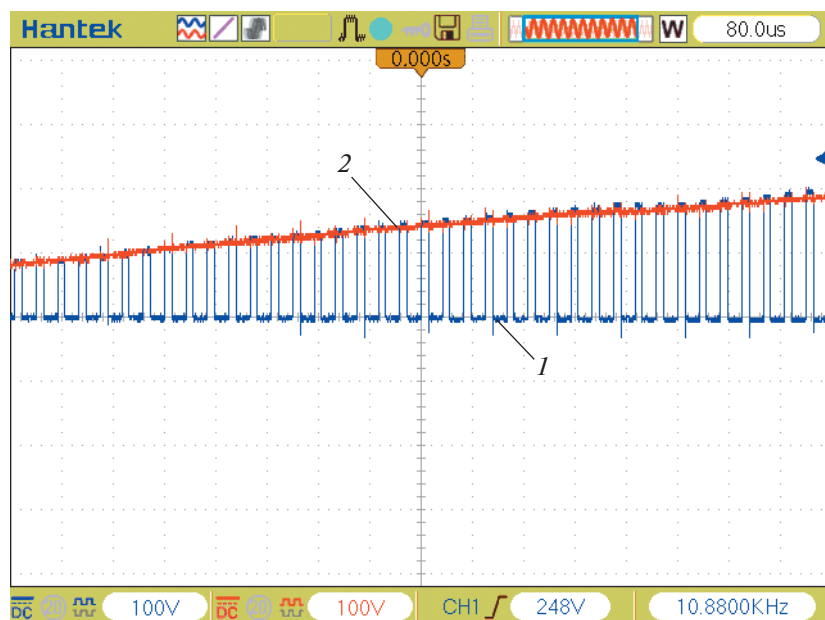


Рис. 2. Осциллограммы напряжений до (1) и после (2) выходного фильтра.

диапазоне 0 – 600 Гц. Отклонение амплитуды выходного напряжения от заданного значения не выше 1%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 12179-76 Кабели и провода. Метод определения тангенса угла диэлектрических потерь. М., 2003.
2. ГОСТ 6433.4-71 Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости при частоте 50 Гц. М., 1972.
3. Журавлев И.И., Панфилов Д.И., Асташев М.Г., Рожков А.Н., Красноперов Р.Н., Горчаков А.В. // Электротехника. 2022. № 6. С. 23. https://doi.org/10.53891/00135860_2022_6_23
4. Доманов В.И., Доманов А.В., Муллин И.Ю. // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2009. № 2. С. 32.
5. Куриченко А.А., Ивлиев А.Д. // ПТЭ. 2018. № 5. С. 149. <https://doi.org/10.1134/S0032816218050105>

Адрес для справок: Россия, 400062, Волгоград, просп. Университетский, 100; Волгоградский государственный университет, Институт математики и информационных технологий. E-mail: yakimets_volsu@mail.ru (Якимец А.Л.)

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ В ЛАБОРАТОРИЯХ

УДК 550.3+553.9

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ С ГАЗОГИДРАТАМИ

© 2023 г. В. И. Юсупов^{a,b}, А. Н. Коновалов^a, Н. В. Минаев^a,
С. И. Цыпина^a, И. С. Семилетов^b

Поступила в редакцию 15.11.2022 г.

После доработки 19.12.2022 г.

Принята к публикации 27.12.2022 г.

DOI: 10.31857/S0032816223030163, EDN: IVINMG

В последнее время появляется все больше работ, посвященных газогидратам метана. Такой повышенный интерес к этой теме обусловлен тремя основными факторами: 1) метан в тепловом балансе Земли играет важную роль, 2) исследователи фиксируют беспрецедентный рост концентрации метана в атмосфере и 3) этот рост связан с ускоряющимся разложением природных газовых гидратов в осадочной толще океана [1, 2]. Для того чтобы понять, что происходит с выбросом метана в настоящее время и может произойти в ближайшем будущем, учеными проводятся крупномасштабные натурные исследования и модельные эксперименты. Актуальным является лабораторное изучение поднятых на поверхность образцов донного грунта с вкраплениями газогидратов метана.

Такие исследования могут быть выполнены на созданном нами лабораторном стенде (рис. 1а), специально предназначенном для исследования образцов гидратосодержащих пород как искусственного, так и естественного происхождения. Основу стенда составляют лазерные источники, скоростная камера, тепловизор и спектрометр комбинационного рассеяния.

Образец 1 для исследования первоначально помещают под микроскоп спектрометра 7 комбинационного рассеяния (КР). При этом он может находиться в охлаждаемом реакторе высокого давления 8 с прозрачным верхним окошком. Под микроскопом изучается структура поверхности и снимается карта спектров КР. По характерным пикам на спектрограммах определяется состав частиц и делается заключение о наличии газогидратов в

структуре. На втором этапе образец 1 помещается на столик трехкоординатной подвижки 2. Под визуальным контролем (цифровая камера 3) с помощью тепловизора 4 получают термограммы участка поверхности образца (рис. 1б). Такие наблюдения по характерным областям с пониженной температурой позволяют выявлять газогидратные включения, активно разлагающиеся при нормальных условиях. На третьем этапе проводится изучение взрывоподобного разложения газогидратных вкраплений. Для этого выбранный участок образца нагревают лазерным импульсом, а разлет частиц регистрируют скоростной камерой. Такие эксперименты позволяют получать, помимо информации о содержании газогидратов и поровой влаги, важные для проведения модельных экспериментов прочностные характеристики образца.

В стенде использованы: скоростная камера Fastcam SA-3 (Photron, Япония), тепловизор FLIR A655sc (FLIR, США) с макрообъективом, КР-спектрометр (Nicolet Omega XP, США). Нагрев осуществляется сфокусированным импульсным излучением YAG:Er лазера с длиной волны 2.94 мкм, длительностью импульса 0.5 мс и энергией до 8 Дж. Отметим, что для более полного изучения гидратосодержащих образцов стенд может быть дополнен лазерными источниками с другими параметрами. Кроме того, дополнительные исследования могут быть проведены на стенде для исследования образования и разложения газогидратов [3, 4].

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа поддержана программой развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

^aИнститут фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Россия, Москва, Троицк.

^bТомский государственный университет, Россия, Томск.

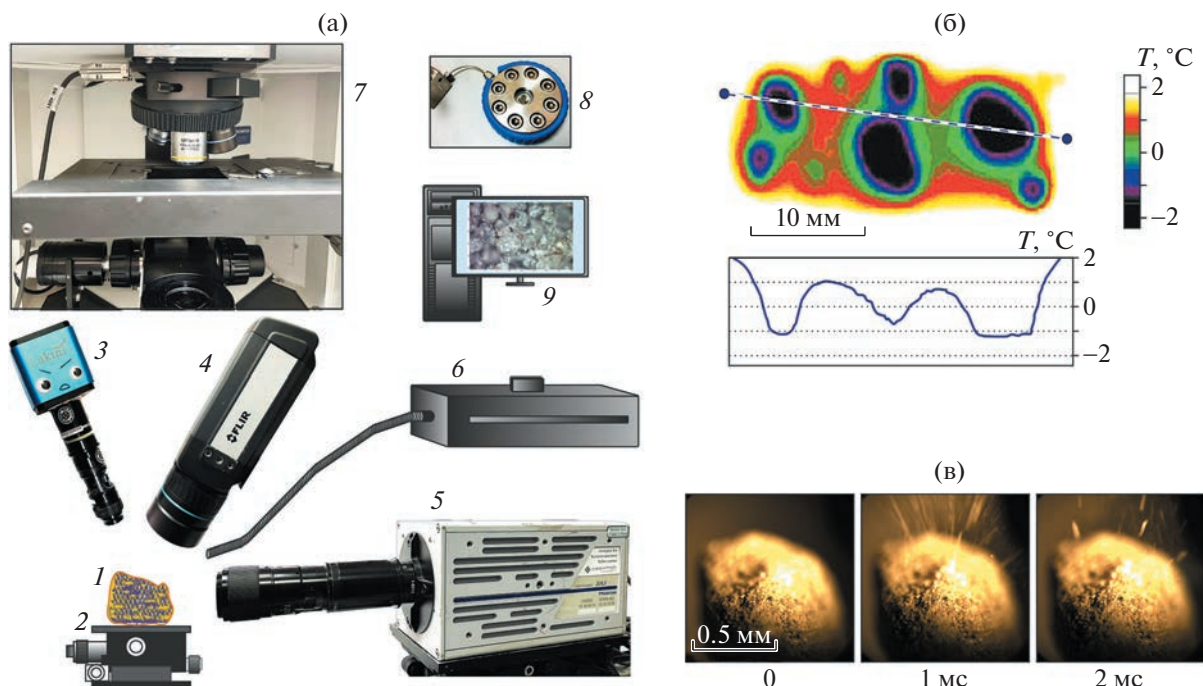


Рис. 1. а – схематическое изображение стенда (1 – образец, 2 – трехкоординатная подвижка, 3 – цифровая камера, 4 – тепловизионная камера, 5 – скоростная камера, 6 – лазерный источник, 7 – КР-спектрометр, 8 – охлаждаемый реактор высокого давления, 9 – управляющий компьютер); б, в – некоторые результаты, полученные при тестировании образца с газогидратами метана: термограмма образца с вкраплениями газогидратов (б), показано изменение температуры на разрезе (по штриховой линии), а также кадры скоростной съемки при лазерном импульсном нагреве образца (в).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kostach D., Gustafsson Ö. // Science. 2010. V. 327. № 5970. P. 1246. <https://doi.org/10.1126/science.1182221>
2. Юсупов В.И., Салюк А.Н., Карнаух В.Н., Семилетов И.П., Шахова Н.Е. // Доклады Академии наук. 2010. Т. 430. № 6. С. 820.
3. Минаев Н.В., Юсупов В.И., Баграташвили В.Н. Патент № 133022 РФ // Оpubл. 10.10.2013. Бюл. № 28.
4. Юсупов В.И., Минаев Н.В., Саломатин А.С., Черных Д.В., Семилетов И.П., Баграташвили В.Н. // ПТЭ. 2018. № 3. С. 159. <https://doi.org/10.7868/S0032816218030151>

Адрес для справок: Россия, 108840, Москва, Троицк, ул. Пионерская, 2, Институт фотонных технологий ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН. Тел.: +79151862495. E-mail: iouss@yandex.ru (Юсупов В.И.)

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ
В ЛАБОРАТОРИЯХ

УДК 681.542

**ВСТРОЕННАЯ МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ
ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ ЧЕТЫРЕХКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОПТИЧЕСКИХ
ДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ 32-БИТНЫХ
ARM-КОНТРОЛЛЕРОВ МИЛАНДР 1986VE92QI**

© 2023 г. Н. В. Дунин, В. Б. Дунин, С. А. Савинов, Т. Е. Демихов,
С. Н. Майбуров, Е. И. Демихов

Поступила в редакцию 13.09.2022 г.

После доработки 05.12.2022 г.

Принята к публикации 27.12.2022 г.

DOI: 10.31857/S0032816223030205, EDN: CVUWMJ

Для измерения характеристик сверхслабого оптического излучения от биокультур используются блоки регистрации на основе фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) [1].

Наиболее подходящая элементная база для подсчета импульсов с таких блоков регистрации — это однокристалльные микроконтроллеры. Среди российских разработчиков таких приборов можно выделить фирму “ПКК Миландр”. Микроконтроллеры этой фирмы используются в военной, авиакосмической и специальной технике. Микроконтроллер ARM Cortex-M3 1986VE92QI от фирмы “Миландр”, установленный на печатную плату регистрации интенсивности событий, осуществляет подсчет импульсов детектора оптического излучения и детектора космического излучения.

В программно-аппаратном комплексе блока регистрации интенсивности событий был реализован следующий функционал: наличие файловой системы, запись измерений на карту SD, измерение температуры с внешнего цифрового датчика, коммуникация по UART в режиме циклического опроса. Для обслуживания регистратора была создана программа RedSD.exe в среде Lazarus IDE, исполняемая под ОС Windows версии не ниже Windows 7.

Основные технические характеристики. Прибор работает в режиме записи данных на съемный носитель или в режиме мониторинга данных через ПК. Блок регистрации импульсов подсчитывает сигналы в TTL-стандарте. Амплитуда регистрируемых сигналов составляет 3.3 В. Минимальная длительность импульса 10 нс. Габариты микропроцессорной системы (регистратора) составляют: диаметр — 11 см, высота — 2 см.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Авторы выражают признательность за финансовую поддержку Российскому фонду фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 19-29-10007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дунин Н.В., Дунин В.Б., Савинов С.А., Рыбаков А.С., Майбуров С.Н., Багдинова А.Н., Демихов Е.И. // ПТЭ. 2013. № 1. С. 132.
doi10.31857/S003281622206012X

Адрес для справок: Россия, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинский просп., 53, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, e-mail: demihovei@lebedev.ru (Демихов Е.И.)

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ В ЛАБОРАТОРИЯХ

УДК 621.317+612.8

РЕГИСТРАЦИЯ РЕФЛЕКСА ИСПУГА

© 2023 г. В. О. Молодцов^{a,b}, В. Ю. Смирнов^{a,c},
С. Д. Солнушкин^a, В. Н. Чихман^a

Поступила в редакцию 25.11.2022 г.

После доработки 10.12.2022 г.

Принята к публикации 16.01.2023 г.

DOI: 10.31857/S0032816223030242, EDN: CWRFWW

Одной из методик экспериментальных физиологических исследований является регистрация поведения лабораторных животных в ответ на тревожный, в частности звуковой, раздражитель (Acoustic Startle Reflex – ASR) [1, 2]. Вздрагивание или замирание экспериментального животного как реакция на акустический сигнал регистрируется при исследовании нейронных механизмов обработки сенсомоторной информации. Реализация количественной оценки этой реакции предоставляет дополнительные возможности экспериментаторам для выяснения нейронной основы поведенческой пластичности, понимания неврологических заболеваний человека.

Работы по измерению рефлекса испуга известны давно [1]. Рефлекс измеряется с помощью электромиографии и визуализации головного мозга с помощью позитронно-электронной томографии. В последние годы разрабатывались компьютеризированные устройства, например система производства фирмы Med Associates Inc (USA) или комплекс производства группы компаний “Виварий” (Белгород, Россия), использующие для регистрации вздрагивания в качестве датчиков акселерометры. Однако эти комплексы характеризуются сложностью и высокой стоимостью.

Нами разработано относительно простое устройство MD308 и написана программа для количественной оценки ASR на базе персонального компьютера с операционной системой Windows. Экспериментальная установка представляет собой клетку, в которую помещается лабораторное животное (белые крысы). Пол клетки выполнен в виде пластиковой платформы, устанавливаемой на четыре опоры из поролона, опирающиеся в свою очередь на четыре пьезодатчика (типа MakerHawk Analog Ceramic Piezo Vibration Sensor),

размещенные в днище клетки. В верхней части клетки установлен акустический динамик для подачи звукового раздражителя, а под днищем – электронное устройство MD308 (рис. 1). Устройство MD308 выполнено на основе микроконтроллера (D_1) STM32L053C8T6 (STM, Switzerland), обеспечивающего передачу выходных кодов аналого-цифрового преобразователя (Analog-to-Digital Converters – ADC) в компьютер в соответствии с протоколом интерфейса USB. Выходы пьезодатчиков (AIN0–AIN3) через разъем X3, делитель напряжения и емкость, образующие фильтр низкой частоты, подключены к входам ADC микроконтроллера. Одновременное с сигналами от пьезодатчиков измерение аудиосигнала обеспечивает временную привязку для дальнейшей обработки регистрируемых данных. Формируемый компьютером звуковой сигнал подключен к ADC через разъем X5 и фильтр высокой частоты со смещением сигнала к середине диапазона, чтобы преобразовать биполярный сигнал в униполярный.

Устройство с частотой 1 кГц измеряет напряжение на входах от датчиков (ADC IN0–ADC IN3) и от аудиовхода (ADC IN4), т.е. по пяти каналам, формирует пакеты из шести таких измерений (30 значений по 16 бит = 60 байт) и отправляет их в USB. Диапазон дискретизации от 0 до 2047. При частоте дискретизации 1000 Гц пакеты поступают в компьютер каждые 6 мс. Данная частота дискретизации вполне достаточна, так как латентное время реакции вздрагивания составляет порядка 50–300 мс [3].

MD 308 представляет собой USB Custom HID устройство (для Windows это стандартный класс USB-устройств, не требующих драйверов), обмен данными с которым осуществляется путем отправки и получения отчетов (HID_Reports) в режиме запрос–ответ. Устройство открывается по имени “MD308”. Микроконтроллер при старте подключается по протоколу USB к компьютеру и выполняет выдачу данных дискретизации сигналов. Выдача осуществляется порциями по 60 байт

^aИнститут физиологии им. И.П. Павлова РАН, Россия, Ленинградская обл., село Павлово.

^bСанкт-Петербургский государственный электротехнический университет, Россия, Санкт-Петербург.

^cНаучно-технический центр “Радиационная экология” (НТЦ “РАДЭК”), Россия, Санкт-Петербург.

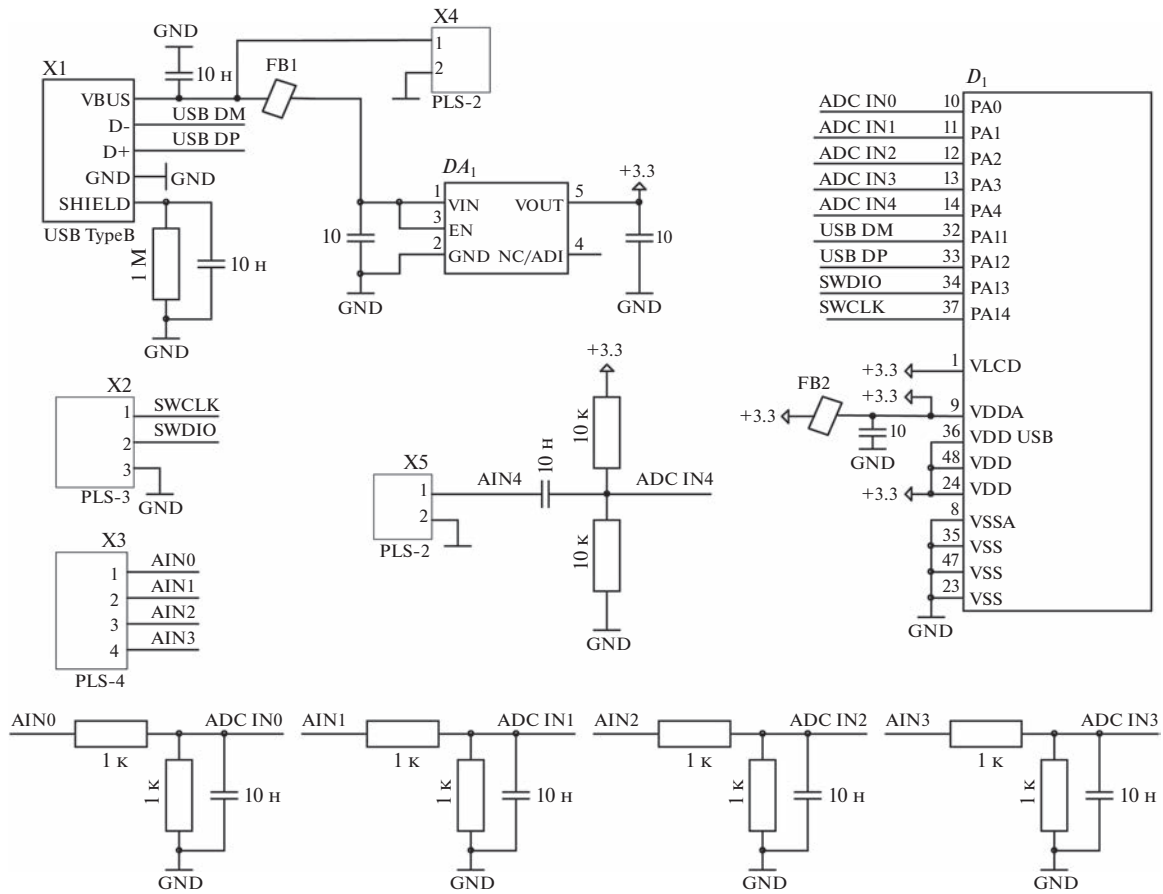


Рис. 1. Принципиальная схема устройства MD308. X1 – разъем для связи с USB; X2 – технологический разъем для программирования микроконтроллера; X3 – разъем для связи с пьезодатчиками, X4 – разъем для питания усилителя звука; X5 – разъем для подачи на вход ADC звукового сигнала; D1 – микроконтроллер STM32L053C8T6; DA1 – линейный стабилизатор на +3.3 В для питания микроконтроллера.

(ID_Report – 0x03): 6 отсчетов по пяти каналам по 2 байта (канал 0 – первый отсчет, канал 1 – первый отсчет, ..., канал 4 – первый отсчет, далее – канал 0 – второй отсчет и т.д.).

Группировка результатов дискретизации по шести выходным значениям выбрана из соображения удобного обеспечения дальнейшего мониторинга данных на экране с учетом того, что в HID максимальная частота передачи пакетов 1 кГц, а размер одного пакета максимум 64 байта. Микрокод для функционирования микроконтроллера разработан на языке C++ в среде IAR Embedded Workbench for ARM (IAR, Sweden) с использованием библиотеки USB, созданной фирмой STM. Установка SMD-компонентов (конденсаторов, резисторов и др.) на схеме MD308 с соответствующими номинальными значениями выполнена, согласно апробированным схемотехническим решениям. Разработка схемы, проектирование и разводка печатной платы выполнены с помощью программных средств CAD ALTIUM DESIGNER (Altium Europe GmbH).

Программа обработки сигналов написана в среде Borland Delphi 7, использует библиотеку компонентов JEDI VCL с компонентом TjvHidDeviceController, реализующим доступ к HID совместимым USB-устройствам. Программа обеспечивает количественную регистрацию сигналов от четырех пьезодатчиков, формирование акустического сигнала с заданными параметрами (амплитуда, частота, длительность, количество звуковых стимулов), фиксацию времени начала стимула. Реализовано динамическое отображение процессов, их сохранение в базе данных.

Эксплуатация устройства MD308 в Институте физиологии им. И.П. Павлова РАН подтвердила эффективность его применения при невысоких затратах на изготовление.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке госпрограммы 47 ГП “Научно-технологическое развитие Российской Федерации” (2019–2030), тема 0134-2019-0005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hoffman H.S., Fleshler M.* // American Journal of Psychology. 1964. V. 77. 307.
2. *Koch M.* // Progress in Neurobiology. 1999. V. 59. P. 107.
3. *Ramirez-Moreno D., Sejnowski T.* // Biol Cybern. 2012. V. 106 (3). P. 169.

Адрес для справок: Россия, 188680, Ленинградская обл., село Павлово, Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН. E-mail: V_C_pavlinst@mail.ru

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ В ЛАБОРАТОРИЯХ

УДК 620.172/173+537.533.35

УСТАНОВКА ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ *IN SITU* В РАСТРОВОМ ЭЛЕКТРОННОМ МИКРОСКОПЕ

© 2023 г. Т. Д. Пацаев^а, Е. В. Ястремский^{а,б}, С. В. Крашенинников^а, А. Е. Крупнин^а,
К. Г. Антипова^а, К. Е. Луканина^а, Т. Е. Григорьев^а, Р. А. Камышинский^{а,б}, А. Л. Васильев^{а,б}

Поступила в редакцию 09.11.2022 г.

После доработки 15.12.2022 г.

Принята к публикации 16.01.2023 г.

DOI: 10.31857/S0032816223030266, EDN: CWXJHP

Определение физико-механических свойств материалов – важная составляющая разработки изделий практически во всех сферах науки и техники. Такие исследования необходимы при разработке полимерных матриц – основы для формирования искусственных органов и тканей, на которые высаживают культуры клеток [1]. Для оценки механических свойств материалов матриц используются испытательные установки, измеряющие напряжения в материале в зависимости от его деформации [2]. Процесс формирования разрывов в матриксе и их распространение при рассмотрении на микроуровне, даже для идентичных материалов, могут кардинально различаться в зависимости от морфологических особенностей матрикса. Из-за сложной геометрии матрикса невозможно использовать простые модели механики разрушений для описания происходящих процессов. Дополнительная визуализация помогает решить задачу качественного и количественного описания процесса деформирования и разрыва топологически сложных волокнистых, губчатых или пленочных структур. В силу большой глубины резкости в растровой электронной микроскопии (РЭМ) (в отличие от световой микроскопии) возможно получение хорошо сфокусированного изображения в широком диапазоне толщин образца [3]. Ограничением РЭМ является требование электропроводности объекта исследования, однако в современных растровых электронных микроскопах эта проблема решается с помощью “ухудшения” вакуума и напуска водяных паров в камеру прибора, что снимает заряд с поверхности образца. Этот метод получил название ЕРЭМ (РЭМ в режиме естественной среды) [4]. Однако использование ЕРЭМ требует понижения температуры образца.

Исследования механических свойств различных материалов *in situ* методами РЭМ/ЕРЭМ проводились ранее [5–7], но практически только для “твердотельных” образцов. В настоящей публикации представлена созданная нами установка для механических испытаний *in situ* полимеров (хотя возможны любые другие материалы) в камере растрового электронного микроскопа Versa (Thermo Fisher Scientific, США), работающего в режиме ЕРЭМ.

Общий вид установки в камере растрового электронного микроскопа представлен на рис. 1. Основа установки – металлический каркас для фиксации образца, совмещенный со столиком 2 для ЕРЭМ. На каркасе размещены неподвижный зажим 1 для образцов, шаговый электродвигатель (3) CTN28-0601-30 (ToAuto, Китай) с точностью шага 50 мкм, способный перемещать вдоль одного направления упор, на котором последователь-

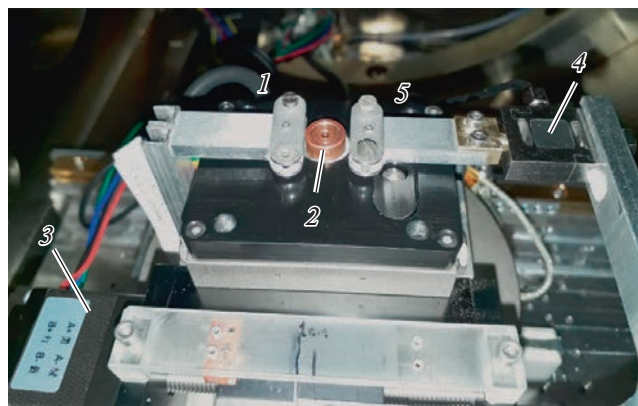


Рис. 1. Установка внутри камеры растрового электронного микроскопа. 1 – неподвижный зажим; 2 – столик для ЕРЭМ-экспериментов с возможностью охлаждения образца и регулирования влажности среды; 3 – мотор с подвижным элементом, на котором закреплен тензометрический датчик 4 со вторым зажимом 5.

^аНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Россия, Москва.

^бИнститут кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, Россия, Москва.

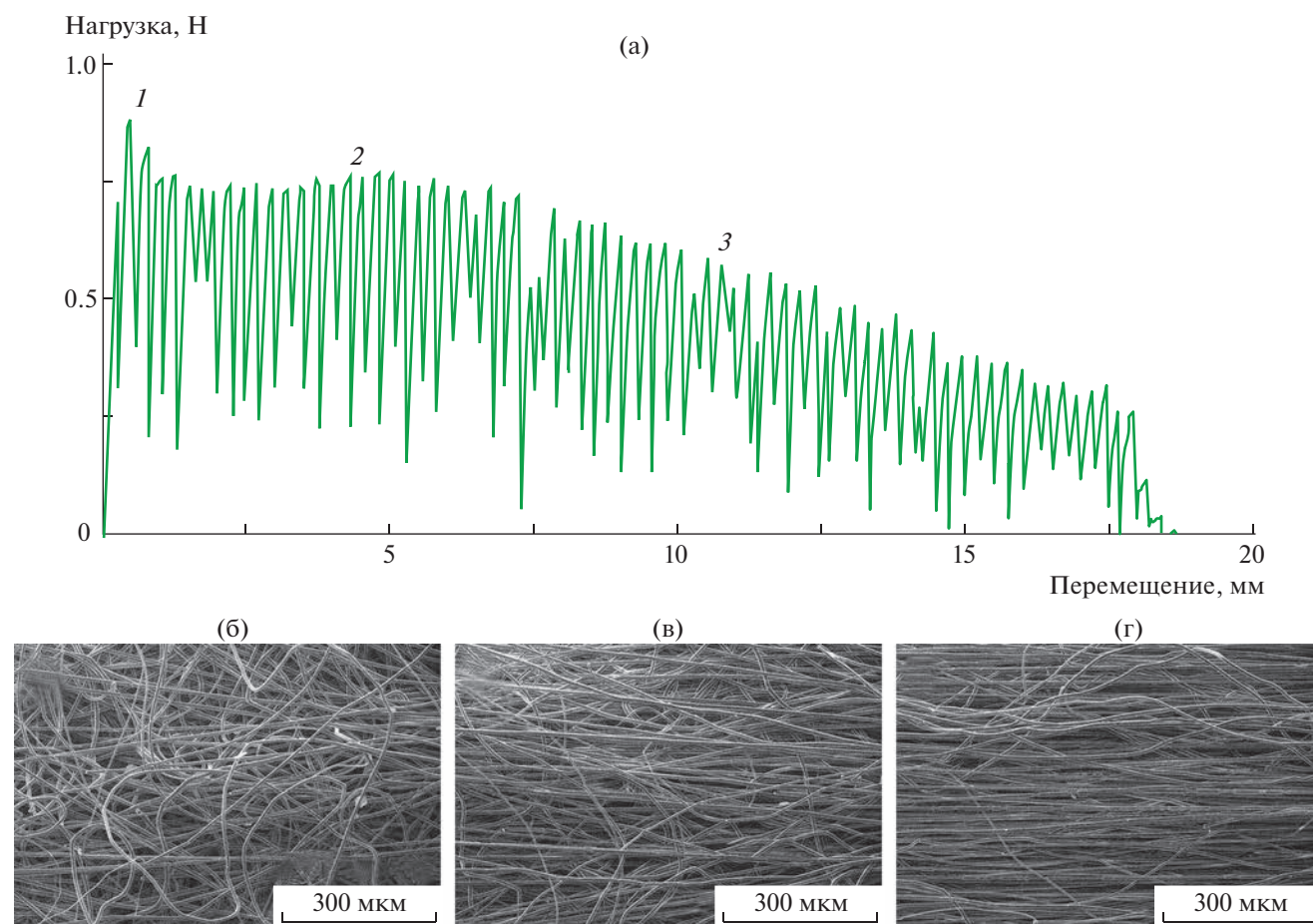


Рис. 2. а – график зависимости нагрузки от перемещения при растяжении волокнистого нетканого образца полилактида (ПЛА); б–г – изображения, полученные в растровом электронном микроскопе, соответствующие моментам 1–3 эксперимента, показывающие изменение направления волокон.

но закреплены тензометрический датчик (4) F28082210068-100N (Tecsis, Индия) и второй зажим 5. В установке можно исследовать образцы толщиной до 7 мм, для чего были разработаны сменные зажимы с вертикальной фиксацией удерживающих элементов. Для каждого из зажимов предусмотрено два типа фиксаторов для проведения испытаний на растяжение и упор для испытаний на сжатие.

Для считывания данных тензометрического датчика было сконструировано устройство на основе микроконтроллера ATmega328 на плате, совместимой с Arduino (Италия) (управляющая плата с собственным процессором, памятью и контактами) и аналого-цифровым преобразователем NH711 с усилителем сигнала. Предусмотрен контакт образца с охлаждающим устройством. Также было разработано программное обеспечение, позволяющее подключаться к устройству по последовательному порту. Ввод шины управления и получения данных осуществляется через штатный вакуумный разъем микроскопа. Можно зада-

вать скорость растяжения (или сжатия), которую принято устанавливать равной 100% или 250% от начальной длины образца в минуту (что для стандартных образцов соответственно составляет 10 мм/мин или 25 мм/мин).

После задания необходимых параметров и начала эксперимента данные записываются и отображаются в виде графика зависимости нагрузки (H) от перемещения (в миллиметрах) в реальном времени. Для одновременного получения деформационных данных и регистрации микрофотографий образец растягивается или сжимается на выбранное расстояние в диапазоне от 50 мкм до 20 мм, причем в процессе эксперимента движение останавливается на время, необходимое для получения изображения, после чего движение возобновляется. Во время остановки происходит релаксация материала, что вызывает появление “пилы” на графике (рис. 2). Для верификации полученных результатов аналогичные образцы были протестированы на поверенной установке INSTRON 5965, в результате было выявлено вы-

сокое совпадение механических характеристик. Небольшой разброс проявлялся из-за индивидуальных особенностей полимерных губчатых и нетканых образцов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 21-13-00321, “Деформационное поведение биоразлагаемых матриц различного типа при механических нагрузках”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Teoh G.Z., Klanrit P., Kasimatis M., Seifalian A.M.* // *Minerva medica*. 2015. V. 106. P. 17.
2. *Ventre M., Mollica F., Netti P.A.* // *Journal of biomechanics*. 2009. V. 42. № 4. P. 430.
<https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2008.12.004>
3. *Солсбери А., Роулэнд Г., Кларк Д.* // *Успехи физических наук*. 1969. Т. 99. № 12. С. 673.
4. *Donald A.M.* // *Nature materials*. 2003. V. 2. № 8. P. 511.
<https://doi.org/10.1038/nmat898>
5. *Brandt L.R., Salvati E., Le Bourhis E., Korsunsky A.M.* // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2020. V. 145. Article Number 104145.
<https://doi.org/10.1016/j.jmps.2020.104145>
6. *Comley K., Fleck N.A.* // *Journal of biomechanics*. 2010. V. 43. № 9. P. 1823.
<https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2010.02.029>
7. *Frühmann K., Burgert I., Stanzl-Tschegg S.E.* // *Holzforschung*. 2003. V. 57. P. 326.
<https://doi.org/10.1515/HF.2003.048>

Адрес для справок: Россия, 123182, Москва, площадь Академика Курчатова 1, НИЦ “Курчатовский институт”. E-mail: a.vasiliev56@gmail.com

АННОТАЦИИ СТАТЕЙ, НАМЕЧАЕМЫХ К ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ ПТЭ

DOI: 10.31857/S0032816223030291, EDN: URJHQH

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Беличенко С.Г., Каретников М.Д., Мазнин А.Д. Энергоугловые корреляции при неупругом рассеянии меченых нейтронов на ядрах углерода, азота и кислорода. — 14 с., 7 рис.

Результаты нейтронного анализа состава вещества методом меченых нейтронов весьма чувствительны к погрешности измерения параметров пиков в γ -спектре. Это приводит к необходимости учета эффекта Доплера, приводящего к сдвигу и уширению пиков γ -спектра, а также анизотропии выхода γ -квантов в зависимости от угла между направлениями движения меченых нейтронов и регистрируемых γ -квантов. В работе приводятся экспериментальные угловые зависимости сдвига и интенсивности (относительной площади) пиков спектра γ -квантов из ядер углерода, азота, кислорода, измеренные на установке с мечеными нейтронами. Влияние эффекта Доплера и анизотропии углового распределения в устройствах с мечеными нейтронами проявляется при анализе протяженных объектов, при многоугловом расположении γ -детекторов, когда γ -кванты попадают на детекторы под различными углами относительно потока меченых нейтронов.

Бондарь А.Е., Борисова Е.О., Бузулцков А.Ф., Носов В.В., Олейников В.П., Соколов А.В., Фролов Е.А. Изучение работы матриц кремниевых фотоумножителей при криогенной температуре. — 21 с., 14 рис.

Исследована работа матриц Si-ФЭУ MPPC S13360-6050PE с параллельным и последовательным подключением элементов в условиях эксперимента с двухфазным детектором, а также выполнены теоретические расчеты характеристик сигналов таких матриц. Показано, что длительность сигнала при последовательном соединении Si-ФЭУ с хорошей точностью не изменяется, а при параллельном соединении увеличивается с увеличением числа Si-ФЭУ в матрице. В пределах ошибок интегральная амплитуда сигнала при параллельном соединении не зависит от числа элементов в матрице, а при последовательном соединении наблюдается ее ожидаемое падение, обратно пропорциональное числу элементов в матрице. По результатам данной работы для дальнейшего использования в двухфазном криогенном детекторе темной материи выбрана матрица Si-ФЭУ, состоящая из четырех элементов, соединенных параллельно, так как для такой матрицы продемонстрирована надежная регистрация однофотонных импульсов, при этом длительность сигнала остается приемлемой.

Галаванов А.В., Кумпан А.В., Салахутдинов Г.Х., Сосновцев В.В., Шакиров А.В. Установка для исследования газовых смесей для трехкаскадного газового электронного умножителя. — 7 с., 8 рис.

В НИЯУ МИФИ создана экспериментальная установка для исследования спектрометрических характеристик газовых смесей для каскадных газовых электронных усилителей (ГЭУ), которые широко используются в современных трековых детекторах, черенковских детекторах, детекторах синхротронного излучения для постановки экспериментов в области физики высоких энергий. В статье приводятся результаты исследований характеристик газовой смеси для ГЭУ, применяемых в междуна-

родном эксперименте VM@N (ОИЯИ, г. Дубна). Отмечена возможность использования данной установки для проведения лабораторных работ в сопровождении магистерских курсов по направлению “Ядерная физика и технологии”.

Губер Ф.Ф., Ивашкин А.П., Карпушкин Н.М., Махнев А.И., Морозов С.В., Серебряков Д.В. Временное разрешение и световыход образцов сцинтилляционных детекторов для времяпролетного детектора нейтронов эксперимента VM@N. — 10 с., 3 рис.

Для идентификации нейтронов, образующихся в ядро-ядерных столкновениях при энергиях до 4 АГЭВ в эксперименте VM@N с фиксированной мишенью на Нуклотроне (ОИЯИ, Дубна), и измерения их энергии планируется создать новый компактный времяпролетный детектор нейтронов. Этот детектор будет использоваться для измерения выходов и азимутальных потоков нейтронов, которые, как показано в различных теоретических моделях, должны быть чувствительны к уравнению состояния плотной ядерной материи. В качестве чувствительных элементов для активных слоев детектора нейтронов предлагается использовать пластиковые сцинтилляторы российского производства площадью около $10 \times 20 \text{ см}^2$ и толщиной 2.5 см, а для регистрации фотонов — кремниевые фотоумножители с чувствительной площадью $6 \times 6 \text{ мм}^2$, по одному на каждую сцинтилляционную ячейку. Для достижения требуемого разрешения (порядка нескольких процентов) по энергии нейтронов в диапазоне энергий нейтронов до 4 ГэВ временное разрешение сцинтилляционных детекторов должно быть 100–150 пс. Обсуждается концепция времяпролетного нейтронного детектора. Приводятся результаты проведенных измерений световыхода и временного разрешения ряда образцов сцинтилляционных детекторов различных размеров. Результаты получены при использовании кремниевых фотоумножителей двух типов.

Данилов М.В., Ершов Н.В., Кобякин А.С., Куденко Ю.Г., Русинов В.Ю., Тарковский Е.И., Федорова Д.В., Федотов С.А., Чвирива А.А., Чернов Д.О. Сцинтилляционные детекторы заряженных частиц для черенковского нейтринного детектора. — 7 с., 6 рис.

Представлены результаты измерений параметров сцинтилляционных вето-детекторов, которые планируется установить в промежуточном водном черенковском детекторе проекта “Гипер-Камиоканде”. Вето-детекторы представляют собой дисковые сцинтилляторы с вклеенными спектросмещающими волокнами и компактными фотоприемниками — кремниевыми фотоумножителями. Показано, что эффективность регистрации космических мюонов такими детекторами превышает 99%.

Рязанцев А.В., Букреева С.И., Васильев А.Н., Горин А.М., Гончаренко Ю.М., Моисеев В.В., Мочалов В.В., Семенов П.А. Сцинтилляционный волоконный годокоп эксперимента СПАСЧАРМ на ускорительном комплексе У-70. — 9 с., 8 рис.

Представлен сцинтилляционный волоконный годокоп высокого разрешения с использованием многоанодных фотоэлектронных умножителей. Подробно изложена технология изготовления волоконных касет и их монтажа в корпус детектора, приведены функ-

циональная схема дискриминатора анодных сигналов, а также характеристики годоскопа при работе в составе экспериментальной установки на пучках канала 14 ускорительного комплекса У-70.

Топорков Д.К., Глуховченко С.Ю., Николенко Д.М., Рачек И.А., Семёнов А.М., Шестаков Ю.В. Измерение поляризации дейтериевого атомного пучка с помощью поляриметра лэмбовского сдвига. — 9 с., 11 рис.

Описан криогенный источник поляризованных атомов дейтерия, который используется в эксперименте по измерению анализирующих способностей реакции фотодезинтеграции дейтрона на электронном накопителе ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН. Измерена эффективность переходов атомов в заданное энергетическое состояние в блоке среднего магнитного поля (Medium Field Transition (MFT)), в блоке сильного поля (Strong Field Transition (SFT)), а также при совместной работе этих блоков. Измерения проведены с помощью поляриметра лэмбовского сдвига. Измеренная эффективность блоков составила более 90%. Приведена процедура определения фона в поляриметре. Применение отчатки в камере ионизатора должно привести к существенному уменьшению фонового сигнала.

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Paldurai K., Hariharan K., Naveen K.S., Shreenidhaa K.K. Implementation of linear test stimulus generator for non-linearity computation of ADC. — 11 p., 7 fig. (публикуется только в английской версии ПТЭ).

A linear ramp stimulus is generally preferred to accurately measure the non-linearity errors in an Analog to Digital Converter (ADC). Three methods are proposed to generate a linear ramp signal, of which the first approach employs two sine waves. In contrast, the second utilizes a sine wave with a pulse signal to generate a parabolic signal which is then differentiated to produce a ramp signal. The third method achieves linearity by maintaining a constant potential across the resistor to push a constant current into the capacitor. The three proposed concepts have been designed and simulated to compute the Differential Non-Linearity (DNL) error for an ideal 8 bit ADC in 90 nm CMOS technology. The third method shows high linearity when compared to the existing methods, by exhibiting a very low DNL error of 0.0015 LSB in simulation. Its implementation indicates that 92% of the silicon area is reduced, making it suitable for ADC testing.

ЭЛЕКТРОНИКА И РАДИОТЕХНИКА

Коротков С.В., Аристов Ю.В., Козлов К.А. Динисторный коммутатор мощных наносекундных импульсов. — 6 с., 5 рис.

Описан мощный коммутатор на основе блока динисторов с ударной ионизацией, который имеет рабочее напряжение 16 кВ и способен на частоте 300 Гц коммутировать наносекундные импульсы тока с амплитудой ~3 кА. Приведены результаты компьютерного моделирования процесса его включения, определены перспективы увеличения коммутируемой мощности.

Хусаинов Т.А., Проявин М.Д., Лубяко Л.В. Режекторные фильтры, изготовленные методом 3D-печати, для систем СВЧ-диагностики установок управляемого термоядерного синтеза. — 11 с., 5 рис.

Обсуждается возможность применения технологии 3D-печати с последующей металлизацией при изготовлении полосовых волноводных режекторных фильтров, предназначенных для обеспечения работы чувствительной приемной аппаратуры в экспериментах по коллективному томсоновскому рассеянию на флуктуациях плотности электронов плазмы, в которых используется

ся мощное (до нескольких сотен киловатт) зондирующее излучение. Создан двухрезонаторный прототип фильтра, исследованы его характеристики и опробована работа в реальных условиях. Полученные результаты указывают на перспективность использованной технологии. С учетом того, что такие фильтры играют ключевую роль в обеспечении электромагнитной совместимости диагностической приемной аппаратуры и гиротрона, предложенная технология изготовления СВЧ-компонентов открывает возможности, представляющие интерес для широкого круга исследователей.

Широков В.А., Галузин А.С., Милич В.Н. Особенности построения усилителей сигнала раскачки пьезоизлучателя для лабораторного гидроакустического исследовательского комплекса. — 13 с., 6 рис.

Описаны усилители сигнала раскачки пьезоизлучателей аппаратного обеспечения гидроакустического исследовательского комплекса, предназначенные для усиления кратковременных сигналов с амплитудной, частотной и фазовой модуляцией на частоте 1 МГц. Особенностью линейного усилителя сигналов с амплитудной модуляцией является применение усилителя с токовой обратной связью, характеризующегося высокими скоростными свойствами. Особенность ключевого усилителя сигналов с постоянной амплитудой (частотная и фазовая модуляция) — это применение оптопар в схеме формирователя управляющих импульсов выходных MOSFET (metal-oxide-semiconductor field effect transistor), что обеспечило симметрию импульсов. Высокая скважность усиливаемых сигналов позволила избежать необходимости в специальных теплоотводах и выполнить простую и компактную реализацию схем. Коэффициент усиления линейного усилителя составил 18 дБ, максимальная амплитуда выходного сигнала — 80 В, ключевого — 26 дБ и 200 В соответственно. Приведены конкретные схемотехнические решения.

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Булавская А.А., Бушмина Е.А., Григорьева А.А., Ермакова А.С., Милойчикова И.А., Стучебров С.Г. Разработка методики определения оптимального количества проекций при реализации метода многоуглового сканирования пучка ионизирующего излучения. — 11 с., 6 рис.

Разработан метод многоуглового сканирования для измерения распределения интенсивности пучка в поперечном сечении. Данный метод основан на реконструкции профилей пучка, полученных под разными углами в плоскости, перпендикулярной оси пучка. Для эффективной реализации метода многоуглового сканирования необходимо найти оптимальное количество проекций, т.е. такое количество проекций, при котором результат измерения остается достоверным при минимальном времени измерения. В результате численного эксперимента была разработана методика поиска оптимального количества проекций и было показано, что без учета ошибок, вызванных работой узлов экспериментальной установки, оптимальное число проекций равно 10. Для устранения этой погрешности было проведено многоугловое сканирование рентгеновского пучка и были реконструированы распределения его интенсивности в поперечном сечении при разном количестве проекций. С помощью разработанной методики было определено оптимальное количество проекций для данной экспериментальной установки, которое составило 18.

Волков П.В., Горюнов А.В., Лукьянов А.Ю., Семиков Д.А., Тертышник А.Д. Метод детектирования нанометровых колебаний длины в волоконно-оптических сенсорах с помощью следящего tandemного низкокогерентного интерферометра. — 7 с., 4 рис.

Предложен метод детектирования изменений длины оптического резонатора, предназначенный для во-

локонно-оптических сенсоров на базе интерферометра Фабри–Перо. Показана возможность детектирования колебаний длины резонатора на субнанометровом уровне в полосе частот 1.5–300 кГц. Чувствительность составила 0.3 нм по среднеквадратичному отклонению. Предложенная схема позволяет надежно выделять высокочастотные колебания на фоне медленных дрейфов длины сенсора, вызванных температурными колебаниями или деформациями.

Кизириди П.П., Озур Г.Е. Увеличение энергии в импульсе радиально сходящегося низкоэнергетического сильноточного электронного пучка. — 8 с., 4 рис.

Исследованы энергетические характеристики сильноточной электронной пушки с радиально сходящимся электронным пучком. Катодный узел пушки состоял из одной или двух кольцевых секций с внутренним диаметром 8 см, каждая из которых включала 18 резистивно развязанных дуговых источников плазмы, иницируемых пробоем по поверхности диэлектрика. Показано, что электростатическое экранирование, препятствующее выходу электронов и ультрафиолетового излучения из катодной и анодной плазмы в пространство за катодом, снижает вероятность развития пробоя вдоль резисторов дуговых источников плазмы и позволяет примерно вдвое увеличить энергию пучка, выделяемую в аноде. В двухсекционном варианте катодного узла ширина автографа пучка на аноде (следа оплавления) составила около 7 см при аксиальном расстоянии между центрами секций 4 см.

Котов А.Н., Старостин А.А., Шангин В.В., Бобин С.Б., Лончаков А.Т. Установка для термореклетометрии полупроводниковых материалов в сильном магнитном поле при низких температурах. — 6 с., 2 рис.

Разработаны конструкция экспериментальной ячейки и оптоэлектронный блок для исследования релаксационных процессов в приповерхностной области полупроводников при импульсном лазерном облучении в температурном диапазоне от 3 до 300 К и магнитном поле до 12 Тл.

Маркин Ю.В., Кунькова З.Э. Методика оперативного контроля инструментальных ошибок при регистрации спектров магнитного кругового дихроизма в отраженном свете. — 16 с., 6 рис.

Описана методика оперативного контроля достоверности данных спектроскопии магнитного кругового дихроизма в отраженном свете, основанная на измерении полярного магнитооптического эффекта Керра при нормальном падении света на образец с использованием метода фазовой модуляции световой волны с помощью фотопружного модулятора. Представленная методика предполагает в процессе сканирования по спектру измерение амплитуд сигналов на “нулевой” (V_{\pm}) и удвоенной (V_{2f}) частотах f фазовой модуляции в скрещенных поляризаторах. При этих измерениях постоянство отношения V_{2f}/V_{\pm} во всем спектральном диапазоне является подтверждением достоверности данных спектроскопии. Выполнен анализ возможных инструментальных погрешностей, приводящих к искажению формы регистрируемого спектра. Работоспособность и эффективность методики иллюстрируется на примере измерения спектра магнитного кругового дихроизма пленки MnAs.

Ниненко С.И. Сильфонная камера в качестве дожимающей ступени для получения давления 1 ГПа в газовой среде. — 7 с., 2 рис.

Описана дожимающая ступень установки для сжатия газовой среды до 1 ГПа, в качестве которой используется тонкостенная сильфонная камера, погруженная в гидростатически сжатую среду. Такая конструкция позволяет создавать требуемое давление в рабочем объеме более 1.5 см^3 , что достаточно и для оптических исследований, и для точных измерений давления в рабочей камере.

Оздиев А.Х., Сырякин В.И. Контурный метод томографического сканирования с идентификацией дефектов при помощи компьютерного зрения. — 9 с., 14 рис.

Исследование крупногабаритных объектов является одной из самых распространенных проблем рентгеновского томографического сканирования, решение которой требует применения более мощных источников излучения, сложной дорогостоящей мехатроники, а также детекторных устройств большого размера, что, несомненно, ведет к кратному удорожанию самой рентгеновской установки. В данной статье представлен один из возможных методов решения данной проблемы, суть которого заключается в сканировании объектов по их контуру. Такой подход способен сильно сократить стоимость комплектов рентгеновской установки. В то же время подход обладает существенным ограничением: наличием большого числа артефактов, которые не позволяют с достаточной достоверностью детектировать дефекты. Данную проблему предложено решить при помощи машинного обучения.

Сандуляк А.А., Сандуляк Д.А., Полискова М.Н., Ершова В.А., Сандуляк А.В. Расширение возможностей магнитометра с полюсами-полусферами. — 12 с., 5 рис.

Описан модернизированный магнитометр, работающий на пондеромоторном принципе, в котором специально используемые полюса сферической формы создают неоднородное магнитное поле с зонами с практически постоянными значениями магнитного градиента (MG) и/или магнитного силового фактора (MFF) в окрестностях экстремумов координатных зависимостей MG и MFF. Зоны MG_{const} и MFF_{const} фиксируемые в магнитометре ограничителями в виде управляемых маркеров (лазерных), имеют индивидуальные значения координат их условных центров x_{extr} и протяженностей Δx с допускаемой погрешностью изменения данных MG и MFF в пределах таких зон. Показано, что при разных взаимных расстояниях между полюсами-полусферами диаметром D зона MFF_{const} в сравнении с зоной MG_{const} располагается (по x_{extr}/D) на треть ближе к межцентральной линии полюсов-полусфер и является настолько же менее протяженной (по $\Delta x/D$).

Сошенко В.В., Кожокару И.С., Большедворский С.В., Рубинас О.Р., Козодаев А.М., Дрофа С.М., Вилюжанина П.Г., Примак Е.А., Смолянинов А.Н., Акимов А.В. Двухчастотный резонатор для возбуждения сверхтонких переходов в азотно-вакансионном центре окраски в алмазе. — 8 с., 7 рис.

Представлены результаты разработки двухчастотного резонатора для частот 4.95 и 7.1 МГц, соответствующих частотам сверхтонких переходов основного состояния азотно-вакансионного центра окраски в алмазе. Продемонстрирована работоспособность резонатора путем наблюдения осцилляций Раби. Амплитуда переменного магнитного поля составила 1.6 и 1 мТл для частот 4.95 и 7.1 МГц соответственно при мощности на входе резонатора 0.3 Вт.

Тиликин И.Н., Шелковенко Т.А., Пикун С.А., Григорьева И.Г., Макаров А.А., Салахутдинов Г.Х. Исследование энергетической компоненты рентгеновского излучения горячей точки на установке X-пинч. — 7 с., 5 рис.

Описана методика и приведены основные экспериментальные результаты исследования пространственной структуры плазменных объектов гибридного X-пинча в диапазоне рентгеновского излучения. Представлены результаты измерений спектральных характеристик источников рентгеновского излучения плазменных объектов. Исследования проведены с использованием термомонохроматических детекторов на основе фторидов лития LiF(Mg,Ti).

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

Chongjie Wang, Conger Wang, Yuxin Miao, Min Zhang. A Global Optimization Fusion Algorithm for Correcting and Quantitatively Analyzing NaI(Tl) Gamma-Spectrum Based on Particle Swarm Optimization. — 14 p., 2 fig. (публикується тільки в англійській версії ПТЭ).

To eliminate the influence of serious spectra drift and overlapping peaks on analytical accuracy of NaI(Tl) gamma spectra, a global optimization fusion algorithm for correcting and quantitatively analyzing NaI(Tl) gamma spectra was proposed in this paper. By embedding the system transformation based spectral correction algorithm into the full-spectrum analytical model, the optimal spectral drift correction and quantitative analysis of NaI(Tl) gamma spectra were obtained simultaneously using particle swarm optimization without solving overlapped peaks or calculating the peak parameters, even without considering the influence of system energy resolution. The statistically analytical results of the actual measured spectra of a standard volumetric radioactive source show that the maximum relative deviations of radioactive activities of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K from the known values were 2.74%, 1.91% and 3.86%, respectively, and the corresponding uncertainties were 3.86%, 2.76% and 6.95%, respectively, which indicates that high analytical accuracy and high precision were obtained using the proposed algorithm. It can be deduced that the fusion algorithm has high stability, reliable statistical performance and low requirements on initial parameters. Also, its procedure is easy to operate, especially suitable for non-expert users.

Yang Jin, Weidong Chen, Handong Teng. Static and Dynamic Testing of Bag-type Molecular Spring Vibration Isolator. — 13 p., 12 fig. (публикується тільки в англійській версії ПТЭ).

The bag-type molecular spring vibration isolator combines the characteristics of air spring and molecular spring. The molecular spring is placed in the bag-type vibration isolator. When the isolator is subjected to external load, the bag-type molecular spring vibration isolator is compressed, and the water invades and escapes from the hydrophobic micropores of the molecular spring material under external pressure, realizing the storage and release of energy. Combined with the deformation analysis of the bladder and the process of water molecules invading the hydrophobic micropores, the mechanical model of the molecular spring isolator was established and the force-displacement relationship of the isolator was deduced. The mechanical model was verified by quasi-static test and the influence factors of vibration isolator performance were analyzed by numerical simulation and experiments. Finally, the vibration isolation performance of the molecular spring isolator is measured by the vibration level drop. The results show that the theoretical and experimental results are in good agreement. The molecular spring isolator exhibits high-low-high segmental stiffness characteristics, and the stiffness in stage II is greatly reduced compared with stage I and stage III. The vibration level drop of the molecular spring isolator is more than 23 dB, and more than 93% of the vibration is isolated.

Yongxing Yuan, Tongzhu Yu, Yixin Yang, Huaqiao Gui, Jianguo Liu. Design and experimental validation of a high-resolution nanoparticle differential mobility analyzer. — 16 p., 13 fig. (публикується тільки в англійській версії ПТЭ).

Sub-23 nm particles in motor vehicle exhaust have a significant impact on the environment and human health, but current analytical methods have low particle size resolution that make it difficult to truly reflect the sub-23 nm particles emission characteristics in exhaust gas. A differential mobility analyzer (DMA) combining a semi-ellipsoidal gas flow conditioner, a multi-hole ring, and an anti-turbulent slit was designed to improve the particle size resolution of the DMA for sub-23 nm particles at a conventional sheath gas

flow rate. The effect of the anti-turbulent slit on the DMA particle size resolution was modeled by COMSOL software. Through coupling analysis of the electric field, flow field, and particle trajectory, the DMA particle size resolution improved with the increase in depth and decrease in width of the anti-turbulent slit, and the critical size of the anti-turbulent slit of the self-developed DMA was determined. The experimental results showed that the particle size resolution of the developed high-resolution DMA for 12–23 nm particles was 7–12.5 under the condition that the transfer function height is at the same level, a value that was 2.1 times that of similar commercial equipment (TSI 3081). The analyzer can provide a more effective means for the study of sub-23 nm particles emission patterns in gases such as motor vehicle exhaust.

Аврорин А.В., Аврорин А.Д., Айнутдинов В.М., Аллахвердян В.А., Бардачова З., Белолаптиков И.А., Борина И.В., Буднев Н.М., Гафаров А.Р., Голубков К.В., Горшков Н.С., Гресь Т.И., Дворниcki P., Джилкибаев Ж.-А.М., Дик В.Я., Домогацкий Г.В., Дорошенко А.А., Дячок А.Н., Елжов Г.В., Заборов Д.Н., Кебкaл В.К., Кебкaл К.Г., Кожин В.А., Колбин М.М., Конишев К.В., Коробченко А.В., Кошечкин А.П., Круглов М.В., Крюков М.К., Кулепов В.Ф., Малышкин Ю.М., Миленин М.Б., Миргазов Р.Р., Назари В., Наумов Д.В., Петухов Д.П., Плисковский Е.Н., Розанов М.И., Рушай В.Д., Рябов Е.В., Сафронов Г.Б., Сеитова Д., Сиренко А.Э., Скурихин А.В., Соловьев А.Г., Сорокочиков М.Н., Страмаков А.П., Суворова О.В., Таболенко В.А., Тарашанский Б.А., Файт Л., Хатун А., Храмов Е.В., Шайбoнов Б.А., Шелепов М.Д., Шилкин С.Д., Шимковиц Ф., Штекл И., Эцкерова Э., Яблокова Ю.В. Повышение чувствительности нейтринного телескопа ВАИКАЛ-GVD с помощью внешних гирлянд оптических модулей. — 15 с., 7 рис.

В оз. Байкал продолжается развертывание глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD. К апрелю 2022 г. было введено в эксплуатацию 10 кластеров телескопа, в состав которых входит 2880 оптических модулей. Одной из актуальных задач Байкальского проекта является исследование возможностей увеличения эффективности регистрации детектора на основе опыта его эксплуатации и результатов, полученных на других нейтринных телескопах за последние годы. В данной работе рассматривается вариант оптимизации конфигурации телескопа путем установки дополнительной гирлянды оптических модулей между кластерами детектора (внешней гирлянды). Экспериментальная версия внешней гирлянды была установлена в оз. Байкал в апреле 2022 г. В работе представлены результаты расчетов эффективности регистрации нейтринных событий для новой конфигурации установки, техническая реализация системы регистрации и сбора данных внешней гирлянды и первые результаты ее натурных испытаний в оз. Байкал.

Блинковский Н.К., Гулько В.Л., Мещеряков А.А. Навигационные групповые радиооптические отражатели кругового действия. — 13 с., 10 рис.

Разработаны конструкции навигационных групповых радиооптических отражателей кругового действия. Приведены результаты экспериментальных исследований их характеристик рассеяния в составе плавучего буя. Получены сравнительные оценки дальности видимости плавучих бueв, оборудованных групповыми радиооптическими отражателями, в оптическом и радиолокационном диапазонах длин волн. Экспериментальные исследования проводились в Обском бассейне внутренних водных путей — на реках Обь и Томь.

Филиппов А.Ю., Филиппов Ю.П., Коврижных А.М. Оптимизация бессепарационного трехфазного расходомера нефть–вода–газ горизонтальной ориентации с двухизотопным гамма-плотномером. — 19 с., 9 рис.

Вероятно, впервые представлена информация о характеристиках бессепарационных трехфазных расходомеров нефть–вода–газ горизонтальной ориентации, связанная с оптимизацией конструкции по результатам экспериментальных исследований одноизотопных и двухизотопных γ -плотномеров и комбинированного конического сужающего устройства (СУ), состоящего из двух последовательно установленных конусов различных размеров. Эксперименты проводились как на смесях “реальная нефть–газ–соленая вода” на стенде фирмы TUV SUD NEL, г. Глазго, так и на модельных потоках “экс-ол–газ–пресная вода” на эталоне многофазных потоков ГЭТ195-2011 во ВНИИР, г. Казань, для типичных расходомеров с номинальным диаметром DN 100. Показано, что γ -плотномер целесообразно устанавливать в сечении с промежуточным диаметром $D = 70$ мм, в качестве измерительного СУ использовать конус 70/50 мм, а конус 100/70 мм применять для предварительного ускорения потока с целью уменьшения разнообразия режимов течения двухфазных и трехфазных потоков в измерительном СУ и в проточной части γ -плотномера. Это позволяет существенно улучшить характеристики макета расходомера. Проведено сравнение некоторых полученных характеристик с характеристиками известного вертикального аналога Vx Schlumberger и представлены варианты конструкций усовершенствованного горизонтального трехфазного расходомера, позволяющих также увеличить срок его службы и повысить рабочее давление.

ЛАБОРАТОРНАЯ ТЕХНИКА

Mingsheng Jin, Haojie Yan, Zhilong Chen, Haipeng Hou, Rumiao Wang, Dongfang Yang, Zhenzhen Chen, Jian Yang. Pneumatically Operated Piston Shock Calibrator for Acceleration Sensors. — 19 p., 9 fig. (публикуется только в английской версии ПТЭ).

In order to provide fast, accurate, and low cost shock sensitivity calibration of acceleration sensors, a pneumatically operated piston shock calibrator based on ISO 16063-22 is designed. comparative calibration method is used to calibrate the shock sensitivity of tested sensor within a shock peak amplitude of 25g to 2000g and a pulse duration of 0.1 to 3 ms. The pneumatically operated piston shock calibrator includes modules of mechanical shock, shock signal generation, and measurement control based on the NI data acquisition card and LabVIEW control program. Numerical analysis and calculation of the pneumatic ejection process by MATLAB is performed to analyze the influence factors and levels of the impact velocity. Moreover, experiments on key performance indexes and test data processing are carried out. The repeatability of shock peak amplitude and pulse duration are better than 1.24% and 2.19%, respectively, which reaches the level of the commercially available calibrator of the same type. Meanwhile, the calibrated uncertainty is 2.56% ($k = 2$), which meets the ISO 16063-22 requirement with the accuracy of less than 5%.

Гусева В.Е., Корепанов М.А., Королева М.Р., Нечай А.Н., Перекалов А.А., Салашенко Н.Н., Чхало Н.И. Способы формирования газовых, кластерных спрейных и жидкостных мишеней в лазерно-плазменном источнике излучения. — 15 с., 12 рис.

Рассматриваются способы формирования жидкостных, микрокапельных, кластерных и газовых мишеней в вакууме для использования в лазерно-плазменных источниках излучения. Приведены характеристики используемых систем формирования мишени и систем пуска газа на их основе. Данные системы формируют импульсные и статичные струи с малым массовым рас-

ходом, порядка ~ 70 мл/ч жидкости или $1500 \text{ см}^3/\text{ч}$ газа, что позволяет проводить откачку вакуумного объема одним турбомолекулярным насосом с производительностью 1000 л/с.

Зайцев С.В., Зыкова Е.Ю., Рау Э.И., Татаринцев А.А., Киселевский В.А. Расширение аналитических возможностей сканирующей электронной микроскопии при детектировании обратнорассеянных электронов — 12 с., 8 рис.

Приводятся новые возможности режима детектирования обратнорассеянных электронов в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ). Получила дальнейшее развитие методика определения химического состава зондируемого участка образца по предварительно откалиброванной шкале серого экрана СЭМ. Приведены простые соотношения для практического применения при нахождении толщин тонких пленок на массивной подложке. Определены параметры двойного слоя пленочной наноструктуры на подложке, т.е. глубины залегания и толщины подповерхностных фрагментов микрообъекта. Предложена методика измерения поверхностного потенциала отрицательно заряжающихся диэлектрических образцов при облучении электронами средних энергий.

Казачек М.В. Математическая обработка импульсов для улучшения временных характеристик счетчика корреляций. — 9 с., 5 рис.

Систематическая ошибка измерения длительности вспышек счетчиком корреляций, построенным нами ранее на основе цифрового осциллографа и компьютера, уменьшена на 1–2 нс путем математической обработки входных импульсов и коррекции времен их регистрации. Разброс измерения длительности и задержки вспышек не меняется при включении коррекции. Методика протестирована на модельных вспышках, уточнено время вспышек солюминесценции. Счетчик может применяться для измерения других быстропротекающих событий, например в ядерной физике.

Румянцев А.В., Пятых И.Н. Замкнутый бесконтактный метод исследования теплофизических свойств металлов и сплавов в области температур 1000–2500 К. — 19 с., 5 рис.

Описан замкнутый бесконтактный метод сходящихся радиальных температурных волн, создаваемых при высокочастотном индукционном модулированном нагреве образца цилиндрической формы. Метод предназначен для исследования теплофизических свойств металлов и сплавов в области высоких температур. Для реализации метода создана экспериментальная установка на базе современной аппаратуры. По данным эксперимента теплофизические параметры определяются со следующими погрешностями: температуропроводность — 2%; теплоемкость — 3%; теплопроводность — 5%; удельное электросопротивление — 1.4%; мощность — 2%. После этого вычисляются плотность, коэффициент объемного теплового расширения, электронная и решеточная теплопроводность, объемная теплоемкость, коэффициент теплоусвоения, монохроматическая и интегральная степенни черноты, энтальпия, энтропия, энергия Гиббса. На конкретном примере при исследовании сплава замещения и сплава внедрения показаны преимущества замкнутого метода.

ПРАВИЛА ПУБЛИКАЦИИ В ПТЭ

DOI: 10.31857/S0032816223030308, EDN: OKNBIL

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Журнал издается на русском языке и в переводе на английский язык. К публикации в журнале принимаются рукописи обзорных, оригинальных работ, краткие сообщения, комментарии, содержащие дискуссию по существу статей, ранее опубликованных в ПТЭ, рекламные объявления о новых физических приборах и материалах.

В 2022 г. наш журнал открывает новый раздел по тематике “Приборы и техника демонстрационного и учебного эксперимента”. Требования к статьям этого раздела не отличаются от требований к статьям других разделов ПТЭ. Мы надеемся, что авторы этого раздела будут представлять не только текстовые описания новых приборов, но и представлять видеоматериалы о том, как эти демонстрации используются в лекционной и лабораторной практике работы со студентами. Эти материалы можно давать в виде ссылок на свои ресурсы или оформлять их как “дополнительные материалы” к статье (<https://www.pleiades.online/ru/authors/guidlines/prepare-electronic-version/supplementary-materials/>).

Дополнительные материалы публикуются только в электронной версии на сайте <https://link.springer.com/> (для англоязычных журналов) и <https://elibrary.ru> (для русскоязычных журналов).

Статьи принимаются от граждан любой страны на русском или английском языке (от авторов из стран дальнего зарубежья).

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ СТАТЕЙ

1. Предмет статьи должен иметь конкретные применения к задачам экспериментов, использующих физические методы, описанные и проиллюстрированные в статье.

2. Описываемый прибор или метод должен быть осуществлен и испытан в эксперименте, показавшем преимущества по сравнению с опубликованными ранее, и эти преимущества нужно четко указать в статье.

3. Обзор должен быть написан достаточно подробно и ясно для понимания физиками любой специальности. Рекомендуется снабжать обзор

сжатым введением, разъясняющим основные задачи, понятия и термины.

4. Статья должна быть достаточно полна и подробно для обеспечения возможности с учетом цитированных публикаций воспроизведения квалифицированным читателем метода и прибора, осуществленного и испытанного авторами. Статья должна давать ясное представление о цели работы, принципе метода или устройства прибора, технических характеристиках, погрешностях измерений, возможностях и особенностях его применения.

5. Комментарий, как и ответ автора, должен касаться только существа обсуждаемой статьи: физических ошибок, неточностей, указания более удачных альтернативных решений и подходов.

6. Краткая информация о новом приборе и материале, изготовленных в лабораториях, не переводится на английский язык и публикуется только в русской версии ПТЭ. Она, должна содержать наименование, основные технические и эксплуатационные характеристики. Информация о приборе может сопровождаться его фотографией, информация о материале — только в том случае, если фотография может дать наглядное представление о его качествах. Допускается второй рисунок — график или схема, характеризующие возможности прибора. Необходимо указывать адрес, по которому следует обращаться за получением дополнительной информации.

7. Объем присылаемых для опубликования в журнале обзоров и оригинальных статей формально не ограничен. Однако в интересах читателей не следует перегружать статью материалами, достаточно известными из журнальных публикаций, обзоров, монографий, справочников, а также подробным описанием достаточно очевидных или второстепенных деталей. Для подобных материалов предусмотрена возможность их размещения в электронном виде. Разъяснения по дополнительным материалам приведены на сайте: <http://pleiades.online/ru/authors/guidlines/prepare-electronic-version/supplementary-materials/>. Объем остальных материалов не должен превышать: комментариев и ответов на них — 2 страниц и 1 рисунок, краткой информации о приборах, изготовленных в лабораториях, — 2–3 страниц текста и 1–2 рисунков, рекламных объявлений — 1 страницы и 1 рисунок на каждую оплаченную полосу.

Посылая рукопись в журнал, автор гарантирует, что соответствующий материал (в оригинале или в переводе на другие языки или с других языков) ранее нигде не публиковался и не находится на рассмотрении для публикации в других журналах.

Для принятия редколлегией решения о публикации статьи в журнале авторам необходимо представить в редакцию рукопись статьи в формате MS Word сопроводительное письмо от авторов или организации, направляющей статью, и авторские договоры с издателями журнала (русской и английской версий), заполненные и подписанные автором и всеми соавторами. Авторские договоры вступают в силу в случае и с момента принятия статьи к публикации. Формы договоров с издателями и дополнительная юридическая информация размещены на сайтах <https://sciencejournals.ru/journal/pribory/> (русская версия) и <https://www.pleiades.online/ru/journal/instr/authors-instructions/> (английская версия). Необходимо иметь в виду, что договоры являются юридически обязывающими документами, поэтому надо строго следовать их форме и требованиям издательства. Авторы, статьи которых публикуются в разделе “Приборы, изготовленные в лабораториях”, должны оформить только лицензионный договор, приведенный на сайте <https://sciencejournals.ru/journal/pribory/>, т.к. этот раздел не включается в английскую версию ПТЭ.

Статьи, основанные на работах, выполненных в учреждении, должны содержать точное название и адрес учреждения, публикуемые в статье. Направление от учреждения, содержащее эти данные, желательно предоставить вместе со статьей. Экспертное заключение от учреждения предоставляется в том случае, если это требуют его правила. В сопроводительном письме авторы могут назвать 3–5 возможных рецензентов для представленной работы.

Рукопись необходимо отправлять через Издательский портал, используя браузер Google Chrome 60+ (<https://sciencejournals.ru/submit-manuscript/>). Зарегистрируйтесь на портале как автор и следуйте инструкциям системы. Желательно продублировать поданные материалы по электронной почте в адрес редакции (instr@pleiadesonline.com). Файлы рукописи, подписанных договоров и сопроводительных документов должны быть собраны в один архив (желательно ZIP). Дополнительные файлы большого объема (например, оригинальные файлы иллюстраций) могут быть переданы в редакцию после принятия статьи к публикации. В случае возникновения у редакции вопросов по предоставленному варианту рукописи редколлегия вправе запросить у авторов ее печатный вариант (или вызвавший вопрос фрагмент). Если предполагается, что публикация статьи осуществляется в режиме открытого доступа, то необходимо вместо заполнения авторского договора следо-

вать инструкциям по ссылке <https://www.pleiades.online/ru/authors/openaccess/how-to-publish/>

Все материалы, поступившие для публикации, проходят анонимное рецензирование. Авторам в течение недели со дня поступления рукописи в редакцию направляется уведомление о ее получении с указанием даты поступления.

Рукопись, направленная авторам на доработку, должна быть возвращена в исправленном виде в течение двух месяцев. По истечении этого срока она рассматривается как вновь поступившая. К переработанной рукописи необходимо приложить письмо от авторов, описывающее сделанные исправления и содержащее ответы на все замечания рецензента.

После принятия рукописи к публикации и согласования с ним окончательного варианта статьи перед сдачей в набор автор не может вносить существенных изменений и добавлений. После публикации автор получает копию статьи в формате PDF.

Рукописи авторам не возвращаются. Редакция вправе не вступать в переписку с автором относительно причин (оснований) отказа в публикации статьи.

2. СТРУКТУРА РУКОПИСИ

Обязательными являются следующие элементы статьи.

1. **Название статьи**, максимально конкретное и информативное.

2. **Полный список авторов** (инициалы и фамилии). Необходимо указать, кто из авторов ответственен за переписку.

3. **Место работы авторов**. Полное (без сокращений) название организации, почтовый адрес с указанием города, страны и почтового индекса. Если авторы работают в разных организациях, то должно быть понятно, кто и в какой именно организации работает. Для иностранных учреждений приводится оригинальное название и адрес латинскими литерами.

4. **Электронный адрес автора**, ответственного за переписку. Так как статьи для проверки авторам рассылаются только по электронной почте, то в случае, когда у статьи только один автор, желательно указать альтернативный адрес электронной почты на случай возможных технических проблем. В качестве альтернативного рекомендуется указывать почтовый ящик, который проверяется во время отпуска или командировки. Если у статьи несколько авторов, желательно указать адреса электронной почты двух или трех авторов, которые регулярно проверяют поступающие сообщения.

5. **Аннотация статьи** (Abstract). Обзору и статье должно быть предпослано краткое (10–15 строк) изложение их сути (аннотация) с четким определением новизны предмета и указанием его численных характеристик (погрешности, чувствительности и т.п.). Аннотация должна быть пре-

дельно содержательной и понятной в отрыве от статьи в связи с тем, что в каждом номере ПТЭ публикуются аннотации статей, намечаемых к публикации в следующих номерах. Аннотация не должна содержать ссылок на другие работы.

6. Собственно **рукопись** (основной текст). При подготовке рукописи следует соблюдать единообразие терминов. Не стоит называть одно и то же разными именами. Следует соблюдать единообразие в обозначениях, системах единиц измерения, номенклатуре. Следует по мере возможности избегать сокращений, кроме общеупотребительных. Если все-таки используются сокращения, то они должны быть расшифрованы в тексте при их первом упоминании. Аббревиатура строчными буквами с точками – это традиция журнала, и наши авторы, как правило, ее принимают, отдавая дань уважения отцам-основателям журнала, существующего с 1956 года.

7. **Список литературы**. Список литературы должен в достаточной мере отражать современное состояние дел в исследуемой области и не быть избыточным. Он должен содержать ссылки на достоверные источники. Цитируемую литературу следует давать общим списком в конце статьи с указанием в тексте статьи ссылки порядковой цифрой на строке в прямых скобках (например, [1]). Цитируемая литература должна быть оформлена в следующем порядке:

а) для журнальных статей указываются фамилии и инициалы авторов, название журнала, год, номер, страница, целесообразно приводить ссылки на DOI тех статей, у которых они есть;

б) для книг надо указать фамилии и инициалы авторов, полное название книги, издательство, место издания, год, страницу (для книг иностранного происхождения указать также данные русского перевода, если таковой имеется);

в) для сборников и трудов конференций надо указать фамилии и инициалы авторов, название сборника (конференции), где и кем изданы (город и издательство или институт), год, том, номер и страницу;

г) при ссылке на статью, вышедшую в журнале нашего издательства, необходимо дать ссылку и на ее перевод;

д) не допускаются ссылки на более чем один источник под одним номером и на один источник под разными номерами.

Для каждого источника должен быть указан **ПОЛНЫЙ** перечень авторов, без сокращений.

8. При наличии **иллюстраций или таблиц** располагать их следует в конце статьи на отдельных листах. К каждой иллюстрации должна быть указана подрисовочная подпись. При наличии нескольких частей в одной иллюстрации они должны располагаться последовательно и иметь общую

подпись. Возможна публикация цветных иллюстраций только в on line версии журнала. Требования по оформлению цветных иллюстраций см. на сайте <https://www.pleiades.online/ru/authors/guidelines/prepare-electronic-version/images/>. Упоминаемые в статье или заметке выпускаемые промышленностью приборы или материалы должны именоваться их паспортным наименованием с указанием типа или марки, а также фирмы-изготовителя с указанием города, страны или Интернет-сайта. Чертежи, графики и схемы должны быть четко выполнены в формате, обеспечивающем ясность понимания всех деталей. Рисунки следует выполнять компактно в целях экономии места. Полезно иметь в виду, что наиболее удобны для типографского воспроизведения рисунки шириной в одну колонку (~8 см), две колонки (~17 см) или во весь лист (17 × 23 см). Поэтому желательно изображать отдельные элементы и надписи на рисунке так, чтобы при уменьшении масштаба рисунка до одного из указанных размеров буквы и цифры приобрели высоту 1.5–2 мм, элементы радиосхем – 3–5 мм, отдельные точки – 1 мм, а линии должны быть при этом разнесены на расстояние не менее 1–2 мм. Величины деталей на радиосхем следует указывать непосредственно на чертежах с десятичными приставками, но без наименования единиц, за исключением величины емкостей в микрофарадах, которые пишутся без десятичных приставок (например, 1 Ом – 1; 5.6 кОм – 5.6 к; 2.0 МОм – 2 М; 1.1 ГОм – 1.1 Г; 15 пФ – 15 п; 2.2 нФ – 2 н; 1.0 мкФ – 1). Для изображения элементов схем следует пользоваться стандартными обозначениями. Редакция обращает внимание авторов на необходимость особенно тщательной проверки представляемых рисунков. Фотографии, изображающие наиболее интересные детали или общий вид описываемых приборов или полученные на экспериментальных установках (осциллограммы, треки в камерах, микрофотограммы и т.п.), представляются в виде, соответствующем требованиям издателя (<https://www.pleiades.online/ru/authors/guidelines/prepare-electronic-version/images/>).

9. К статье должен быть приложен список специальных терминов, материалов и их принятого перевода на английский язык. Необходимо привести также авторский вариант перевода заглавия и аннотации, названия учреждения, направляющего работу, и написание латинскими литерами имен авторов. В списке литературы необходимо указывать ссылку не только на оригинал статьи, но и на ее перевод, если статья вышла в журнале нашего издательства.

При отсутствии хотя бы одного из указанных выше элементов рукопись может быть отклонена без рассмотрения по существу.

3. ФОРМАТ РУКОПИСИ

Общие требования к формату рукописи представлены на сайте <https://www.pleiades.online/ru/authors/guidlines/prepare-electronic-version/>

Технические требования к подготовке текстовой части статьи и иллюстраций размещены на сайтах <https://www.pleiades.online/ru/authors/guidlines/prepare-electronic-version/text> и <https://www.pleiades.online/ru/authors/guidlines/prepare-electronic-version/images/>.

Текстовую часть статей желательно готовить с использованием стилевого файла.

4. РАБОТА С ЭЛЕКТРОННОЙ КОРРЕКТУРОЙ

Для работы с электронной корректурой авторам высылается по электронной почте PDF-файл верстки статьи. Файлы можно прочитать и отре-

дактировать с помощью программы Adobe Reader (версии 9 и выше), которую можно бесплатно скачать через Интернет: <http://get.adobe.com/reader>. На все письма необходимо дать ответ, не изменяя тему письма, даже если замечания или исправления отсутствуют.

Замечания нужно вносить прямо в PDF-файл статьи, используя панель инструментов “Комментарии и пометки” программы Adobe Reader версии 9+. **Не используйте другие программы для правки PDF-файлов**, иначе авторские замечания могут быть потеряны при автоматической обработке ответов.

Нельзя изменять название pdf-файла статьи и тему e-mail сообщения по той же причине.

Подробная инструкция Вам будет выслана вместе с корректурой статьи. Дополнительно ознакомиться с требованиями по внесению исправлений можно на сайте <https://www.pleiades.online/ru/authors/guidlines/electronic-proofreading/>