

ISSN 1813-8586

НАНО-И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

- Нанотехнологии
- Зондовая микроскопия
- Микромашины и наносистемы
- Молекулярная электроника
- Биоактивные нанотехнологии
- Элементы датчиков и биочипы
- Микроэлектромеханические системы
- Микрооптоэлектромеханические системы
- Биомикроэлектромеханические системы

Том 23. № 5. 2021

Рисунки к статье В. И. Лаукарта, О. А. Филина, С. В. Кузнецова, М. С. Степычева
**«МЕТОД ВАКУУМНОЙ ГЕРМЕТИЗАЦИИ МЭМС-УСТРОЙСТВ
 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕРАСПЫЛЯЕМОГО ГАЗОПОГЛОТИТЕЛЯ»**

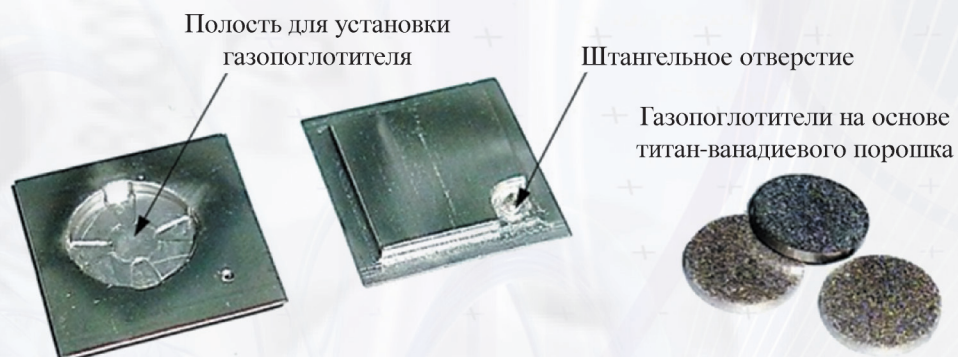
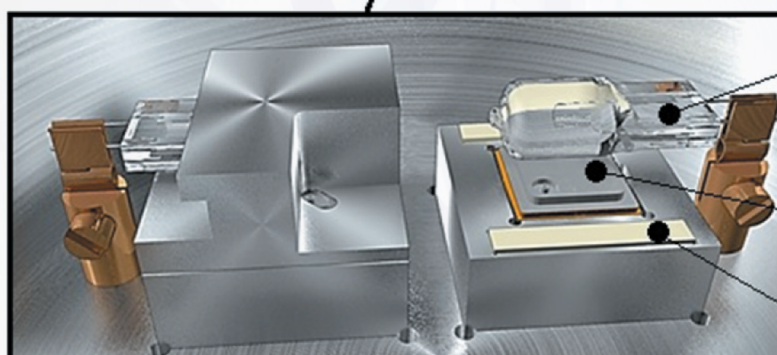
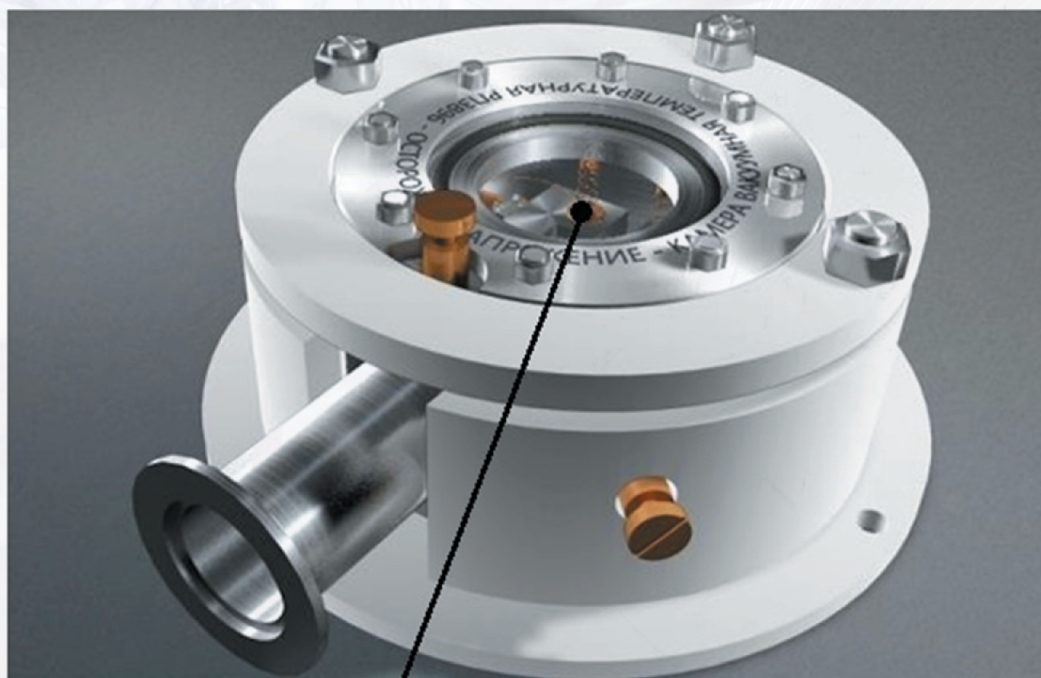


Рис. 4. Вновь разработанная крышка корпуса с газопоглотителем



Лампа G12 35 Вт

Корпус 5142.48-А

Термоизоляция

Рис. 5. Вакуумная камера с функцией активации газопоглотителя

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 23. № 5 ♦ 2021

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал включен в международные базы данных на платформе Web of Science: Chemical Abstracts Service (CAS), которая входит в Medline, и Russian Science Citation Index (RSCI).

Журнал индексируется в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) и включен в международную базу INSPEC.

Журнал включен в Перечень международных реферируемых баз данных по научному направлению 02.00.00 химические науки

и в Перечень научных и научно-технических изданий ВАК России по научным направлениям: 01.04.00 физика, 05.27.00 электроника.

Журнал выпускается при научно-методическом руководстве Отделения нанотехнологий и информационных технологий Российской академии наук

Статьи имеют DOI

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Издается с 1999 г.

Главный редактор

Мальцев П. П., д.т.н., проф.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В., д.т.н., проф.

Шур М., д.ф.-м.н., проф. (США)

Редакционный совет:

Асеев А. Л., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН

Грибов Б. Г., д.х.н., чл.-кор. РАН

Квардаков В. В., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН

Ковальчук М. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН

Кульчин Ю. Н., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН

Лабунов В. А., д.т.н., проф., акад. НАНБ (Беларусь)

Нарайкин О. С., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН

Рыжий В. И., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН

Сауров А. Н., д.т.н., проф., акад. РАН

Сигов А. С., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН

Чаплыгин Ю. А., д.т.н., проф., акад. РАН

Шевченко В. Я., д.х.н., проф., акад. РАН

Редакционная коллегия:

Абрамов И. И., д.ф.-м.н., проф. (Беларусь)

Андреев А., к.ф.-м.н. (Великобритания)

Астахов М. В., д.х.н., проф.

Бакланов М. Р., д.х.н., проф. (Китай)

Басаев А. С., к.ф.-м.н.

Викулин В. В., к.х.н., д.т.н., проф.

Дайнеко А. В., к.х.н.

Кальнов В. А., к.т.н.

Карякин А. А., д.х.н., проф.

Кузнецов В. И., д.т.н. (Нидерланды)

Леонович Г. И., д.т.н., проф.

Панин Г. Н., к.ф.-м.н., проф. (Южная Корея)

Панич А. Е., д.т.н., проф.

Пожела К., д.ф.-м.н. (Литва)

Рыжий М. В., д.т.н., проф. (Япония)

Сантос Э. Х. П., PhD, Ful. Prof. (Бразилия)

Сингх К., к.т.н. (Индия)

Телец В. А., д.т.н., проф.

Тимошенко С. П., д.т.н.

Хабибуллин Р. А., к.ф.-м.н., доц.

Шашкин В. И., д.ф.-м.н., проф.

Шубарев В. А., д.т.н., проф.

Редакция:

Антонов Б. И. (директор изд-ва)

Лысенко А. В. (отв. секретарь)

Чугунова А. В. (науч. ред.)

Щетинкин Д. А. (сайт)

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Цветков Л. А., Пустовалов А. А., Бадун Г. А., Буяев В. А., Вербцкий В. Н., Мандругин А. А., Баранов Н. Н. Способы повышения удельной энергоёмкости бета-вольтаических атомных батарей на основе трития 223

Глухова О. Е., Слепченко М. М., Барков П. В. Закономерности электропроводности монослойного наносетчатого графена с круглыми отверстиями 231

Лаукарт В. И., Филин О. А., Кузнецов С. В., Степичев М. С. Метод вакуумной герметизации МЭМС-устройств с использованием нераспыляемого газопоглотителя 238

Мустафаева Д. Г. Улучшение термоэлектрических свойств материала и повышение эффективности процессов преобразования 243

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Борисенков И. Л., Воронов К. Е., Леонович Г. И., Калаев М. П., Телегин А. М. Сенсорная система на основе внутриволоконных брэгговских решеток и интеррогатора со спектрально-временным разделением каналов 247

Лукичев В. Ф., Амиров И. И., Уваров И. В., Камран Кешаварздивко-лан, Воротынцев Д. А., Серегин Д. С., Воротилов К. А. Изготовление и резонансные характеристики PZT-кантилеверов 255

Гнатюк Д. Л., Зуев А. В., Мальцев П. П. Исследование потерь пропускания в поликристаллическом CVD-алмазе в диапазоне частот 40...80 ГГц 261

Алтухов А. А. Радиоэлектронные модули и системы контроля излучений на основе алмазных детекторов 266

Аннотации и статьи на русском и английском языках доступны на сайте журнала (<http://microsystems.ru>; <http://novtex.ru/nmst/>) в разделе "Архив статей с 1999 г."

ПОДПИСКА:

по каталогу "Пресса России"
(индекс 27849)
в редакции журнала
(тел. 8(499) 270-16-52)

Адрес для переписки:

107076, Москва,
ул. Матросская Тишина,
д. 23, стр. 2, оф. 45
e-mail: nmst@novtex.ru

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

NANO- and MICROSYSTEMS TECHNOLOGY

(Title "NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEKHNIKA")

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Vol. 23

No. 5

2021

CHIEF EDITOR

Maltsev P. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

DEPUTY CHIEF EDITOR

Luchinin V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

DEPUTY CHIEF EDITOR

Shur M. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. (USA)

Editorial council:

Aseev A. L., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS
Chaplygin Ju. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. RAS
Gribov B. G., Dr. Sci. (Chem.), Cor.-Mem. RAS
Kovalchuk M. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Kuljchin Yu. N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS
Kvardakov V. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS
Labunov V. A. (Belorussia), Sci. (Tech.), Acad. NASB
Narajkin O. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Ryzhii V. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Saurov A. N., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. RAS
Shevchenko V. Ya., Dr. Sci. (Chem.), Prof., Acad. RAS
Sigov A. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS

Editorial board:

Abramov I. I. (Belorussia), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Andreev A. (UK), Cand. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Astahov M. V., Dr. Sci. (Chem.), Prof.
Baklanov M. R., Dr. Sci. (Chem.), Prof. (China)
Basaev A. S., Cand. Sci. (Phys.-Math.)
Dayneko A. V., Cand. Sci. (Tech.)
Kalnov V. A., Cand. Sci. (Tech.)
Karjakin A. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof.
Khabibullin R. A., Cand. Sci. (Phys.-Math.), Ass. Prof.
Kuznetsov V. I., Dr. Sci. (Tech.) (Netherlands)
Leonovich G. I., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Panich A. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Panin G. N., PhD, Prof. (South Korea)
Pozhela K. (Lithuania), Dr. Sci. (Phys.-Math.)
Ryzhii M. V., (Japan), Dr. Eng., Prof.
Santos E. J. P., PhD, Prof. (Brasil)
Shubarev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shashkin V. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Singh K., PhD (India)
Telets V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Timoshenkov S. P., Dr. Sci. (Tech.)
Vikulin V. V., Cand. Chem. Sci., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Editorial staff:

Antonov B. I. (Director Publ.)
Lysenko A. V. (Executive secretary)
Chugunova A. V. (Research Editor)
Shchetinkin D. A. (site)

The Journal is included in the international databases of the chemical sciences — Chemical Abstracts Service (CAS) and of the engineering sciences — INSPEC, and it is also indexed in the Russian Science Citation Index (RSCI) based on the Web of Science platform. The Journal is included in the Russian System of Science Citation Index and the List of Journals of the Higher Attestation Commission of Russia. Its articles have DOI and are printed in the Journal in Russian and English languages. The Journal is published under the scientific-methodical guidance of the Branch of Nanotechnologies and Information Technologies of the Russian Academy of Sciences.

CONTENTS

SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

Tsvetkov L. A., Pustovalov A. A., Badun G. A., Bunyaev V. A., Verbetsky V. N., Mandrugun A. A., Baranov N. N. Ways of Increasing Specific Energy Intensity of Tritium-based beta-Voltaic Nuclear Batteries 223

Glukhova O. E., Slepchenkov M. M., Barkov P. V. Regularities of Electrical Conductivity of Monolayer Graphene Nanomesh with Round Holes 231

Laukart V. I., Filin O. A., Kuznetsov S. V., Stepychev M. S. Die-Level Vacuum Packaging of Mems Devices with Non-Evaporating Getters 238

Mustafaeva D. G. Improving the Thermoelectric Properties of the Material and Increasing the Efficiency of Conversion Processes 243

MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

Borisenkov I. L., Voronov K. E., Leonovich G. I., Kalayev M. P., Telegin A. M. Sensor System based on in-fiber Bragg Grats and Interrogator with Spectral Time Channel Separation 247

Lukichev V. F., Amirov I. I., Uvarov I. V., Kamran Keshavarzdi-vkolaee, Vorotyntsev D. A., Seregin D. S., Vorotilov K. A. Fabrication and Resonance Characteristics of PZT Cantilevers 255

Gnatyuk D. L., Zuyev A. V., Maltsev P. P. Research of Insertion Loss of Polycrystalline CVD Diamond within Range of 40...80 GHz 261

Altukhov A. A. Radio-Electronic Modules and Radiation Monitoring Systems based on Diamond Detectors 266

Web: www.microsystems.ru/eng; e-mail: nmst@novtex.ru

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

УДК 546.11.027*3 + 621.383.8

DOI: 10.17587/nmst.23.223-231

Л. А. Цветков¹, канд. техн. наук, гл. специалист, levtsvet@gmail.com,
А. А. Пустовалов², канд. техн. наук, вед. науч сотр., ap25605@gmail.com,
Г. А. Бадун³, канд. хим. наук, доц., зав. лаб., badunga@gmail.com,
В. А. Буняев³, аспирант, vitalii1992@mail.ru,
В. Н. Вербецкий³, д-р хим. наук, проф., verbetsky@hydride.chem.msu.ru,
А. А. Мандругин³, д-р хим. наук, проф., aam1945@mail.ru,
Н. Н. Баранов⁴, д-р техн. наук, проф., nsmppve@iht.mpei.ac.ru,

¹ ООО "ЭкоБиоЭнергия", г. Кострома;

² Институт динамики геосфер РАН, г. Москва;

³ Химический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва;

⁴ Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ ЭНЕРГОЕМКОСТИ БЕТА-ВОЛЬТАИЧЕСКИХ АТОМНЫХ БАТАРЕЙ НА ОСНОВЕ ТРИТИЯ

Поступила в редакцию 04.06.2021

Рассмотрены и проанализированы радиационно-физические и энергетические характеристики различных соединений трития, позволяющие использовать их в дальнейшем для создания на их основе эффективных источников излучения для бета-вольтаических атомных батарей.

Ключевые слова: бета-вольтаические атомные батареи; тритий; бета-излучатель; интерметаллические соединения

Бета-вольтаическая атомная батарея (БВАБ) — устройство, в котором кинетическая энергия бета-частиц (быстрых электронов) преобразуется частично в электрическую энергию, частично в тепловую. Базовый элемент БВАБ содержит две неперенные составляющие: излучатель бета-частиц и преобразователь. Их взаимодействие, эффективность каждого в отдельности и в совокупности определяют качество разработки БВАБ, под которым подразумевается значение удельной электрической мощности (Вт/г; Вт/см³), являющейся одной из главных характеристик автономных источников питания [1].

Преобразователь — это, как правило, изделие из области микроэлектроники. Его разрабаты-

вают во множестве вариантов, которые в рамках этой работы ограничены полупроводниковой структурой с $p-n$ -переходом и, соответственно, встроенным электрическим полем. Эффективность преобразователя определяется как используемым полупроводником (шириной запрещенной зоны), так и степенью оптимизации его электрофизических характеристик (глубиной залегания $p-n$ -перехода, степенью легирования, временем жизни носителей, минимизацией токов утечек и др.) [2].

Эффективность использования излучателя бета-частиц в БВАБ в первую очередь определяется значением удельного энерговыделения (энергоемкости) используемого радионуклида,

т. е. энергией бета-частиц и периодом полураспада. Важное значение имеют также геометрия излучателя, состав материала — носителя и концентрация в нем радионуклида, распределение и доля частиц, достигающих преобразователя [3].

В настоящее время можно считать доказанным, что из всего многообразия известных бета-излучающих радионуклидов для создания БВАБ со сроком службы в наиболее востребованном диапазоне от 15 до более 50 лет пригодны только изотопы никеля ^{63}Ni и водорода ^3H (тритий или Т). Трех-, пятилетние батареи могут с некоторыми оговорками быть оснащены изотопом прометия ^{147}Pm . Изотоп углерода ^{14}C с периодом полураспада 5730 лет пригодится, если кому-то понадобится батарея со сроком службы в тысячи лет [4, 5].

Искусственный радионуклид ^{63}Ni производится всегда в смеси с другими изотопами никеля и для использования в качестве эффективного бета-излучателя его содержание в смеси должно быть доведено до 80 % или более [6]. В конструктивном и технологическом отношении никель очень удобен, его применению в последнее десятилетие посвящена масса расчетных и экспериментальных работ.

С применением трития дело обстоит гораздо сложнее. Для достижения максимального зна-

чения энергоемкости бета-излучатель на основе трития должен содержать максимально возможную объемную концентрацию радиоактивных атомов. Но в свободном состоянии тритий является молекулярным газом T_2 , и при нормальных условиях не может обеспечить плотности потока бета-частиц на поверхность преобразователя более $\sim 0,6$ мКи/см 2 . В работе [7] газообразный тритий использован для заполнения пор микропористой 3D-структуры. В этом случае практически все излучение достигало кремниевого преобразователя, однако значение КПД составило всего 0,22 %. Увеличить эффективность устройства использованием трития под высоким давлением технически сложно и опасно. Молекулярный тритий в жидком (при температуре ниже 25 К) или в твердом состоянии (температура ниже 20 К) имеет отличную энергетическую характеристику (см. табл. 1 ниже), однако представить практический вариант осуществления не удастся. Реально для увеличения объемной концентрации необходимо использовать тритий только в связанном состоянии, например в виде химических соединений. Самое доступное из них — тритиевая вода T_2O — имеет весьма неплохие показатели удельного энерговыделения: 90 мВт/г и 110 мВт/см 3 . При необходимости вода легко образует тончайшие пленки или заполняет мик-

Таблица 1

Характеристики гидридов с высоким содержанием изотопов водорода (против H_2 или трития T_2)

Вещество (гидрид, тритид)	Содержание изотопов водорода (ИВ)		Молеку- лярная масса	Плотность, г/см 3		Емкость по ИВ, см 3 /г	Температура диссоциации при $P = 0,1$ МПа, °С	Энерговыделение тритида	
	10^{22} ат ИВ в 1 см 3	% по массе		вещества	парциаль- ная ИВ			мВт/ г	мВт/см 3
LiH	5,84	12,6	7,94	0,77	0,097	1400	894	—	—
LiT	5,84	30,2	9,94	0,96	0,29	1130	—	99,2	95,3
CaH $_2$	5,47	4,80	42,10	1,91	0,092	530	860	—	—
CaT $_2$	5,47	13,0	46,08	2,09	0,272	485	—	42,7	89,4
ScH $_2$	7,33	4,30	46,98	2,86	0,123	477	1100	—	—
ScT $_2$	7,33	11,8	50,96	3,10	0,365	441	—	38,8	120
TiH $_2$	9,05	4,05	49,90	3,75	0,152	449	600	—	—
TiT $_2$	9,05	11,1	53,9	4,05	0,451	414	—	36,5	148
YH $_3$	7,78	3,30	91,94	3,96	0,130	366	320	—	—
YT $_3$	7,78	9,19	97,91	4,22	0,388	343	—	30,2	127
ZrH $_2$	7,23	2,17	93,24	5,60	0,121	241	≈ 850	—	—
ZrT $_2$	7,23	6,17	97,22	5,84	0,360	230	—	20,2	118
BeH $_2$	6,22	18,3	11,03	0,57	0,104	2029	~ 190	—	—
BeT $_2$	6,22	40,0	15,01	0,776	0,310	1493	—	131	102
MgH $_2$	6,50	7,67	26,32	1,42	0,109	850	~ 300	—	—
MgT $_2$	6,50	19,8	30,30	1,63	0,323	739	—	65	106
H $_2$ жидк.	4,20	100	2	0,071	0,07	—	—	—	—
T $_2$ жидк.	5,12	100	6	0,255	0,255	—	—	329	83,8
H $_2\text{O}$	6,692	11,1	18	1,0	0,111	—	—	—	—
T $_2\text{O}$	6,640	27,4	22,032	1,215	0,333	—	—	90,1	109,4

ропоры 3D-структур. Специфические ограничения — температурный диапазон и токи утечки-замыкания — влияют на область применения и необходимость особых схемотехнических решений [8]. В сфере других химических соединений высказывались идеи использовать органические молекулы, например, меченный тритием полистирол [9], а также тритий, введенный в состав углеродных наноматериалов [10]. Возможно использование насыщенного тритием кремния [11, 12], однако этот подход имеет сложности выполнения, прочность удерживания трития в кремнии не исследована и скорее всего невысокая, а также тритий будет влиять на структуру и свойства полупроводника.

Определенный интерес, как содержащие тритий материалы, могут представлять наноразмерные структуры углерода: фуллерены, нанотрубки, наноалмазы, графен и оксид графена. Были попытки введения трития в эти структуры с использованием различных способов. Например, внедряли тритий внутрь молекул фуллера при его получении в ядерных реакциях [13—15]. Известно, что фуллерены можно легко гидрировать различными восстанавливающими агентами, в том числе газообразным водородом [16, 17], однако о получении тритированных фуллеренов пока нет данных. В качестве материала для хранения водорода рассматриваются углеродные нанотрубки [18, 19], что открывает перспективы создания наноконтейнеров для трития. Появились работы по введению трития в состав наноалмазов [20, 21], причем найдены условия полного замещения необменного водорода на тритий на функциональной поверхности наночастиц [22]. Наиболее перспективным наноуглеродным материалом, в который можно ввести тритий, является оксид графена [23].

Водород и его изотопы (дейтерий и тритий) при определенных условиях способны проникать в решетку металла или сплава с образованием новых соединений — гидридов. Содержание водорода в составе таких соединений может превышать объемную концентрацию даже жидкого водорода. Поэтому еще одним вариантом "связывания" трития можно рассматривать гидриды (тритиды) металлов, сплавов и интерметаллидов [24, 25], которые являются твердыми веществами.

Опубликованных материалов по тритидам недостаточно, поэтому приходится использовать также данные по гидридам. Энергетические характеристики и некоторые другие свойства ряда наиболее перспективных с нашей точки зрения гидридов приведены в табл. 1.

Наиболее емкими по водороду являются гидриды лития, магния, скандия, титана, иттрия, циркония, способные содержать от 250 до 1600 см³ водорода в 1 г металла [26, 27]. Самое высокое удельное энерговыделение (148 мВт/см³) имеет тритид титана, и это определяет его наибольшую перспективность для практического использования [28, 29]. Высокое энерговыделение на единицу массы наблюдается у тритида лития, который тоже можно рассматривать как потенциальный материал для атомной батареи [30].

Кроме гидридов металлов, привлекают внимание гидриды интерметаллидов, особенно те, где одним из компонентов является никель. Типичным представителем данного класса является LaNi₅, образующий гидрид LaNi₅H₆ при комнатной температуре, а при пониженной температуре — LaNi₅H₉. Для повышения энергоемкости в тритидах таких веществ целесообразно использовать Ni в виде радионуклида ⁶³Ni с удельным энерговыделением 5,7 мВт/г. В табл. 2

Таблица 2

Характеристики перспективных гидридов интерметаллидов

Гидрид (тритид)	Концентрация трития (или H ₂)		Молекулярная масса	Плотность, г/см ³		Емкость по тритию, см ³ /г	Энерговыделение	
	атомов 10 ²² /см ³	% по массе		вещества	третия		мВт/г	мВт/см ³
LaNi ₅ H _{6,7}	7,55	1,52	439,1	8,25	—	—	— 1	—
LaNi ₅ T _{6,7}	7,55	4,44	452,5	8,50	0,378	165	14,6	124
La ⁶³ Ni ₅ T _{6,7}	7,55	4,25	472,5	8,88	0,378	159	17,0	151
Mg ₂ NiH ₄	5,88	3,77	111,5	2,60	—	—	—	—
Mg ₂ NiT ₄	5,88	10,5	119,9	2,80	0,294	390	34,5	96,7
Mg ₂ ⁶³ NiT ₄	5,88	10,5	123,9	2,89	0,294	380	35,8	103,4

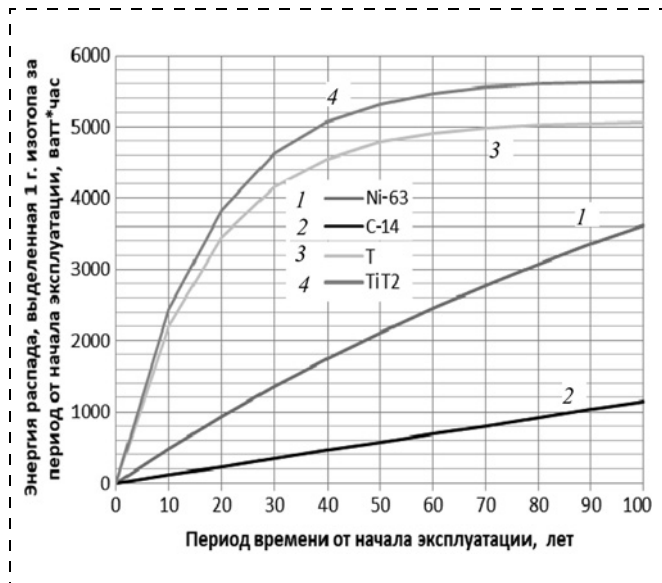


Рис. 1. Сравнение энергетической эффективности β-активных радионуклидов

соответствующие строки выделены жирным шрифтом. Кроме LaNi_5 изучены и описаны многочисленные другие интерметаллические соединения, аккумулирующие значительное количество водорода. Характеристики некоторых интерметаллических гидридов приведены в табл. 2 (данные по тритидам — расчетные).

Наибольшее значение объемной энергоемкости (124 мВт/см^3) имеет $\text{LaNi}_5\text{T}_{6,7}$, а при использовании в нем радиоактивного никеля-63 с обогащением 80 % энергоемкость возрастает до 151 мВт/см^3 , т. е. на 22 %.

На рис. 1 приведено сравнение энергетических характеристик некоторых тритиевых соединений с характеристиками других радионуклидов, пригодных для практического применения, а на рис. 2 — изменение удельного энерговыделения тех же радионуклидов во времени.

Графики, приведенные на рис. 3, убедительно показывают, что если критерием работоспособности источника энергии является значение снижения начальной мощности, батареи на основе трития могут быть эффективны 10...12 лет. Совместное использование трития и никеля-63 (в интерметаллидах)

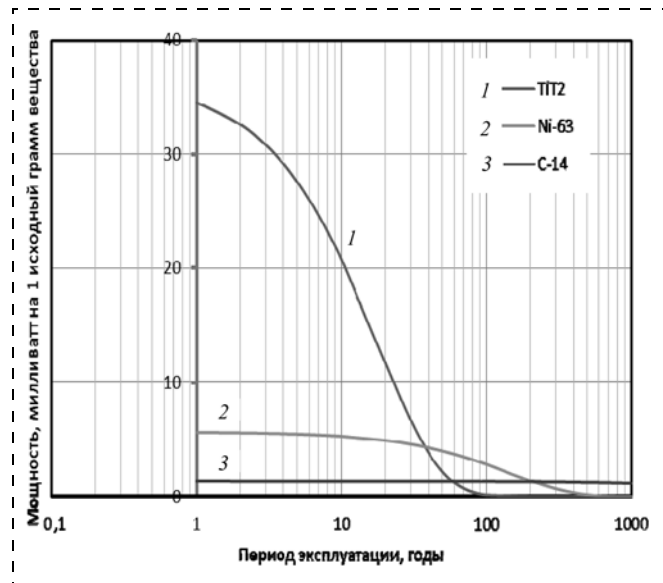


Рис. 2. Изменение со временем выделяемой мощности различных β-излучателей

повышает этот срок на 30...50 %. По-настоящему долгоживущими в течение многих десятков лет будут батареи на никеле-63. Удельная энергоемкость определяет мощность и размер батареи, но на срок жизни повлиять не может.

Достижение максимального значения энергоемкости бета-преобразователя, помимо энергетических характеристик используемого радионуклида, зависит от эффективности бета-излу-

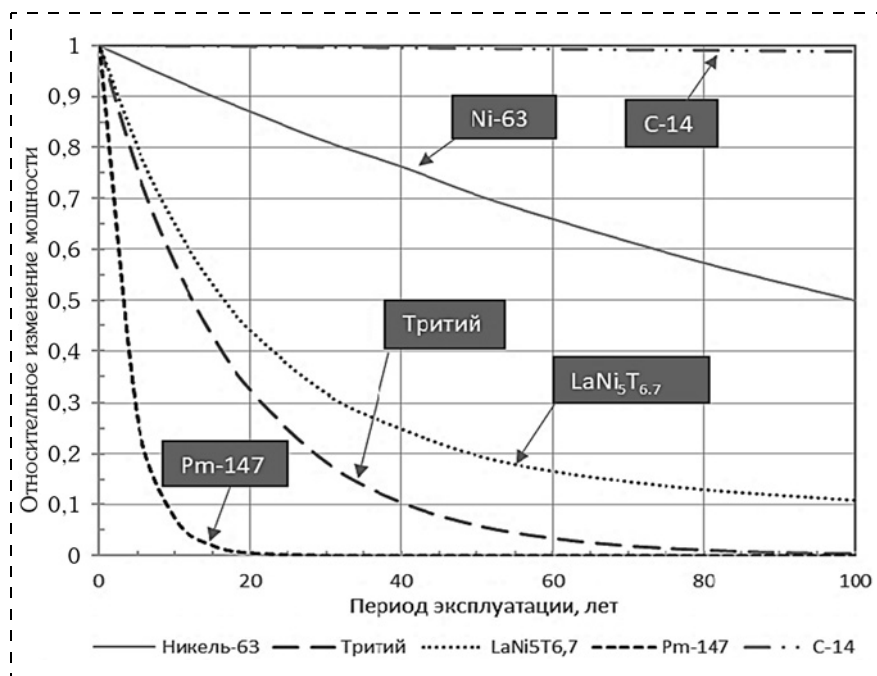


Рис. 3. Относительное уменьшение мощности различных β-излучателей во время эксплуатации. В интерметаллиде использован Ni-63

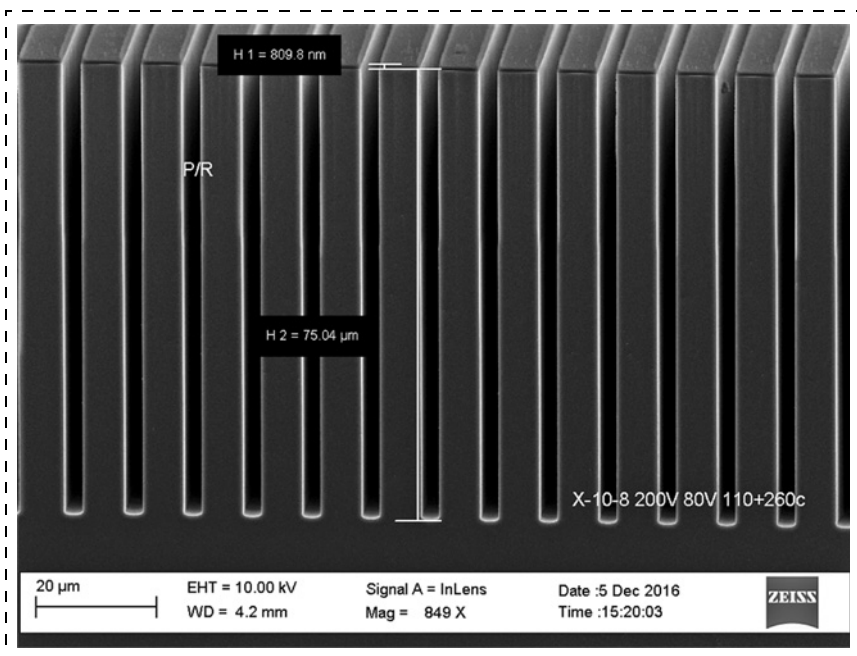


Рис. 4. Профили травления кремния, глубина травления около 75 мкм, остаточная толщина фоторезистивной маски около 800 нм

чателя и полупроводникового преобразователя. Эффективность бета-излучателя зависит от толщины слоя и свойств материала-носителя радионуклида. В настоящее время практически применяют планарные бета-преобразователи. В этом случае радиоактивный препарат наносят на одну из поверхностей преобразователя. Дополнительным способом повышения энергоемкости является переход от планарных структур к созданию в его объеме 3D-структур. Для этого используют текстурирование планарной поверхности, например, создание пористых структур, состоящих из расположенных упорядоченным образом пор ("колодцев") [31, 32].

На рис. 4 показана типичная кремниевая 3D-структура, изготовленная с использованием плазмохимического метода [33–35].

Размерные и массовые характеристики батареи очевидно улучшаются с уменьшением толщины преобразователя, пока не начнет падать его эффективность в сборе зарядов. С толщиной радионуклидного излучателя обстоит намного сложнее. Пролет бета-излучения в веществе ограничен, поэтому его самоослабление необходимо учитывать при оценке энергии, достигающей преобразователя. Для β -частиц слой половинного ослабления приблизительно равен

$$d \approx 0,095 \frac{Z}{A} \cdot E_{\max}^{3/2},$$

где $E_{\max}$ — граничная энергия спектра β -частиц; для трития она равна 0,0186 МэВ; Z — заряд атомов мишени, для титана равен 22; A — массовое число мишени, равно 47,9. Размерность $[d]$ получится в г/см². Формула применима от H_2 до Cu , для спектра простого β -распада до ослабления ~ 20 .

Для тритида титана

$$d \approx 0,095 \cdot 22(47,9)^{-1} \cdot 0,0186^{3/2} = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^2.$$

Линейный слой половинного ослабления

$$d_l = (d/\rho) = (1,1 \cdot 10^{-4}/4,05) = 2,7 \cdot 10^{-5} \text{ см} = 0,27 \text{ мкм},$$

т. е. β -излучение трития наполовину ослабляется, пройдя в тритиде титана расстояние 0,27 мкм.

Для тела выпуклой формы средняя хорда при изотропном распределении частиц равна $L = 4V/S$, где V — объем; S — поверхность. В плоском слое толщиной t имеем $L = 2t$. Если тритий равномерно распределен в объеме слоя, каждая β -частица проходит половину средней хорды, т. е. $L = t$. Коэффициент выхода β -частиц из слоя толщиной t равен

$$K = \exp\{-0,693t/d_l\}.$$

На рис. 5 представлена зависимость коэффициента выхода β -частиц от толщины слоя тритида титана.

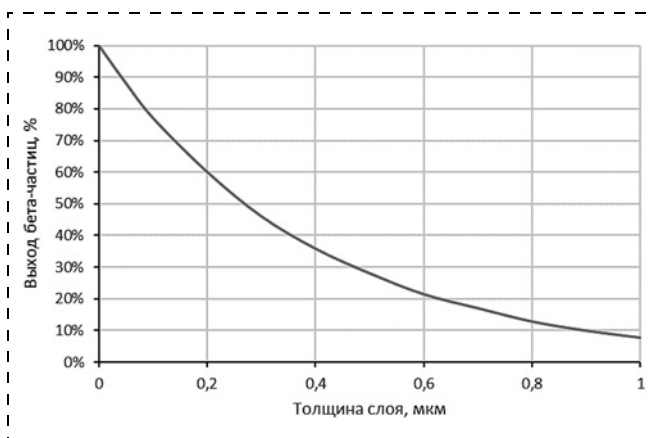


Рис. 5. Зависимость коэффициента выхода β -частиц от толщины слоя тритида титана

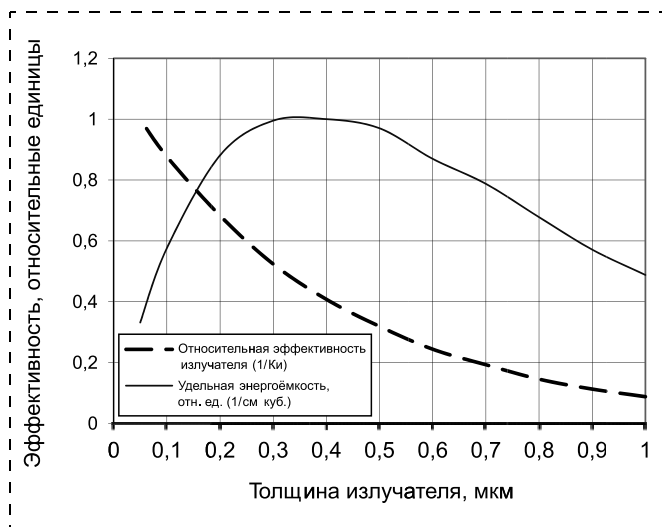


Рис. 6. Влияние толщины излучателя TiT_2 на параметры батареи

Как видно из этого рисунка, в батарее с излучателем толщиной 1 мкм лишь 7,7 % родившихся β -частиц покидают излучатель и попадают в преобразователь. Чтобы получить КПД батареи 1 % необходимо (и достаточно) использовать преобразователь с эффективностью 13 %.

По мере уменьшения толщины излучателя доля вылетевших из него β -частиц существенно возрастает. Утончив излучатель в 2 раза, до $t = 0,5$ мкм, мы почти в 4 раза увеличим поток β -частиц в преобразователь. Его эффективность неизменна, и значит электрическая мощность возрастет тоже примерно в 4 раза (при этом мы отвлекаемся от тонких эффектов, связанных с влиянием толщины излучателя на угловое распределение вылетающих из него частиц). Появляется возможность (при сохранении мощности батареи) уменьшить площадь излучателя и загрузку трития, а в конечном итоге габаритные размеры и стоимость батареи.

Расчет изменения параметров гипотетической многослойной планарной батареи с кремниевым преобразователем толщиной 5 мкм в зависимости от толщины бета-излучателя TiT_2 представлен на рис. 6 в относительных единицах.

Зависимость удельной энергоёмкости рабочего тела батареи от толщины пленки излучателя имеет выраженный максимум в диапазоне 0,3...0,4 мкм, так что имеет смысл для уменьшения размеров батареи стремиться к этим значениям t . Штриховая кривая показывает, что необходимая загрузка трития при фиксированной мощности батареи монотонно уменьшается

с уменьшением t , соответственно снижается и стоимость. В то же время видно, что уменьшать толщину менее 0,1 мкм нет смысла. В итоге наилучшее соотношение габаритных и стоимостных показателей батареи ожидается при толщине излучателя 0,2...0,25 мкм. Приведенные соображения в соответствующей части применимы и к 3D-структурам. Использование других радионуклидов или полупроводников требует проведения соответствующих подобных расчетов.

Из изложенного выше следует, что если при разработке конструкции БВАБ ставится задача создать батарею с максимально высокой удельной объемной энергоёмкостью — ($Вт/см^3$), то для этого целесообразней использовать тритид титана (TiT_2), имеющий, по сравнению с другими рассмотренными соединениями трития, наибольшее значение объемного энерговыделения, 148 мВт/см³. При разработке БВАБ с максимальной возможной удельной массовой энергоёмкостью целесообразней использовать такие бета-излучатели, как тритид бериллия BeT_2 с удельной энергоёмкостью 131 Вт/г или тритид лития LiT — 99,2 Вт/г. Гидриды (тритиды) интерметаллидов на основе лантан-никелевых ($LaNi_5T_6$) соединений целесообразней всего использовать, когда речь идет о создании БВАБ со сроком службы 15...25 лет с максимально возможным значением удельного объемного энерговыделения. Этот тритид, при значении удельного энерговыделения 124 мВт/см³, сможет обеспечить достаточно высокую величину начальной электрической мощности при указанном сроке службы.

Выводы

1. Рассмотрены и проанализированы разнообразные варианты использования трития, в том числе в виде тритидов металлов и интерметаллидов, позволяющие создавать на их основе эффективные источники излучения для бета-вольтаических атомных батарей.

2. Показано на примере источника излучения на основе тритида титана (TiT_2), что оптимальная толщина радиоактивного слоя должна составлять 0,2...0,25 мкм.

3. Установлено, что для создания БВАБ с максимальным начальным значением удельного (объемного) энерговыделения и сроком службы 12—15 лет целесообразно использовать тритид титана TiT_2 (148 мВт/см³), а для БВАБ с большим сроком службы возможно использовать

тритид на основе лантан-никелевого интерметаллида LaNi_5T_6 (124 или 151 мВт/см³ с природным никелем или с никелем-63 (80 %) соответственно).

4. Для создания БВАБ с максимально возможным удельным массовым энерговыделением и сроком службы 12—15 лет необходимо использовать тритид бериллия BeT_2 (132 мВт/г) или тритид лития LiT (99,2 мВт/г).

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 19-08-00452.

Список литературы

1. Кромптон Т. Первичные источники тока. Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 328 с.
2. Поликарпов М. А., Якимов Е. Б. Исследование свойств полупроводниковых преобразователей на основе кремния для бета-вольтаических элементов // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49, вып. 6. С. 763—766.
3. Лазаренко Ю. В., Пустовалов А. А., Шаповалов В. П. Малогабаритные ядерные источники электрической энергии. М.: Энергоатомиздат, 1992. 207 с.
4. Пустовалов А. А., Цветков Л. А. Высокообогащенный никель-63 и тритий — безальтернативная основа крупносерийного производства бета-вольтаических атомных батарей // Нано- и микросистемная техника. 2020. Т. 22, № 1. С. 34—38.
5. Ануфриев Ю. В., Зенова Е. В., Воронков Э. Н. Оценка перспективы применения бета-электрических батарей в микромощных автономных устройствах // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20, № 6. С. 356—367.
6. Пустовалов А. А., Гусев В. В., Задзе В. В., Петренко Н. С., Тихомиров А. В., Цветков Л. А. Бета-вольтаический источник тока на основе никеля-63 // Атомная энергия. 2007. Т. 103, вып. 6. С. 353—356.
7. Sun W., Kherani N. P., Hirschman K. D., Gadeken L. L., Fauchet P. M. A three-dimensional porous silicon p-n diode for betavoltaics and photovoltaics // Advanced materials. 2005. P. 1230—1233.
8. Окись трития / Под ред. Ю. И. Москалева. М.: Атомиздат, 1968. 396 с.
9. Гулько В. М., Книжник Е. И., Рудишин В. К., Ящук А. И. Источник бета-излучения на основе тритийсодержащего полистирола // Атомная энергия. 1980. Т. 48, вып. 2. С. 111.
10. Bower K. E., Barbanel Y. A., Shreter Yu. G., Bohnert G. W. Polymers, phosphors, and voltaics for radioisotope microbatteries. Boca Raton, London, New York, Washington: CRC Press. 2002. 504 p.
11. Koteleski T. et al. Tritiated amorphous silicon films and devices // J. Vac. Sci. Technol., A. 1998. Vol. 16. P. 893—896.
12. Liu B. et al. Self-irradiation enhanced tritium solubility in hydrogenated amorphous and crystalline silicon. // Journal of Applied Physics. 2011. Vol. 109. 054902.
13. Jimenez—Vazquez H. A. et al. Hot-atom incorporation of tritium atoms into fullerenes. // Chem. Phys. Lett. 1994. Vol. 229. P. 111—114.
14. Sahoo R. R., Bokare A. D., Patnaik A. Recoil tritium—C60 interaction: a channel for endohedral encapsulation of tritium in C60. // Carbon. 2002. Vol. 40 (13). P. 2453—2460.
15. Khong A., Cross R. J., Saunders M. From 3He@C60 to 3H@C60 : hot atom incorporation of tritium in C60 // J. Phys. Chem. 2000. Vol. 104 (17). P. 3940—3943.
16. Гольдшлегер Н. Ф., Моравский А. П. Гидриды фуллеренов: получение, свойства, структура // Успехи химии. 1997. Т. 66 (4). С. 353—375.
17. Тарасов Б. П., Гольдшлегер Н. Ф., Моравский А. П. Водородсодержащие углеродные наноструктуры: синтез и свойства // Успехи химии. 2001. Т. 70 (2). С. 149—166.
18. Dillon A. C. et al. Storage of hydrogen in single walled carbon nanotubes // Nature. 1997. Vol. 386. P. 377—379.
19. Biris A. R. et al. Hydrogen Storage in Carbon-Based Nanostructured Materials // Particulate Science and Technology. 2008. Vol. 26 (4). P. 297—305.
20. Badun G. A. et al. A novel approach radiolabeling detonation nanodiamonds through the tritium thermal activation method // Radiochimica Acta. 2014. Vol. 102. № 10. P. 941—946.
21. Girard H. A. et al. Tritium labeling of detonation nanodiamonds // Chem. Commun. 2014. Vol. 50. P. 2916—2918.
22. Myasnikov I. Yu. et al. Presonication of nanodiamonds hydrosols in radiolabelling by a tritium thermal activation method // Mendelev Communications. 2018. Vol. 28. P. 495—496.
23. Badun G. A. et al. Langmuir hydrogen dissociation approach in radiolabeling carbon nanotubes and graphene oxide // Radiochimica Acta. 2016. Vol. 104 (8). P. 593—599.
24. Беловодский Л. Ф., Гаевой В. К., Гришмановский В. И. Тритий. М.: Энергоатомиздат, 1985. 250 с.
25. Горловой Г. Д., Степаненко В. А. Тритиевые излучатели. М.: Атомиздат, 1965. 116 с.
26. Гамбург Д. Ю. и др. Водород. Свойства, получение, хранение. Справочник под ред. Гамбурга Д. Ю., Дубовкина Н. Ф. М.: Химия, 1989. 215 с.
27. Колачев Б. А. и др. Гидридные системы: справочник. М.: МЕТАЛЛУРГИЯ, 1992. 350 с.
28. Xiaoyi Li et al. Analyses of time-related performance of betavoltaic batteries using TiT_2 // Journal of Physics D: Applied Physics. 2021. Vol. 53. Number 46LT01.
29. Wu M. et al. Optimization design of betavoltaic battery based on titanium tritide and silicon using Monte Carlo code // APPLIED RADIATION AND ISOTOPES. 2018. Vol. 142. P. 22—27.
30. Kherani N. P., Shmayda W. T. Lithium tritide: micropower source and fusion fuel // Fusion Technology // Proceedings of the 17th Symposium on Fusion Technology, Rome, Italy, 1992. P. 1167—1171.
31. Полупроводниковый преобразователь бета-излучения в электроэнергию: пат. 2452060 Рос. Федерация. № 2010121444/28; заявл. 27.05.2010; опубл. 10.12.2011, Бюл. № 34.
32. Бета-вольтаический полупроводниковый генератор электроэнергии: пат. 2608058 Рос. Федерация. № 2015128489; заявл. 14.07.2015; опубл. 12.01.2017, Бюл. № 2.
33. Пустовалов А. А. и др. Отчет "Исследование процесса нанесения никелевых пленок газовой фазой методом из тетракарбонила никеля на поверхность углублений в кремниевых пластинах". Арх. ООО "БИАПОС". 2007. № Б-02/08. С. 82.
34. Бета-вольтаический полупроводниковый генератор электроэнергии. Патент РФ № 2608058. — от 12.01.2017. Заявл. 14.07.2015 г.
35. Цветков Л. А., Пустовалов А. А., Баранов Н. Н., Мандругин А. А. Основы бета-вольтаики. М.: РадиоСофт, 2019. 336 с.

L. A. Tsvetkov¹, Ph. D., Main Specialist, levtsvet@gmail.com,
A. A. Pustovalov², Ph. D., leading researcher, ap25605@gmail.com,
G. A. Badun³, Ph. D., Associate Professor, badunga@gmail.com,
V. A. Bunyaev³, Ph. D., student, vitalii1992@mail.ru,
V. N. Verbetsky³, doctor of Science, professor, verbetsky@hydride.chem.msu.ru,
A. A. Mandrugina³, doctor of Science, professor, aam1945@mail.ru,
N. N. Baranov⁴, doctor of Science, professor, nsmppve@iht.mpei.ac.ru

¹ LLC "EcoBioEnergy", Kostroma;

² Institute of Geosphere Dynamics, Moscow;

³ Moscow State University, Moscow;

⁴ Joint Institute for High Temperatures, Moscow

Corresponding author:

Badun Gennadiy A., Ph. D., Associate Professor, Moscow State University, Moscow

E-mail: badunga@gmail.com

Ways of Increasing Specific Energy Intensity of Tritium-based beta-Voltaic Nuclear Batteries

Received on June 06, 2021

Accepted on July 12, 2021

Creating a beta-voltaic semiconductor battery based on long-lived radionuclide is an urgent task. However, today the technology of creating such energy sources and their output characteristics are far from perfect. This article analyzes ways to maximize energy intensity on the surface of the semiconductor carrier. Various methods of creating the maximum possible volume concentration of radioactive beta-emitter atoms based on the use of tritium are considered. A variety of variants using "associated" tritium are considered for application on the surface of the semiconductor carrier: metal tritides, intermetallics. One option may be the use of tritium-labeled organic molecules and polymers, as well as tritium, which is part of carbon nanomaterials — fullerenes, nanotubes, nanodiamonds, graphene and graphene oxide. The properties of intermetallic hydrides (LaNi₅, LaNi₅T₆) are considered. The dependence of the unit energy intensity of the battery's working body on the thickness of the emitter's film has been analyzed. As a result of the studies, the analysis of ways to achieve maximum energy intensity on the surface of the semiconductor carrier was analyzed. Various methods of creating the maximum possible volume concentration of radioactive beta-emitter atoms based on the use of tritium are considered. The dependence of the unit energy intensity of the battery's working body on the thickness of the emitter's film has been analyzed.

Keywords: Beta-voltaic atomic battery, tritium, metal tritides, intermetallic tritides, beta radiation, specific power

For citation:

Tsvetkov L. A., Pustovalov A. A., Badun G. A., Bunyaev V. A., Verbetsky V. N., Mandrugina A. A., Baranov N. N. Ways of Increasing Specific Energy Intensity of Tritium-based beta-Voltaic Nuclear Batteries, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 5, pp. 223—231.

DOI: 10.17587/nmst.23.223-231

References

1. **Crompton T. R.** Small Batteries. Volume 2 Primary Cells. The Macmillan Press Ltd. London, Basingstoke. 1982. 222 p.
2. **Polikarpov M. A., Yakimov E. B.** Study of The Properties of Silicon-Based Semiconductor Converters for Betavoltaic Cells, *Semiconductors*, 2015, vol. 49, no. 6, pp. 746—748 (in Russian).
3. **Lazarenko Yu. V., Pustovalov A. A., Shapovalov V. P.** Malogabaritnye yadernye istochniki elektricheskoi energii, Moscow, *Energoatomizdat*, 1992, 207 p. (in Russian).
4. **Pustovalov A. A., Tsvetkov L. A.** Highly Enriched Nickel-63 and Tritium — Non-Alternative Basis Mass Production Beta-Voltaic Batteries, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 34—38 (in Russian).
5. **Anufriev Ju. V., Zenova E. V., Voronkov Je. N.** Estimation of the Prospects for the Beta Voltaic Batteries in the Micro-Power Autonomous Devices, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 6, pp. 356—367 (in Russian).
6. **Pustovalov A. A., Gusev V. V., Zaddé V. V., Petrenko N. S., Tsvetkov L. A., Tikhomirov A. V.** 63Ni-based β -electric current source, *Atomic Energy*, 2007, vol. 103, pp. 939—945 (in Russian).
7. **Sun W., Kherani N. P., Hirschman K. D., Gadeken L. L., Fauchet P. M.** A three-dimensional porous silicon p-n diode for betavoltaics and photovoltaics, *Advanced materials*, 2005, pp. 1230—1233.
8. **Okis tritiya / Pod red. Yu. I. Moskaleva**, Moscow, Atomizdat, 1968. 396 p. (in Russian).
9. **Gul'ko V. M., Knizhnik E. I., Rudishin V. K., Yashchuk A. I.** Beta source based on tritium-containing polystyrene, *Soviet Atomic Energy*, 1980, vol. 48, no. 2, p. 111 (in Russian).

10. Bower K. E., Barbanel Y. A., Shreter Yu. G., Bohnert G. W. Polymers, phosphors, and voltaics for radioisotope microbatteries. Boca Raton, London, New York, Washington, *CRC Press*, 2002. 504 p.
11. Kostas T. et al. Tritiated amorphous silicon films and devices, *J. Vac. Sci. Technol. A*, 1998, vol. 16, pp. 893–896.
12. Liu B. et al. Self-irradiation enhanced tritium solubility in hydrogenated amorphous and crystalline silicon, *Journal of Applied Physics*, 2011, vol. 109, p. 054902.
13. Jimenez—Vazquez H. A. et al. Hot-atom incorporation of tritium atoms into fullerenes, *Chem. Phys. Lett.*, 1994, vol. 229, pp. 111–114.
14. Sahoo R. R., Bokare A. D., Patnaik A. Recoil tritium—C60 interaction: a channel for endohedral encapsulation of tritium in C60, *Carbon*, 2002, vol. 40, no. 13, pp. 2453–2460.
15. Khong A., Cross R. J., Saunders M. From 3He@C60 to 3H@C60: hot atom incorporation of tritium in C60, *J. Phys. Chem.*, 2000, vol. 104, no. 17, pp. 3940–3943.
16. Goldshleger N. F., Moravskii A. P. Fullerene hydrides: synthesis, properties, and structure, *Russ. Chem. Rev.*, 1997, vol. 66, no. 4, pp. 323–345.
17. Tarasov B. P., Goldshleger N. F., Moravskii A. P. Hydrogen-containing carbon nanostructures: synthesis and properties, *Russ. Chem. Rev.*, 2001, vol. 70, no. 2, pp. 131–146.
18. Dillon A. C. et al. Storage of hydrogen in single walled carbon nanotubes, *Nature*, 1997, vol. 386, pp. 377–379.
19. Biris A. R. et al. Hydrogen Storage in Carbon-Based Nanostructured Materials, *Particulate Science and Technology*, 2008, vol. 26, no. 4, pp. 297–305.
20. Badun G. A. et al. A novel approach radiolabeling detonation nanodiamonds through the tritium thermal activation method, *Radiochimica Acta*, 2014, vol. 102, no. 10, pp. 941–946.
21. Girard H. A. et al. Tritium labeling of detonation nanodiamonds, *Chem. Commun.*, 2014, vol. 50, pp. 2916–2918.
22. Myasnikov I. Yu. et al. Presonication of nanodiamonds hydrosols in radiolabelling by a tritium thermal activation method, *Mendeleev Communications*, 2018, vol. 28, pp. 495–496.
23. Badun G. A. et al. Langmuir hydrogen dissociation approach in radiolabeling carbon nanotubes and graphene oxide, *Radiochimica Acta*, 2016, vol. 104, no. 8, pp. 593–599.
24. Belovodskij L. F., Gaevoy V. K., Grishmanovskij V. I. Tritij. Moscow, *Jenergoatomizdat*, 1985. 250 p. (in Russian).
25. Gorlovoj G. D., Stepanenko V. A. Tritievye izluchatel. Moscow, *Atomizdat*, 1965. 116 p.
26. Gamburg D. Ju. et al. Vodorod. Svoystva, poluchenie, hranenie // Spravochnik pod red. Gamburga D. Ju., Dubovkina N. F., Moscow, *Himija*, 1989. 215 p.
27. Kolachev B. A. et al. Gidridnye sistemy: spravochnik. Moscow, *METALLURGIJa*, 1992. 350 p.
28. Xiaoyi Li et al. Analyses of time-related performance of betavoltaic batteries using TiT₂, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, vol. 53, Number, 46LT01.
29. Wu M. et al. Optimization design of betavoltaic battery based on titanium tritide and silicon using Monte Carlo code, *APPLIED RADIATION AND ISOTOPES*, 2018, vol. 142, pp. 22–27.
30. Kherani N. P., Shmayda W. T. Lithium tritide: micropower source and fusion fuel, *Fusion Technology. Proceedings of the 17th Symposium on Fusion Technology, Rome, Italy*, 1992, pp. 1167–1171.
31. Poluprovodnikovyy preobrazovatel' beta-izlucheniya v jelektrojenergiju: pat. 2452060 Rus. Federacija. N. 2010121444/28; zajavl. 27.05.2010; opubl. 10.12.2011, Bjul. N. 34.
32. Beta-vol'taicheskij poluprovodnikovyy generator jelektrojenergii: pat. 2608058 Rus. Federacija. N. 2015128489; zajavl. 14.07.2015; opubl. 12.01.2017, Bjul. N. 2.
33. Pustovalov A. A. et al. Otchet "Issledovanie processa naneseniya nikel'nykh pljonok gazofaznym metodom iz tetrakarbonila nikelja na poverhnost' uglublenij v kremnievykh plastinah". Arh. LLC "BIAPOS". 2007. N. B-02/08. P. 82.
34. Beta-Voltaic Semiconductor Electric Energy Generator: pat. 2608058 Rus. Federacija. N. 2015128489; zajavl. 14.07.2015; opubl. 12.01.2017, Bjul. N. 2.
35. Tsvetkov L. A., Pustovalov A. A., Baranov N. N., Mandrugina A. A. Osnovy beta-vol'taiki. Moscow, *RadioSoft*, 2019. 336 p.

УДК 537.311.3

DOI: 10.17587/nmst.23.231-237

О. Е. Глухова, проф., зав. каф. радиотехники и электродинамики,
М. М. Слепченко, доц., e-mail: slepchenkovm@mail.ru, **П. В. Барков**, инженер,
 Саратовский национальный исследовательский государственный университет
 им. Н. Г. Чернышевского, Саратов

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МОНОСЛОЙНОГО НАНОСЕТЧАТОГО ГРАФЕНА С КРУГЛЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ

Поступила в редакцию 06.08.2021

Электрические свойства наносетчатого графена с круглыми отверстиями были рассчитаны в зависимости от его ширины шейки. Было установлено, что наносетчатый графен демонстрировал как металлическую, так и полупроводниковую проводимость при увеличении ширины шейки вдоль направления "зигзаг". В случае увеличения ширины шейки вдоль направления "кресло" наносетчатый графен демонстрировал только металлический тип проводимости. Наблюдалась анизотропия электропроводности в зависимости от направления, по которому осуществлялся перенос тока.

Ключевые слова: электропроводность, удельная электропроводность, анизотропия электропроводности, наносетчатый графен, плотность электронных состояний, энергия Ферми, энергетическая щель, компьютерное моделирование

Графен с регулярными/нерегулярными нанодырками называют нанодырчатым, а также наносетчатым. В любом случае, по сути, он является наноматериалом с островковой структурой, поскольку его плотность резко меняется вдоль поверхности, снижаясь до нуля в отдельных локальных областях. Наиболее часто этот материал называют наносетчатым графеном (НСГ), являющимся одним из перспективных наноматериалов. Он представляет собой однослойную углеродную пленку с расположенными на одинаковом расстоянии друг от друга отверстиями. Наносетчатый графен — простая в изготовлении наноструктура, в которой можно регулировать ширину запрещенной зоны в больших графеновых листах, а полевые транзисторы на основе НСГ могут поддерживать токи почти в 100 раз большие, чем отдельные устройства на основе графеновых нанолент [1]. Существуют несколько методов получения наносетчатого графена. Например, в работе [2] было описано изготовление наносетчатого графена с помощью метода блок-сополимерной литографии. Пленку оксида кремния (SiO) толщиной 10 нм выпаривали на защитном слое графена. Была сформирована тонкая пленка блок-сополимера, имеющая цилиндрические домены, перпендикулярные поверхности. Впоследствии процесс травления с помощью реактивного иона (RIE) и кислородно-плазменное травление были использованы для пробивания отверстий в графеновом слое. Еще одним методом получения наносетчатого графена является наносферная литография. Ключевым шагом в наносферной литографии для получения НСГ с использованием коллоидных микросфер является создание периодической пористой маски для травления графена. Практически наносетчатый графен применяют в качестве разделительных материалов для всех видов смесей, включая опреснение морской воды, очистку низкомолекулярных соединений [3]. Также ряд экспериментальных исследований продемонстрировал использование наносетчатого графена для газового [4], ионного просеивания [5] и для секвенирования ДНК [6].

Как известно, основными структурными параметрами для НСГ являются: 1) периодичность — расстояние между центрами соседних дырок; 2) ширина шейки — наименьшее расстояние между соседними дырками. Во многих ра-

ботах исследуется влияние ширины шейки W на проводимость G . Однако ширина шейки меняется большими скачками, например, от 5 до 100 нм с шагом 5—10 нм, что исключает возможность правильного понимания влияния топологии на проводимость.

Различают структуры НСГ с круглыми, треугольными и прямоугольными отверстиями [7—11]. В то же время, как отмечается в работе [7], именно наносетчатый графен с отверстиями круглой формы традиционно получают в реальном эксперименте. В той же работе авторы проводят методами DFT детальное исследование влияния формы отверстия на размеры энергетической щели НСГ, по результатам которого установлено, что НСГ с круглыми отверстиями имеют наибольшую щель по сравнению с НСГ с треугольными и прямоугольными отверстиями. В работе [12] с помощью сканирующей ионной микроскопии показано, что полученные методом интерференционной литографии НСГ с круглыми отверстиями обладают исключительно высокой механической стабильностью и могут охватывать области размером до ~2500 мкм. Результаты молекулярно-динамического моделирования одноосной деформации растяжения НСГ, представленные в работе [13], наглядно демонстрируют, что НСГ с отверстиями круглой формы обладают изотропными упругими свойствами, в отличие от НСГ с отверстиями эллиптической формы. Еще одним преимуществом круглой формы отверстий НСГ является возможность выращивания в них нанотрубок различной хиральности, в частности, в составе композитных структур графен/одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ) [14, 15]. Ранее при участии авторов данной работы была разработана методика прогнозирования возможности роста ОУНТ в дырках наносетчатого графена [16] и было показано, что именно в круглых отверстиях размером ~0,8...1,2 нм энергетически выгоден рост ОУНТ (6,6) и (9,9), обладающих высокой симметрией. Выращивание ОУНТ в дырках из НСГ делает композит — колонный графен. В той же работе прогнозируется возможность с помощью контроля ширины шейки управлять электропроводностью G и ее анизотропией.

В данной работе были детально исследованы закономерности изменения электронных параметров и электропроводности G наносетчатого графена с круглыми отверстиями диаметром ~1,2 нм с увеличением ширины шейки с мини-

мально возможным шагом в направлении "зигзаг" от 0,74 до 5,18 нм, в направлении "кресло" от 0,99 до 5,25 нм.

2. Атомистические модели и вычислительные методы

Наименьшими размерами периодического ящика (суперячейки) $X \times Y$ были выбраны $2,46 \times 2,55$ нм. Число атомов в этой суперячейке составляет 186 атомов. Направление X — "зигзаг", направление Y — "кресло", как показано на рис. 1. Исходные размеры выбраны нами с энергетической точки зрения. Это наименьшие размеры супер-ячейки, обеспечивающие энергетическую стабильность структуры. Также на рис. 1, б указана ширина шейки вдоль направления "зигзаг" (W_X) и вдоль направления "кресло" (W_Y): $W_X = 0,74$ нм и $W_Y = 0,99$ нм. Данные значения ширины шейки удовлетворяют экспериментальным данным [17]. Детальное исследование свойств НСГ проводили в два этапа. На первом этапе ширина шейки постепенно была увеличена вдоль направления "зигзаг" (вдоль направления X) до ~ 5 нм с минимально возможным шагом $\Delta W_X = 0,24$ нм (рис. 1, а). При этом ширина шейки вдоль направления "кресло" (вдоль Y) была неизменна и равна исходному значению 0,99 нм. На втором этапе ширина шейки была увеличена вдоль направления "кресло" (вдоль Y) до ~ 5 нм с минимальным шагом $\Delta W_Y = 0,42$ нм при постоянном значении ширины шейки вдоль направления "зигзаг" (вдоль X), равном 0,74 нм.

Расчеты функции электропроводности G выполняли с использованием метода неравновесных функций Грина—Келдыша [18], а также с использованием формализма Ландауэра—Буттикера, позволяющего изучать квантовый транспорт электронов с учетом упругого рассеяния электронов на неоднородностях [19]. Электропроводность описывается выражением

$$G = 2e^2/h \int_{-\infty}^{\infty} T(E) F_T(E - E_F) dE, \quad (1)$$

где $T(E)$ — функция пропускания электронов; E_F — энергия Ферми материала контактов, к которым подсоединен исследуемый объект; e — заряд электрона; h — постоянная Планка; e^2/h — квант проводимости, величина для единственного канала проводимости; F_T — функция, определяющая температурное уширение. Цифра "2" учитывает вырождение по спину электронов.

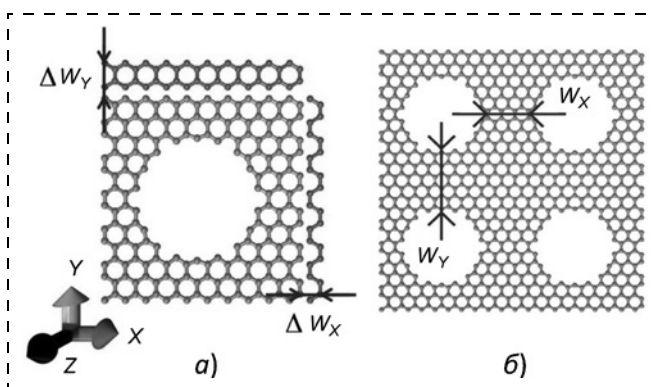


Рис. 1. Суперячейка монослойного наносетчатого графена

Функция пропускания электронов определяется выражением

$$T(E) = \text{Tr}(\Gamma_S(E) G_C^A(E) \Gamma_D(E) G_C^R(E)), \quad (2)$$

где $G_C^A(E)$, $G_C^R(E)$ — опережающая и запаздывающая матрицы Грина, описывающие контакт с электродами; $\Gamma_S(E)$, $\Gamma_D(E)$ — матрицы уширения уровней для истока и стока. Вычисления функции пропускания $T(E)$ и электропроводности G проводили с помощью программного пакета Kvazar-Mizar [20, 21].

Для нахождения энергии E многоэлектронной системы использовали квантовый метод функционала плотности в схеме сильной связи с самосогласованными зарядами (SCC-DFTB) [22]. В рамках метода SCC-DFTB учитывается влияние флуктуаций электронной плотности на полную энергию системы. Распределение зарядов атомов определяется из анализа заселенностей по схеме Малликена. Учет самосогласованного распределения зарядов позволит существенно повысить точность расчетов для многоатомных систем, содержащих ковалентные и ионные связи. Выбор метода SCC-DFTB для расчета полной энергии многоэлектронной системы обусловлен многоатомностью рассматриваемых суперячеек, которые содержат 1000 и более атомов. Как известно, многоатомные ячейки исследовать с помощью DFT очень ресурсоемко, поэтому метод SCC-DFTB более предпочтителен. Вычисление полной энергии E проводили с помощью программного пакета DFTB+ [23, 24].

Поиск равновесной конфигурации суперячеек исследуемых структур осуществляли путем минимизации полной энергии системы по длинам векторов трансляций L_X , L_Y и всем координатам атомов суперячейки в рамках метода SCC-DFTB. Все расчеты проводили при температуре 300 К.

3. Результаты

В первую очередь были рассчитаны энергетические характеристики НСГ при увеличении ширины шейки, в том числе энергетическая щель (E_{gap}), уровень Ферми (E_F) и плотности электронных состояний (DOS). На рис. 2, а, б приведены графики DOS для первых трех случаев последовательного увеличения ширины шейки в направлении "зигзаг" и в направлении "кресло". При увеличении ширины шейки вдоль направления "зигзаг" ширина энергетической щели изменяется немонотонно, скачкообразно в диапазоне 0,03...0,37 эВ (рис. 2, а). Наибольшее значение ширина энергетической щели достигает при ширине шейки, равной 1,24 нм. В случае увеличения ширины шейки вдоль направления "кресло", ширина энергетической щели практически

не меняется и равна $0,02 \pm 0,01$ эВ (рис. 2, б). Аналогичное поведение ширины щели наблюдается для всех последующих случаев увеличения значений W_x и W_y . Однако, если для случая увеличения W_y щель не меняется практически, то при увеличении W_x наблюдается осциляция ширины щели с шагом 3, как представлено на графике (рис. 2, в). При этом независимо от направления увеличения ширины шейки НСГ уровень Ферми составляет $-4,71 \pm 0,02$ эВ.

Далее были исследованы закономерности квантового транспорта электронов. В первую очередь были рассчитаны функции пропускания $T(E)$, характеризующие число каналов проводимости и определяющие значение электропроводности G . Профиль функции пропускания определяется профилем графика DOS. Естественно ожидать, что наличие энергетической ще-

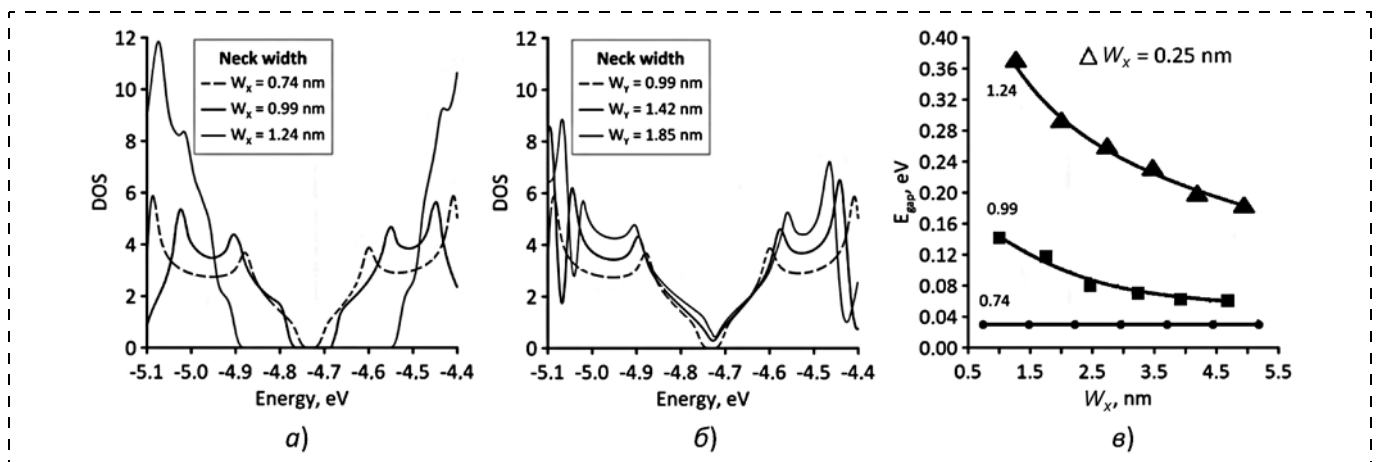


Рис. 2. Энергетические характеристики НСГ:

а, б — графики DOS; в — энергетическая щель зонной структуры при увеличении ширины шейки W_x (направление "зигзаг")

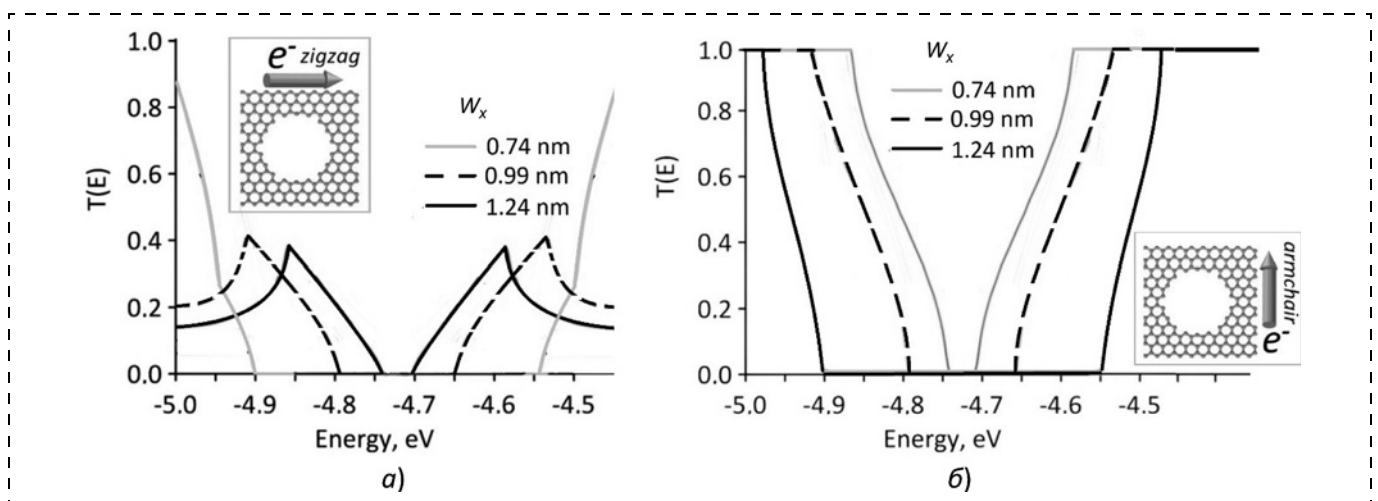


Рис. 3. Графики функции пропускания НСГ при последовательном увеличении W_x при токопереносе:

а — вдоль направления "зигзаг", б — вдоль направления "кресло"

ли приведет к появлению нулевого интервала у функции $T(E)$ вблизи уровня Ферми, а также особенности изменения E_{gap} при увеличении ширины шейки определяют и характер изменения функции пропускания $T(E)$. Наиболее интересным, как было показано выше, является случай увеличения шейки НСГ вдоль направления X , поэтому на рис. 3 показаны результаты расчетов $T(E)$ для направлений токопереноса вдоль осей X (направление "зигзаг" (zigzag)) и Y (направление "кресло" (armchair)) наносетчатых графеновых структур, получаемых последовательным увеличением ширины шейки W_x . На вставках рис. 3 показана ячейка НСГ с направлением токопереноса. Сразу можно заметить, что наблюдается анизотропия транспортных свойств, а именно в направлении Y ("кресло") электропроводность выше, чем в направлении X ("зигзаг"). Такая же ситуация наблюдается и при наращивании ширины W_y . При этом для случая токопереноса в направлении Y вблизи уровня Ферми у функции пропускания появляется один канал проводимости, чего не наблюдается для токопереноса в направлении X , где $T(E)$ не превышает 0,6. Можно предположить, что причиной такой разницы в поведении функции $T(E)$ является локализация электронов, которая приводит к сильному

Таблица 2
Проводимость и удельная проводимость НСГ при увеличении ширины шейки вдоль направления "кресло"

W_y , нм	W_x , нм	Токоперенос вдоль направления "зигзаг"		Токоперенос вдоль направления "кресло"	
		G , мкСм	σ , мкСм/нм	G , мкСм	σ , мкСм/нм
0,99	0,74	4,96	14,07	17,87	54,57
1,42		7,67	18,62	20,39	72,68
1,85		10,11	21,43	23,05	93,77
2,28		12,38	23,42	19,34	88,38
2,7		15,77	26,83	17,68	90,15
3,13		18,28	28,23	16,03	89,72
3,55		22,52	31,86	16,38	100,19
3,98		24,67	32,25	15,26	100,68
4,4		24,45	29,62	13,71	97,62
4,83		26,27	29,89	13,01	99,32
5,25		30,34	32,19	13,78	111,54

увеличению локальной плотности электронных состояний на краях дырок и, как следствие, к перераспределению электронной плотности на всех атомах структуры.

Рассчитанные на основе $T(E)$ значения электропроводности G (1) и удельной электропроводности σ приведены в табл. 1 и 2. Анализ данных таблиц показывает, что при увеличении ширины шейки W_x наблюдается скачкообразное изменение обоих значений проводимости при токопереносе и вдоль направления "зигзаг", и вдоль направления "кресло". При этом каждое третье значение удельной проводимости при токопереносе вдоль направления "кресло" почти в 3—4 раза больше каждого третьего значения удельной проводимости вдоль направления "зигзаг" (в табл. 1 эти значения выделены полужирным шрифтом). Наибольшую удельную проводимость наносетчатый графен имеет при токопереносе вдоль направления "кресло" при увеличении ширины шейки вдоль направления "кресло". При токопереносе вдоль направления "зигзаг" удельная проводимость в несколько раз меньше. Из данных табл. 2 следует, что при увеличении ширины шейки в направлении "кресло" проводимость немонотонно меняется без каких-либо скачков и четкой закономерности.

Заключение

В результате детального исследования наносетчатого графена с круглыми наноотверстиями диаметром $\sim 1,2$ нм были получены новые зна-

Таблица 1
Проводимость и удельная проводимость НСГ при увеличении ширины шейки вдоль направления "зигзаг"

W_x , нм	W_y , нм	Токоперенос вдоль направления "кресло"		Токоперенос вдоль направления "зигзаг"	
		G , мкСм	σ , мкСм/нм	G , мкСм	σ , мкСм/нм
0,74	0,99	17,87	54,57	4,96	14,07
0,99		2,92	8,08	1,39	4,34
1,24		0,04	0,1	0,02	0,09
1,48		19,94	46,64	4,35	16,05
1,73		4,01	8,72	1,4	5,57
1,98		0,24	0,48	0,10	0,44
2,22		27,73	52,73	4,49	20,45
2,46		9,70	17,4	2,33	11,23
2,71		0,44	0,75	0,16	0,81
2,96		31,26	50,16	4,02	21,69
3,2		13,83	21,03	2,54	14,41
3,45		1,16	1,68	0,33	1,97
3,7		34,68	48,02	3,41	21,32
3,94		16,1	21,37	2,52	16,42
4,19		2,25	2,86	0,52	3,54
4,44		36,78	44,88	3,06	21,7
4,68		17,57	20,54	2,43	17,91
4,92		3,42	3,86	0,67	5,13
5,18		41,83	45,5	2,77	22,01

ния о влиянии ширины шейки на электронные свойства. На основе анализа плотности электронных состояний сделан вывод, что наносетчатый графен в зависимости от ширины шейки демонстрирует полупроводниковый тип проводимости, но с различными значениями запрещенной щели в пределах 0,01...0,37 эВ.

Обнаружена анизотропия электропроводности, зависящая от направления, вдоль которого осуществляется токоперенос. Наибольшую удельную проводимость имеет наноструктура при токопереносе вдоль направления "кресло", при этом она возрастает при увеличении ширины шейки в этом же направлении до 5 нм.

В итоге можно заключить, что наносетчатый графен может стать основой для элементной базы полупроводниковых приборов. Для этого наносетчатый графен обладает, судя по теоретическому прогнозу, всеми необходимыми качествами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSRR-2020-0004) и гранта Президента Российской Федерации (проект № МК-2289.2021.1.2).

Список литературы

1. Bai J., Zhong X., Jiang S. et al. Graphene nanomesh // Nat. Nanotechnol. 2010. Vol. 5, N. 3. P. 190–194.
2. Yuan W., Li M., Wen Z. et al. The Fabrication of Large-Area, Uniform Graphene Nanomeshes for High-Speed, Room-Temperature Direct Terahertz Detection // Nanoscale Research Letters. 2018. Vol. 13, N. 190. P. 8.
3. Zhang L., Wu C., Ding X. et al. Separation selectivity and structural flexibility of graphene-like 2-dimensional membranes // Phys. Chem. Chem. Phys. 2018. Vol. 20. P. 18192–18199.
4. O'Hern S. C., Stewart C. A., Boutilier M. S. H. et al. Selective Molecular Transport through Intrinsic Defects in a Single Layer of CVD Graphene // ACS Nano. 2012. Vol. 6, N. 11. P. 10130–10138.
5. Surwade S. P., Smirnov S. N., Vlassiouk I. V. et al. Water desalination using nanoporous single-layer graphene // Nat. Nanotech. 2015. Vol. 10, N. 5. P. 459–464.
6. Branton D., Deamer D. W., Marziali A. et al. The potential and challenges of nanopore sequencing // Nat. Biotechnol. 2008. Vol. 26. P. 1146–1153.
7. Tang G., Zhang Z., Deng X. et al. The effect of different hydrogen terminations on the structural and electronic properties in the triangular array graphene nanomeshes // Carbon. 2014. Vol. 76. P. 348–356.
8. Zhang J., Zhang W., Ragab T., Basaran C. Mechanical and electronic properties of graphene nanomesh heterojunctions // Computational Materials Science. 2018. Vol. 153. P. 64–72.
9. Kausar A. Graphene nanomesh and polymeric material at cutting edge // Polymer-plastics technology and materials. 2019. Vol. 58, N. 8. P. 803–820.
10. Yarifard M., Davoodi J., Rafii-Tabar H. In-plane thermal conductivity of graphene nanomesh: A molecular dynamics study // Computational Materials Science. 2016. Vol. 111. P. 247–251.
11. Yang H. X., Chshiev M., Boukhvalov D. W. et al. Inducing and optimizing magnetism in graphene nanomeshes // Phys. Rev. B. 2011. Vol. 84, N. 214404. P. 7.
12. Winter A., Ekinci Y., Götzhäuser A., Turchanin A. Free-standing carbon nanomembranes and graphene monolayers nanopatterned via EUV interference lithography // 2D Mater. 2019. Vol. 6, N. 021002. P. 9.
13. Carpenter C., Christmann A. M., Hu L. et al. Elastic properties of graphene nanomeshes // Applied Physics Letters. 2014. Vol. 104, N. 141911. P. 6.
14. Park J., Prakash V. Phonon scattering and thermal conductivity of pillared graphene structures with carbon nanotube-graphene intramolecular junctions // Journal of Applied Physics. 2014. Vol. 116, N. 014303. P. 13.
15. Qian H.-J., Eres G., Irle S. Quantum chemical molecular dynamics simulation of carbon nanotube–graphene fusion // Molecular Simulation. 2017. Vol. 43. P. 1269–1276.
16. Slepchenkov M. M., Shmygin D. S., Zhang G., Glukhova O. E. Controlling anisotropic electrical conductivity in porous graphene-nanotube thin films // Carbon. 2020. Vol. 165. P. 139–149.
17. Feng T., Ruan X. Ultra-low thermal conductivity in graphene nanomesh // Carbon. 2016. Vol. 101. P. 107–113.
18. Keldysh L. V. Diagram Technique for Nonequilibrium Processes // JETP. 1965. Vol. 20. P. 1018–1026.
19. Datta S. Quantum Transport: Atom to Transistor. London, UK, Cambridge University Press: Cambridge, 2005. 404 p.
20. Glukhova O. E. Thermal Transport in Carbon-Based Nanomaterials. Amsterdam, Netherlands, Elsevier: Hardcover, 2017. 267 p.
21. Glukhova O. E. Carbon Nanotubes: Synthesis and Properties. London, UK: Nova Science Publishers, 2012. 319 p.
22. Elstner M., Porezag D., Jungnickel G. et al. Self-consistent-charge density-functional tight-binding method for simulations of complex materials properties // Phys. Rev. B. 1998. Vol. 58. P. 7260–7268.
23. Aradi B., Hourahine B., Frauenheim Th. DFTB+, a Sparse Matrix-Based Implementation of the DFTB Method // J. Phys. Chem. A. 2007. Vol. 111. P. 5678–5684.
24. Hourahine B., Aradi B., Blum V. et al. DFTB+, a software package for efficient approximate density functional theory based atomistic simulations // J. Chem. Phys. 2020. Vol. 152, N. 124101. 20 p.

O. E. Glukhova, Head of Chair of Radiotechnology and Electrodynamics,
M. M. Slepchenkov, Associate Professor, e-mail: slepchenkovm@mail.ru, **P. V. Barkov**, Engineer,
 Institute of Physics, Saratov State University, Saratov, 410012, Russian Federation

Corresponding author:

Slepchenkov M. M., Associate Professor, Institute of Physics, Saratov State University, Saratov, 410012, Russian Federation, e-mail: slepchenkovm@mail.ru

Regularities of Electrical Conductivity of Monolayer Graphene Nanomesh with Round Holes

Received on August 06, 2021

Accepted on August 16, 2021

This paper studies graphene nanomesh with different neck width is the smallest distance between two neighboring holes. The electrical properties of graphene nanomesh with circular holes were calculated in dependence on its neck width. For the considered structures energetical characteristics including energy gap (E_{gap}), Fermi level (E_f), and density of electron states (DOS) were found. It was established that graphene nanomesh demonstrated both metallic and semiconductor types of conductivity when the neck width was increased along the zigzag direction. In the case of increasing the neck width along armchair direction, graphene nanomesh demonstrated only a metallic type of conductivity. It was observed the anisotropy of electrical conductivity depending on the direction along which the current transfer was carried out.

Keywords: electrical conductivity, anisotropy of electrical conductivity, graphene nanomesh, density of states, Fermi energy, energy gap, computer modeling

For citation:

Glukhova O. E., Slepchenkov M. M., Barkov P. V. Regularities of Electrical Conductivity of Monolayer Graphene Nanomesh with Round Holes, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 5, pp. 231–237.

DOI: 10.17587/nmst.23.231-237

References

1. Bai J., Zhong X., Jiang S. et al. Graphene nanomesh, *Nat. Nanotechnol.*, 2010, vol. 5, no. 3, pp. 190–194.
2. Yuan W., Li M., Wen Z. et al. The Fabrication of Large-Area, Uniform Graphene Nanomeshes for High-Speed, Room-Temperature Direct Terahertz Detection, *Nanoscale Research Letters*, 2018, vol. 13, no. 190, p. 8.
3. Zhang L., Wu C., Ding X. et al. Separation selectivity and structural flexibility of graphene-like 2-dimensional membranes, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2018, vol. 20, pp. 18192–18199.
4. O'Hern S. C., Stewart C. A., Boutilier M. S. H. et al. Selective Molecular Transport through Intrinsic Defects in a Single Layer of CVD Graphene, *ACS Nano*, 2012, vol. 6, no. 11, pp. 10130–10138.
5. Surwade S. P., Smirnov S. N., Vlassiounk I. V. et al. Water desalination using nanoporous single-layer graphene, *Nat. Nanotech.*, 2015, vol. 10, no. 5, pp. 459–464.
6. Branton D., Deamer D. W., Marziali A. et al. The potential and challenges of nanopore sequencing, *Nat. Biotechnol.*, 2008, vol. 26, pp. 1146–1153.
7. Tang G., Zhang Z., Deng X. et al. The effect of different hydrogen terminations on the structural and electronic properties in the triangular array graphene nanomeshes, *Carbon*, 2014, vol. 76, pp. 348–356.
8. Zhang J., Zhang W., Ragab T., Basaran C. Mechanical and electronic properties of graphene nanomesh heterojunctions, *Computational Materials Science*, 2018, vol. 153, pp. 64–72.
9. Kausar A. Graphene nanomesh and polymeric material at cutting edge, *Polymer-plastics technology and materials*, 2019, vol. 58, no. 8, pp. 803–820.
10. Yarifard M., Davoodi J., Rafii-Tabar H. In-plane thermal conductivity of graphene nanomesh: A molecular dynamics study, *Computational Materials Science*, 2016, vol. 111, pp. 247–251.
11. Yang H. X., Chshiev M., Boukhalov D. W. et al. Inducing and optimizing magnetism in graphene nanomeshes, *Phys. Rev. B*, 2011, vol. 84, no. 214404, p. 7.
12. Winter A., Ekinci Y., Götzhäuser A., Turchanin A. Free-standing carbon nanomembranes and graphene monolayers nanopatterned via EUV interference lithography, *2D Mater.*, 2019, vol. 6, no. 021002, p. 9.
13. Carpenter C., Christmann A. M., Hu L. et al. Elastic properties of graphene nanomeshes, *Applied Physics Letters*, 2014, vol. 104, no. 141911, p. 6.
14. Park J., Prakash V. Phonon scattering and thermal conductivity of pillared graphene structures with carbon nanotube-graphene intramolecular junctions, *Journal of Applied Physics*, 2014, vol. 116, no. 014303, p. 13.
15. Qian H.-J., Eres G., Irle S. Quantum chemical molecular dynamics simulation of carbon nanotube–graphene fusion, *Molecular Simulation*, 2017, vol. 43, pp. 1269–1276.
16. Slepchenkov M. M., Shmygin D. S., Zhang G., Glukhova O. E. Controlling anisotropic electrical conductivity in porous graphene-nanotube thin films, *Carbon*, 2020, vol. 165, pp. 139–149.
17. Feng T., Ruan X. Ultra-low thermal conductivity in graphene nanomesh, *Carbon*, 2016, vol. 101, pp. 107–113.
18. Keldysh L. V. Diagram Technique for Nonequilibrium Processes, *JETP*, 1965, vol. 20, pp. 1018–1026.
19. Datta S. Quantum Transport: Atom to Transistor. London, UK, Cambridge University Press: Cambridge, 2005, 404 p.
20. Glukhova O. E. Thermal Transport in Carbon-Based Nanomaterials. Amsterdam, Netherlands, Elsevier: Hardcover, 2017, p. 267.
21. Glukhova O. E. Carbon Nanotubes: Synthesis and Properties. London, UK, Nova Science Publishers, 2012, p. 319.
22. Elstner M., Porezag D., Jungnickel G. et al. Self-consistent density-functional tight-binding method for simulations of complex materials properties, *Phys. Rev. B*, 1998, vol. 58, pp. 7260–7268.
23. Aradi B., Hourahine B., Frauenheim Th. DFTB+, a Sparse Matrix-Based Implementation of the DFTB Method, *J. Phys. Chem. A*, 2007, vol. 111, pp. 5678–5684.
24. Hourahine B., Aradi B., Blum V. et al. DFTB+, a software package for efficient approximate density functional theory based atomistic simulations, *J. Chem. Phys.*, 2020, vol. 152, no. 124101, 20 p.

В. И. Лаукарт, нач. отдела, kb2@vniitf.ru, **О. А. Филин**, нач. группы,
С. В. Кузнецов, инженер-конструктор, **М. С. Степычев**, инженер-исследователь
Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский
институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, г. Снежинск

МЕТОД ВАКУУМНОЙ ГЕРМЕТИЗАЦИИ МЭМС-УСТРОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕРАСПЫЛЯЕМОГО ГАЗОПОГЛОТИТЕЛЯ

Поступила в редакцию 21.06.2021

Рассмотрен способ вакуумной герметизации микроэлектромеханических (МЭМС) устройств с размещением открытого чувствительного элемента в герметичном металлокерамическом корпусе 5142.48-А. Определены требования к технологическому процессу сборки, оборудованию и материалам, необходимым для создания и поддержания высокого уровня вакуума в герметизируемом объеме на протяжении всего срока эксплуатации изделия. Приведены результаты экспериментальных исследований процесса высокотемпературной активации нераспыляемых газопоглотителей.

Ключевые слова: МЭМС, герметизация, вакуумирование, шовно-роликовая сварка, лазерная сварка, штенгель, газопоглотитель, активация, отжиг, пирометр, галогеновая лампа, вакуумная камера

Введение

Как показывает опыт разработки МЭМС-преобразователей, для реализации требуемых функциональных характеристик чувствительные элементы (ЧЭ) зачастую необходимо устанавливать в герметизированный объем, в котором поддерживается высокий уровень вакуума (менее 10^{-5} мм рт. ст.). Выбор способа герметизации является одним из ключевых вопросов при разработке конструкции и технологии изготовления ЧЭ МЭМС, поскольку именно от него зависит стойкость преобразователя к большинству внешних воздействующих факторов, долговечность и надежность прибора в целом.

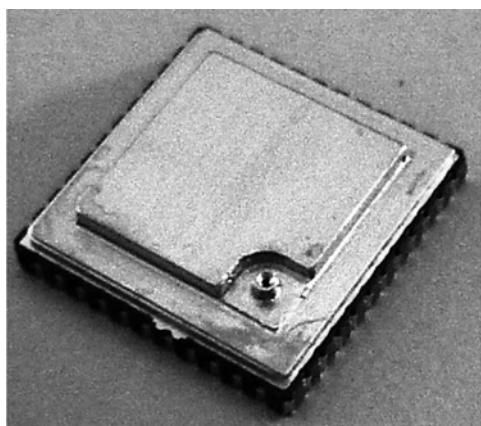


Рис. 1. Металлокерамический корпус 5142.48-А с вновь разработанной крышкой оригинальной конструкции

Проведенный анализ возможных технологических решений показал, что технология вакуумирования ЧЭ МЭМС на российских предприятиях, обладающих опытом изготовления устройств данного типа, либо отсутствует, либо находится в начальной стадии разработки. В связи с этим был предложен и апробирован способ вакуумной герметизации ЧЭ МЭМС на основе миниатюрного дискретного металлокерамического корпуса 5142.48-А с вновь разработанной крышкой оригинальной конструкции (рис. 1).

Процесс вакуумной герметизации корпуса 5142.48-А

Стандартный процесс герметизации металлокерамических корпусов — шовно-роликовая сварка — предполагает создание избыточного давления во внутрикорпусном пространстве. Для создания внутри корпуса вакуума соединение крышки с основанием корпуса и герметизацию внутрикорпусного объема необходимо осуществлять поэтапно. В связи с этим была разработана крышка оригинальной конструкции, в которой предусмотрено отверстие штенгельного типа для откачки воздуха. Такая крышка позволяет проводить процесс вакуумной герметизации корпуса в два этапа. Первый этап — соединение поверхности крышки с монтажным кольцом основания корпуса посредством шовно-роликовой сварки. Второй этап — вакуумирование и герме-

тизация внутрикорпусного объема путем заваривания штенгельного отверстия на установке лазерной сварки.

Независимо от применяемой технологии вакуумно-плотного корпусирования уровень вакуума в рабочей полости с течением времени может ухудшаться [1]. Это происходит как вследствие внешнего натекания в связи с микродефектами в корпусе и сварных швах, так и в результате газовыделения из основных структурных материалов. Поэтому важно не только получить высокий уровень вакуума непосредственно на этапе герметизации чувствительного элемента, но и обеспечить его стабильность на протяжении всего срока эксплуатации изделия.

Низкое значение внешнего натекания обеспечивается качественным соединением крышки корпуса с керамическим основанием и однородным заполнением штенгельного отверстия расплавом. Это достигается за счет подбора соответствующих конструкционных материалов и оптимальных параметров процесса сварки. В качестве материала крышки был выбран сплав 29НК, поскольку значение его коэффициента температурного расширения ($6,2 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$) близко к значению коэффициента температурного расширения керамики ($6,8 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$). Вне зависимости от основного материала для шовно-роликовой сварки рекомендуется применять крышки с покрытием, в роли которого чаще всего выступает никель. При этом следует различать никель, нанесенный электролитическим и химическим методами. Стандартные крышки, которыми комплектуются металлокерамические корпуса, обычно имеют покрытие из химического никеля. Однако в ходе отработки процесса герметизации было установлено, что никель, нанесенный химическим методом, имеет в своем составе включения фосфора, присутствие которых приводит к растрескиванию материала штенгельного отверстия в процессе лазерной сварки (рис. 2).

Для предотвращения растрескивания штенгельного отверстия покрытие вновь разработанной крышки было заменено на никель толщиной 6 мкм, нанесенный электролитическим мето-

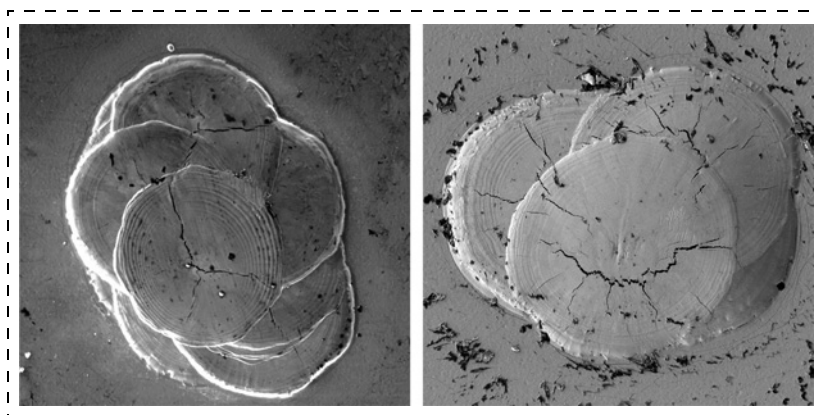


Рис. 2. Вид на штенгельное отверстие, выполненное в стандартной крышке корпуса 5142.48-А (покрытие — хим. НЗ), после лазерной сварки

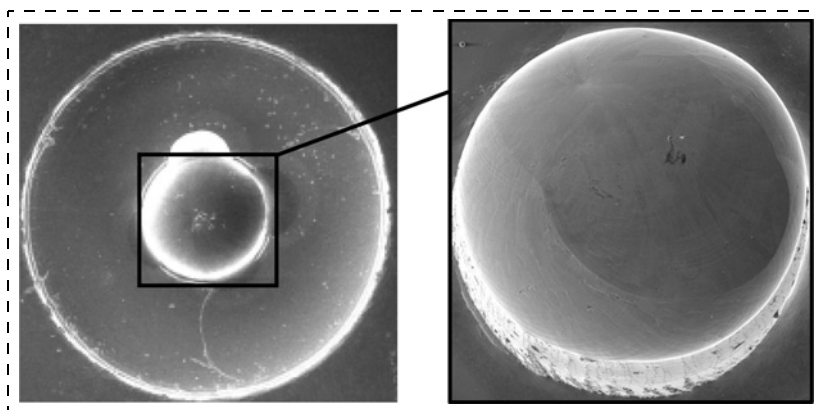


Рис. 3. Вид на штенгельное отверстие, выполненное во вновь разработанной крышке (покрытие — Н6), после лазерной сварки

дом. В результате сварная область штенгельного отверстия приобрела вид сплошной оплавленной зоны без трещин и прочих дефектов (рис. 3).

Герметичность внутреннего объема контролировали путем измерения уровня натекания гелия. Для этого герметизированные корпуса в течение нескольких суток выдерживали в среде гелия при повышенном давлении, после чего помещали в гелиевый течеискатель. Исследования подтвердили, что шовно-роликовая сварка с последующим лазерным завариванием штенгельного отверстия обеспечивает высокую герметичность внутрикорпусного объема: среднее значение течи по потоку гелия для тестируемых корпусов составило менее $1 \cdot 10^{-10} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$.

Для уменьшения газовыделения из структурных материалов на этапе разработки конструкции были предприняты следующие меры:

исключены конструкционные материалы с повышенным газовыделением (в частности, клей и другие органические материалы, применяемые при монтаже кремниевого чувствительного элемента в металлокерамический корпус);

введен в конструкцию геттер — газопоглощающий элемент, способный сорбировать газы, выделяемые элементами конструкции.

В качестве геттера были использованы малогабаритные газопоглощающие элементы на основе спрессованного титан-ванадиевого порошка ПТФ ТУ 14-1-4699—2003 в виде таблеток диаметром 6,5 мм и толщиной 0,7 мм с сорбционной емкостью по водороду 5 л · Па производства АО НИИ "Полюс" им. М. Ф. Стельмаха, г. Москва [2]. Для размещения геттера во вновь разработанной крышке была предусмотрена специальная полость. Установку газопоглотителя проводили путем запрессовки с посадкой "в натяг" (рис. 4, см. вторую сторону обложки). Благодаря этому таблетка газопоглотителя плотно прилегает к поверхности крышки, что обеспечивает не только механическую прочность сборки, но и хорошую теплопередачу, что важно при последующем отжиге и активации геттера.

Газопоглотители на основе спрессованного порошка ПТФ относятся к нераспыляемым геттерам и способны обратимо поглощать водород и необратимо поглощать кислород, пары воды и оксид углерода. Принцип работы геттера основан на образовании химической связи между атомами титан-ванадиевого сплава и атомами вышеупомянутых газообразных веществ. Вследствие этого, как только вновь изготовленный газопоглощающий элемент впервые подвергается воздействию атмосферы, на его поверхности образуется пассивирующий слой, препятствующий дальнейшему поглощению газа. Непосредственно перед герметизацией ЧЭ МЭМС газопоглощающий элемент должен быть подвергнут термообработке в условиях вакуума, т. е. активирован. Активация — высокотемпературный процесс, в ходе которого происходит предварительное обезгаживание материала газопоглотителя и диффузия уже адсорбированных газообразных продуктов вглубь материала, в результате чего на поверхности геттера формируется слой с повышенной сорбционной способностью.

Согласно рекомендациям производителя активацию газопоглощающих элементов из порошка ПТФ ТУ 14-1-4699—2003 следует проводить путем их выдержки в вакууме не хуже 10^{-5} мм рт. ст. при постоянной внешней откачке и температуре не менее 525 °С в течение не менее 45 мин. Герметизацию внутрикорпусного объема необходимо проводить непосредственно после активации газопоглотителя без приостановки внешней откачки.

Конструкция и принцип работы системы вакуумной герметизации

Для проведения процесса активации газопоглотителя и последующей герметизации корпуса чувствительного элемента была разработана специальная технологическая оснастка (рис. 5, см. вторую сторону обложки). Оснастка представляет собой вакуумную камеру, внутри которой одновременно можно размещать до четырех герметизируемых чувствительных элементов. Камера подключена к турбомолекулярному вакуумному насосу, обеспечивающему уровень вакуума на уровне 10^{-7} мм рт. ст. Нагрев оснастки осуществляется с помощью стандартных миниатюрных галогеновых ламп G12 мощностью 35 Вт каждая, число которых соответствует числу одновременно герметизируемых чувствительных элементов. Для заваривания штенгельного отверстия с помощью лазерной сварки в конструкции вакуумной камеры предусмотрено окно из кварцевого стекла, прозрачного для лазерного излучения.

В ходе экспериментальной отработки было определено, что полной мощности одной галогеновой лампы достаточно для нагрева крышки корпуса до температуры свыше 600 °С, что является неприемлемым. В связи с этим для обеспечения требуемого температурного профиля процесса активации газопоглотителя был разработан электронный блок управления мощностью нагревательных элементов. Блок управления сконструирован на базе программируемого микроконтроллера, обеспечивающего изменение степени накала галогеновых ламп в автоматическом режиме по предварительно заданному профилю. Изменение степени накала обеспечивается изменением скважности прямоугольных импульсов питающего напряжения 12 В.

По результатам отработки были подобраны параметры процесса, обеспечивающие требуемый температурный профиль активации газопоглотителя: длительность отдельных фаз нагрева и скважность прямоугольных импульсов на каждом этапе. В процессе отработки температуру крышки чувствительного элемента, которую условно можно считать равной температуре запрессованного в нее газопоглотителя, контролировали с помощью бесконтактного пирометра. Результирующий температурный профиль с учетом поправки на поглощение излучения кварцевым стеклом представлен на рис. 6.

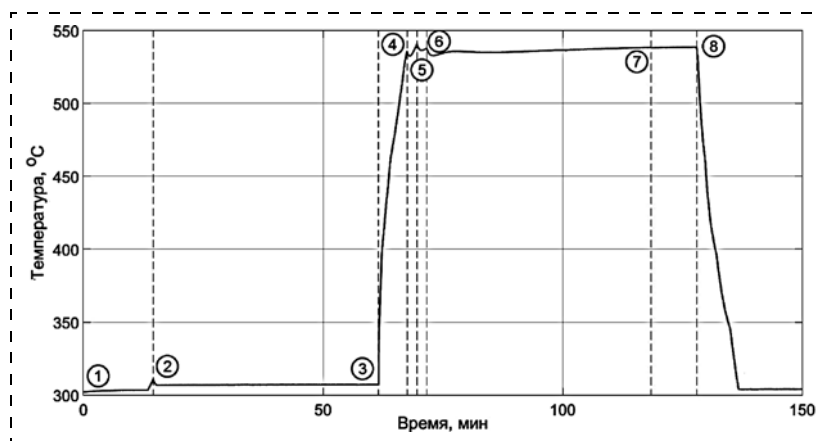


Рис. 6. Температурный профиль отжига и активации газопоглотителя

В табл. 1 представлена детальная информация о продолжительности каждой стадии процесса и параметрах режима нагрева. Обязательным требованием является выдержка оснастки в нормальных условиях в течение не менее 60 мин после герметизации корпуса чувствительного элемента. В случае сокращения продолжительности этой стадии при повторении процесса температурный профиль может быть нарушен за счет аккумуляции теплоты во внутреннем объеме оснастки. В ряде случаев это может привести к нежелательному перегреву герметизируемого чувствительного элемента.

Таблица 1
Основные параметры стадий процесса активации газопоглотителя и герметизации корпуса

Стадия	Продолжительность, мин	Коэффициент заполнения, %	Температура, °C
Прогрев	15	27	25...310
Обезгаживание	45	10	310
Нагрев	6	93	310...540
Стабилизация I	2	64	540...530
Стабилизация II	2	48	530...525
Активация	45	34	525...530
Герметизация (заваривание штенгельного отверстия)	10	34	530
Остывание	60	0	530...25

Таблица 2
Данные по добротности некоторых образцов чувствительных элементов МЭМС-гироскопов

Наличие газопоглотителя	Добротность МЭМС-гироскопов			
	До герметизации (при постоянной откачке)	Непосредственно после герметизации	Через 1 день	Через 6 месяцев
+	76 167	148 964	142 987	142 657
+	88 680	116 419	125 045	104 745
—	72 331	4164	2245	—
—	63 815	3997	1772	—

Также следует отметить, что с течением времени нить накаливания галогеновых ламп склонна к деградации, что приводит к изменению ее сопротивления. Подобранный режим обеспечивает требуемый температурный профиль в случае использования галогеновых ламп с сопротивлением 4,2...4,5 Ом. Отклонение от данного диапазона сопротивлений на 5...7 % приводит к смещению температурного профиля по оси ординат в среднем на 10 °C. Во время эксплуатации оснастки необходимо периодически

контролировать состояние галогеновых ламп, поскольку их деградация может приводить к недостаточному прогреву чувствительного элемента и, как следствие, неполной активации газопоглотителя.

Заключение

Предложен и апробирован способ вакуумной герметизации ЧЭ МЭМС на основе миниатюрного дискретного металлокерамического корпуса 5142.48-А. Разработана конструкция вакуумной камеры, позволяющая одновременно герметизировать до четырех МЭМС-устройств. Реализован вариант высокотемпературной активации газопоглотителей за счет использования стандартных галогеновых ламп. Для управления мощностью ламп разработан и изготовлен специальный модуль на базе программируемого микроконтроллера, обеспечивающий изменение степени накала галогеновых ламп в автоматическом режиме по предварительно заданному профилю. Изготовленный модуль протестирован в составе системы вакуумной герметизации и подтвердил свою работоспособность. Проведены эксперименты по определению необходимого температурного профиля активации газопоглотителя. Показана возможность работы системы вакуумной герметизации в требуемом температурном диапазоне.

Стабильность уровня вакуума во внутрикорпусном объеме предварительно подтверждена измерениями добротности в ходе тестирования герметизированных МЭМС-гироскопов. Данные по добротности некоторых образцов чувствительных элементов МЭМС приведены в табл. 2.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанная технология герметизации может быть использована в производстве

чувствительных элементов МЭМС в вакуумном исполнении. В то же время окончательные выводы по эффективности применения указанных в работе газопоглотителей можно будет сделать только после проведения исследований сохранения требуемого уровня вакуума на протяжении всего срока эксплуатации изделия (10 лет и более).

Список литературы

1. **Acar C., Shkel A.** MEMS Vibratory Gyroscopes. Structural Approaches to Improve Robustness. Irvine, University of California: Springer-Science, 2009. 256 с.
2. **Кольцевые** газопоглотители // Официальный сайт АО НИИ "Полус" им. М. Ф. Стельмаха. URL: <http://niipolyus.ru/products-and-services/laser-gyros/960260> (дата обращения: 17.02.2021).

V. I. Laukart, Head of Department, kb2@vniitf.ru, **O. A. Filin**, Chief of Group, **S. V. Kuznetsov**, Design Engineer, **M. S. Stepychev**, Research Engineer
All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, 456770

Corresponding author:

V. I. Laukart, Head of Department, All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, 456770, Russian Federation, e-mail: kb2@vniitf.ru

Die-Level Vacuum Packaging of Mems Devices with Non-Evaporating Getters

Received on June 21, 2021

Accepted on July 05, 2021

In this article original method of vacuum packaging in ceramic package 5142.48-A with non-evaporating getter inside is described.

Some MEMS devices such as gyroscopes, accelerometers and resonators often require high and stable vacuum for operational capability. It is known two main approaches to the vacuum packaging of MEMS devices: hermetization on the wafer level and on the die level. Die-level vacuum packaging can be implemented by sealing the die in ceramic package providing excellent hermeticity with sufficiently low leak rate. However, because of outgassing from materials of the package it is difficult to achieve stable vacuum over all MEMS device lifetime. To prevent vacuum degradation it is necessary to use special materials that can remove active gases from the package by chemical sorption named getters. In this work tablet-shaped non-evaporating getter with thickness of 0.7 mm made of titan-vanadium alloy with activation temperature near 525 °C was used.

For the vacuum packaging workflow new special vacuum chamber is designed. It may contain four MEMS devices simultaneously. During the process of getter activation heating was provided by halogen lamps G12 35 W placed over the caps of the ceramic packages with a little gap. It is defined that in deep vacuum full power of one lamp can heat the cap of the package to the temperature more than 600 °C. Probable overheating is excluded by means of the newly-designed programmable device — power switch, which can maintain required temperature in automatic mode for the necessary time. Temperature control is realized by no-contact pyrometrical method. During the experiment all necessary parameters providing specified temperature profile of the process were determined.

Efficiency of the developed vacuum packaging workflow is successfully confirmed by the high and stable Q-factor of fabricated MEMS gyroscopes.

Keywords: MEMS, vacuum, hermetic sealing, stem, getter, activation, annealing, halogen lamp, vacuum camera, die level, ceramic package

For citation:

Laukart V. I., Filin O. A., Kuznetsov S. V., Stepychev M. S. Die-Level Vacuum Packaging of Mems Devices with Non-Evaporating Getters, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 5, pp. 238—242.

DOI: 10.17587/nmst.23.238-242

References

1. **Acar C., Shkel A.** MEMS Vibratory Gyroscopes. Structural Approaches to Improve Robustness. Irvine, University of California, Springer-Science, 2009. 256 p.

2. **Ring** Getters. Research Institute "Polyus" Official Website. URL: <http://niipolyus.ru/products-and-services/laser-gyros/960260> (access date: 17.02.2021).

Д. Г. Мустафаева, канд. техн. наук, доц., dzhamilya79@yandex.ru,
ФГБОУ ВО "Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет)", г. Владикавказ

УЛУЧШЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА И ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Поступила в редакцию 11.05.2021

Область практического применения термоэлектрических материалов зависит от значения термоэлектрической добротности. Использование полупроводниковых материалов позволяет реализовать условия, при которых соотношения их параметров обеспечивает достижение высоких значений термоэлектрической добротности. Достижение максимума термоэлектрической добротности обуславливает повышение эффективности процессов преобразования за счет совершенствования термоэлектрических свойств материала. Положение максимального значения термоэлектрической эффективности предопределяется параметрами рассеяния и соотношением подвижностей и эффективных масс носителей заряда.

Ключевые слова: преобразование, процесс, эффективность, свойство, концентрация, примесь, дефект, заряд

Введение

Эффективность процессов преобразования тепловой энергии в электрическую существенно зависит от качества материала и определяется термоэлектрической добротностью. Основным способом увеличения эффективности термоэлектрических устройств является разработка новых или усовершенствование термоэлектрических свойств существующих термоэлектрических материалов. В последние годы ведутся значительные исследования в области термоэлектрических материалов и устройств на их основе [1–15].

Термоэлектрические свойства материала и повышение эффективности процессов преобразования

Область практического применения термоэлектрических материалов зависит от значения термоэлектрической добротности. Использование полупроводниковых материалов позволяет реализовать условия, при которых соотношение их параметров обеспечивает достижение высоких значений термоэлектрической добротности. Достижение максимума термоэлектрической добротности обуславливает повышение эффективности процессов преобразования за счет улучшения термоэлектрических свойств материала, т. е. электропроводности, коэффициентов термоЭДС и теплопроводности.

Термоэлектрическая добротность Z полностью определяется физическими свойствами материала $Z = \alpha^2 \sigma / k$, где α — коэффициент термоЭДС, В/К; σ — электропроводность, $1/(\text{Ом} \cdot \text{м})$; k — коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К).

Вместо термоэлектрической добротности используется безразмерный параметр (или эффективность): $ZT = \alpha^2 \sigma T / k$, где T — температура, К.

В полупроводнике неизменно присутствуют два типа носителей заряда. Для легированных полупроводников концентрация основных носителей заряда неизменно в основном больше концентрации неосновных носителей заряда, и электропроводность может быть описана соотношением $\sigma = en\mu$, где e — заряд электрона; n — концентрация основных носителей заряда; μ — подвижность.

Если в полупроводнике присутствуют два типа носителей заряда, концентрация которых не имеет значительного отличия, то электропроводность находится как сумма составляющих электронной σ_e и дырочной σ_p : $\sigma = \sigma_e + \sigma_p$.

В полупроводниковых материалах концентрация и подвижность носителей заряда зависят от температуры, а степень подвижности обуславливается характером рассеяния на дефектах кристаллической решетки, вызванных присутствием примесей, тепловыми колебаниями кристаллической решетки. Увеличение рассеяния на фонах обуславливает уменьшение длины свободного пробега носителей заряда. Характер из-

менения электропроводности определяется поведением концентрации носителей заряда.

ТермоЭДС обуславливается зависимостью концентрации носителей заряда от температуры и подвижности носителей заряда от энергии. Высокие значения термоЭДС имеют место в сплавах.

Эффективность преобразования ограничивается появлением носителей заряда противоположного знака при переходе полупроводника в область смешанной и собственной проводимости. В этом случае коэффициент термоЭДС уменьшается, а коэффициент теплопроводности возрастает.

В полупроводниковых материалах имеют место два механизма переноса теплоты и коэффициент теплопроводности содержит следующие составляющие: фононную, обусловленную переносом теплоты за счет тепловых колебаний атомов кристаллической решетки, и электронную (дырочную), обусловленную переносом теплоты свободными носителями. Полная теплопроводность представляет собой сумму этих вкладов и может быть записана как $k = k_{эл} + k_{фон}$.

При фононной теплопроводности тепловые колебания атома передаются соседнему в виде упругих волн, которые отличаются направлением распространения и длиной. Концентрация фононов растет прямо пропорционально температуре. Коэффициент теплопроводности определяется длиной свободного пробега фононов, которая обратно пропорциональна их концентрации. Фононная теплопроводность обратно пропорциональна температуре $k_{фон} \sim 1/T$. Теплопроводность, как и электропроводность, пропорциональна концентрации электронов и длине свободного пробега.

В полупроводниках с одним типом носителей заряда связь электропроводности и электронной теплопроводности описывается законом Видемана-Франца $k_{эл}/\sigma = LT$, где L — число (постоянная) Лоренца, B^2/K^2 . Для вырожденной статистики электронов она имеет значение $L = \pi^2/3(k_{эл}/e)^2$, а для невырожденной $L = 2(k_{эл}/e)^2$.

Температурная зависимость электронной теплопроводности определяется температурной зависимостью длины свободного пробега. Положение максимального значения термоэлектрической эффективности предопределяется параметрами рассеяния и соотношением подвижностей и эффективных масс носителей заряда.

Повышение термоэлектрической эффективности достигается разработкой многокомпонентных соединений, а также оптимизацией параметров известных и применяемых соединений и сплавов. Оптимизацию термоэлектрических параметров можно проводить путем легирования и совершенствования свойств соединений, что обуславливает оптимизацию концентрации носителей заряда и ширины запрещенной зоны, изменение плотности состояний, снижение фононной составляющей теплопроводности.

Снижение фононной составляющей теплопроводности достигается также созданием твердых растворов, путем введения заряженных и нейтральных примесей. В первом случае имеет место увеличение фактора рассеяния при введении ионов примеси, а во втором случае увеличивается отношение подвижности к решеточной составляющей теплопроводности. Уменьшение коэффициента теплопроводности происходит и при введении ионизированных примесей.

Наибольшее значение термоэлектрической добротности имеет место при оптимальной концентрации носителей заряда. В этих условиях доля теплопроводности электронного газа по отношению к теплопроводности кристаллической решетки невелика. При этом электронная теплопроводность материала не играет заметной роли в переносе теплоты.

Оптимизация термоэлектрических свойств материалов осуществляется также на основе наноструктурирования, создания различных типов наноструктур, таких как квантовые точки, нитевидные кристаллы, сверхрешетки, объемные нанокomпозиты [16—23]. Улучшение термоэлектрической добротности обеспечивается изменением плотности состояний в низкоразмерных системах и снижением фононной составляющей теплопроводности.

Основные параметры термоэлектрического материала — электропроводность, коэффициент термоЭДС, коэффициент теплопроводности не пропорционально зависят от концентрации носителей заряда. В результате достижение максимума термоэлектрической добротности обеспечивается при определенной концентрации носителей заряда, которая соответствует оптимальному значению.

Заключение

Основные параметры термоэлектрического материала непропорционально зависят от кон-

центрации носителей заряда. Совершенствование термоэлектрических свойств материала возможно путем легирования и совершенствования свойств, что обуславливает оптимизацию концентрации носителей заряда, изменение плотности состояний, снижение фононной составляющей теплопроводности. Положение наибольшего значения термоэлектрической эффективности предопределяется параметрами рассеяния и соотношением подвижностей и эффективных масс носителей заряда. Достижение максимума термоэлектрической добротности обуславливает повышение эффективности процессов преобразования за счет улучшения термоэлектрических свойств материала.

Список литературы

1. Zhang X., Zhao L.-D. Thermoelectric materials: Energy conversion between heat and electricity // *Journal of Materials*. 2015. Vol. 1. P. 92–105.
2. Zheng J.-C. Recent advances on thermoelectric materials // *Front. Phys. China*. 2008. Vol. 3, N. 5. P. 269–279.
3. Govardhan N., Dilip K. B., Meda K. K. State of the Art Review on Thermoelectric Materials // *Int. J. Sci. Res.* 2016. Vol. 5, N. 10. P. 1833–1844.
4. Chen J., Li K., Liu C., Li M., Lv Y., Jia L., Jiang S. Enhanced efficiency of thermoelectric generator by optimizing mechanical and electrical structures // *Energies*. 2017. Vol. 10. P. 1329–1–1329–15.
5. Richner P., Gaspar P. G., Goncalves L. C., Almeida D. Experimental results analysis of the energy conversion efficiency of thermoelectric generators // *The Renewable Energy & Power Quality J.* 2011. Vol. 1, N. 9. P. 278–282.
6. Twaha S., Zhu J., Yan Y., Li B. A comprehensive review of thermoelectric technology: materials, applications, modelling and performance improvement // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2016. Vol. 65. P. 698–726.
7. Sharma A., Lee J. H., Kim K. H., Jung J. P. Recent Advances in Thermoelectric Power Generation Technology // *J. Microelectron. Packag. Soc.* 2017. Vol. 24, N. 1. P. 9–16.
8. Patidar S. Applications of thermoelectric energy: a review // *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.* 2018. Vol. 6, N. 5. P. 1992–1996.
9. Champier D. Thermoelectric generators: a review of applications // *Energy Convers. Manage.* 2017. Vol. 140. P. 167–181.

10. Petsagkourakis I., Tybrandt K., Crispin X., Ohkubo I., Satoh N., Mori T. Thermoelectric materials and applications for energy harvesting power generation // *Sci. Technol. Adv. Mater.* 2018. Vol. 19, N. 1. P. 836–862.
11. Riffat S., Ma X. Thermoelectrics: a review of present and potential applications // *Appl. Therm. Eng.* 2003. Vol. 23, N. 8. P. 913–935.
12. Solbrekken G. L., Yazawa K., Bar-Cohen A. Thermal management of portable electronic equipment using thermoelectric energy conversion // *Conference proceeding, 9th Intersociety Conference on Thermal and thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*. 2004. Vol. 1. P. 276–283.
13. Liu W., Hu J., Zhang S., Deng M., Han C.-G., Liu Y. New trends, strategies and opportunities in thermoelectric materials: A perspective // *Materials Today Physics*. 2017. Vol. 1. P. 50–60.
14. Snyder G. J., Toberer E. S. Complex thermoelectric materials // *Nat. Mater.* 2008. Vol. 7. P. 105–114.
15. Sofo J. O., Mahan G. D. Optimum band gap of a thermoelectric material. *Phys. Rev. B*. 1994. Vol. 49, N. 7. P. 4565–4570.
16. Usenko A. A., Moskovskikh D. O., Gorshenkov M. V., Korotitskiy A. V., Kaloshkin S. D., Voronin A. I., Khovaylo V. V. Optimization of ball-milling process for preparation of Si-Ge nanostructured thermoelectric materials with a high figure of merit // *Scr. Mater.* 2015. Vol. 96. P. 9–12.
17. Usenko A. A., Moskovskikh D. O., Gorshenkov M. V., Voronin A. I., Stepashkin A., Kaloshkin S. D., Arkhipov D., Khovaylo V. V. Enhanced thermoelectric figure of merit of p-type $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$ nanostructured spark plasma sintered alloys with embedded SiO_2 nanoinclusions // *Scr. Mater.* 2017. Vol. 127. P. 63–67.
18. Usenko A. A., Moskovskikh D. O., Korotitskiy A. V., Khovaylo V. V. Thermoelectric properties of n-type $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$ – FeSi_2 multiphase nanostructures // *J. Electron. Mater.* 2016. Vol. 45, N. 7, doi: 10.1007/s11664-016-4487-4.
19. Vineis C. J., Shakouri A., Majumdar A., Kanatzidis M. G. Nanostructured thermoelectrics: big efficiency gains from small features // *Adv. Mater.* 2010. Vol. 22. P. 3970–3980.
20. Pichanusakorn P., Bandaru P. Nanostructured thermoelectric // *Mater. Sci. & Eng. R.* 2010. Vol. 67. P. 19–63.
21. Lim P. N., Maleksaeedi S., Xie H., Yu P. C., Tay B. Y. Synthesis and processing of nanostructured thermoelectric materials // *SIMTech Technical Reports*. 2011. Vol. 12, N. 3. P. 98–104.
22. Minnich A. J., Dresselhaus M. S., Ren Z. F., Chen G. Bulk nanostructured thermoelectric materials: current research and future prospects // *Ener. & Environ. Sci.* 2009. Vol. 2. P. 466–479.
23. Liu W., Yan X., Chen G., Ren Z. Recent advances in thermoelectric nanocomposites // *Nano Energy*. 2012. Vol. 1. P. 42–56.

D. G. Mustafaeva, Associate Professor, dzhamilya79@yandex.ru,
North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz,
362021, Russian Federation

Corresponding author:

Mustafaeva Dzamilya G., Associate Professor, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, 362021, Russian Federation
E-mail: dzhamilya79@yandex.ru

Improving the Thermoelectric Properties of the Material and Increasing the Efficiency of Conversion Processes

The area of practical application of thermoelectric materials depends on the value of the thermoelectric figure of merit. The use of semiconductor materials makes it possible to realize the conditions under which the ratio of their parameters ensures the achievement of high values of thermoelectric figure of merit. The achievement of the maximum thermoelectric figure of merit causes an increase in the efficiency of conversion processes due to the improvement of the thermoelectric properties of the material. The position of the maximum value of the thermoelectric figure of merit is predetermined by the scattering parameters and the ratio of the mobilities and effective masses of charge carriers. The nature of the change in electrical conductivity is determined by the behavior of the concentration of charge carriers. Thermal conductivity, like electrical conductivity, is proportional to the concentration of electrons and the mean free path. An increase in thermoelectric efficiency is achieved by optimizing thermoelectric parameters by doping and improving the properties of compounds, which leads to an optimization of the concentration of charge carriers, a change in the density of states, and a decrease in the phonon component of thermal conductivity. The improvement of the thermoelectric properties of the material and the increase in the efficiency of the conversion processes are provided at a certain concentration of charge carriers, which corresponds to the optimal value.

Keywords: transformation, process, efficiency, property, concentration, impurity, defect, charge, material, parameter

For citation:

Mustafaeva D. G. Improving the Thermoelectric Properties of the Material and Increasing the Efficiency of Conversion Processes, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 5, pp. 243–246.

DOI: 10.17587/nmst.23.243-246

References

1. Zhang X., Zhao L.-D. Thermoelectric materials: Energy conversion between heat and electricity, *Journal of Materiomics*, 2015, vol. 1, pp. 92–105.
2. Zheng J.-C. Recent advances on thermoelectric materials, *Front. Phys. China*, 2008, vol. 3, no. 5, pp. 269–279.
3. Govardhan N., Dilip K. B., Meda K. K. State of the Art Review on Thermoelectric Materials, *Int. J. Sci. Res.*, 2016, vol. 5, no. 10, pp. 1833–1844.
4. Chen J., Li K., Liu C., Li M., Lv Y., Jia L., Jiang S. Enhanced efficiency of thermoelectric generator by optimizing mechanical and electrical structures, *Energies*, 2017, vol. 10, pp. 1329–1–1329–15.
5. Richner P., Gaspar P. G., Goncalves L. C., Almeida D. Experimental results analysis of the energy conversion efficiency of thermoelectric generators, *The Renewable Energy & Power Quality J.*, 2011, vol. 1, no. 9, pp. 278–282.
6. Twaha S., Zhu J., Yan Y., Li B. A comprehensive review of thermoelectric technology: materials, applications, modelling and performance improvement, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 2016, vol. 65, pp. 698–726.
7. Sharma A., Lee J. H., Kim K. H., Jung J. P. Recent Advances in Thermoelectric Power Generation Technology, *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 2017, vol. 24, no. 1, pp. 9–16.
8. Patidar S. Applications of thermoelectric energy: a review, *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, 2018, vol. 6, no. 5, pp. 1992–1996.
9. Champier D. Thermoelectric generators: a review of applications, *Energy Convers. Manage.*, 2017, vol. 140, pp. 167–181.
10. Petsagkourakis I., Tybrandt K., Crispin X., Ohkubo I., Satoh N., Mori T. Thermoelectric materials and applications for energy harvesting power generation, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 2018, vol. 19, no. 1, pp. 836–862.
11. Riffat S., Ma X. Thermoelectrics: a review of present and potential applications, *Appl. Therm. Eng.*, 2003, vol. 23, no. 8, pp. 913–935.
12. Solbrekken G. L., Yazawa K., Bar-Cohen A. Thermal management of portable electronic equipment using thermoelectric energy conversion, *Conference proceeding, 9th Intersociety Conference on Thermal and thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, 2004, vol. 1, pp. 276–283.
13. Liu W., Hu J., Zhang S., Deng M., Han C.-G., Liu Y. New trends, strategies and opportunities in thermoelectric materials: A perspective, *Materials Today Physics*, 2017, vol. 1, pp. 50–60.
14. Snyder G. J., Toberer E. S. Complex thermoelectric materials, *Nat. Mater.*, 2008, vol. 7, pp. 105–114.
15. Sofo J. O., Mahan G. D. Optimum band gap of a thermoelectric material, *Phys. Rev. B.*, 1994, vol. 49, no. 7, pp. 4565–4570.
16. Usenko A. A., Moskovskikh D. O., Gorshenkov M. V., Korotitskiy A. V., Kaloshkin S. D., Voronin A. I., Khovaylo V. V. Optimization of ball-milling process for preparation of Si-Ge nanostructured thermoelectric materials with a high figure of merit, *Scr. Mater.*, 2015, vol. 96, pp. 9–12.
17. Usenko A. A., Moskovskikh D. O., Gorshenkov M. V., Voronin A. I., Stepashkin A., Kaloshkin S. D., Arkhipov D., Khovaylo V. V. Enhanced thermoelectric figure of merit of p-type Si_{0.8}Ge_{0.2} nanostructured spark plasma sintered alloys with embedded SiO₂ nanoinclusions, *Scr. Mater.*, 2017, vol. 127, pp. 63–67.
18. Usenko A. A., Moskovskikh D. O., Korotitskiy A. V., Khovaylo V. V. Thermoelectric properties of n-type Si_{0.8}Ge_{0.2}–FeSi₂ multiphase nanostructures, *J. Electron. Mater.*, 2016, vol. 45, no. 7, doi: 10.1007/s11664-016-4487-4.
19. Vineis C. J., Shakouri A., Majumdar A., Kanatzidis M. G. Nanostructured thermoelectrics: big efficiency gains from small features, *Adv. Mater.*, 2010, vol. 22, pp. 3970–3980.
20. Pichanusakorn P., Bandaru P. Nanostructured thermoelectric, *Mater. Sci. & Eng. R.*, 2010, vol. 67, pp. 19–63.
21. Lim P. N., Maleksaeedi S., Xie H., Yu P. C., Tay B. Y. Synthesis and processing of nanostructured thermoelectric materials, *SIMTech Technical Reports*, 2011, vol. 12, no. 3, pp. 98–104.
22. Minnich A. J., Dresselhaus M. S., Ren Z. F., Chen G. Bulk nanostructured thermoelectric materials: current research and future prospects, *Ener. & Environ. Sci.*, 2009, vol. 2, pp. 466–479.
23. Liu W., Yan X., Chen G., Ren Z. Recent advances in thermoelectric nanocomposites, *Nano Energy*, 2012, vol. 1, pp. 42–56.

И. Л. Борисенков¹, канд. техн. наук, зам. председателя, **К. Е. Воронов**², канд. техн. наук, доц.,
Г. И. Леонович¹, д-р техн. наук, нач. отделения, **М. П. Калаев**², канд. техн. наук, доц.,
А. М. Телегин², канд. физ.-мат. наук, доцент

¹ Секция прикладных проблем при Президиуме РАН, г. Москва, e-mail: leogi1@mail.ru

² Самарский национальный исследовательский университет, г. Самара, e-mail: talex85@mail.ru

СЕНСОРНАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ ВНУТРИВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК И ИНТЕРРОГАТОРА СО СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ

Поступила в редакцию 15.04.2021

Предложены принцип построения и вариант программно-аппаратной реализации сенсорной системы на основе внутриволоконных брэгговских решеток (ВБР) на примере измерения температуры. Применение спектрально-временного разделения измерительных каналов, учитывающего особенности функционирования и размещения датчиков на основе ВБР, позволяет существенно снизить себестоимость, габаритные размеры, массу и энергопотребление интеррогатора, нивелировать характерные для серийных изделий сложности в настройке и периодической калибровке. Результаты испытаний системы показывают направления и перспективы использования разработанной аппаратуры в составе портативных и бортовых систем контроля и управления.

Ключевые слова: сенсорная система, внутриволоконные брэгговские решетки, интеррогатор, спектрально-временное разделение каналов

Введение

Волоконно-оптические сенсорные структуры — FOSS (*Fiber Optic Smartor Sensory Structures*) — сенсорные сети из датчиков на волоконных брэгговских решетках (ВБР), которые получают широкое распространение в энергетике, строительстве, изделиях аэрокосмической промышленности и др. FOSS-систему обслуживает единое устройство обработки сигналов и управления — интеррогатор, в состав которого входят источники и приемники оптического излучения, оптические и электронные устройства обработки информации и др. Недостатками известных интеррогаторов являются отсутствие гибкости при решении ряда специальных задач, высокая стоимость оборудования и проприе-

тарность программного обеспечения. Авторами предложен один из вариантов построения сенсорных систем на основе компактного недорогого интеррогатора.

Структура и принцип работы системы

В основу большинства датчиков на ВБР положена регулярная короткопериодная решетка, чувствительная к температуре T и непосредственным деформирующим воздействиям ε (рис. 1).

Такая ВБР представляет собой участок оптического волокна (ОВ) длиной $L_{BG} = 1,0 \dots 10,0$ мм, в котором эффективный показатель преломления основной моды n_{eff} промодулирован в продольном направлении с пространственным пе-

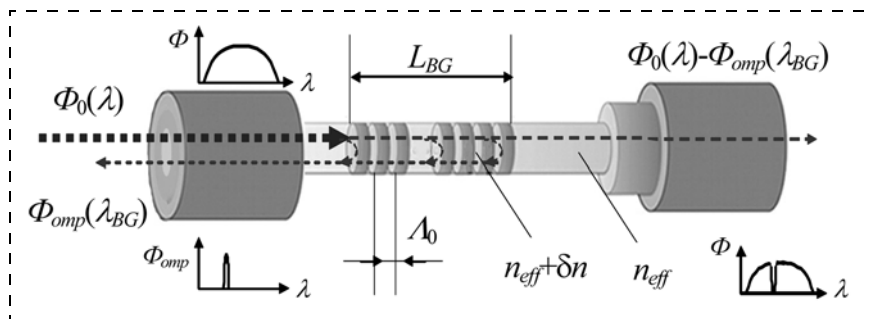


Рис. 1. Структура ВБР (с зачищенным сенсорным участком ОВ)

риодом $\Lambda_0 = 300...600$ нм и глубиной модуляции $\delta n \approx 10^{-4}$.

Связь между относительным изменением длины брэгговской волны ($\lambda_{BG} = 2n_{eff}\Lambda$), изменением температуры ΔT , осевой деформацией $\varepsilon = \Delta L_{BG}/L_{BG}$ и изменением показателя преломления определяется как [1]

$$\frac{\Delta\lambda_{BG}}{\lambda_{BG}} = \delta\lambda_{BG} = (1 - p_e)\varepsilon + (\alpha_\Lambda + \alpha_n)\Delta T, \quad (1)$$

где p_e — редуцированный деформационно-оптический коэффициент первого порядка; α_Λ — коэффициент температурного расширения ОВ; α_n — температурно-оптический коэффициент преломления.

В оптико-электронном блоке (интеррогаторе) осуществляется фотоэлектрическое преобразование и цифровая обработка отраженных от решеток оптических сигналов (рис. 2, см. третью сторону обложки). Современные интеррогаторы при приеме сигналов от группы до нескольких десятков датчиков на канал обеспечивают определение смещения спектра от каждой ВБР с точностью до долей нанометра, что составляет (0,1...0,5) % от диапазона изменения ΔL_{BG} .

Типичные значения сдвига центральной длины волны: по температуре $\Delta\lambda_{BG}(T) \approx 0,01$ нм/К; по деформации $\Delta\lambda_{BG}(\varepsilon) \approx 10^3\varepsilon$ нм. Структура и принцип действия датчиков на ВБР позволяют формировать из них высоконадежные резервированные сети со сложной топологией [1—3].

Способы и материалы для формирования и крепления сенсорно-актюаторной струк-

туры (САС) к ОВ и, при необходимости, САС к измеряемому объекту, также могут быть разными. Наибольшее распространение получили датчики с нанесенными пленочными покрытиями и применение твердотельных и пластичных САС как отдельных элементов, фиксируемых на ОВ посредством двухкомпонентных эпоксидных клеевых соединений.

Построенные на основе ВБР датчики могут содержать дополнительную САС, тем или иным образом сопряженную с сенсорным участком ОВ длиной $L_f \geq L_{BG}$. САС выполняют в форме пластины, тела сложной конфигурации или пленочного покрытия из материала со стрикционным или иным динамическим эффектом.

В целях повышения помехоустойчивости, связанной с обеспечением инвариантности к дрейфу спектральных характеристик ВБР при воздействии внешних дестабилизирующих факторов, можно применить спектрально-временное разделение каналов (рис. 3).

В такой сети каждому датчику посредством узкополосного фильтра и элемента задержки выделяются спектральная полоса и временные ворота, позволяющие исключить ошибки идентификации датчиков от смежных сигналов путем

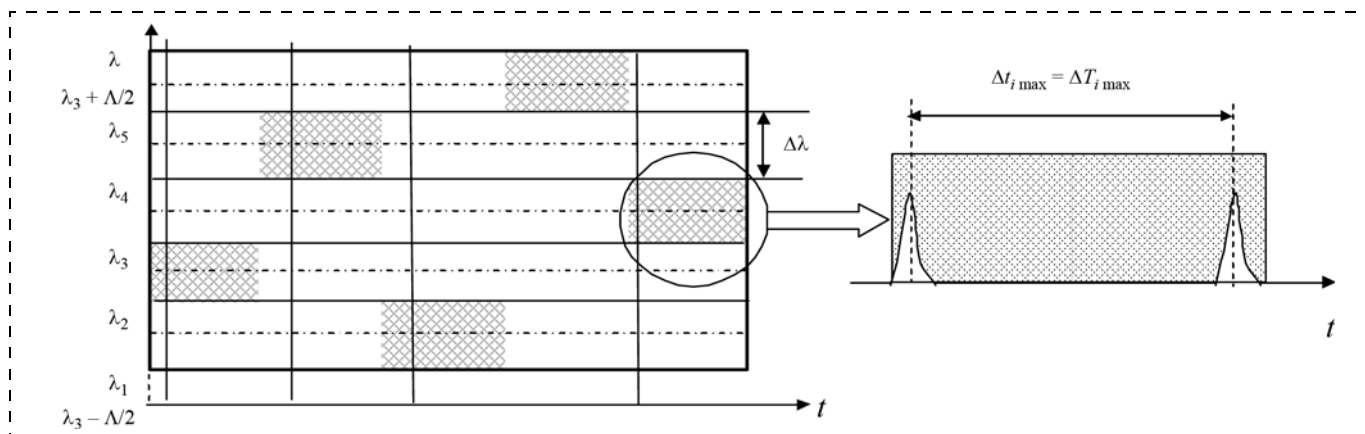


Рис. 3. Сеть со спектрально-временным разделением каналов и выводом излучения по одиночному ОВ

подбора алгоритма распределения спектрально-временных чипов. Учет дрейфа спектральных и временных параметров заключается также в сужении допусковых границ для каждого чипа (выделенные области). При выходе сигнала за указанный порог (цена младшего разряда) принимается решение о реализации корректирующего алгоритма или о недостоверности выходного сигнала конкретного сенсора. Посредством оптического демультиплексора, фотоприемного устройства, коммутатора, нормирующего усилителя и АЦП принятые оптические сигналы разделяются по спектру, преобразуются в каналные электрические сигналы, из которых формируются цифровые коды, пропорциональные фазовому вращению в соответствующих точках. Дальнейшая обработка кодов и формирование пакета данных осуществляются контроллером [4–6].

Структурная схема системы (рис. 4) включает в себя N выполненных на общем оптическом волокне ВБР-датчиков на расстоянии ≥ 2 м от интеррогатора и друг относительно друга, и занимают спектральную полосу 1520...1580 нм. Один ВБР-датчик в зависимости от диапазона измеряемой величины занимает полосу с разделительным интервалом в пределах 5...10 нм. Оптические сигналы, которые отражаются от датчиков, через циркуляторы попадают на следящие фильтры. Каждому датчику соответствует следящий фильтр, имеющий такую же, или смещенную на 0,1...0,5 нм центральную частоту. После фильтров оптический сигнал поступает на оптический приемник, выполненный на основе лавинного фотодиода, далее электрический сигнал усиливается и подается на вход АЦП. С помощью АЦП аналоговый сигнал оцифровывается и сохраняется в памяти FPGA, где проводится его дальнейшая обработка. В качестве циркулятора применен Box Opticaltech, 3 portC+Lband optical circulator, P.N: PIOC-3-15-1-1-1. Источником широкополосного излучения служит

суперлюминесцентный лазерный диод (SLED) марки BHSLD-1550-02SM-FA (Box Opticaltech, China) в корпусе Butterfly с волоконным выходом и встроенным термостатом на основе модуля Пельтье. Центральная длина волны равна 550 нм, ширина спектра по уровню 3 дБ составляет 35 нм, по уровню 13 дБ — 89 нм. Выходная мощность >2 мВт. Отраженные оптические импульсы принимает и преобразует в электрические сигналы лавинный фотодиод (APD) с волоконным входом BAPD-50P05X-FA. Быстродействие фотодиода составляет ~ 2 ГГц, рабочий диапазон частот 1000...1680 нм, чувствительность 10 А/Вт, коэффициент лавинного умножения ≥ 10 .

Для питания фотодиода устройство формирует напряжение в диапазоне 10...48 В с погрешностью $\leq 0,025$ В, что позволяет в широких пределах регулировать его коэффициент усиления для осуществления автоматической регулировки усиления (APУ), увеличения диапазона измере-

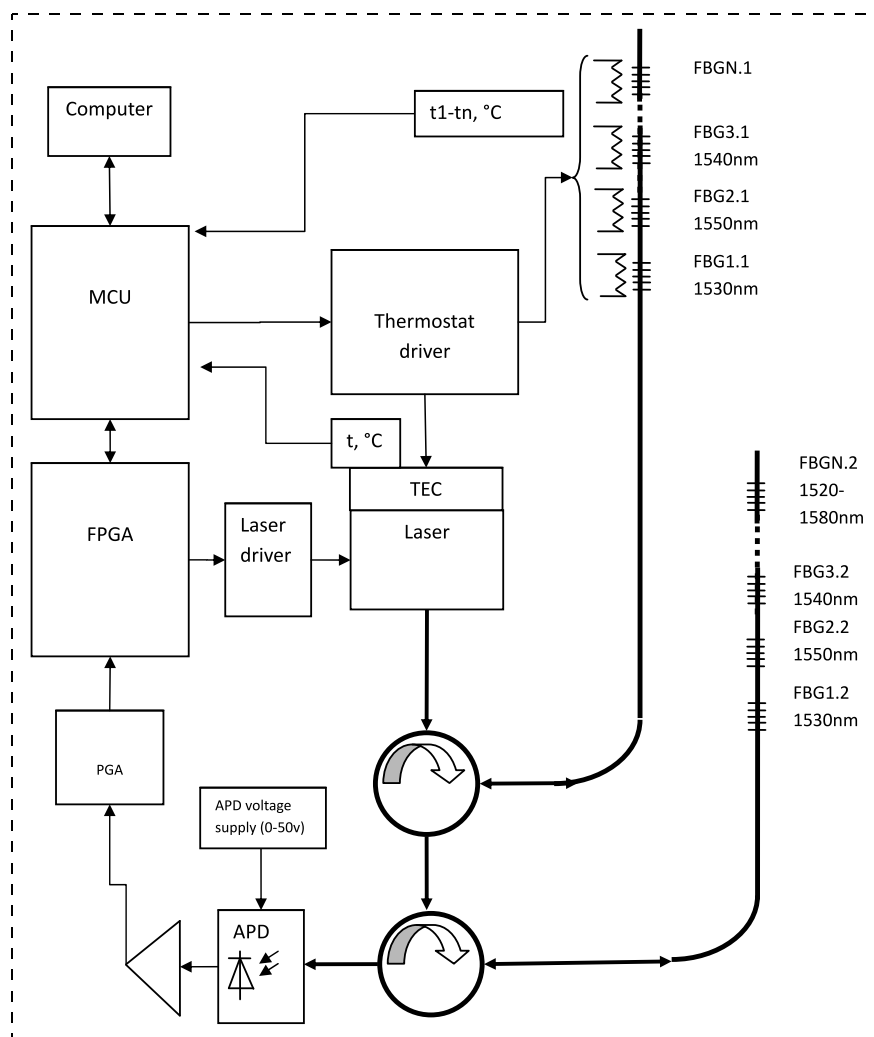


Рис. 4. Структурная схема интеррогатора

ний, а также компенсации температурного дрейфа параметров фотоприемника.

По команде микроконтроллера FPGA генерирует импульс фиксированной длины T_{in} , которая может быть задана в диапазоне 10...2500 нс с шагом 10 нс. С учетом быстродействия усилителей оптимальное значение T_{in} составляет 20 нс. Одновременно с этим начинается запись результатов измерения АЦП в ОЗУ FPGA. Скорость оцифровки — 100 МГц, разрядность — 8 бит. Запись останавливается при достижении заданной длительности 100 нс ... 100 мкс. Поскольку ВБР размещены на расстоянии 2 м ... 20 км друг от друга, фотоприемник регистрирует серию импульсов, соответствующих отражению от каждой ВБР. Далее FPGA около 50 мкс проводит обработку измеренного массива в целях поиска положения и амплитуды записанных импульсов. Во времени прихода каждого импульса содержится информация о номере датчика, а амплитуда каждого из импульсов зависит от отклонения центральных частот измерительной и опорной ВБР для каждого канала. Максимальное число каналов ограничено полосой пропускания системы, которая зависит от ширины спектра лазера LD1, диапазона измеряемых температур, спектральных характеристик использованных ВБР. Для расширения динамического диапазона в системе имеется программируемый усилитель PGA с диапазоном перестройки от -5 до +40 дБ. При спектральном диапазоне 1520...1580 нм и шаге канала 2 нм максимальное число каналов может достигать 30 В.

Максимальная длительность записи массива

$$t_R = \frac{1}{B} V_{RAM} t_{ADC}$$

где B — разрядность АЦП, в байтах; V_{RAM} — объем оперативной памяти, доступной для записи массива; t_{ADC} — время одного преобразования АЦП.

Таблица 1
Время задержки распространения сигнала в электронных и оптических элементах

Устройства	Задержка, нс
FPGA	5,0...7,0
Лазер	10,0...12,0
Фотоприемник	0,9...1,3
Усилитель 1	10,0...12,0
Усилитель 2	1,8...2,3
АЦП конвейерного типа	50,0...55,0
Суммарная задержка	77,7...89,6

Тогда максимальная длина l волокна составляет

$$l = \frac{1}{2} \frac{t_R c}{n},$$

где c — скорость света; $n = 1,46$ — показатель преломления световода.

Общая протяженность оптоволоконной линии ограничена затуханием и максимальной длительностью записи в ОЗУ FPGA. Применение FPGA ep4c55 с объемом ОЗУ 260 Кбайт позволяет провести запись пакета длительностью 2,6 мс, что соответствует длине волокна 293 км с учетом прохождения зондирующего импульса в прямом и обратном направлении. Поскольку в большинстве практических применений датчики распределены не равномерно по всей длине волокна, а объединены в группы, возможно сохранение в памяти только отдельных частей массива измерений, что позволяет полностью исключить ограничение на длительность записи. Кроме того, электронные компоненты системы имеют ограниченное быстродействие, т. е. при измерении времени прохождения оптического сигнала по оптоволоконному тракту возникает дополнительная задержка, которая является аддитивной величиной и может быть вычислена суммированием задержек включения всех элементов, входящих в цепи формирования и измерения сигнала (табл. 1).

Конструктивное исполнение

Конструктивно интеррогатор состоит из блока инициации, управления, формирования и оцифровки оптического сигнала (базового модуля интеррогатора), представленного на рис. 5 (см. третью сторону обложки), и подключенного к нему оптоволоконного кабеля с группой термостатов для смещения центральной частоты опорных ВБР (рис. 6).

Температурный датчик представляет собой открытый участок оптического волокна с короткопериодной ВБР, закрепленный в рамке (рис. 7).

Примеры функционирования системы при измерении температуры

Рассмотрим подробно работу системы в режиме измерения температуры одного из трех каналов. Характеристики опорной ВБР1 и измерительной ВБР2 для канала № 1 приведены в табл. 2. Для определения зависимости амплитуды

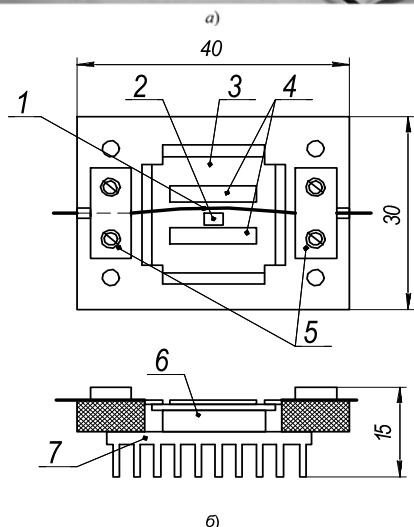
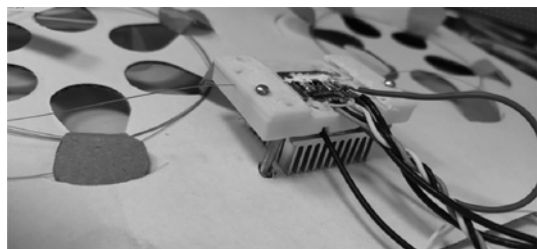


Рис. 6. Термостат для смещения центральной частоты опорной FBG:

a — общий вид; *б* — конструкция; 1 — оптоволокно с FBG; 2 — датчик температуры; 3 — печатная плата термостата; 4 — пленочные нагреватели; 5 — прижимы оптоволокон; 6 — элемент Пельтье; 7 — радиатор

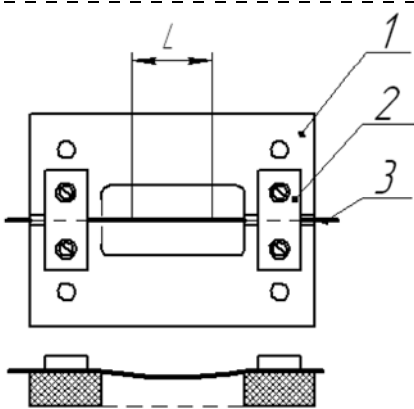


Рис. 7. Датчик температуры на основе FBG:

1 — рамка-держатель; 2 — зажимы волокна; 3 — оптоволокно с ВБР

ды сигнала на входе АЦП от разности температур опорной и измерительной ВБР2 был проведен эксперимент. ВБР1 была размещена на термостате 1, поддерживающем постоянную температуру 25 °С. ВБР2 расположена на термостате 2, регулирующем температуру от +10 до +80 °С. Зависимость уровня сигнала (цифровой код с выхода АЦП) от разности температур ВБР1 и ВБР2 приведена на рис. 8.

Как видно из рис. 8, максимальное значение сигнала на входе АЦП соответствует разности температур ВБР1 и ВБР2 17 °С. Это происходит по причине исходного расхождения длин волн основного пика ВБР1 и ВБР2 $\Delta f_{ВБР1,2} = 0,175$ нм (см. табл. 2).

Также можно сделать вывод, что на отдельных участках ($\Delta t = -5...5$ °С и $\Delta t = 35...45$ °С) возможна линейная аппроксимация функции (СКО менее 1 %). На этих участках наклон графика составляет приблизительно 5 разрядов на 1 °С. Таким образом, рассмотренная система имеет чувствительность к изменению температуры около 0,2 °С. При использовании АЦП с более высокой разрядностью (10—14 разрядов), а также реализации фильтрации результатов измерений, возможно повышение точности, однако в этом случае накладываются аналогичные требования на систему управления температурой опорной ВБР. В большинстве практических случаев регулировка температуры термостата с точностью выше 0,1 °С затруднена.

Возможны три режима алгоритма определения температуры измерительной ВБР.

1. Компараторный режим. Термостат поддерживает некоторую температуру для поддержания амплитуды сигнала, отраженного от измерительной ВБР, заданную цифровым компаратором. Порог компаратора целесообразно задавать на участке с максимальной крутизной характеристики выходного сигнала ВБР. Температура измерительной ВБР при этом определяется по формуле

$$T_{ВБР1} = f_{ВБР2} + \Delta T_{см} + \frac{\Delta f_{ВБР1,2}}{K_{ТР}},$$

Таблица 2

Характеристики опорной и измерительной ВБР в канале 1

№	Длина волны, при $t = 25$ °С, нм	Коэф. отражения, %	Ширина пика, нм	Подавления боковых пиков, дБ	Число слоев покрытия, акрилат	Окно, мм	Длина ВБР, мм
1	1539,920	67,64	0,34	12,7	1	9	3
2	1540,095	71,82	0,35	12,2	1	9	3

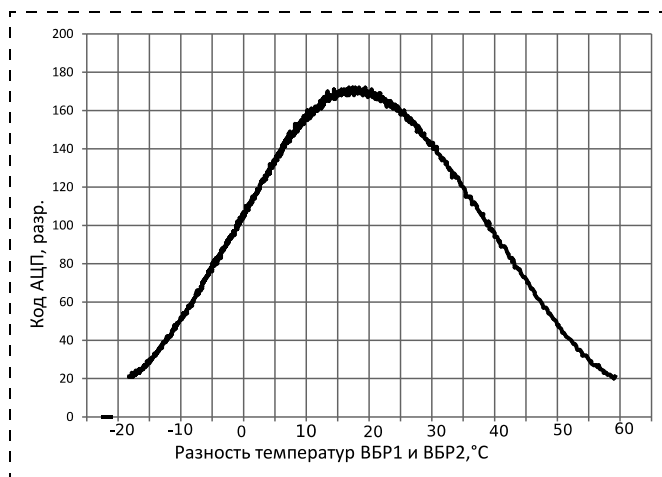


Рис. 8. Зависимость уровня сигнала от разности температур ВБР1 и ВБР2

где $T_{ВБР2}$ — текущая температура ВБР2 (опорной); $\Delta T_{см}$ — разность между значением температуры пика и температурой точки функции преобразования $K(\Delta T)$, выбранной в качестве порога цифрового компаратора; $K_{Тр}$ — коэффициент температурной чувствительности ВБР.

Диапазон измеряемых температур при компараторном алгоритме ограничен возможностями термостата. Термостат, разработанный для данной системы, способен поддерживать температуру опорной ВБР в диапазоне 0...125 °C (при температуре окружающей среды 25 °C). С учетом исходного спектрального смещения ВБР1 и ВБР2 на 0,175 нм этот диапазон смещается на -17 °C, а за счет выбора порогового значения амплитуды АЦП на спадающем склоне характеристики преобразования (см. рис. 8) диапазон дополнительно смещается на $\Delta T_{см} = -25$ °C (при выборе растущего склона $\Delta T_{см} = +25$ °C). Таким образом, итоговый диапазон температур, измеряемый с помощью ВБР, при указанных характеристиках входящих элементов, составляет (-42...+83 °C). При использовании ВБР1 и ВБР2 с другим начальным смещением диапазон измеряемых температур может быть смещен в любую сторону.

2. Режим определения температуры по нелинейной функции

преобразования. В этом случае температура опорной ВБР поддерживается на постоянном уровне, а температура измерительной ВБР определяется с помощью функции $K(\Delta t)$, хранящейся в памяти FPGA в табличном виде. Как видно из формы функции преобразования на рис. 8, точность определения температуры в этом случае будет зависеть от величины Δt , и на пологом участке вблизи максимума распределения она будет относительно невысокой.

3. Комбинированный режим (комбинация 1 и 2).

Система работает в компараторном режиме в некотором диапазоне температур (чаще всего в диапазоне, который может обеспечить термостат опорной ВБР). При достижении предельной температуры термостат продолжает поддерживать ее значение, а температура измерительной ВБР определяется с учетом функции преобразования.

Алгоритм программы FPGA представлен на рис. 9. Программа написана на языке Verilogc с использованием среды *Quartus Prime Lite Edition* v.20 для FPGA семейства Cyclone 4.

Для визуализации полученных данных была написана демонстрационная версия программы для компьютера на языке C# в VisualStudio. Ра-

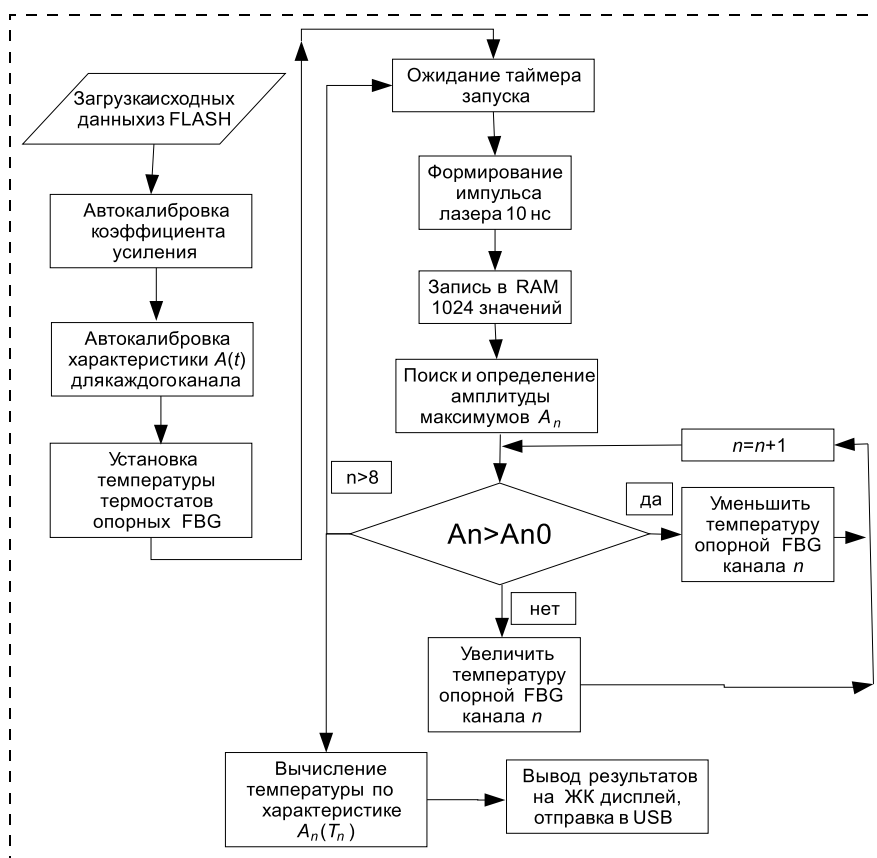


Рис. 9. Алгоритм программы измерения температуры

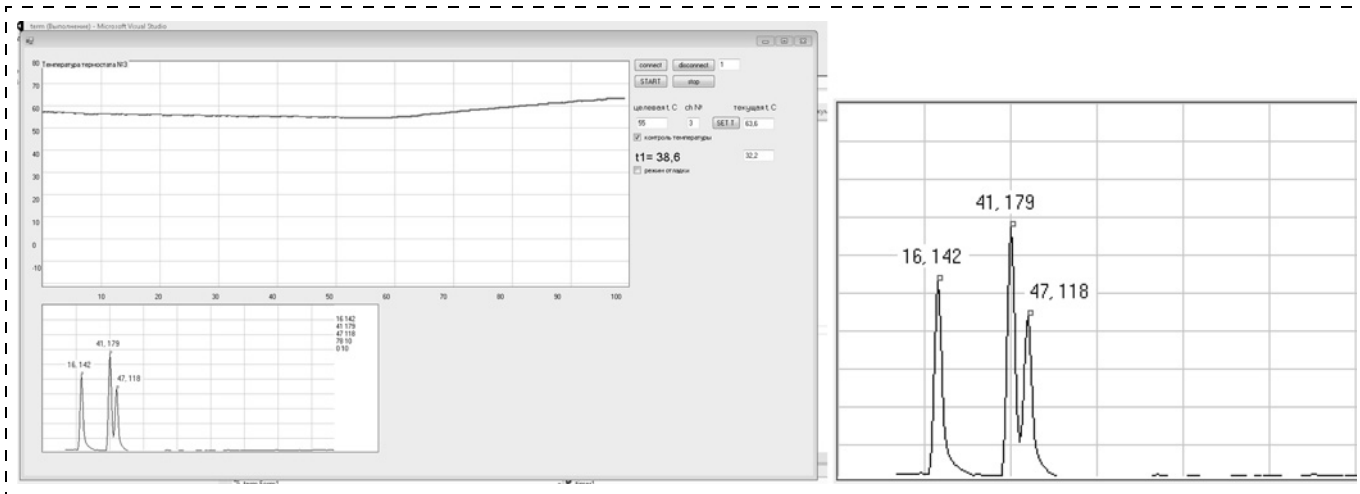


Рис. 10. Вид сигнала, полученного с помощью рабочего окна ПО

бочее окно программы приведено на рис. 10. Алгоритм FPGA позволяет обрабатывать до 30 пиков сигнала, выполнять усреднение и различные полезные импульсы на фоне шумов. Далее результаты в сжатом виде (от нескольких байт до нескольких десятков байт) передаются в микроконтроллер и затем, при необходимости, в ПК. Реализация основной обработки в FPGA позволяет максимизировать быстродействие системы и снять ограничения, связанные с передачей больших массивов измерений в ПК через относительно медленные интерфейсы. При этом возможность просмотра полной записи сигнала на экране ПК сохранена, как показано на рис. 10.

Данные FPGA накладываются на осциллограмму в виде точек с указанием координат (первая цифра — время от начала записи в десятках наносекунд, вторая цифра — амплитуда пика). Испытания показали, что импульсы от двух соседних ВБР, разделенных только собственными концами (по 1,5 м с каждой стороны), фиксируются раздельно.

Заключение

Разработаны принцип построения и алгоритм функционирования, выполнена техническая реализация и проведены экспериментальные исследования сенсорной системы на основе интеррогатора и группы подключенных к нему ВБР-датчиков. Размеры и масса базового модуля интеррогатора составляют соответственно $120 \times 100 \times 16$ мм и 200 г; размеры и масса термостата на четыре канала — $80 \times 90 \times 60$ мм и 300 г. Принципиальной особенностью структуры и алгоритма функционирования системы яв-

ляется спектрально-временное разделение измерительных каналов, ориентированное на назначение и топологию сенсорной сети. Технически реализованный вариант системы на основе ВБР-датчиков температуры позволяет обслуживать до 30 датчиков на один волоконный канал в спектральном диапазоне 1520...1580 нм, размещенных на расстоянии 2,0...10 000 м друг относительно друга при протяженности сенсорной сети до 20 км. Относительная погрешность измерения амплитуды оптических сигналов $\leq 1\%$. Скорость опроса при длине измерительного участка волокна $L_{\text{изм}} = 100$ м составляет до 10 000 кадров в секунду. Характеристики и доступность компонентов разработанной системы показывают возможность ее применения в компактных пассивных системах дистанционного контроля, а также в составе АСКУ широкого спектра автономных мобильных платформ.

Список литературы

1. Леонович Г. И., Олешкевич С. В. Гибридные датчики на волоконно-оптических брэгговских решетках // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18, № 4 (7). С. 1340—1345.
2. Борисенков И. Л., Федечев А. Ф., Леонович Г. И., Куприянов С. В., Крутов А. А., Захаров В. Н. Математическая модель неравномерной микромеханической деформации участка оптического волокна при осесимметричном нагружении // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21, № 6. С. 331—336.
3. Kuo Li. Review of the Strain Modulation Methods Used in Fiber Bragg Grating Sensors // Hindawi Publishing Corporation Journal of Sensors Volume. 2016. Article ID 1284520. 8 p. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/1284520>.
4. Леонович Г. И., Данилин А. И., Куприянов С. В., Воронов К. Е., Телегин А. М., Захаров В. Н. Низкочастотные радиоантенны и антенные системы на основе внутриволоконных брэгговских решеток, сопряженных с магнито-

электрическими структурами // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: материалы Всероссийской научно-технической конференции (г. Самара 21—23 апреля 2020 г.) / Под ред. А. И. Данилина; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева. Самара: Вектор, 2020. С. 9—11.

5. Kalaev M. P., Telegin A. M., Voronov K. E. et al. Investigation of optical glass characteristics under the influence of space factors // *Computer Optics*. 2019. Vol. 43, is. 5. P. 803—809.

6. Othonos A. Fiber Bragg gratings // *Rev. Sci. Instrum.* 1997, vol. 68, N. 12. P. 4309—4341.

I. L. Borisenkov¹, Ph. D., Deputy Chairman, **K. E. Voronov**², Ph. D., Associate Professor, **G. I. Leonovich**¹, D. Sc., Department Head, **M. P. Kalayev**², Ph. D., Associate Professor, **A. M. Telegin**², Ph. D., Associate Professor

¹ Section of Applied Problems at the Presidium of the Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: leogil@mail.ru

² Samara National Research University, Samara, e-mail: talex85@mail.ru

Corresponding author:

Telegin Aleksey M., Ph. D., Associate Professor, Samara National Research University, Samara, e-mail: talex85@mail.ru

Sensor System based on in-fiber Bragg Grats and Interrogator with Spectral Time Channel Separation

Received on April 15, 2021

Accepted on May 12, 2021

The principle of construction and a variant of the software and hardware implementation of the sensor system based on intra-fiber Bragg gratings (FBG) by the example of temperature measurement are proposed. The use of spectral-time separation of measuring channels, which takes into account the features of the functioning and placement of sensors based on FBGs, can significantly reduce the cost, dimensions, weight and power consumption of the interrogator, and neutralize the difficulties in setting up and periodic calibration typical for serial products. The test results of the system show the directions and prospects of using the developed equipment as part of portable and on-board monitoring and control systems.

Keywords: sensor system, intra-fiber Bragg gratings, interrogator, spectral-time division of channels

For citation:

Borisenkov I. L., Voronov K. E., Leonovich G. I., Kalayev M. P., Telegin A. M. Sensor System based on in-fiber Bragg Grats and Interrogator with Spectral Time Channel Separation, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 5, pp. 247—254.

DOI: 10.17587/nmst.23.247-254

References

1. Leonovich G. I., Oleshkevich S. V. Gibridnye datchiki na volokonno-opticheskikh breggovskikh reshetkakh, *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2016, vol. 18, no. 4 (7), pp. 1340—1345 (in Russian).

2. Borisenkov I. L., Fedechev A. F., Leonovich G. I., Kupriyanov S. V., Krutov A. A., Zakharov V. N. Matematicheskaya model neravnomernoy mikromekhanicheskoy deformatsii uchastka opticheskogo volokna pri osesimmetrichnom nagruzhении // *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 6, pp. 331—336 (in Russian).

3. Kuo Li. Review of the Strain Modulation Methods Used in Fiber Bragg Grating Sensors, *Hindawi Publishing Corporation Journal of Sensors*, vol. 2016, Article ID 1284520, 8 p. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/1284520>.

4. Leonovich G. I., Danilin A. I., Kupriyanov S. V., Voronov K. Ye., Telegin A. M., Zakharov V. N. Nizkochastotnye radioantennы i antennыe sistemy na osnove vnutrivolokonnykh breggovskikh reshetok, sopryazhennykh s magnitoelektricheskimi strukturami, *Aktualnye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy: materialy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (g. Samara 21—23 aprelya 2020 g.)* / Ed. A. I. Danilin; Samarskiy natsionalnyy issledovatel'skiy universitet imeni akademika S. P. Koroleva. Samara, Vektor, 2020, pp. 9—11 (in Russian).

5. Kalaev M. P., Telegin A. M., Voronov K. E. etc. Investigation of optical glass characteristics under the influence of space factors, *Computer Optics*, 2019, vol. 43, issue 5, pp. 803—809.

6. Othonos A. Fiber Bragg gratings, *Rev. Sci. Instrum.*, 1997, vol. 68, no. 12, pp. 4309—4341.

В. Ф. Лукичев^{1,2}, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, директор², e-mail: lukichev@ftian.ru,
И. И. Амиров³, д-р физ.-мат. наук, зав. лаб., e-mail: amirov@yf-ftian.ru,
И. В. Уваров³, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., e-mail: i.v.uvarov@bk.ru,
Камран Кешаварздивколаи¹, аспирант, e-mail: kamran-keshavarz@yandex.ru,
Д. А. Воротынцев¹, магистр, e-mail: dima.vorotyntsev@mail.ru,
Д. С. Серегин¹, канд. техн. наук, нач. отдела, e-mail: d_seregin@mirea.ru,
К. А. Воротилов¹, д-р техн. наук, проф., e-mail: vorotilov@mirea.ru

¹ МИРЭА — Российский технологический университет, Москва

² Физико-технологический институт имени К. А. Валиева РАН, Москва

³ Ярославский Филиал Физико-технологического института имени К. А. Валиева РАН, Ярославль

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И РЕЗОНАНСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ PZT-КАНТИЛЕВЕРОВ

Поступила в редакцию 02.08.2021

Тонкие пленки цирконата титаната свинца $Pb(Zr_{0,52}Ti_{0,48})O_3$ (PZT) толщиной 1,4 мкм были изготовлены методом химического осаждения из растворов на подложках $Si/SiO_2/TiO_2/Pt$. На основе полученных пленок формировались структуры PZT-кантилеверов шириной 100...300 мкм и длиной 500...1000 мкм. В качестве верхнего и нижнего электродов использована платина толщиной 100 нм, нанесенная методом магнетронного распыления. Освобождение PZT-кантилеверов осуществлялось травлением жертвенного слоя в SF_6 . Резонансные характеристики PZT-кантилеверов определяли оптическим методом светового рычага с помощью оптического измерительного стенда. Выходные характеристики PZT-кантилеверов могут быть использованы для МЭМС-устройств, в частности, МЭМС-резонаторов.

Ключевые слова: пленки PZT, кантилевер, технология изготовления, резонансные характеристики

Введение

Пьезоэлектрические пленки являются важным семейством функциональных материалов в микроэлектромеханических системах (МЭМС), они обеспечивают прямой и обратный пьезоэффект, и таким образом полезны для всех видов резонаторов, инерционных датчиков, актюаторов, ультразвуковых и акустических устройств. Среди пьезоэлектрических материалов пленки цирконата титаната свинца благодаря большим значениям пьезомодулей (d_{ij}) и коэффициента электромеханической связи (k_t) рассматриваются в качестве потенциальных кандидатов на использование в пьезоэлектрических МЭМС-резонаторах [1–3]. Пьезоактивность пленок PZT зависит от ряда факторов, таких как исходные препараты, кристаллическое строение, стехиометрический состав, методы формирования, температура кристаллизации и др. В пленках PZT наибольшие значения пьезокоэффициентов на-

блюдаются на морфотропной фазовой границе (МФГ), где кристаллическая структура резко меняется между тетрагональной и ромбоэдрической модификациями [4, 5].

Для получения большого выходного сигнала в МЭМС-резонаторах необходимо формировать пленки PZT толщиной 1...5 мкм [6]. На сегодняшний день наиболее распространенным методом осаждения пленок PZT больших толщин является золь-гель-процесс, имеющий низкую температуру формирования оксидных фаз, высокую скорость получения пленок и совместимость с полупроводниковой кремниевой технологией [7]. В большинстве МЭМС-резонаторов возбуждение колебаний и детектирование выходного сигнала осуществляются с помощью упругих элементов, таких как кантилевер, микробалка, диск и мембраны.

В данной работе на основе толстых (>1 мкм) золь-гель-пленок PZT-методами фотолитографии и плазмохимического травления были сфор-

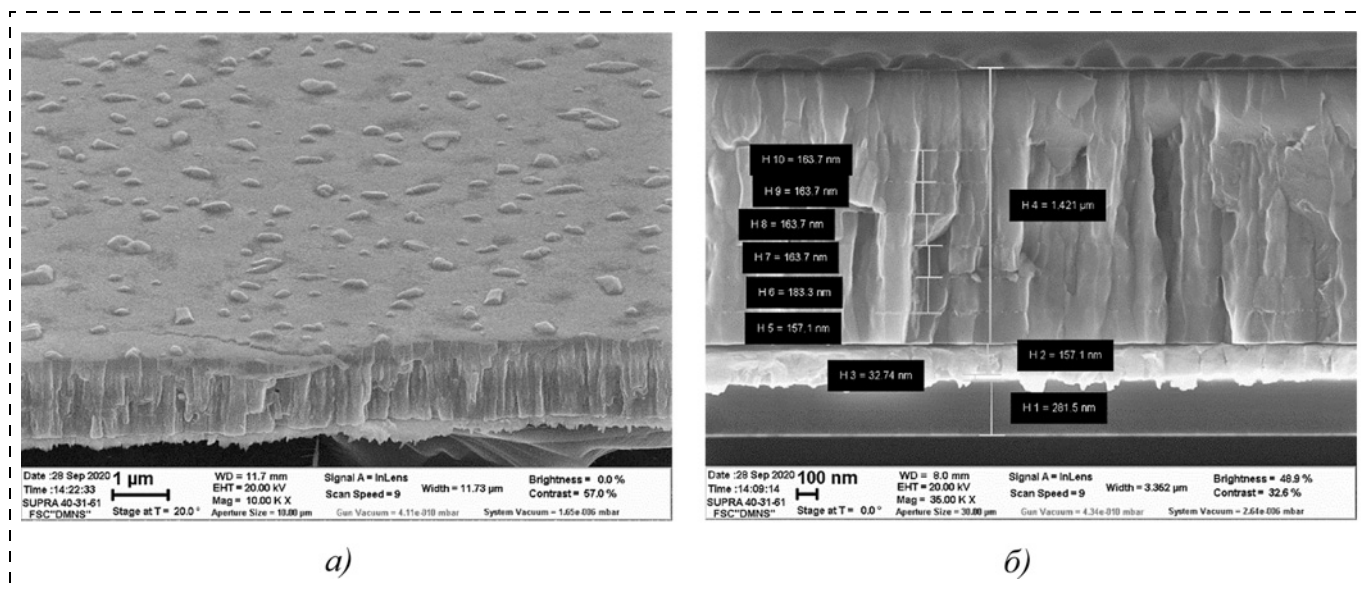


Рис. 1. СЭМ-изображения поверхности (а) и скола (б) пленки PZT. Толщина осажденного PZT 1,42 мкм, температура роста 650 °C

мированы кантилеверы различных размеров и проведены измерения их резонансных характеристик.

Методика изготовления пленок PZT

На первой стадии создания PZT-кантилеверов использовали образцы на основе сегнетоэлектрических пленок PZT, сформированные золь-гель-методом [8]. Пленки были изготовлены в научно-образовательном центре "Технологический центр" РТУ МИРЭА.

Для приготовления пленкообразующего раствора в качестве прекурсоров использовали н-пропилат циркония $Zr(O_nPr)_4$ в виде 70 %-ного раствора в 1-пропанол, изопропилат титана $Ti(O^iPr)_4$ 99,999 % и обезвоженный ацетат свинца (II) $Pb(CH_3COO)_2$, полученный методом твердофазного синтеза [9]. Метилцеллозоль ($CH_3OCH_2CH_2OH$) использовали как растворитель.

Концентрация пленкообразующего раствора в расчете на сумму алкоголятов титана (Ti) и циркония (Zr) составляла 0,25 моль/л. Соотношение Zr/Ti составляло 48/52 (вблизи МФГ), избыточное содержание свинца 15 мол. %.

Для формирования пленок PZT использовали кремниевые подложки p-типа проводимости со структурой Si (800 мкм)/SiO₂ (300 нм)/TiO₂ (10 нм)/Pt (150 нм) (компания Inostek, Корея). Пленкообразующий раствор PZT наносили на слой Pt методом послойного (всего 40 слоев)

центрифугирования (скорость вращения около 2500 об/мин) с промежуточной сушкой при 180 °C (5 мин в инфракрасной импульсной печи) и пиролизом при 390 °C (10 мин на горячей плитке). Для предотвращения растрескивания после нанесения каждого пяти слоев проводили термообработку при 650 °C в течение 10 мин для осуществления кристаллизации сформированной части пленки. Результирующая толщина сегнетоэлектрической пленки PZT составила 1,4 мкм. На рис. 1 показаны СЭМ-изображения поверхности и скола пленки PZT до формирования кантилеверов. Пленка имеет типичную столбчатую структуру перовскитных зерен и не содержит посторонней фазы пирохлора.

На рис. 2 представлены характерные зависимости диэлектрической проницаемости и полярности сформированных пленок PZT от электрического поля

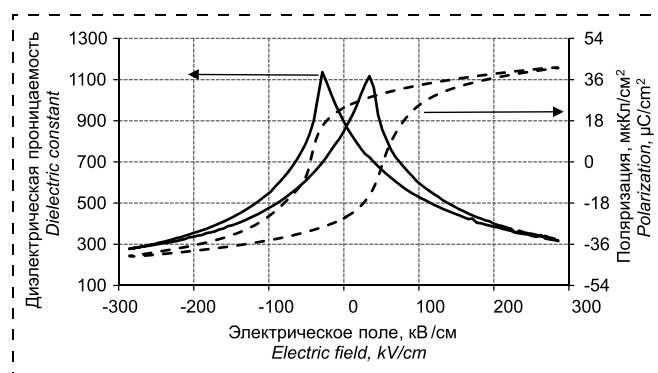


Рис. 2. Зависимости диэлектрической проницаемости и полярности сформированных пленок PZT от электрического поля

ляризации сформированных пленок PZT на платинированных кремниевых подложках от электрического поля. Измерения зависимости диэлектрической проницаемости от напряжения проведены с помощью LCR-метра Agilent 4284A на частоте 100 кГц; петли диэлектрического гистерезиса определены с помощью специализированного комплекса AixACCT TF Analyzer 2000 на частоте 100 Гц. Металлический контакт к пленке PZT был обеспечен с помощью ртутного зонда MDC 802B-150 с площадью электрода $0,515 \text{ мм}^2$. Согласно результатам измерений максимальные значения диэлектрической проницаемости пленок достигают 1100 при коэрцитивных полях около $\pm 31 \text{ кВ/см}$, значение остаточной поляризации составляет 23 мКл/см^2 .

Технология изготовления PZT-кантилеверов

Кантилеверы изготавливали методом поверхностной микрообработки с использованием двух шаблонов. Снимки фотошаблонов, задающие размер образцов, представлены на рис. 3. Внешний размер шаблонов соответствует размерам исходной пластинки. Размер исходной пластинки составил $5 \times 5 \text{ см}$. В левом нижнем углу сформированы контактные площадки для контроля процессов травления. На пластинке располагаются 36 чипов. Каждый чип содержит шесть кантилеверов длиной 500, 600, 700, 800, 900 и 1000 мкм. Чипы объединены в три одинаковые группы по 12 штук в каждой. В свою очередь, внутри группы чипы разбиты на три подгруппы, отличающиеся шириной кантилеверов (100, 200 и 300 мкм). Каждый чип имеет свой номер.

Основные этапы изготовления представлены на рис. 4 (см. четвертую сторону обложки). На первом этапе на слой PZT методом магнетронного распыления наносились слои платины и хрома толщиной 100 и 500 нм, соответственно (рис. 4, а). Далее выполнялась контактная фотолитография с помощью фотошаблона № 1, задающего размеры кантилевера и контактных площадок (рис. 4, б). Через маску фоторезиста Microposit S1813 SP15 осуществлялось жидкостное травление Cr (рис. 4, в). Таким образом бы-

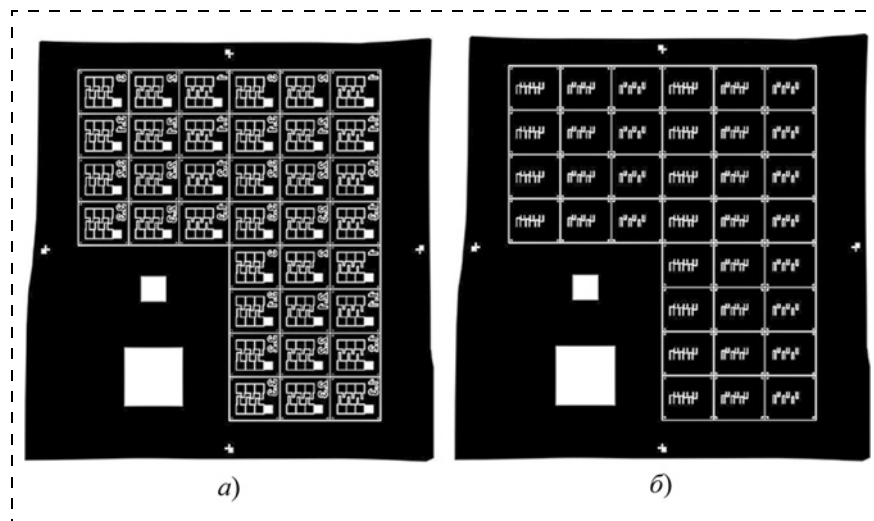


Рис. 3. Фотошаблоны для контактной УФ-литографии:
а — шаблон № 1; б — шаблон № 2

ла подготовлена стойкая металлическая маска (рис. 4, г), через которую выполнялось плазмохимическое травление верхнего слоя Pt и PZT в плазме SF_6/Ar до нижнего слоя Pt (рис. 4, д).

На следующей стадии пластину покрывали слоем фоторезиста, в котором формировалась маска в соответствии с шаблоном № 2 (рис. 4, е). Через нее выполнялось плазмохимическое травление нижележащих слоев Pt и SiO_2 до базового слоя кремния (рис. 4, ж). На заключительном этапе осуществлялось вывешивание кантилеверов методом изотропного травления Si в плазме SF_6 на глубину до 150 мкм (рис. 4, з) и удаление фоторезиста (рис. 4, и).

СЭМ-изображение кантилеверов шириной 100 мкм представлено на рис. 5. Кантилеверы,

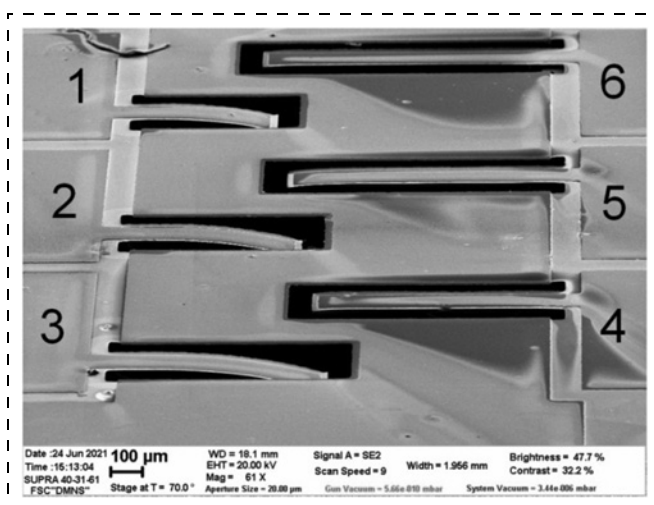


Рис. 5. Группа из шести кантилеверов, обозначенных цифрами

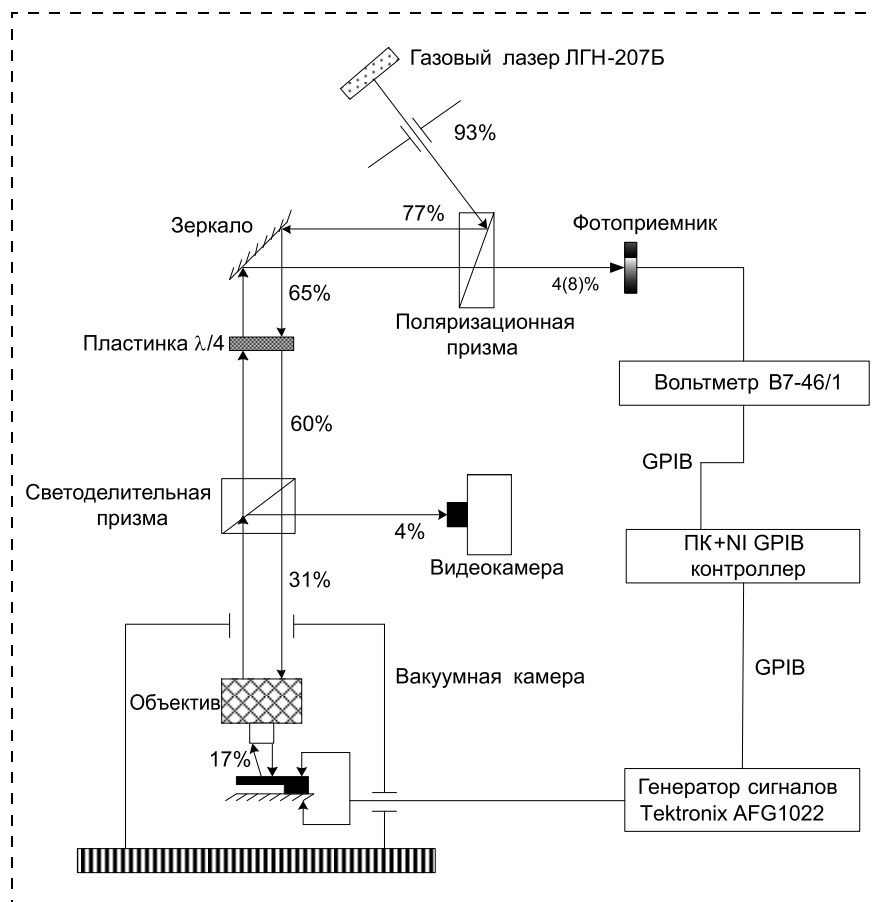


Рис. 6. Принцип работы оптического измерительного стенда

расположенные с левой стороны чипа (№ 1, 2, 3), изогнуты вниз. Это свидетельствует об их успешном освобождении. Изгиб обусловлен внутренними напряжениями в слоях Cr, Pt и слое PZT, который играет роль верхнего электрода. У кантилеверов, расположенных с правой стороны (№ 4, 5, 6), изгиб отсутствует. Жертвенный слой удален из-под них не полностью.

Экспериментальный метод измерения резонансных характеристик

Измерение резонансных характеристик PZT-кантилеверов проводили с помощью оптического измерительного стенда, схема которого изображена на рис. 6 [10]. Чип устанавливали в держатель, оснащенный пьезоэлектрическим диском. На диск подавалось переменное напряжение от генератора сигналов Tektronix AFG1022. Диск вибрировал с определенной частотой, возбуждая колебания кантилевера (механическое возбуждение). На контактные площадки чипа устанавливали вольфрамовые иглы измерительной го-

ловки, позволяющие снимать напряжение с верхнего и нижнего электродов кантилевера, т. е. регистрировать пьезоотклик. Кроме того, с их использованием можно было возбуждать колебания кантилевера путем подачи напряжения на электроды (электрическое возбуждение).

Держатель помещали в вакуумную камеру, давление в которой составляло 10^{-5} атм. На поверхность кантилевера фокусировался лазерный луч. Отраженный луч падал на позиционно-чувствительный фотоприемник (ФП). Колебания кантилевера вызывали перемещение этого луча по ФП, на выходе которого появлялся электрический сигнал, пропорциональный амплитуде колебаний. Оптическая схема стенда подробно описана в работе [11]. Измерительными приборами управляли персональный компьютер с помощью программного обеспечения, написан-

ного в среде LabView. В автоматическом режиме строилась резонансная кривая кантилевера, представляющая собой зависимость амплитуды выходного напряжения ФП от частоты возбуждения.

Пример резонансной кривой, полученной для кантилевера № 2, представлен на рис. 7. Для обоих методов возбуждения наблюдали симметричный резонансный пик, соответствующий основной колебательной моде. В случае механического возбуждения максимум находился на частоте 8534 Гц. При электрическом возбуждении резонансная частота была несколько выше и составляла 8540 Гц. Рост частоты вероятно был обусловлен увеличением упругости кантилевера

Резонансные частоты и добротности PZT-кантилеверов

№ кантилевера	Частота, Гц	Добротность
1	13 618	1135
2	8534	1219
3	6356	1412

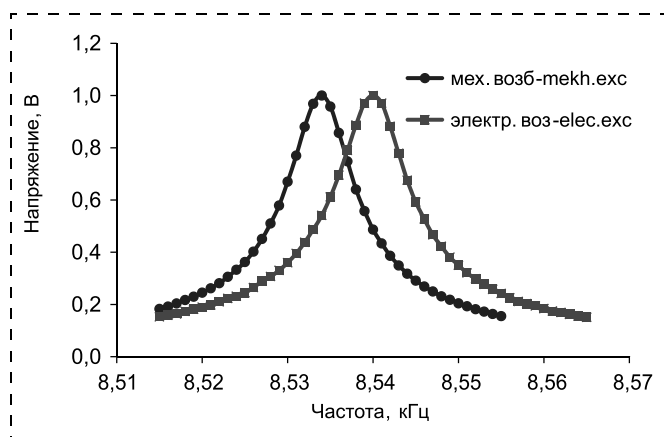


Рис. 7. Резонансная кривая кантилевера № 2 шириной 100 и длиной 900 мкм

под действием электрического поля. Добротность, рассчитанная по ширине пика, составляла 1219 и 1068 для механического и электрического методов возбуждения, соответственно.

Значения резонансной частоты и добротности кантилеверов № 1—3, полученные механическим возбуждением, представлены в таблице.

Стоит отметить, что подача переменного напряжения на электроды кантилевера успешно возбуждала его колебания. Следовательно, слой PZT проявлял пьезоэлектрические свойства. Однако при механическом возбуждении пьезоотклик зарегистрировать не удалось. Вероятной причиной являлась небольшая амплитуда колебаний кантилевера. Малый изгиб обеспечивал небольшие внутренние напряжения в слое PZT, поэтому выходное напряжение было недостаточно велико для детектирования.

Заключение

Таким образом, в работе были рассмотрены процессы формирования тонкопленочных структур на основе сегнетоэлектрических пленок PZT. На основе сформированных пленок были изготовлены кантилеверы длиной от 500 до 1000 мкм и шириной от 100 до 300 мкм. Определены зависимости добротности и резонансной частоты от длины и ширины PZT-кантилеверов. Экспериментально полученные значения резонансных частот хорошо согласуются с аналитическим расчетом зависимости частоты от ширины и длины PZT-кантилеверов. Полученные в ходе исследования данные будут полезны при проведении дальнейшего исследования в области МЭМС-резонаторов.

Работа по формированию сегнетоэлектрических пленок выполнена в РТУ МИРЭА при поддержке гранта РФФИ № 19-29-03058.

Работы по разработке технологии изготовления и определению резонансных характеристик кантилеверов выполнялись в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ по теме № 0066-2019-0002 с использованием оборудования Центра коллективного пользования "Диагностика микро- и наноструктур".

Список литературы

1. Абдуллаев Д. А., Воротилов К. А., Зубкова Е. Н., Сегрегин Д. С., Сигов А. С. Реактивно-ионное травление пленок цирконата-титаната свинца // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18, № 12. С. 723—729.
2. Сергеева О. Н., Богомолов А. А., Киселев Д. А., Малинкович М. Д., Пронин И. П., Каптелов Е. Ю., Сенкевич С. В., Пронин В. П. Пирозлектрические и пьезоэлектрические свойства тонких пленок PZT на морфотропной фазовой границе // Физика твердого тела. 2014. Т. 56, вып. 4. С. 687—691.
3. Tommasi A., Coletta G., Balma D., Marasso S. L., Perrone D., Canavese G., Stassi S., Bianco S., Cocuzza M., Pirri C. F. Process optimisation of a MEMS based PZT actuated microswitch // Microelectronic Engineering. 2014. Vol. 119. P. 137—140.
4. Sanchez L. M., Potrepka D. M., Fox G. R., Takeuchi I., Ke Wang, Bendersky L. A., Polcawich R. G. Optimization of PbTiO₃ seed layers and Pt metallization for PZT-based piezoMEMS actuators // J. Mater. Res. 2013. Vol. 28, N. 14. P. 1920—1931.
5. Yoshida S., Hanzawa H., Wasa K., Tanaka S. Fabrication and characterization of large figure-of-merit epitaxial PMnN-PZT/Si transducer for piezoelectric MEMS sensors // Sensors and Actuators A: Physical. 2016. Vol. 239. P. 201—208.
6. Hindrichsen C. G., Lou-Moller R., Hansenc K., Thomsen E. V. Advantages of PZT thick film for MEMS sensors // Sensors and Actuators A: Physical. 2010. Vol. 163. P. 9—14.
7. Seung Min Oh, Min-Gyu Kang, Young Ho Do, Chong Yun Kang., Seok Jin Yoon. Fabrication of 1µm thickness lead zirconium titanate films using poly (N-vinylpyrrolidone) added sol-gel method // Transaction on electrical and electronic materials. 2011. Vol. 12, N. 5. P. 222—225.
8. Vorotilov K., Sigov A., Seregin D., Podgorny Yu., Zhi-galina O., Khmelenin D. Crystallization behaviour of PZT in multilayer heterostructures // Phase Transitions: Multinatl. 2013. Vol. 86, N. 11. P. 1152—1165.
9. Kotova N. M., Vorotilov K. A., Seregin D. S., Sigov A. S. Role of precursors in the formation of lead zirconate-titanate thin films // Inorganic Materials. 2014. Vol. 50, N. 6. P. 661—666.
10. Уваров И. В., Наумов В. В., Аминов М. К., Куприянов А. Н., Амиров И. И. Исследование резонансных характеристик металлических микро- и нанобалок // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 12. С. 45—48.
11. Uvarov I. V., Naumov V. V., Amirov I. I. Resonance properties of multilayer metallic nanocantilevers // Proceedings of SPIE. 2013. Vol. 8700. P. 87000S-1.

V. F. Lukichev^{1, 2}, Professor, D. Sc., Corresponding member of RAS, Director²,
 I. I. Amirov³, D. Sc., Professor, Head of Laboratory, I. V. Uvarov³, Ph. D., Senior Researcher,
 Kamran Keshavarzdivkolaee¹, Postgraduate Student,
 D. A. Vorotyntsev¹, magister, e-mail: dima.vorotyntsev@mail.ru,
 D. S. Seregin¹, Ph. D., Head of Department, K. A. Vorotilov¹, D. Sc., Professor
¹ MIREA — Russian Technological University, Moscow
² Valiev Institute of Physics and Technology, Russian Academy of Sciences, Moscow
³ Valiev Institute of Physics and Technology of Russian Academy of Sciences, Yaroslavl Branch

Corresponding author:

Kamran Keshavarzdivkolaee, Postgraduate Student, MIREA — Russian Technological University, Moscow, 119454,
 Russian Federation, e-mail: kamran-keshavarz@yandex.ru

Fabrication and Resonance Characteristics of PZT Cantilevers

Received on August 02, 2021

Accepted on August 16, 2021

Thin films of lead zirconate titanate $Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3$ (PZT) with thickness of $1.4 \mu m$ were prepared on $Si/SiO_2/TiO_2/Pt$ substrates by chemical solutions deposition. Based on the obtained films, the structures of PZT cantilevers were formed, with a length from 500 to 1000 μm and wide from 100 to 500 μm . Platinum (100 nm) as the bottom and top electrode, has been deposited by magnetron sputtering. PZT cantilevers were released by etching the sacrificial layer in SF_6 . The resonance characteristics of the PZT cantilevers were determined by the light lever method using a special optical measuring stand. Output characteristics of the PZT cantilevers, can be used in MEMS devices, specially, in MEMS resonators.

Keywords: PZT films, cantilever, manufacturing technology, resonance characteristic

For citation:

Lukichev V. F., Amirov I. I., Uvarov I. V., Kamran Keshavarzdivkolaee, Vorotyntsev D. A., Seregin D. S., Vorotilov K. A. Fabrication and Resonance Characteristics of PZT Cantilevers, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 5, pp. 255–260.

DOI: 10.17587/nmst.23.255-260

References

1. Abdullaev D. A., Vorotilov K. A., Zubkova E. N., Seregin D. S. Reaktivno-ionnoe travlenie plenok cirkonata-titanata svinca, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2016, vol. 18, no. 12, pp. 723–729 (in Russian).
2. Sergeeva O. N., Bogomolov A. A., Kiselev D. A., Malinkovich M. D., Pronin I. P., Kaptelov E. Ju., Senkevich S. V., Pronin V. P. Piroelektricheskie i p'ezoelektricheskie svojstva tonkih plenok PZT na morfotropnoj fazovoj granice, *Fizika tverdogo tela*, 2014, vol. 56, no. 4, pp. 687–691 (in Russian).
3. Tommasi A., Coletta G., Balma D., Marasso S. L., Perrone D., Canavese G., Stassi S., Bianco S., Cocuzza M., Pirri C. F. Process optimisation of a MEMS based PZT actuated microswitch, *Microelectronic Engineering*, 2014, vol. 119, pp. 137–140.
4. Vorotilov K., Sigov A., Seregin D., Podgorny Yu., Zhihalina O., Khmelenin D. Crystallization behaviour of PZT in multilayer heterostructures, *Phase Transitions: Multinatl*, 2013, vol. 86, no. 11, pp. 1152–1165.
5. Yoshida S., Hanzawa H., Wasa K., Tanaka S. Fabrication and characterization of large figure-of-merit epitaxial PMN-PZT/Si transducer for piezoelectric MEMS sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, vol. 239, pp. 201–208.
6. Hindrichsen C. G., Lou-Moller R., Hansenc K., Thomsen E. V. Advantages of PZT thick film for MEMS sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010, vol. 163, pp. 9–14.
7. Seung Min Oh., Min-Gyu Kang, Young Ho Do, Chong Yun Kang., Seok Jin Yoon. Fabrication of 1 μm thickness lead zirconium titanate films using poly (N-vinylpyrrolidone) added sol-gel method, *Transaction on electrical and electronic materials*, 2011, vol. 12, no. 5, pp. 222–225.
8. Sanchez L. M., Potrepka D. M., Fox G. R., Takeuchi I., Ke Wang, Bendersky L. A., Polcawich R. G. Optimization of $PbTiO_3$ seed layers and Pt metallization for PZT-based piezoMEMS actuators, *J. Mater. Res.*, 2013, vol. 28, no. 14, pp. 1920–1931.
9. Kotova N. M., Vorotilov K. A., Seregin D. S., Sigov A. S. Role of precursors in the formation of lead zirconate-titanate thin films, *Inorganic Materials*, 2014, vol. 50, no. 6, pp. 661–666.
10. Uvarov I. V., Naumov V. V., Aminov M. K., Kupriyanov A. N., Amirov I. I. Issledovanie rezonansnyh harakteristik metallicheskih mikro- i nanobalok, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2011, no. 12, pp. 45–48 (in Russian).
11. Uvarov I. V., Naumov V. V., Amirov I. I. Resonance properties of multilayer metallic nanocantilevers, *Proceedings of SPIE*, 2013, vol. 8700, pp. 87000S-1.

Д. Л. Гнатюк¹, канд. техн. наук, зав. лаб., dgnatyuk@yandex.ru,

А. В. Зуев¹, науч. сотр., zkzz@mail.ru,

П. П. Мальцев^{1,2}, д-р техн. наук, проф., isvch@isvch.ru

¹ Федеральное государственное автономное научное учреждение

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники

имени В. Г. Мокерова Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), Москва, Россия

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

"МИРЭА — Российский технологический университет", Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ ПРОПУСКАНИЯ В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ CVD-АЛМАЗЕ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 40...80 ГГц

Поступила в редакцию 03.08.2021

Исследованы потери пропускания поликристаллического CVD-алмаза в диапазоне частот 40...80 ГГц методом свободного пространства. В качестве объекта изучения был использован алмазный диск диаметром 56,5 мм и толщиной 366 мкм, изготовленный в ИОФ РАН. Полученные результаты свидетельствуют о радиопрозрачности поликристаллического алмаза в указанном диапазоне. При практическом использовании алмазной крышки для герметизации металлокерамического корпуса с приемо-передающей монолитной интегральной схемой вносимые потери на частоте 60,5 ГГц составили 2,9 дБ.

Ключевые слова: миллиметровый диапазон длин волн, поликристаллический алмаз, радиопрозрачность, корпусирование

Введение

Развитие радиоэлектронной аппаратуры неразрывно связано с задачей корпусирования и герметизации интегральных схем. Поскольку малый размер длины волны в миллиметровом диапазоне длин волн позволяет интегрировать на кристалл как отдельные антенны, так и небольшие антенные решетки, то при корпусировании может оказаться необходимым обеспечить свободное прохождение сигнала на приемную антенну или с передающей антенны через крышку корпуса. Поиск материалов для использования в качестве радиопрозрачных крышек (обтекателей) в миллиметровом диапазоне длин волн является актуальной задачей. Выбор частотного диапазона в настоящем исследовании обусловлен практическим интересом к пятимиллиметровому диапазону длин волн. Согласно решению Государственной комиссии по радиочастотам диапазон частот 66...71 ГГц был выделен для проведения научных, исследовательских, опытных, экспериментальных и конструкторских работ в целях разработки и испытания систем пятого поколения мобильной связи 5G.

Алмаз обладает наиболее широким спектральным окном прозрачности, от УФ области до радиодиапазона, среди всех известных оптических материалов. Имеются экспериментальные данные по исследованию прозрачности поликристаллических алмазов на частотах вплоть до 1 ТГц. В наиболее качественных алмазных дисках измерены тангенсы угла диэлектрических потерь $\tan\delta$ порядка 10^{-5} , что соответствует низкому, порядка 10^{-3} см^{-1} , коэффициенту поглощения. В диапазоне частот ниже 70 ГГц экспериментальные данные $\tan\delta$ лежат в пределах $10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-5}$ [1]. Заметим, что поглощение СВЧ излучения в алмазе в сильной степени зависит от структурного совершенства синтезируемого материала, и определяется технологией процесса выращивания.

Алмаз с его высокой теплопроводностью и широким спектральным окном прозрачности является перспективным материалом для изготовления не только радиопрозрачных крышек излучателей, но и теплопроводящих корпусов. В литературе сообщается о применении поликристаллического алмаза для создания корпусов типа SMD (плоское основание и объемная крыш-

ка) [2] в целях улучшения теплоотвода по сравнению с керамическими корпусами. Дополнительным преимуществом применения корпуса и крышки из одного и того же материала является их согласованность в диапазоне температур.

Результаты эксперимента

Образец пластины поликристаллического алмаза для исследования был изготовлен в ИОФ РАН в СВЧ-плазмохимическом реакторе ARDIS-100 (ООО "Оптосистемы", частота 2,45 ГГц) в смесях метан—водород на подложке кремния диаметром 56,5 мм. Средняя толщина алмазного диска составила 366 мкм.

Измерение потерь пропускания в алмазном диске проводили методом свободного пространства. Метод не налагает жестких требований на геометрическую форму исследуемого образца, он должен быть лишь плоским с известной толщиной в пределах $\lambda/18 \dots \lambda$. Для минимизации погрешности измерений, обусловленной эффектами дифракции на краях образца, его поперечный размер должен быть не менее трех ширины диаграммы направленности антенны (ДНА) по уровню 3 дБ в E -плоскости. Параметры процесса синтеза образца и результаты исследования его структуры в растровом электронном микроскопе и методом Рамановской спектроскопии подробно изложены в работе [1]. Там же показано, что в диапазоне частот 50...67 ГГц значение $\tan \delta$ образца лежит в диапазоне $7,5 \cdot 10^{-3} \dots 8 \cdot 10^{-2}$, возрастаая с частотой.

Измерения проводили в московском представительстве компании *Keysight Technologies* с применением измерительной системы миллиметрового диапазона длин волн от 900 Гц до 110 ГГц

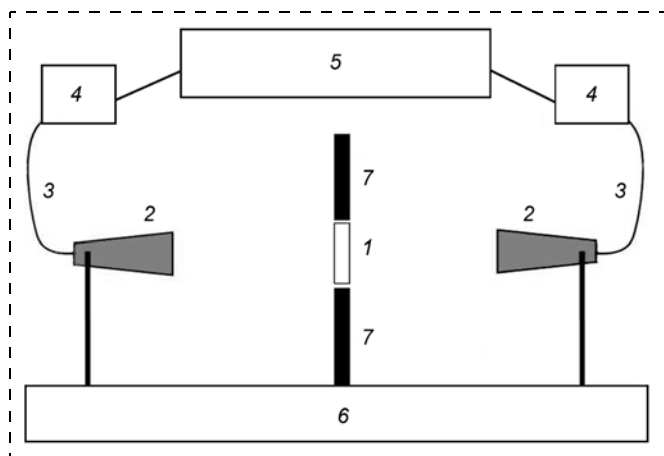


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

N5290A (рис. 1). Исследуемый алмазный диск 1 размещен по центру между рупорными антеннами с фланцем WR-15 2 с номинальными рабочими частотами 50...75 ГГц. Однако поскольку частоты среза волновода WR-15 составляют примерно 40 и 80 ГГц, то измерения были проведены в этом, более широком, диапазоне частот. Антенны с помощью кабельных сборок сечения 1,0 мм, адаптеров и коаксиально-волноводных переходов 3 подключены к преобразователям частоты 4, соединенным с анализатором цепей PNA-X 5. Антенны и образец алмаза монтировали на оптическом рельсе 6, который обеспечивал их соосность и позволял варьировать местоположение. Расстояние между антеннами составляло 93 см и было ограничено длиной рельса. Образец располагался по центру между антеннами. Заметим, что указанное расстояние не обеспечивало нахождение образца в дальней зоне антенн. Ширина ДНА по уровню 3 дБ в E -плоскости рупорных антенн была измерена и составила $8 \pm 1^\circ$. Тогда на удалении 46,5 см от антенны поперечный размер ДНА составит $6,5 \pm 0,8$ см. При диаметре образца 56,5 мм следует ожидать значительных погрешностей от дифракции. Поэтому при измерениях дополнительно применяли радионепроницаемый экран 7 с отверстием, равным диаметру диска.

Перед измерениями выполняли двухпортовую калибровку измерительной установки в коаксиальном тракте в выходном сечении кабельной сборки с помощью набора коаксиальных калибровочных мер. После калибровки проводили референсные измерения потерь (параметр S21) при прохождении СВЧ сигнала в свободном пространстве между антеннами с расположенным между ними пустым держателем образца с радионепроницаемым экраном. Далее в держатель помещали алмазный диск и проводили повторные измерения.

Ввиду отсутствия калибровки свободного пространства при измерениях в частотной области оказывались нескорректированными переломы сигнала от образца, антенн, неоднородностей коаксиально-волноводного тракта, которые приводили к образованию стоячей волны с осцилляциями $\pm 1,5$ дБ, что повышало неопределенность измерений. Для снижения неопределенности была дополнительно использована возможность анализатора цепей проводить измерения во временной области, позволяющая выполнять селекцию побочных отраженных сигналов. Измерения проводили без использования

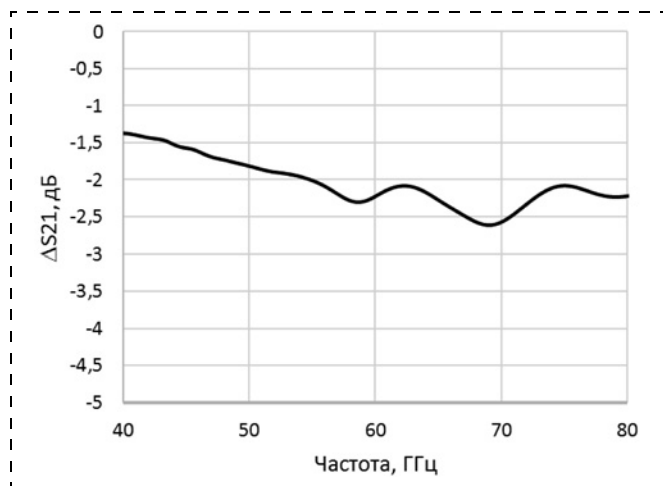


Рис. 2. Рассчитанное значение затухания в алмазном диске

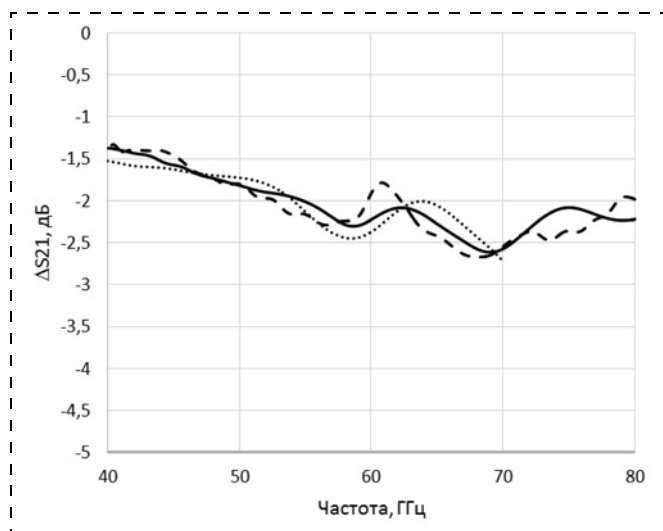


Рис. 3. Сравнение значений затухания в алмазном диске, полученных в разных условиях

безэховой камеры, что могло привести к дополнительной погрешности за счет переотражений, например, от крепежных конструкций или лабораторного стола. Однако за счет применения функции селекции во временной области данные источники погрешности не должны существенно повлиять на результат.

На рис. 2 показано рассчитанное значение разницы между референсным измерением потерь пропускания и измерением с алмазным диском, который в исследованном диапазоне частот привносит дополнительное затухание на $2 \pm 0,6$ дБ.

Для оценки воспроизводимости результатов измерений, а также для анализа влияния на результаты факта проведения измерений не в дальней зоне, а в зоне Френеля, было проведено сравнение данных, полученных в разных ус-

ловиях (рис. 3). Сплошная кривая соответствует результату рис. 2, а штриховая — результату, полученному на том же оборудовании в другой день после повторной сборки и калибровки. Пунктирная кривая характеризует результат, полученный в электрофизической лаборатории ИСВЧПЭ РАН с использованием другой модели анализатора цепей в диапазоне частот до 70 ГГц без использования внешних преобразователей частоты. Расстояние между антеннами при этом было увеличено до 143 см благодаря новой крепежной оснастке, что обеспечивало нахождение образца в дальней зоне антенн во всем исследуемом диапазоне частот до 70 ГГц. Все три результата хорошо коррелируют друг с другом по значению затухания и характеру АЧХ. Наибольшая разница наблюдается в окрестности 61 ГГц. Вычисленное значение среднего квадратического отклонения на частоте 61 ГГц составило 0,24 дБ. Таким образом, измерения в зоне Френеля не оказывают значительного влияния на результат, а воспроизводимость полученных результатов находится в пределах 0,5 дБ.

Прикладное применение и верификация

В ИСВЧПЭ РАН проводятся исследования по созданию отечественной элементной базы пятимиллиметрового диапазона длин волн на гетероструктурах нитрида галлия. Ряд разработанных монолитных интегральных схем (МИС) прошли необходимые испытания и были включены в серию 5411 с утверждением ТУ на следующие монолитные интегральные схемы [3]:

- малошумящий усилитель (МШУ) 5411УВ01Н без антенны и МШУ 5411УВ01АН, интегрированный с антенной на одном кристалле (АЕНВ.431130.293ТУ);

- усилитель мощности (УМ) 5411УВ02Н без антенны и УМ 5411УВ02АН, интегрированный с антенной на одном кристалле (АЕНВ.431120.294ТУ);

- преобразователь сигнала приемный 5411НС01Н (АЕНВ.431320.295ТУ), в его составе ГУН, балансный смеситель и усилитель промежуточной частоты;

- усилитель промежуточной частоты 5411УР01Н (АЕНВ.431130.320ТУ).

Развитием данной работы стало создание однокристалльного приема-передающего преобразователя сигнала со встроенными в кристалл приемной и передающей антеннами с эффективной изотропно излучаемой мощностью (ЭИИМ)

более 10 дБм. Данные МИС были успешно опробованы в составе макетов однокристалльных приемо-передающих устройств на печатных платах при условии прямого монтажа кристаллов на платы методом приклейки и разварки [4]. По результатам работы было получено пять свидетельств о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы [5–9].

Следующим шагом исследований стал монтаж МИС однокристалльных преобразователей сигнала в металлокерамические корпуса. Поскольку вход и выход СВЧ сигнала высокой частоты осуществляется через встроенные антенны, то выводы корпуса служат исключительно для подачи напряжений питания и выхода низкочастотного сигнала промежуточной частоты. Поэтому теоретически для монтажа можно применять любые подходящие по размеру и конфигурации корпуса. В настоящее время мы используем корпуса КП 5172.44-1 из низкотемпературной керамики производства АО "НИИПП" (г. Томск).

МИС приклеивают в корпуса на теплопроводящий клей и разваривают золотыми проволоками диаметром 28 мкм. Теплоотвод от кристалла осуществляется через металлизированные заземляющие отверстия в дне корпуса. Для измерения параметров преобразователей сигнала применяют контактирующее устройство Завода полупроводниковых приборов (г. Йошкар-Ола). Внешний вид приемо-передающего преобразователя сигнала в герметичном корпусе в контактирующем устройстве показан на рис. 4.

Для оценки влияния поликристаллического алмаза на излучаемую мощность один из опытных образцов преобразователя сигнала был за-

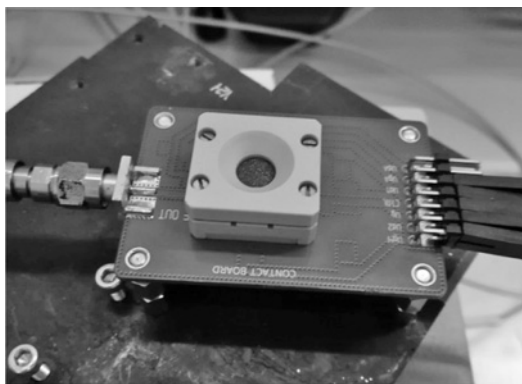


Рис. 4. Фотография контактирующего устройства с экспериментальным образцом однокристалльного приемо-передающего преобразователя сигнала в корпусе с алмазной крышкой во время измерений

герметизирован алмазной крышкой. Сравнение значений ЭИИМ образца, измеренных до и после герметизации на частоте 60,5 ГГц, показало, что монтаж крышки привел к уменьшению ЭИИМ на 2,9 дБм. Полученная величина хорошо согласуется с результатом измерения потерь в неразрезанном алмазном диске, который на частоте 60,5 ГГц составил $2,2 \pm 0,5$ дБ.

Заключение

В образце алмазного диска толщиной 366 мкм в диапазоне частот 40...80 ГГц зафиксировано значение потерь пропускания в пределах $(1,4...2,6) \pm 0,5$ дБ. При практическом использовании алмазной крышки для герметизации металлокерамического корпуса с установленной в него МИС приемо-передающего преобразователя сигнала отмечено снижение уровня излучаемой мощности на 2,9 дБ на частоте 60,5 ГГц. Указанное значение хорошо согласуется с данными для неразрезанного алмазного диска. Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования поликристаллического алмаза в качестве окон (крышек) в конструкциях с относительно невысокой СВЧ мощностью.

Авторы выражают благодарность В. Г. Ральченко и Д. Н. Совеку (ИОФ РАН) за предоставление образца алмазного диска, московскому представительству компании Keysight Technologies и техническому специалисту П. В. Байбакову за доступ к измерительному оборудованию и помощь в проведении измерений, а также за предоставление лицензии на опцию измерений во временной области к анализаторам цепей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 19-07-00683. Научный руководитель Мальцев П. П.

Список литературы

1. Гнатюк Д. Л., Зуев А. В., Крапухин Д. В., Мальцев П. П., Созык Д. Н., Ральченко В. Г. Исследование потерь пропускания в поликристаллическом CVD-алмазе в миллиметровом диапазоне длин волн методом свободного пространства // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47, № 18. С. 43–46.
2. Темнов А. М. Гибридно-монокристалльные интегральные схемы СВЧ на алмазе // Нано- и микросистемная техника. 2020. Т. 22, № 6. С. 298–328.
3. Справочный лист комплекта бескорпусных МИС серии 5411 на нитриде галлия для диапазона частот 57–64 ГГц. URL: <http://new.isvch.ru/razrab/> (дата обращения: 02.08.2021)
4. Федоров Ю. В., Бугаев А. С., Гнатюк Д. Л. и др. Макетирование приемо-передающих модулей 5-миллиметро-

вого диапазона длин волн на базе отечественных монолитных интегральных схем на нитриде галлия // Нано- и микросистемная техника, 2019. Т. 21, № 12. С. 702–708.

5. Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л., Матвеев О. С., Зуев А. В. Топология ИМС "Интегральный антенный элемент со встроенным малошумящим усилителем для диапазона 57–64 ГГц" // Свидетельство о государственной регистрации № 2013630159 от 06.11.2013.

6. Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л., Матвеев О. С., Зуев А. В. Топология ИМС "Преобразователь сигнала для диапазона 57–64 ГГц" // Свидетельство о государственной регистрации № 2013630171 от 05.12.2013.

7. Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л., Матвеев О. С., Зуев А. В. Топология ИМС "Интегральный антенный элемент со встроенным усилителем мощности для диапазона 57–64 ГГц" // Свидетельство о государственной регистрации № 2015630131 от 02.12.2015.

8. Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л., Матвеев О. С., Крапухин Д. В., Путинцев Б. Г. Топология ИМС "Интегрированный приемо-передающий модуль для диапазона частот 57–64 ГГц" // Свидетельство о государственной регистрации № 2015630131 от 12.07.2016.

9. Федоров Ю. В., Зуев А. В. Топология ИМС "Усилитель промежуточной частоты" // Свидетельство о государственной регистрации № 2017630087 от 05.03.2017.

D. L. Gnatyuk¹, Ph. D., Head of Laboratory, dgnatyuk@yandex.ru,
A. V. Zuyev¹, Researcher, zkzz@mail.ru, **P. P. Maltsev**^{1,2}, Ph. D., Professor,
Scientific Advisor of IUHFSE RAS, Head of Laboratory of MIREA, isvch@isvch.ru

¹ Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS, Moscow

² MIREA — Russian Technological University, Moscow

Corresponding author:

Gnatyuk Dmitry L., Ph. D., Head of Laboratory, Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS, Moscow, 117105, Russian Federation, e-mail: dgnatyuk@yandex.ru

Research of Insertion Loss of Polycrystalline CVD Diamond within Range of 40...80 GHz

Received on August 03, 2021

Accepted on August 16, 2021

Insertion loss of polycrystalline CVD diamond within range of 40...80 GHz is investigated by free space method. A diamond disk with diameter 56,6 mm and thickness 366 um was provided by GPI RAS. The disk was found to be radio transparent. Usage of diamond lid to seal LTCC package with T/R MMIC inside resulted in radiation loss by 2,9 dB at 60,5 GHz.

Keywords: millimeter wavelength range, polycrystalline CVD diamond, radio transparency, packaging

For citation:

Gnatyuk D. L., Zuyev A. V., Maltsev P. P. Research of Insertion Loss of Polycrystalline CVD Diamond within Range of 40...80 GHz, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 5, pp. 261–265.

DOI: 10.17587/nmst.23.261-265

References

1. Gnatyuk D. L., Zuev A. V., Krapuhin D. V. et al. *Pis'ma v ZhTF*, 2021, vol. 47, no. 18, pp. 43–46 (in Russian).

2. Temnov A. M. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 6, pp. 298–328 (in Russian).

3. *Spravochnyy list komplekta beskorpusnyh MIS serii 5411 na nitride galliya dlja diapazona chastot 57–64 GHz*, available at: <http://new.isvch.ru/razrab/> (accessed 02.08.2021)

4. Fedorov Yu. V., Bugaev A. S., Gnatyuk D. L. et al. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 12, pp. 702–708 (in Russian).

5. Mal'cev P. P., Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L. et al. *Topologiya IMS "Integral'nyy anten'nyy element so vstroennym maloshumyashhim usilitelem dlja diapazona 57–64 GHz"* // Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registracii № 2013630159, 06.11.2013 (in Russian).

6. Mal'cev P. P., Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L. et al. *Topologiya IMS "Preobrazovatel' signala dlja diapazona 57–64 GHz"*, Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registracii № 2013630171, 05.12.2013 (in Russian).

7. Mal'cev P. P., Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L. et al. *Topologiya IMS "Integral'nyy anten'nyy element so vstroennym usilitelem moshhnosti dlja diapazona 57–64 GHz"*, Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registracii № 2015630131, 02.12.2015 (in Russian).

8. Mal'cev P. P., Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L. et al. *Topologiya IMS "Integrirovannyj priemo-peredajushhij modul' dlja diapazona chastot 57–64 GHz"*, Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registracii № 2015630131, 12.07.2016 (in Russian).

9. Fedorov Yu. V., Zuev A. V. *Topologiya IMS "Usilitel' promezhutochnoj chastoty"* // Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registracii № 2017630087, 05.03.2017 (in Russian).

А. А. Алтухов, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
ООО "Производственно-технологический центр "УралАлмазИнвест", г. Москва,
зам. директора, Центр "Микросенсорика" РТУ МИРЭА, г. Москва, altukhov.aa@yandex.ru

РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ МОДУЛИ И СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ОСНОВЕ АЛМАЗНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Поступила в редакцию 28.07.2021

Приведен обзор текущего состояния и перспективных направлений применения полупроводниковых алмазных детекторов для создания на их основе радиоэлектронных систем контроля ионизирующих излучений. Основное внимание уделено созданию многофункциональных систем контроля космических излучений, объединяющих в своем составе комплект алмазных детекторов и аппаратно-программные средства и обеспечивающих диагностику дозовых и спектрометрических характеристик излучений различного типа. Приведены данные о разработанных и изготовленных образцах блоков и бортовых систем контроля космических и ионизирующих излучений.

Ключевые слова: алмаз, детекторы полупроводниковые, спектрометрические детекторы, ионизирующее излучение, космическое излучение, электроны, протоны, тяжелые заряженные частицы, радиационная стойкость

Введение

Алмазные детекторы (АД) ионизирующих излучений (ИИ) имеют ряд преимуществ по сравнению с аналогичными детекторами на основе традиционных полупроводников [1–3, 40]. Благодаря высокому напряжению пробоя и большой ширине запрещенной зоны ($E_g = 5,47$ эВ) детекторы ИИ (ДИИ) на основе алмаза обладают низким уровнем шума по сравнению с аналогами, а большая энергия смещения атомов в кристаллической решетке алмаза придает ему высокую радиационную стойкость. При этом высокие значения подвижности носителей заряда и большая скорость насыщения при больших напряжениях смещения позволяют изготавливать ДИИ с высоким быстродействием и высокой радиационной стойкостью, которые работоспособны при экстремальных внешних воздействиях [4–6]. Эти возможности алмазных ДИИ используют при создании современных приборов диагностики ИИ в различных областях науки и техники, включая планы по модернизации детекторов для проекта LHC (Большой адронный коллайдер) и HL LHC (High-Luminosity LHC) [5, 7, 8], для проекта TOTEM [27], для международного экспериментального термоядерного реактора (ITER) [9, 19], для систем контроля ядерных энергетических установок (ЯЭУ) [30] и для контроля нейтронов [10, 29], для оснащения космической техники [23, 35].

В настоящей работе кратко рассматривается текущее состояние разработки и применения многофункциональных устройств контроля ИИ на основе АД. Такие устройства позволяют осуществить комплексный контроль параметров ИИ, включая дозовые и спектрометрические характеристики излучений различных типов.

Многофункциональные системы устройства ИИ на основе алмазных детекторов

Накопленный опыт успешной разработки и применения дискретных алмазных ДИИ позволил приступить к созданию многофункциональных модулей и систем радиационного контроля (СРК) на их основе. Создание таких устройств позволяет практически продемонстрировать традиционные преимущества дискретных АД (быстродействие, высочайшая радиационная стойкость, высокая стойкость к механическим и тепловым воздействиям) в бортовой аппаратуре с меньшими массогабаритными параметрами.

Основными конструктивно-технологическими решениями, обеспечивающими создание и эффективное функционирование СРК на основе алмазных ДИИ, являются следующие:

- 1) разделение потока ИИ на энергетические поддиапазоны;
 - 2) использование программно-аппаратной обработки данных, поступающих от ДИИ;
 - 3) использование многодетекторной системы.
- Рассмотрим эти решения подробнее.

Разделение потока ИИ на энергетические поддиапазоны необходимо для выделения требуемых (исследуемых) энергетических параметров ИИ и для упрощения решения задачи контроля количества и параметров частиц ИИ в выделенном (ограниченном) диапазоне энергий. Конструктивно-технологические и физические решения по разделению потока ИИ на энергетические поддиапазоны были предложены и обоснованы в работах [11–13]. В их основу заложен принцип использования набора селективных фильтров, обрезающих (ослабляющих) входящий поток ИИ по энергии, в сочетании с решением системы уравнений, определяющих границы диапазона энергий ИИ после прохождения таких фильтров.

На рис. 1 показаны алмазные чувствительные элементы ДИИ (в бескорпусном исполнении) [15, 32]; на рис. 2 приведена структурная схема многодетекторного модуля с селективными фильтрами [28, 32, 33].

Методы аппаратно-программной обработки данных используют алгоритмы амплитудно-временной селекции сигнала, формируемого на выходе алмазного ДИИ, после прохождения частиц ИИ через его объем, что позволяет реализовать количественный расчет характеристик ИИ с учетом упомянутой выше селекции ИИ на подтипы. Описание методов аппаратно-программной обработки информации от алмазных ДИИ и алгоритмы амплитудно-временной селекции получаемых спектров ИИ можно найти в работах [14, 15, 31, 32]. В целом, эти методы представляют собой самостоятельную и достаточно сложную математическую задачу, решение которой позволяет получить отдельные значения потоков ИИ по различным энергетическим диапазонам из суммарного значения потоков электронов, протонов и тяжелых заряженных частиц с различными энергиями.

В работе [32] подробно рассмотрен метод адаптивной фильтрации в задаче восстановления параметров потоков космических излучений (КИ) по измерительным данным для применения в космических транспортных системах с длительным сроком функционирования. Предложена и обоснована математическая модель и алгоритм оптимизации нестационарных систем управления, измерение состояния которых проводится на фоне помех. Алгоритмы параметрической оптимизации организуются с помощью модифицированного уравнения Винера—Хопфа и функций чувствительности.

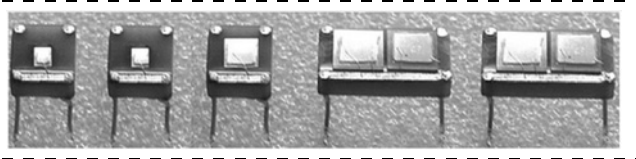


Рис. 1. Бескорпусные алмазные ЧЭ

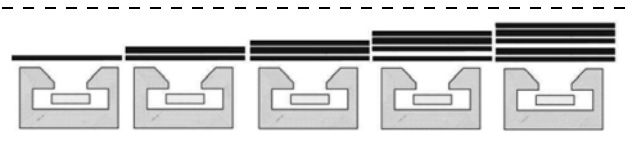


Рис. 2. Структурная схема модуля

Нами были выполнены исследования математических алгоритмов и методов аппаратно-программной обработки информации от алмазных ДИИ, включая задачу восстановления дифференциальных спектров КИ на основе нейросетевых алгоритмов. Для решения этой задачи была предложена и исследована [18, 33, 39] физико-математическая модель преобразования информации о полях КИ в тракте регистрации спектрометра КИ на основе АД с последующим восстановлением дифференциальных спектров КИ с помощью искусственной нейросети (ИНС), что позволяет обеспечить минимальную погрешность восстановления спектров КИ. Модель преобразования информации в тракте регистрации спектрометра использует алгоритм моделирования в программном пакете Geant 4 [34], области применения которого включают в себя физику высоких энергий и исследование ядерных реакций, ускорители частиц, космические физические исследования. Geant 4 позволяет моделировать частицы с энергиями от единиц электрон-вольт до гигаэлектрон-вольт. С помощью созданной модели было проведено моделирование преобразования информации о полях КИ в тракте регистрации многодетекторной системы измерением электронных потоков в диапазоне энергий от 0,1 до 5 МэВ и протонных потоков в диапазоне от 5 до 500 МэВ. Близкий подход к использованию пакета Geant 4 к созданию и моделированию твердотельных детекторов КИ описан в работе [35].

Использование многодетекторной системы основано на том, что в устройстве задействованы одновременно несколько ДИИ, которые функционально выделены для контроля конкретного типа ИИ, и которые могут отличаться конструктивно, например, по площади и по объему чувствительного элемента (ЧЭ) детектора, конст-

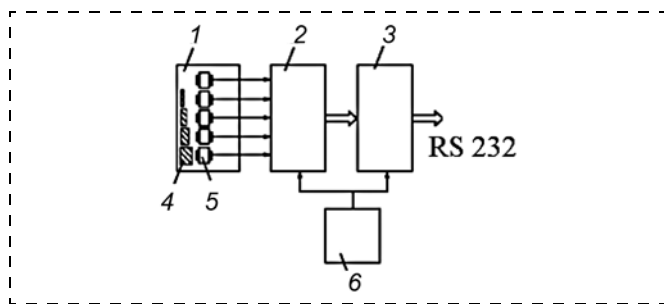


Рис. 3. Функциональная схема спектрометра КИ на основе алмазных ДИИ

рукции селективного фильтра и т. п. Описание конструктивно-технологических решений и примеров построения *многодетекторной системы* приведены в работах [11, 12, 14, 15, 17].

ДИИ многодетекторной системы конструктивно объединены в радиоэлектронный модуль, который включает submodule питания, управления, сбора/обработки информации, а также интерфейсы передачи информации на периферийные устройства по внутренним интерфейсам и/или с помощью передачи телеметрической информации. Функциональная базовая схема спектрометра КИ на основе алмазных ДИИ показана на рис. 3 [31, 32, 33], где 1 — многодетекторный модуль; 2 — модуль усиления, формирования и первичной обработки информации; 3 — модуль управления и информационного интерфейса; 4 — селективные фильтры; 5 — ЧЭ алмазных ДИИ; 6 — модуль питания.

В условиях реального применения базовые конструктивно-технологические решения многофункциональных блоков диагностики КИ дорабатывали и адаптировали применительно к практическим задачам и требованиям потребителей конечных систем, см., например, работы [16, 17, 31]. Рассмотрим практическую реализацию конструктивно-технологических решений для построения многофункциональной СРК на основе алмазных ДИИ на примере блока селективного регистратора КИ для ракетно-космической техники [16, 23]. На рис. 4 представлен внешний вид блока регистратора КИ, конструкция и компоновка основных узлов которого показана на рис. 5. Корпус прибора (рис. 5, поз. 11) выполнен из алюминиевого сплава, в котором установлено два идентичных спектрометрических submodule (узла) регистрации, один из которых является рабочим, а второй используется в качестве резервного.

Спектрометрический узел (см. рис. 5, поз. 5—7) состоит из платы модуля усиления 7, платы ин-

терфейса модуля цифровой обработки 6, платы модуля питания 5. Алмазные ЧЭ 4 установлены на плате модуля усиления и расположены под коллимационными окнами корпуса. В коллимационные окна установлены селективные фильтры 1, которые обеспечивают разделение КИ по диапазонам. На торцевых сторонах корпуса установлены разъем питания 2 и интерфейсный разъем 10.

В приборе использованы дискретные алмазные ДИИ в виде бескорпусных ЧЭ, аналогичные тем, которые показаны на рис. 1. Конструкция модуля позволяет располагать ЧЭ в непосредственной близости к предусилителям сигнала, чем обеспечивается минимизация шумов электронного тракта усиления и влияния электромагнитных помех. Алмазные ДИИ отличаются друг от друга по конструктивным и функциональным характеристикам, при этом два ЧЭ используются для регистрации суммарного потока электронов, протонов и тяжелых ионов; два ЧЭ — для регистрации низкоэнергетических протонов и электронов (с энергиями более 3 МэВ); два ЧЭ с увеличенной рабочей площадью — для регистрации протонов (с энергиями более 30 МэВ) и тяжелых ионов. Селекция электронов и протонов по энергиям обеспечивается за счет применения алмазных ЧЭ, перед которыми установлены селективные фильтры различной толщины.

Наши расчеты [11, 21] показали, что при использовании данного регистратора КИ статистические погрешности измерения потоков ИИ в различных энергетических диапазонах нахо-

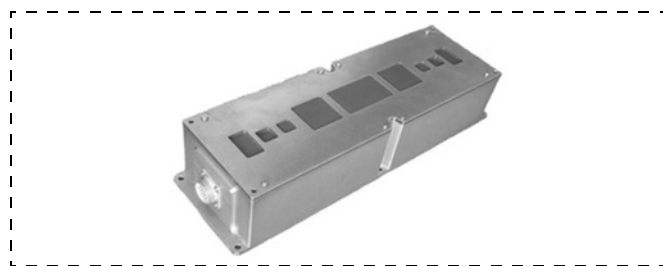


Рис. 4. Фотография селективного регистратора КИ

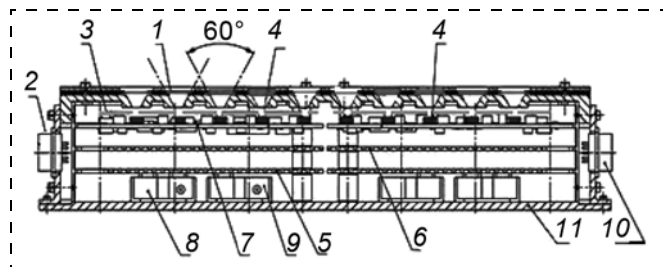


Рис. 5. Конструкция селективного регистратора КИ

дятся в пределах 10 % (при времени измерения от 5 до 10 мин). Экспериментальные проверки конструктивно-технологических решений и аппаратно-программных принципов построения устройства путем сравнения теоретических значений с экспериментальными данными (по скорости счета образца алмазного ДИИ потока бета-частиц от источника ^{90}Sr — ^{90}Y) показали [21], что отклонение расчетных значений скорости счета бета-частиц не превышает 10 % от экспериментальных значений.

На рис. 6—8 (см. четвертую сторону обложки) представлены графики, демонстрирующие селекцию частиц КИ различных типов и энергий, полученные в ходе измерения при использовании набора фильтров [16, 31].

Из представленных на рис. 6—8 графиков видно, что спектры сигналов, получаемые на выходе 1, 2, 3 и 4-го алмазных ЧЭ смещены по энергетической шкале в соответствии с увеличением толщины селективных фильтров. Такое смещение позволяет в каждом канале регистрации фиксировать частицы заданного диапазона энергий. Из графиков также видно, что сигналы от электронов и протонов имеют разные амплитуды, это позволяет разделить эти сигналы между собой с помощью амплитудной дискриминации. Регистрация электронной компоненты КИ в данном блоке выполняется в энергетическом диапазоне 0,2...0,3 МэВ; регистрация протонной компоненты — в энергетическом диапазоне 2...10 МэВ. Для регистрации тяжелых ионов используется 5-й канал регистрации, в котором ионы селективируются с помощью амплитудного отбора в диапазоне 100...1000 МэВ. Амплитудные диапазоны сигналов даны в энергетическом эквиваленте. Поглощенная доза от электронной и протонной компонент и тяжелых ионов космического излучения определяется расчетным путем на основании полученных спектров излучений [14, 17, 18].

Направления применения радиоэлектронных устройств контроля излучений

За последние годы были разработаны и изготовлены радиоэлектронные устройства на основе алмазных ДИИ для контроля различных типов излучений для предприятий ракетно-космической и атомной отраслей промышленности. Активно ведутся разработки радиоэлектронных устройств на основе алмазных детекторов совместно с предприятиями ГК "Ростех" и радиоэлектронного комплекса. Исследования вы-

полняют в тесном взаимодействии с учеными ведущих академических институтов России, с институтами Минобрнауки, включая РТУ МИРЭА, НИУ "МИФИ", МИЭМ НИУ ВШЭ, Новосибирский госуниверситет, НИИЯФ МГУ.

Бортовые радиоэлектронные устройства контроля космического излучения

Растущий интерес к использованию радиоэлектронных бортовых устройств на основе АД для контроля КИ и ИИ связан с рядом причин, включая увеличение длительности эксплуатации — сроков активного существования (САС) изделий РКТ. Ограничение САС связано в том числе с негативным воздействием радиационных факторов на бортовую радиоэлектронную аппаратуру (БРЭА) РКТ, к которым относятся излучения как естественного, так и техногенного происхождения (от ядерных энергетических и двигательных установок космического аппарата (КА).

Проведение непрерывного мониторинга КИ, включающего определение дозовых и спектральных характеристик полей КИ, в том числе на внешней стороне КА, обеспечивает возможность получения информации о динамике изменения поля КИ на орбите КА, что необходимо для расчетов остаточного ресурса КА и САС, плановых сроков замены КА. Мониторинг КИ и ИИ позволяет прогнозировать развитие радиационного воздействия на БРЭА, а также, в случае пилотируемого КА, и воздействие на экипаж. Получаемая информация делает возможным применять меры активного противодействия радиационным нагрузкам, включая перевод части бортовой БРЭА в "спящий" режим, использование мер по дополнительной радиационной защите экипажа и ряд других.

Были разработаны и изготовлены образцы радиоэлектронных устройств на основе АД для контроля параметров КИ, фотографии которого показаны на рис. 9 и 10.

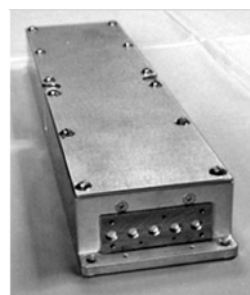


Рис. 9. Блок многофункционального контроля радиационной обстановки

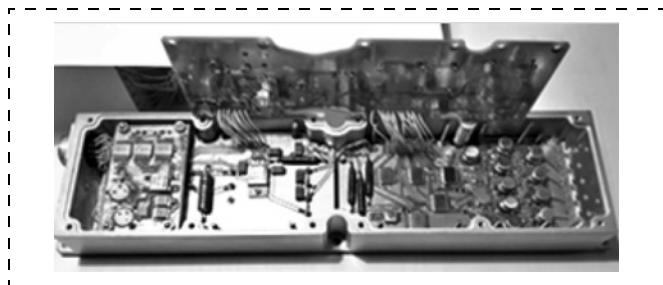


Рис. 10. Фото блока со снятой панелью

Приборный блок предназначен для многофункционального контроля радиационной обстановки, для непрерывного мониторинга плотности потоков частиц КИ на внешней стороне КА, он обеспечивает измерения плотности потоков космических частиц: тяжелых заряженных частиц — ТЗЧ (в пяти поддиапазонах ЛПЭ от 1 до 45 МэВ мг/см^2); электронов в шести поддиапазонах энергии (от 0,1 до 5 МэВ); солнечных космических лучей — СКЛ с энергиями от 10 до 500 МэВ. Блок полностью выполнен на отечественной ЭКБ, без применения зарубежных комплектующих изделий.

Радиоэлектронные устройства контроля космических заряженных частиц

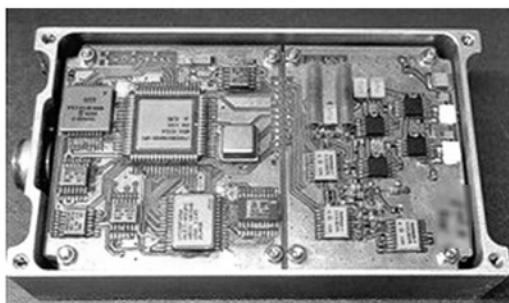
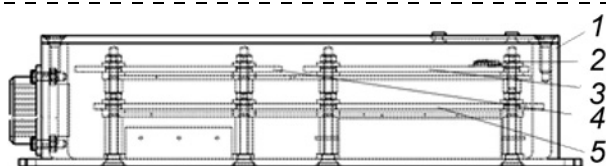
Совместно с АО "РКС" были выполнены исследования по созданию радиоэлектронного устройства контроля КИ (ТЗЧ и СКЛ) — "Бортового сенсора высокоэнергетических частиц с алмазным чувствительным элементом (СВЭЧА)", фотографии которого показаны на рис. 11. На рис. 11 обозначены: 1 — корпус; 2 — алмаз-

ные детекторы; 3 — модуль усиления; 4 — модуль интерфейса; 5 — модуль питания. При создании устройства были использованы результаты экспериментальных и теоретических исследований, полученные в тесном сотрудничестве со специалистами АО "РКС" [13, 36, 37]. Были проведены совместные исследования работы макета сенсора ТЗЧ с алмазным ЧЭ на испытательном стенде Роскосмоса на базе циклотрона У-400М в пучке ионов, ускоренных до энергий вплоть до 500 МэВ. Было установлено [36, 37], что в диапазоне параметров работы сенсора ТЗЧ с алмазным ЧЭ работает в спектрометрическом режиме.

Устройство предназначено для многофункционального контроля параметров радиационной обстановки для перспективных и модернизируемых отечественных КА, при этом измерение потоков ТЗЧ и СКЛ проводят отдельно, по восьми поддиапазонам, погрешность измерений потоков ТЗЧ составляет не более 10 %; измерение потоков протонов осуществлялось отдельно, по семи поддиапазонам энергий (с погрешностью не более 10 %).

Бортовые устройства контроля радиационных факторов для КА серии "Глонасс"

На основе алмазных ДИИ были разработаны и изготовлены опытные образцы блоков типа АДИИ для многофункционального контроля радиационной обстановки и уровня поглощенной дозы снаружи негерметичного приборного отсека КА серии "Глонасс". Фотографии приборных блоков АДИИ показаны на рис. 12. Ис-



а)



б)

Рис. 11. Фото модулей усиления и интерфейса "Бортового сенсора высокоэнергетических частиц с алмазным чувствительным элементом" (а); лабораторно-отрабочные испытания устройства (б)

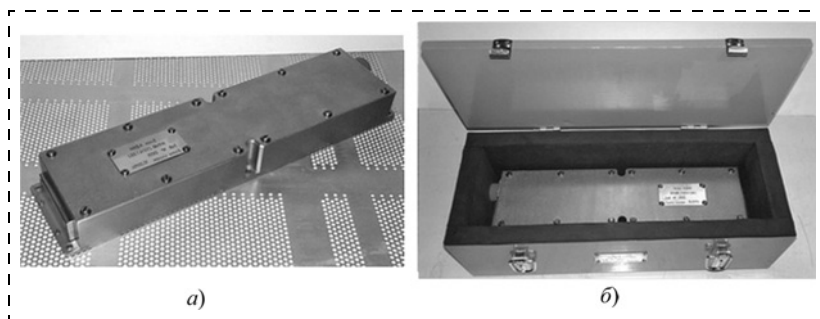


Рис. 12. Фото приборного блока АДИИ для контроля радиационной обстановки на борту КА:

а — внешний вид блока; б — блок в укладочном ящике



Рис. 13. Фотографии двух готовых блоков контроля КИ (а); вид блока в укладочном ящике (б)

пытания опытного образца блока АДИИ были проведены в полях протонного, электронного и гамма-излучения. Получены значения показателей точности измерения мощности поглощенной дозы протонного и бета-излучения, определена радиационная стойкость опытного образца [17]. Приборные блоки АДИИ обеспечивают измерения плотности потоков космических частиц следующих типов: ТЗЧ (в пяти поддиапазонах ЛПЭ); электронов в шести поддиапазонах энергии; СКЛ с энергиями от 10 до 500 МэВ. Масса блока составляет 1,4 кг; энергопотребление — 3,5 Вт; ресурс блоков — не менее 10 лет.

Аналогичные устройства контроля КИ были разработаны для оснащения бортовых диагностических комплексов других КА производства АО "ИСС". Работы проводили в тесном взаимодействии со специалистами Новосибирского государственного университета [20].

Бортовые устройства контроля КИ для перспективного пилотируемого корабля

Завершаются работы по изготовлению спектрометрических блоков многофункционального контроля параметров радиационной обстановки с использованием алмазных ДИИ для пилоти-

руемого многоразового космического корабля. Работы выполняют с учетом базовых конструктивно-технологических решений по созданию бортового регистратора потоков КИ для перспективных образцов РКТ [15—17]. Изделие представляет собой радиоэлектронную модульную конструкцию, в которой используется комплекс АД, предназначенный для селективной регистрации различных типов (компонентов) КИ. В число регистрируемых компонентов входят потоки электронов, протонов и тяжелых заряженных частиц. На рис. 13 показаны фотографии изготовленных спектрометрических блоков потоков КИ [38]. Разработанные совместно со специалистами РКК "Энергия" конструктивные и технологические решения позволили создать первый в стране образец селективного регистратора КИ на основе алмазных ДИИ для непрерывного контроля радиационной обстановки на внешней стороне КА. Разработанные совместно со специалистами РКК "Энергия" конструктивные и технологические решения позволили создать первый в стране образец селективного регистратора КИ на основе алмазных ДИИ для непрерывного контроля радиационной обстановки на внешней стороне пилотируемого многоразового космического корабля.

Характеристики регистрируемых блоком типов КИ приведены в таблице.

Масса и габаритные размеры блока составляют 3,5 кг и 64 × 90 × 300 мм, соответственно. Напряжение питания от 23 до 34 В. Потребляемая мощность не более 5,3 Вт. В блоке предусмотрено двойное резервирование. Ресурс блока — 15 лет. Блок полностью выполнен на отечественной ЭКБ, без применения зарубежных комплектующих изделий. Спектрометр формирует измерительные данные (ИД) о параметрах пото-

Характеристики КИ, регистрируемые блоком

Вид излучения	Диапазон энергий, МэВ			
Протоны	10...25	25...50	50...100	100...200
Электроны	0,2...0,8	0,8...1,6	1,6...3,0	3,0...5,0
ТЗЧ	Диапазон ЛПЭ, МэВ (мг/см ²)			
	1...3	3...10	10...30	Более 30



Рис. 14. Фотографии спектрометрического блока с защитной крышкой (а) и блока, подключенного к контрольной аппаратуре (б)

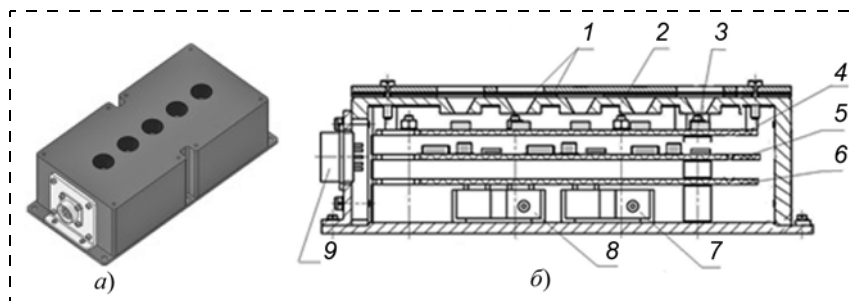


Рис. 15. Внешний вид блока МРБ (фрагмент 3D-модели) (а) и вариант компоновки и конструктивного исполнения блока МРБ (б)

ков КИ, которые передаются в блок обработки данных. Время накопления ИД (время измерения) составляет от 1 до 10 мин. Объем ИД одного измерения — 70 байт. Интерфейс передачи данных и управления работой блока — типа RS-422. По устойчивости к внешним воздействиям блок соответствует классу 5, группа 5.3 ГОСТ РВ 20.39.304.

Фотографии разработанных и изготовленных блоков показаны на рис. 14. Ресурс блока составляет 15 лет. При изготовлении данных устройств использовали только отечественные комплектующие изделия и ЭКБ. Работы ведутся во взаимодействии со специалистами ПАО РКК "Энергия", НИУ МИФИ, а также ГНЦ РФ — ИМБП РАН.

Устройства контроля радиационных факторов для перспективных КА с ЯЭУ

Актуальным направлением использования АД и приборов на их основе является создание БРЭА контроля радиационных факторов для перспективных КА и систем РКТ, использующих ядерные энергетические и двигательные установки (ЯЭУ/ЯЭДУ) [24, 25]. Такие системы разрабатывают у нас в стране, они предназначены для решения различных задач, включая создание космического аппарата, выводимого на

геостационарную орбиту межорбитальным буксиром с ЯЭУ [26]. Надежное функционирование таких КА требует построения комплексной радиационной защиты бортовой электроники КА от суммарного воздействия излучения ЯЭУ и ионизирующего излучения космического пространства [26], а также влияющего на жизнедеятельность экипажей перспективных пилотируемых КА, оснащенных такими установками. Внедрение в состав БРЭА КА с ЯЭУ систем контроля ИИ сможет обеспечить многофункциональную диагностику потоков внешнего КИ и радиационных потоков от ЯЭУ КА. Исследования в данном направлении проводили в координации со специалистами НИИЯФ МГУ им. Д. В. Скобелцына, РТУ МИРЭА, другими предприятиями ракетно-космической и атомной отраслей про-

мышленности. Нами был разработан (эскизный проект) блок контроля ИИ на основе АД, обозначенный как "Монитор радиационной обстановки борта" (МРБ), который может быть использован для контроля радиационной обстановки на перспективных КА с ЯЭУ.

На рис. 15 представлены изображения внешнего вида МРБ (фрагмент 3D-модели), а также вариант компоновки и конструктивного исполнения.

На рис. 15, б обозначены: 1 — фильтры селективные; 2 — коллиматоры алмазных ЧЭ; 3 — алмазные ЧЭ; 5 — плата информационного модуля; 6 — плата модуля питания; 7 — модуль фильтра; 8 — модуль питания; 9 — разъем питания/интерфейса. МРБ должен обеспечивать измерение суммарной поглощенной дозы от воздействия КИ и техногенного излучения ЯЭУ в диапазоне от 0 до 10^6 рад; измерение флюенса нейтронов от ЯЭУ в диапазоне до $1 \cdot 10^{12}$ н/см². Масса МРБ — менее 2 кг, потребляемая мощность менее 3 Вт. МРБ обеспечивает передачу в бортовой вычислительный компьютер данных о поглощенной дозе, потоке нейтронов и другую информацию.

Заключение

Приведенная информация показывает, что алмазные детекторы ИИ активно используют

при создании радиоэлектронных устройств и систем контроля ионизирующих и космических излучений. Использование алмазных ДИИ в совокупности с разработанными конструктивно-технологическими решениями и аппаратно-программными принципами построения таких устройств позволяют обеспечить создание образцов бортовой РЭА для контроля ИИ и КИ, отличающихся небольшими габаритными размерами, высоким быстродействием, стойкостью к радиационным, механическим и температурным воздействиям.

Дальнейшее развитие исследований и разработок в этих направлениях, помимо решения целевых задач радиоэлектронного приборостроения, будет стимулировать технологический прогресс в различных направлениях твердотельной электроники, включая материаловедение и физику широкозонных полупроводников [2, 40], развитие экспериментальной и технологической базы синтеза алмазных объемных кристаллов и многослойных структур [10], создание новых технологий ионно-плазменной обработки полупроводников и ряд других.

Список литературы

1. **Bergonzo P., Jackman R. B.** Semiconductors and Semimetals. Ch. 6. Diamond-based radiation and photon detectors // 2004. Vol. 77, P. 197—309. doi: 10.1016/S0080-8784(04)80018-8.
2. **Хмельницкий Р. А., Талипов Н. Х., Чучева Г. В.** Синтетический алмаз для электроники и оптики / М.: Издательство ИКАР, 2017. 228 стр., илл. ISBN 978-5-7974-0558-0.
3. **Алтухов А. А.** Сравнительные исследования детекторов ионизирующих излучений, изготовленных на основе алмазных пластин различного типа // Нано- и Микросистемная техника. 2021. Т. 23. № 2. С. 68—75. doi: 10.17587/nmst.23.68-75.
4. **Metcalfe A., Fern G. R., Hobson P. R.** [et al.] Development of high temperature, radiation hard detectors based on diamond // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. Vol. 845, 11 February 2017, P. 128—131. doi: 10.1016/j.nima.2016.06.091.
5. **Bossini E. and Minafra N.** Diamond Detectors for Timing Measurements in High Energy Physics // Front. Phys. (2020) 8:248. doi: 10.3389/fphy.2020.00248.
6. **Jain D., Nuwad J., Manoj N., Sudarsan V.** Chapter 19. Diamond-Based Radiation Detectors for Applications in Highly Corrosive Solutions and High-Radiation Fields, Editor(s): A. K. Tyagi, S. Banerjee // Materials Under Extreme Conditions, Elsevier, 2017, pp. 683—715, ISBN 9780128013007, doi: 10.1016/B978-0-12-801300-7.00019-X.
7. **Liu Y., Loh C., J. Zhang** [et al] Proton irradiation tests of single crystal diamond detector at CIAE // Nuclear Materials and Energy, Vol. 22, 2020, 100735, ISSN 2352-1791, doi: 10.1016/j.nme.2020.100735.
8. **Barbero M., Bellini V., Belyaev V.** Development of Diamond Tracking Detectors for High Luminosity Experiments at the LHC // CERN/LHCC 2008-005, LHCC-RD-016. Status Report. RD42. Geneva. April 4, 2008.

9. **Артемов К. К., Родионов Н. Б., Амосов В. Н.** [и др.] Разработка конструкции алмазного детектора для алмазного спектрометра нейтральных частиц ИТЭР // Приборы и техника эксперимента. 2019. N. 3. С. 63—68.
10. **Зубарев П. В., Иваненко С. В., Иванова А. А.** [и др.] Цифровой анализатор сигналов алмазного детектора для вертикальной нейтронной камеры ИТЭР // Вестн. Новосибир. гос. ун-та. Серия: Физика. 2014. Т. 9, вып. 3. С. 11—19.
11. **Bolshakov, A. P., Zyablyuk, K. N., Kolyubin, V. A.** [et al.] Thin CVD diamond film detector for slow neutrons with buried graphitic electrode // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2017, 871, p. 142—147.
12. **Rebai M., Fazzi A., Cazzaniga C.** Time-stability of a single-crystal diamond detector for fast neutron beam diagnostic under alpha and neutron irradiation// Diamond and Related Materials. 2015. V. 61. doi: 10.1016/j.diamond.2015.11.002.
13. **Antchev G., Aspell P., Atanassov I.** [TOTEM Collaboration]. Diamond detectors for the TOTEM timing upgrade // J Instrument. (2017). 12:P03007. doi: 10.1088/1748-0221/12/03/p03007.
14. **Басков П. Б., Гавриков И. В., Кадилин В. В.** [и др.] Перспективные детекторы ионизирующих излучений для применения в системах контроля технологических параметров и диагностики оборудования ядерных энергетических установок (ЯЭУ) // Тезисы доклада. Научная сессия НИЯУ МИФИ-2012. (01—04.02.2012). Аннотации докладов в 3 томах, 2012, стр. 95. Издательство: НИЯУ МИФИ (Москва). ISBN 978-5-7262-1625-6.
15. **Wang S., Li D., Xiao Y.** [et al] Review Paper. Diamond Radiation Detector Used for Space Radiation Detection: a State-of-Art Review // Materials Reports 2018, Vol. 32 Issue (9): 1459—1468. doi: 10.11896/j.issn.1005-023X.2018.09.010.
16. **Gonçalves P. S., Pimenta M., Tomić B.** Simulation of Radiation Monitors for Future Space Missions // Astroparticle, Particle and Space Physics, Detectors and Medical Physics Applications, 2006. pp. 475—479. doi: 10.1142/9789812773678_0078.
17. **Алтухов А. А., Герасимов А. О., Львов С. А.** [и др.]. Система радиационного контроля на основе алмазного детектора ионизирующих излучений // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2009. № 12. С. 41—44.
18. **Алтухов А. А., Герасимов А. О., Зяблук К. Н.** [и др.]. Анализатор спектра электронного излучения с алмазным чувствительным элементом // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. Вып. 2. 2010. С. 10—12.
19. **Алтухов А. А., Аняшин В. С., Герасимов А. О.** [и др.] Исследование макета сенсора тяжелых заряженных частиц на основе алмазного чувствительного элемента. // Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции "Радиационная стойкость электронных систем — "Стойкость 2010". С. 217—218.
20. **Zakharchenko K. V., Kaperko A. F., Kolyubin V. A.** [et al.] Spectrometric Diamond Detector of Fluxes of Ionizing Radiation for Space Transportation Systems // Measurement Techniques. V. 58, P. 713—718 (2015).
21. **Afanasyev V., Kaperko A., Kulagin V., Kolyubin V.** Method of Adaptive Filtering in the Problem of Restoring Parameters of Cosmic Radiation // Automation and Remote Control. 2017. Vol. 78. No. 3, pp. 397—412.
22. **Каперко А. Ф., Кулагин В. П.** Интеллектуальные методы и информационные технологии в процессах контроля и управления потоками ионизирующего излучения. Информационные технологии в науке, образовании и управлении (ИТНОУ). 2017. № 2. С. 30—35.
23. **Zakharchenko K. V., Kaperko A. F., Kolyubin V. A.** [et al.] Modeling the Operation of a Sensor Unit in a Monitoring Device for the Parameters of Cosmic Ray Fluxes // Measurement Techniques, 2016, T. 59. N. 8. P. 884—891.

24. Altukhov A. A., Zakharchenko K. V., Ibragimov R. F. [et al.] Calibration of energy scale of the instrumentation of cosmic particles registration based on diamond sensitive elements using neutron radiation // Proceedings of 22th all-Russian science and technology conference "Stoykost'-2019". Lytkarino. Russia. 2019. P. 79–80.
25. Zakharchenko K. V., Altukhov A. A., Ibragimov R. F. [et al.] Characterization of space radiation monitor based on diamond sensitive elements for future interplanetary missions. // The tenth Moscow Solar system symposium 2019. (10 MS-PS-14). P. P. 285–287.
26. Кадилин В. В., Колюбин В. А., Львов С. А. [и др.]. Перспективы применения алмазных детекторов для регистрации заряженных частиц космического излучения // Ядерная физика и инжиниринг. 2014. Т. 5, № 2. С. 138–144.
27. Истратов А. Ю., Захарченко К. В., Каперко А. Ф. [и др.]. Применение нейросетевого подхода к измерениям потоков космического излучения // Измерительная техника, издательство Стандартинформ (М.), 2016, № 3, С. 49–54.
28. Сайт GEANT4: <http://www.geant4.org/geant4/index.html>
29. Алтухов А. А., Балашов С. В., Авдюшкин С. А. [и др.]. Испытания опытного образца блока регистрации космических частиц на основе алмазных чувствительных элементов. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2017. № 4. С. 20–25.
30. Altukhov A. A., Zaharchenko K. V., Kolyubin V. A. [et al.] Selective detector of cosmic particles based on diamond sensitive elements // International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2015) IOP Publishing. Journal of Physics: Conference Series 675 (2016) 042027 doi: 10.1088/1742-6596/675/4/042027.
31. Ibragimov R. F., Kadilin V. V., Tyurin E. M. [et al.] Experimental checking results of mathematical modeling of the radiation environment sensor based on diamond detectors. 2017 J. Phys.: Conf. Ser. 798. 012180. doi: 10.1088/1742-6596/798/1/012180.
32. Алтухов А. А., Анашин В. С., Зяблюк К. Н. [и др.]. Экспериментальные исследования алмазного детектора в пучке циклотрона тяжелых ионов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. ISSN: 1997-2830. 2011. Вып. 1. С. 56–58.
33. Алтухов А. А., Анашин В. С., Емельянов В. В. [и др.]. Исследования алмазного спектрометра в пучке ускоренных тяжелых ионов канала В5 циклотрона У-400М // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2013. Вып. 1. С. 85–86.
34. Сайт НГУ: <http://www.sib-science.info/ru/heis/novosibirskie-uchenyie-11042017>
35. Сайт АО "ЦНИТИ "Техномаш": <https://cniti-technomash.ru/nashi-specialisty-sozdali-radiacionno-stojkuju-apparaturu-dlja-kontrolja-kosmicheskogo-izlucheniya/>
36. Ярыгин В. И. Ядерная энергетика прямого преобразования в космических миссиях XXI. // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2013. № 2. С. 5–20.
37. Высотемпературная ядерная энергетика. Уникальные разработки и экспериментальная база Курчатовского института. Под общей редакцией академика РАН Пономарева—Степнова Н. Н. Москва, ИздАт, 2008, 192 с. илл. 11. ISBN 978-5-86656-236-7.
38. Гончаров В. В., Загорков А. Н., Михеев О. В., Ошкин А. Е. Оптимизация массовых характеристик радиационной защиты аппаратуры космического аппарата связи, выводимого на геостационарную орбиту межорбитальным буксиром с силовой энергетической установкой // Научно-технический сборник "Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру". 2020. Вып. 1. С. 44–48.
39. Алтухов А. А., Кулагин В. П., Чумаченко Е. Н. [и др.]. Новые структуры на основе алмазных детекторов для космических транспортных систем // Авиакосмические технологии 210 (АКТ-2014): Труды XV Всероссийской научно-технической конференции. — Воронеж. 2014, С. 7–9.

A. A. Altukhov, Senior Researcher, e-mail: uai-co@yandex.ru,
 "Industrial-Technological Center "Uralalmazinvest" Ltd., 4, Ivan Franko Str.,
 Moscow, 121108, Russian Federation
altuhov_a@mirea.ru, Deputy Director, "Microsensorics" Engineering Center of RTU MIREA, 86
 Vernadsky Avenue, Moscow 119571, Russian Federation

Corresponding author:

Altukhov Andrey A., Senior Researcher, "Industrial-technological center "Uralalmazinvest" Ltd., 4, Moscow, 121108, Russian Federation. e-mail: uai-co@yandex.ru

Radio-Electronic Modules and Radiation Monitoring Systems Based on Diamond Detectors

Received on July 28, 2021

Accepted on August 13, 2021

An overview of the current state and promising areas of application of semiconductor diamond detectors for creating radio-electronic monitoring systems for ionizing studies based on them is given. The main attention is paid to the creation of multifunctional space radiation monitoring systems that combine a set of diamond detectors and hardware and software tools that provide diagnostics of dose and spectrometric characteristics of various types of radiation. The data on the developed and manufactured samples of blocks and on-board control systems for cosmic and ionizing radiation are presented.

The overview shows that diamond ionizing radiation detectors (IRD) are actively used in the creation of radio-electronic devices and monitoring systems for ionizing and cosmic radiation. The use of diamond IRD in combination with the developed design and technological solutions, hardware and software principles for the construction of such devices make it possible to create samples of on-board avionics for separate measurement of the parameters of cosmic radiation and neutron fluxes, gamma radiation, characterized by small dimensions, high speed, hardness to radiation, mechanical and temperature influences.

Multifunctional systems for ionizing radiation detection based on diamond detectors use the accumulated experience of successful development and application of discrete diamond IRD allowed us to start creating multifunctional modules and radiation monitoring systems (RMS) based on them. The creation of such devices allows us to practically demonstrate the traditional advantages of discrete DIRD (high speed, the highest radiation hardness, high resistance to mechanical and thermal influences) in on-board equipment with smaller mass dimensions.

The main structural and technological solutions that ensure the creation and effective functioning of RMS based on diamond IRD are the following:

- (1) separation the IR flow into energy sub-bands;
- (2) the use of software and hardware processing of data received from the IRD;
- (3) using a multi-detector system.

Further development of research and development in these areas, in addition to solving the target tasks of radio-electronic instrumentation, will stimulate technological progress in various areas of solid-state electronics, including materials science and physics of wide-band semiconductors, the development of an experimental and technological base for the synthesis of diamond bulk crystals and multilayer structures, the creation of new technologies for ion-plasma processing of semiconductors, and a number of others.

Keywords: diamond, semiconductor detectors, spectrometric detectors, ionizing radiation, cosmic radiation, electrons, protons, heavy charged particles, radiation hardness

For citation:

Altukhov A. A. Radio-Electronic Modules and Radiation Monitoring Systems Based on Diamond Detectors, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 5, pp. 266—276.

DOI: 10.17587/nmst.23.266-276

References

1. Bergonzo P., Jackman R. B. *Semiconductors and Semimetals, Ch. 6 Diamond-based radiation and photon detectors*, 2004, v. 77, pp. 197—309. doi: 10.1016/s0080-8784(04)80018-8
2. Khmelnskiy R. A., Talipov N. H., Chucheva G. V. *Synthetic diamond for electronics and optics*, Moscow: IKAR Publishing House, 2017, 228 p., ISBN 978-5-7974-0558-0
3. Altukhov A. A. Comparative studies of ionizing radiation detectors made on the basis of diamond plates of various types. *Nano and Microsystem technology*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 68—75. doi: 10.17587/nmst.23.68-75
4. Metcalfe A., Fern G. R., Hobson P. R., Ireland T., Salimian A., Silver J., Smith D. R., Lefeuvre G., Saengerd R. Development of high temperature, radiation hard detectors based on diamond, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 845, 11 february 2017, p.p. 128—131. doi: 10.1016/j.nima.2016.06.091
5. Bossini E. and Minafra N. Diamond Detectors for Timing Measurements in High Energy Physics, *Front. Phys.* (2020) 8:248. doi: 10.3389/fphy.2020.00248/
6. Jain D., J. Nuwad, N. Manoj, Sudarsan V. Chapter 19. *Diamond-Based Radiation Detectors for Applications in Highly Corrosive Solutions and High-Radiation Fields*, Editor(s): A. K. Tyagi, S. Banerjee, Materials Under Extreme Conditions, Elsevier, 2017, p.p. 683—715, ISBN 9780128013007, doi: 10.1016/B978-0-12-801300-7.00019-X.
7. Liu Y., Loh C., J. Zhang, Wu F., Qi M., Hei L., Lv F., Lv Y., Ge T., Li Y., Fu Z. Proton irradiation tests of single crystal diamond detector at CIAE, *Nuclear Materials and Energy*, vol. 22, 2020, 100735, ISSN 2352-1791, doi: 10.1016/j.nme.2020.100735.
8. Barbero M., Bellini V., Belyaev V. Development of Diamond Tracking Detectors for High Luminosity Experiments at the LHC, *CERN/LHCC 2008-005, LHCC-RD-016. Status Report, RD42*, Geneva, April 4, 2008.
9. Artemev K. K., Amosov V. N., Rodionov N. B., Krasilnikov V. A., Meschaninov S. A., Rodionova V. P., Kedrov I. V., Kuzmin E. G., Petrov S. Y. Development of a diamond detector for the ITER diamond neutral-particle spectrometer. *Instruments and Experimental Techniques*, 2019. vol. 62. no. 3. p.p. 360—365. doi: 10.1134/s0032816219020186
10. Zubarev P. V., Ivanenko S. V., Ivanova A. A., Kvashnin A. N., Kotel'nikov A. I., Puryga E. A., Hil'chenko A. D., Shvyrev V. G. Цифровой анализатор сигналов алмазного детектора для вертикальной нейтронной камеры ИТЖР, *Vestn. Novosib. gos. un-ta. Seriya: Fizika*, 2014, vol. 9, no. 3, pp. 11—19 (in Russian).
11. Bolshakov A. P., Zyablyuk K. N., Kolyubin V. A., Dravin V. A., Khmelnskiy R. A., Nedosekin P. G., Pashentsev V. N., Tyurin E. M., Ralchenko V. G. Thin CVD diamond film detector for slow neutrons with buried graphitic electrode, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2017, vol. 871, pp. 142—147.
12. Rebai M., Fazzi A., Cazzaniga C. Time-stability of a single-crystal diamond detector for fast neutron beam diagnostic under alpha and neutron irradiation, *Diamond and Related Materials*, 2015, vol. 61. doi: 10.1016/j.diamond.2015.11.002
13. Antchev G., Aspell P., Atanasov I., [TOTEM Collaboration]. Diamond detectors for the TOTEM timing upgrade. *J. Instrument.* (2017), 12:p03007. doi: 10.1088/1748-0221/12/03/p03007
14. Baskov P. B., Gavrikov I. V., Kadilin V. V., Koljubin V. A., Tjurin E. M., Hrunov V. S., Chebyshov S. B., Jurov V. N. Перспективные детекторы ионизирующего излучения для применения в системах контроля технологических параметров и диагностики оборудования ядерных энергетических установок (JaJeU), *Tezisy doklada. Nauchnaya sessiya NIJaU MIFI-2012, (01—04.02.2012), Annotacii dokladov v 3 tomah*, 2012, pp. 95. Izdatel'stvo: NIJaU MIFI (Moskva). ISBN 978-5-7262-1625-6. (in Russian).
15. Wang S., Li D., Xiao Y., Yang Z., Li J., Hao J., Yang C. Review Paper. Diamond Radiation Detector Used for Space Radiation Detection: a State-of-Art Review. *Materials Reports*, 2018, vol. 32, issue (9), pp. 1459—1468. doi: 10.11896/j.jissn.1005-023X.2018.09.010
16. Gonçalves P. S., Pimenta M., Tomić B., Simulation of Radiation Monitors for Future Space Missions. *Astroparticle*,

Particle and Space Physics, Detectors and Medical Physics Applications, 2006. pp. 475–479. doi: 10.1142/9789812773678_0078

17. Altuhov A. A., Gerasimov A. O., L'vov S. A., Sitnikov M. G. Sistema radiacionnogo kontrolja na osnove almaznogo detektora ionizirujushhih izluchenij, *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2009, no. 12, pp. 41–44 (in Russian).

18. Altuhov A. A., Gerasimov A. O., Zjabljuk K. N., Koljubin V. A., L'vov S. A., Sitnikov M. G. Analizator spektra jelektronnogo izlucheniya s almaznym chuvstvitel'nyim jelementom, *Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Serija: Fizika radiacionnogo vozdejstviya na radioelektronnuju apparaturu*, vol. 2, 2010, pp. 10–12 (in Russian).

19. Altuhov A. A., Anashin V. S., Gerasimov A. O., Zjabljuk K. N., Koljubin V. A., L'vov S. A., Sitnikov M. G., Skuratov V. A. Issledovanie maketa sensora tjazhelyh zarjzhennyh chastic na osnove almaznogo chuvstvitel'nogo jelementa, *Sbornik nauchnyh trudov Vserossijskoj nauchnoj konferencii "Radiacionnaja stojkost' jelektronnyh sistem — "Stojkost' 2010"*, pp. 217–218 (in Russian).

20. Zakharchenko K. V., Kaperko A. F., Kolyubin V. A., Kulagin V. P., L'vov S. A., Nedosekin P. G., Chumachenko E. N. Spectrometric Diamond Detector of Fluxes of Ionizing Radiation for Space Transportation Systems, *Measurement Techniques*, vol. 58, pp. 713–718 (2015).

21. Afanasiev V., Kaperko A., Kulagin V., Kolyubin V. Method of Adaptive Filtering in the Problem of Restoring Parameters of Cosmic Radiation, *Automation and Remote Control*, 2017, vol. 78, no. 3, pp. 397–412.

22. Kaperko A. F., Kulagin V. P. Intellekturnye metody i informacionnye tehnologii v processah kontrolja i upravleniya potokami ionizirujushhego izlucheniya, *Informacionnye tehnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii (ITNOU)*, 2017, no. 2, pp. 30–35 (in Russian).

23. Zakharchenko K. V., Kaperko A. F., Kolyubin V. A., Kulagin V. P., L'vov S. A., Nedosekin P. G. Modeling the Operation of a Sensor Unit in a Monitoring Device for the Parameters of Cosmic Ray Fluxes, *Measurement Techniques*, 2016, vol. 59, no. 8, pp. 884–891.

24. Altukhov A. A., Zakharchenko K. V., Ibragimov R. F., Kolyubin V. A., Lvov S. A., Tyurin E. M. Calibration of energy scale of the instrumentation of cosmic particles registration based on diamond sensitive elements using neutron radiation, *Proceedings of 22th all-Russian science and technology conference "Stojkost'-2019". Lytkarino. Russia*, 2019, pp. 79–80.

25. Zakharchenko K. V., Altukhov A. A., Ibragimov R. F., Kolyubin V. A., Lvov S. A., Tyurin E. M. Characterization of space radiation monitor based on diamond sensitive elements for future interplanetary missions, *The tenth Moscow Solar system symposium 2019. (10 MS-PS-14)*, pp. 285–287.

26. Kadilin V. V., Koljubin V. A., L'vov S. A., Nedosekin P. G., Idalov V. A., Tyurin E. M., Kolesnikov S. V., Samosadnyj V. T. Perspektivy primeneniya almaznyh detektorov dlja registracii zarjzhennyh chastic kosmicheskogo izlucheniya, *Jadernaja fizika i inzhiniring*, 2014, vol. 5, no. 2, pp. 138–144. (in Russian).

27. Istratov A. Ju., Zaharchenko K. V., Kaperko A. F., Koljubin V. A., Kulagin V. P., Kurochkin R. I. Primenenie nejrosetevogo podhoda k izmerenijam potokov kosmicheskogo izlucheniya, *Izmeritel'naja tehnika, izdatel'stvo Standartinform (M.)*, 2016, no. 3, pp. 49–54. (in Russian).

28. Web site of GEANT4: <http://www.geant4.org/geant4/index.html>

29. Altuhov A. A., Balashov S. V., Avdjushkin S. A., Tihomirov R. E., Derevjanko Ju. B., Zaharchenko K. V., Koljubin V. A., L'vov S. A., Nedosekin P. G. Ispytaniya opytnogo obrazca bloka registracii kosmicheskikh chastic na osnove almaznyh chuvstvitel'nyh jelementov, *Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Serija: Fizika radiacionnogo vozdejstviya na radioelektronnuju apparaturu*, 2017, no. 4, pp. 20–25. (in Russian).

30. Altukhov A. A., Zaharchenko K. V., Kolyubin V. A., Lvov S. A., Nedosekin P. G., Tyurin E. M., Ibragimov R. F., Kadilin V. V., Nikolaev I. V. Selective detector of cosmic particles based on diamond sensitive elements, *International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2015) IOP Publishing. Journal of Physics: Conference Series*, 675 (2016), 042027 doi:10.1088/1742-6596/675/4/042027.

31. Ibragimov R. F., Kadilin V. V., Tyurin E. M., Gladchenkov E. V., Kolyubin V. A., Nedosekin P. G., Zaharchenko K. V. Experimental checking results of mathematical modeling of the radiation environment sensor based on diamond detectors., *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2017, 798. 012180. doi: 10.1088/1742-6596/798/1/012180.

32. Altuhov A. A., Anashin V. S., Zjabljuk K. N., Koljubin V. A., L'vov S. A., Sitnikov M. G., Skuratov V. A. Jeksperimental'nye issledovaniya almaznogo detektora v puchke ciklotrona tjazhelyh ionov, *Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Serija: fizika radiacionnogo vozdejstviya na radioelektronnuju apparaturu*, ISSN: 1997-2830. 2011. vol. 1, pp. 56–58. (in Russian).

33. Altuhov A. A., Anashin V. S., Emel'janov V. V., Kozjukov A. E., Koljubin V. A., L'vov S. A., Nedosekin P. G., Sitnikov M. G., Skuratov V. A. Issledovaniya almaznogo spektrometra v puchke uskorenyh tjazhelyh ionov kanala V5 ciklotrona U-400M, *Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Serija: Fizika radiacionnogo vozdejstviya na radioelektronnuju apparaturu*, 2013, vol. 1, pp. 85–86. (in Russian).

34. Web site of Novosibirsk University: <http://www.sib-science.info/ru/heis/novosibirskie-uchenye-11042017>

35. Web site of JSC CNITI "Technomash" <https://cniti-technomash.ru/nashi-specialisty-sozdali-radiacionno-stojkuju-apparaturu-dlja-kontrolja-kosmicheskogo-izlucheniya/>

36. Jarygin V. I. Jadernaja jenergetika prjamogo preobrazovaniya v kosmicheskikh missijah XXI, *Izvestija vuzov. Jadernaja jenergetika*, 2013, no. 2, pp. 5–20. (in Russian).

37. Vysokotemperaturnaja jadernaja jenergetika. Unikal'nye razrabotki i jeksperimental'naja baza Kurchatovskogo instituta. Pod obshhej redakciej akademika RAN Ponomareva-Stepnova N. N. *Moskva, Izdat.*, 2008, 192 p., ill. 11, ISBN 978-5-86656-236-7. (in Russian).

38. Goncharov V. V., Zagorkov A. N., Miheev O. V., Oshkin A. E. Optimizacija massovyh harakteristik radiacionnoj zashity apparatury kosmicheskogo apparata svyazi, vyvodimogo na geostacionarnuju orbitu mezhorbital'nym buksirov s silovoj jenergeticheskoj ustanovkoj, *Nauchno-tehnicheskij sbornik "Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Serija: Fizika radiacionnogo vozdejstviya na radioelektronnuju apparaturu"*, 2020, vol. 1, pp. 44–48. (in Russian).

39. Altuhov A. A., Kulagin V. P., Chumachenko E. N., L'vov S. A., Nedosekin P. G. Novye struktury na osnove almaznyh detektorov dlja kosmicheskikh transportnyh system, *Aviakosmicheskie tehnologii 210 (AKT-2014): Trudy XV Vserossijskoj nauchno-tehnicheskij konferencii, Voronezh*, 2014, pp. 7–9. (in Russian).

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, ул. Матросская Тишина, д. 23, стр. 2, оф. 45. Телефон редакции журнала 8(499) 270-1652. E-mail: nmst@novtex.ru
Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Технический редактор Т. А. Шацкая. Корректор Е. В. Комиссарова.

Сдано в набор 20.08.2021. Подписано в печать 27.09.2021. Формат 60×88 1/8. Заказ МС521. Цена договорная
Оригинал-макет ООО «Авансд солюшнз». Отпечатано в ООО «Авансд солюшнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Рисунки к статье И.Л. Борисенкова, К.Е. Воронова, Г.И. Леоновича, М.П. Калаева, А.М. Телегина

«СЕНСОРНАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ ВНУТРИВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК И ИНТЕРРОГАТОРА СО СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ»

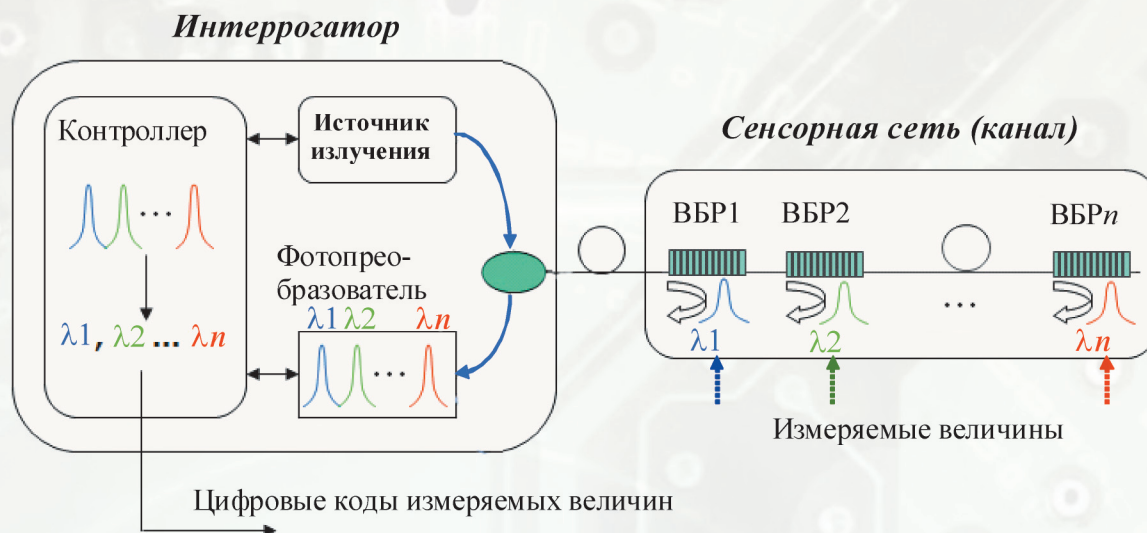


Рис. 2. Фрагмент сенсорной сети на ВБР

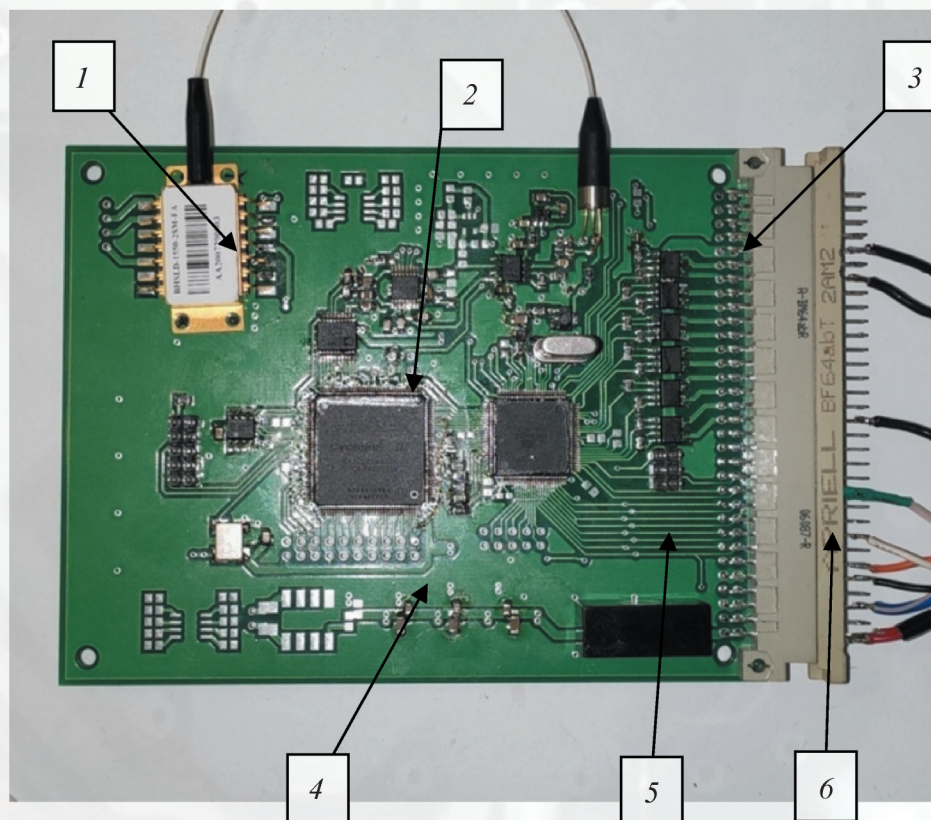


Рис. 5. Общий вид базового модуля:

1 – лазер; 2 – АЦП; 3 – фотоприемник; 4 – FPGA; 5 – MCU; 6 – силовые ключи

Рисунок к статье В. Ф. Лукичева, И. И. Амирова, И. В. Уварова, Камрана Кешаварздивкоаи,
Д. А. Воротынцева, Д. С. Серегина, К. А. Воротилова

«ИЗГОТОВЛЕНИЕ И РЕЗОНАНСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ PZT-КАНТИЛЕВЕРОВ»

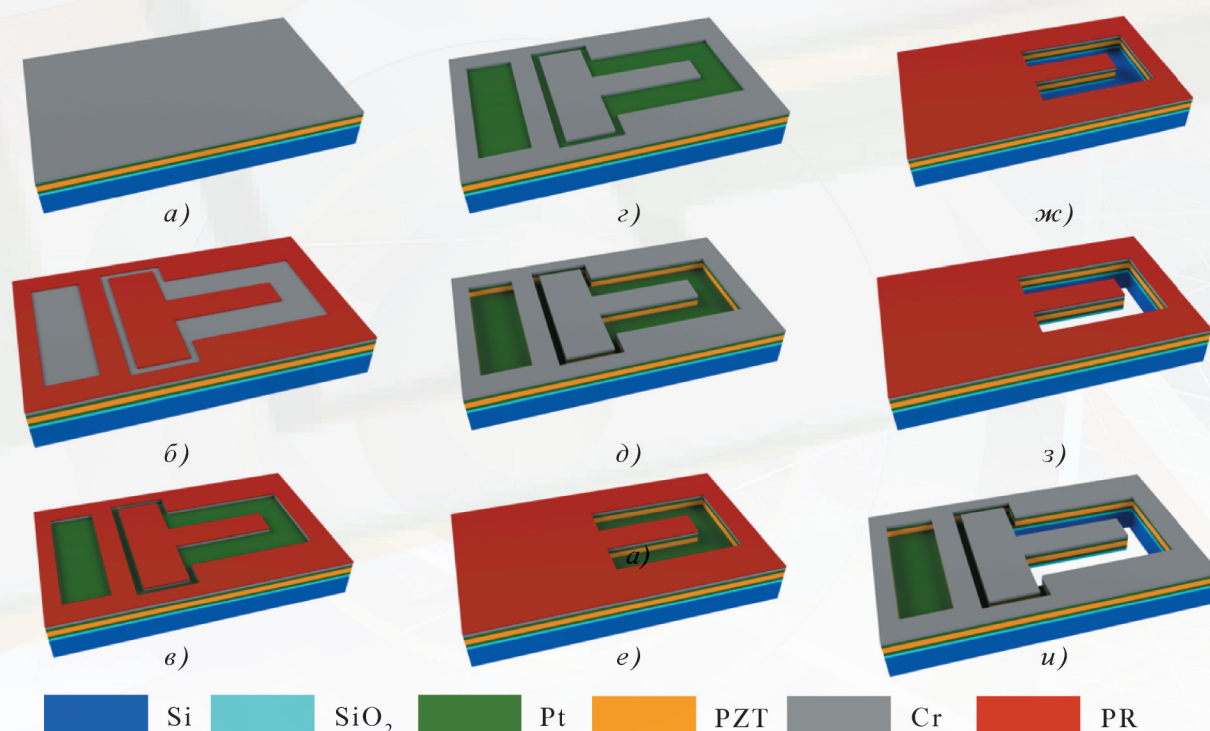


Рис. 4. Основные этапы процесса изготовления кантилеверов

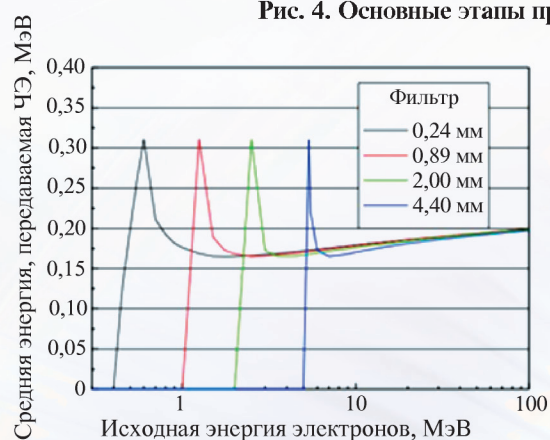


Рис. 6. Графики селекции электронов КИ

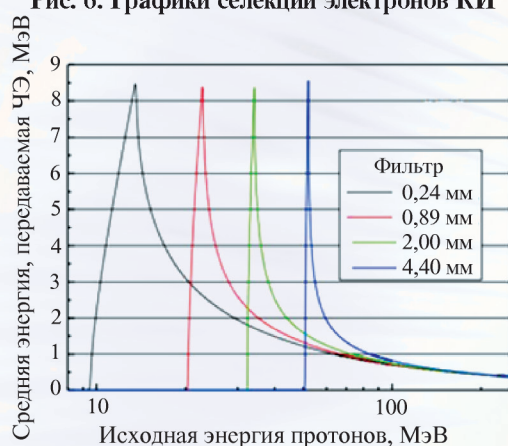


Рис. 7. Графики селекции протонов КИ

Рисунки к статье А. А. Алтухова

«РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ МОДУЛИ И СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ОСНОВЕ АЛМАЗНЫХ ДЕТЕКТОРОВ»

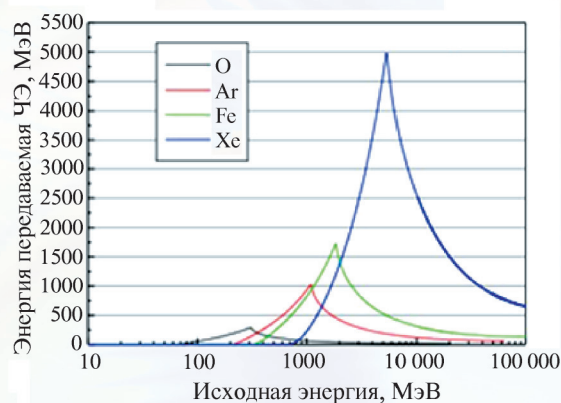


Рис. 8. Графики селекции ТЗЧ в составе КИ