

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ ИНФОРМАТИЗАЦИИ
СОЮЗ МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ, ИННОВАЦИОННЫХ
И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РЯЗАНСКОЙ ОБЛАСТИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ В.Ф. УТКИНА

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ

СТНО-2022

**V МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-
ТЕХНИЧЕСКИЙ ФОРУМ**

Сборник трудов

Том 2

Рязань
Book Jet
2022

УДК 004 + 001.1 + 681.2+ 681.2+ 681.3+681.5
С 568

Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2022 [текст]: сб. тр. V международн. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.2./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2022.

ISBN 978-5-7722-0301-9

Т.2: – 166 с.,: ил.

ISBN 978-5-7722-0301-9

Сборник включает труды участников V Международного научно-технического форума «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2022.

В сборнике освещаются вопросы математического моделирования, новых технологий в радиотехнике, телекоммуникациях, электротехнике и радиоэлектронике, вопросы полупроводниковой наноэлектроники, приборостроения, лазерной, микроволновой техники, силовой промышленной электроники, новые технологии в измерительной технике и системах, биомедицинских системах, алгоритмическое и программное обеспечение вычислительной техники, вычислительных сетей и комплексов, вопросы систем автоматизированного проектирования, обработки изображений и управления в технических системах, перспективные технологии в машиностроительном и нефтехимическом производствах, новые технологии и методики в высшем образовании, в т.ч. вопросы гуманитарной и физико-математической подготовки студентов, обучения их иностранным языкам, перспективные технологии электронного обучения, в том числе, дистанционного, вопросы экономики, управления предприятиями и персоналом, менеджмента, а также вопросы гуманитарной сферы.

Авторская позиция и стилистические особенности сохранены.

УДК 004 + 001.1 + 681.2+ 681.2+ 681.3+681.5

ISBN 978-5-7722-0301-9

ISBN 978-5-7722-0301-9

© Рязанский государственный
радиотехнический университет, 2022

ИНФОРМАЦИЯ О V МЕЖДУНАРОДНОМ ФОРУМЕ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» СТНО-2022

V Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2022 состоялся 02.03.2022-04.03.2022 в г. Рязань в Рязанском государственном радиотехническом университете имени В.Ф. Уткина.

В рамках форума «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2022 состоялась работа четырех Международных научно-технических конференций:

«Современные технологии в науке и образовании. Радиотехника и электроника», секции

- Радиотехнические системы и устройства;
- Телекоммуникационные системы и устройства;
- Цифровые информационные технологии реального времени;
- Промышленная силовая электроника, электроэнергетика и электроснабжение;
- Физика полупроводников, микро- и наноэлектроника;
- Микроволновая, оптическая и квантовая электроника;
- Актуальные задачи химических технологий;

«Современные технологии в науке и образовании. Вычислительная техника и автоматизированные системы», секции

- Алгоритмическое и программное обеспечение вычислительных систем и сетей;
- ЭВМ и системы;
- Системы автоматизированного проектирования;
- Информационные системы и защита информации;
- Математические методы в научных исследованиях;
- Обработка изображений и управление в технических системах;
- Геоинформационные и космические технологии;
- Автоматизация производственно-технологических процессов в приборо- и машиностроении;

- Информационно-измерительные устройства и системы в технике и медицине.

Стандартизация и управление качеством;

- Информационные системы и технологии;

«Современные технологии в науке и образовании. Экономика и управление», секции;

- Современные технологии государственного и муниципального управления;
- Экономика, менеджмент и организация производства;
- Управление персоналом;
- Бухгалтерский учет, анализ и аудит;
- Экономическая безопасность;
- Внешнеэкономическая деятельность;

«Современные технологии в науке и образовании. Новые технологии и методы в высшем образовании», секции

- Современные технологии электронного обучения;
- Иностранный язык в техническом вузе;
- Лингвистика и межкультурная коммуникация;
- Направления и формы гуманитаризации высшего образования и гуманитарная

подготовка студентов;

- Методы преподавания и организация учебного процесса в вузе;
- Физико-математическая подготовка студентов;
- Особенности военного образования на современном этапе.

Организационный комитет Форума:

Чиркин М.В., ректор, д.ф.-м.н., проф. – председатель

Гусев С.И., проректор по научной работе и инновациям, д.т.н., проф. – зам. председателя;

Бабаян П.В., проректор по учебной работе и информатизации, к.т.н., доц. – зам. председателя;

Миловзоров О.В., зам. начальника управления организации научных исследований, к.т.н, доц. – координатор;

Устинова Л.С., начальник отдела информационного обеспечения – отв. за информационную поддержку;

Трубицына С.Г., вед. инженер – секретарь оргкомитета;

Благодарова И.А., ведущий программист – секретарь оргкомитета;

члены оргкомитета:

Алпатов Б.А., профессор кафедры автоматике и информационных технологий в управлении, д.т.н., проф.;

Богачева О.А., доцент кафедры "Государственное, муниципальное и корпоративное управление", к.полит.н., доц.;

Бухенский К.В., зав. кафедрой высшей математики, к.ф.-м.н., доц.;

Витязев В.В., зав. кафедрой телекоммуникаций и основ радиотехники, д.т.н., проф.;

Дмитриев В.Т., зав. кафедрой радиоуправления и связи, д.т.н., проф.;

Евдокимова Е.Н., зав. кафедрой экономики, менеджмента и организации производства, д.э.н., проф.;

Еремеев В.В., директор НИИ «Фотон», д.т.н., проф.;

Есенина Н.Е., зав. кафедрой иностранных языков, к.п.н., доц.;

Жулев В.И., зав. кафедрой информационно-измерительной и биомедицинской техники, д.т.н., проф.;

Клейносова Н.П., директор центра дистанционного обучения, к.п.н., доц.;

Ключко В.К., профессор кафедры автоматике и информационных технологий в управлении, д.т.н., проф.;

Коваленко В.В., зав. кафедрой химической технологии, к.т.н., доц.;

Корячко В.П., зав. кафедрой систем автоматизированного проектирования вычислительных средств, д.т.н., проф.;

Костров Б.В., зав. кафедрой электронных вычислительных машин, д.т.н., проф.;

Кошелев В.И., зав. кафедрой радиотехнических систем, д.т.н., проф.;

Круглов С.А., зав. кафедрой промышленной электроники, д.т.н., доц.;

Куприна О.Г., доцент кафедры иностранных языков, к.филол.н., доц.;

Ленков М.В., зав. кафедрой автоматизации информационных и технологических процессов, к.т.н., доц.

Литвинов В.Г., зав. кафедрой микро- и наноэлектроники, д.ф.-м.н., доц.;

Лукьянова Г.С., доцент кафедры высшей математики, к.ф.-м.н., доц.;

Меркулов Юрий Аркадьевич, ст. преподаватель кафедры "Государственное, муниципальное и корпоративное управление";

Овечкин Г.В., зав. кафедрой вычислительной и прикладной математики, д.т.н., проф.;

Паршин Ю.Н., зав. кафедрой радиотехнических устройств, д.т.н., проф.;

Перфильев С.В., зав. кафедрой государственного, муниципального и корпоративного управления, д.э.н., проф.;

Пржегорлинский В.Н., зав. кафедрой информационной безопасности, к.т.н., доц.;

Пылькин А.Н., профессор кафедры вычислительной и прикладной математики, д.т.н., проф.;

Рохлина Т.А., доцент кафедры иностранных языков, к.филол.н., доц.;

Серебряков А.Е., зам. зав. кафедрой электронных приборов, к.т.н.;

Соколов А.С., зав. кафедрой истории, философии и права, д.и.н.;

Таганов А.И., профессор кафедры космических технологий, д.т.н., проф.;

Харитонов А.Ю., нач. военного учебного центра, полковник, к.т.н., доц.;

Холопов С.И., декан ф-та автоматике и информационных технологий в управлении, зав. кафедрой автоматизированных систем управления, к.т.н., доц.;

Чеглакова С.Г., зав. кафедрой экономической безопасности, анализа и учета, д.э.н., проф..

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ. РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА»

СЕКЦИЯ «МИКРОВОЛНОВАЯ, ОПТИЧЕСКАЯ И КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»

УДК 621.385.6; ГРНТИ 47.14.05

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ НИЗКОВОЛЬТНОЙ ЛБВ W ДИАПАЗОНА НА ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЕ ТИПА «ПЕТЛЯЮЩИЙ ВОЛНОВОД»

Н.А. Сычев, А.И. Панфилов

АО «НПП «ИСТОК» им. Шокина»

Российская Федерация, Фрязино, nortug.n@mail.ru

Аннотация. В работе рассматриваются промежуточные результаты работы по разработке ЛБВ W-диапазона на замедляющей системе типа «петляющий волновод».

Ключевые слова: лампа бегущей волны (ЛБВ), замедляющая система (ЗС), мм-диапазон длин волн, «петляющий волновод» (ПВ).

EXPERIENCE IN THE DEVELOPMENT OF A LOW-VOLTAGE W-BAND TWT ON A SLOW-WAVE SYSTEM OF THE “FOLDED WAVEGUIDE” TYPE

N.A. Sychev, A.I. Panfilov

JSC "RPC "ISTOK" named after Shokin"

Russian Federation, Fryazino, nortug.n@mail.ru

Annotation. The paper considers the intermediate results of the work on the development of the W-band TWT on a slow-wave system of the “looping waveguide” type.

Keywords: traveling wave tube (TWT), slow-wave system (SW), mm-wavelength range, folded waveguide (FWG).

С момента изобретения в 1942 году лампы бегущей волны находят широкое применение в РЛС, РЭБ, а в последнее время еще и в системах спутниковой связи. К достоинствам ЛБВ относят широкую полосу рабочих частот, большую мощность и большое усиление. В частотных диапазонах от 1 до 200 ГГц они обеспечивают выходную мощность от 0,1 до 3 МВт с коэффициентом заполнения импульсов 10 % и от 10 Вт до 20 кВт в непрерывном режиме. Но до сих пор среди рыночной продукции практически отсутствуют ЛБВ с рабочей частотой более 90 ГГц, а их появления ждут. Так, например, к этому диапазону большой интерес проявляют разработчики систем беспроводной связи [1]. Таким образом, в настоящее время одним из актуальных направлений развития микроволновой электроники является разработка усилителей в коротковолновой части W-диапазона длин волн. Исследования в данном направлении ведутся как за рубежом, так и в России. АО «НПП «Исток» им. Шокина» проводит работы по созданию ЛБВ W-диапазона с выходной импульсной мощностью не менее 40 Вт, коэффициентом усиления не менее 30 дБ, диапазоном рабочих частот 1 ГГц и ускоряющем напряжении не более 20 кВ. В настоящей статье приведены промежуточные результаты этой работы.

На предприятии «Исток» уже имеется опыт разработки ЛБВ W-диапазона на замедляющей системе типа «цепочка связанных резонаторов» (ЦСР). ЛБВ W-20, разработанная в начале 2000-х, обеспечивала полосу рабочих частот 0,6 ГГц и выходную импульсную мощность 20 Вт. Однако, эта ЛБВ имела сложную систему управляющих электродов с системой ступенчатой подачи потенциалов, что существенно осложнило ее применение. Кроме того, в связи с уменьшением геометрических размеров элементов ЗС в миллиметровом диапазоне

длин волн, технология изготовления и сборки ЗС типа ЦСР, состоящей из множества прецизионных элементов, является довольно сложной. Для изготовления таких ЗС требуется высокоточная и сложная в изготовлении оснастка. ЗС типа «петляющий волновод», напротив, является более технологичной, и к тому же обладает хорошим теплоотводом, что дает возможность прорабатывать работу ЛБВ в непрерывном режиме.

Фрагмент ЗС типа «петляющий волновод» представлен на рисунке 1. В процессе работы было рассчитано несколько вариантов двухсекционных ЗС. По результатам расчетов было принято решение отработать технологию изготовления на варианте с $L=1,08$ мм, $W=1,71$ мм; $H=2$ мм и каналом для пролета электронов диаметром 0,5 мм. Согласно расчету, этот вариант позволяет получить требуемый уровень выходной мощности при заданных параметрах режимов работы ЛБВ. В дальнейшем усложнение геометрии ЗС в целях повышения эффективности взаимодействия и повышения КПД может быть использовано после отработки базовой технологии формирования узла ЗС и сборки ЛБВ на его основе [2]. На рисунке 2 представлены кривые дисперсионной характеристики и сопротивления связи, а на рисунке 3 расчетная амплитудно-частотная характеристика.

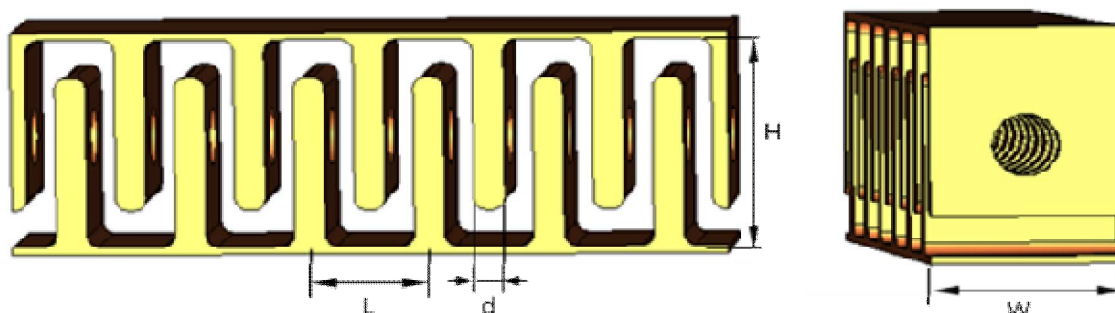


Рис. 1. Фрагмент ЗС типа «петляющий волновод»

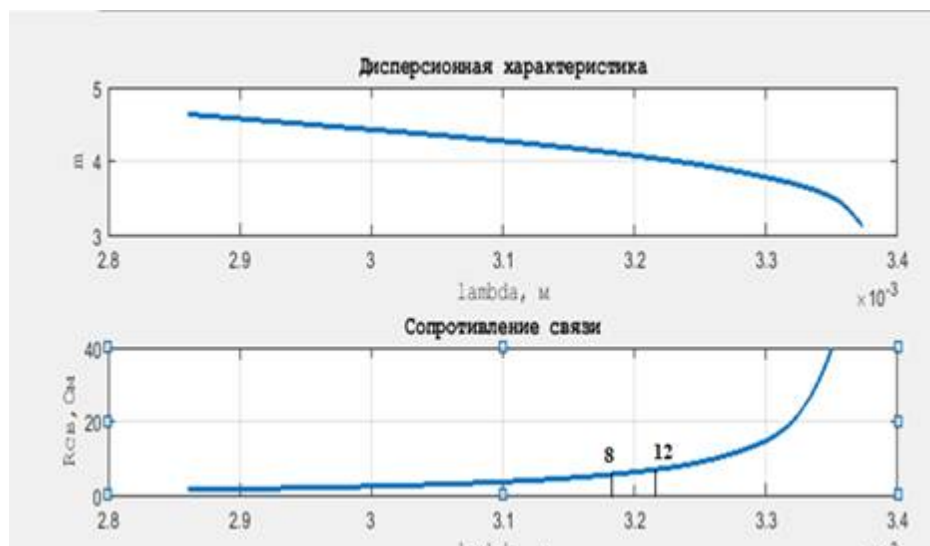


Рис. 2. Кривые дисперсионной характеристики и сопротивления связи

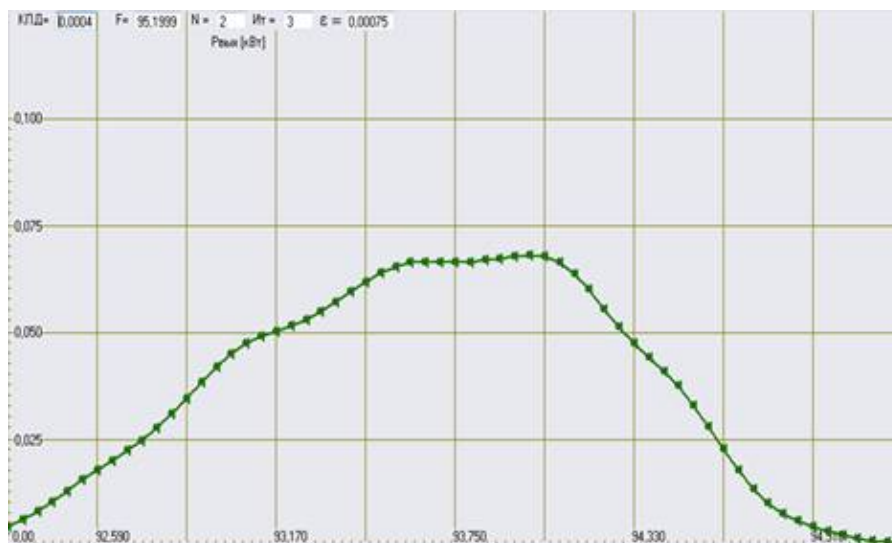


Рис. 3. Расчетная АЧХ при напряжении катода $U_{кат} = 16.9$ кВ, токе катода $I_{кат} = 0,094$ А, входной мощности $P_{вх} = 0.01$ Вт, длина ЗС 62 мм

Также проведено 3-х мерное моделирование взаимодействия с помощью современных программных средств моделирования. Полученная в результате этого расчета АЧХ представлена на рисунке 4. Как можно видеть, результаты 3-х мерного расчета хорошо согласуются с результатами расчетов, приведенными ранее.

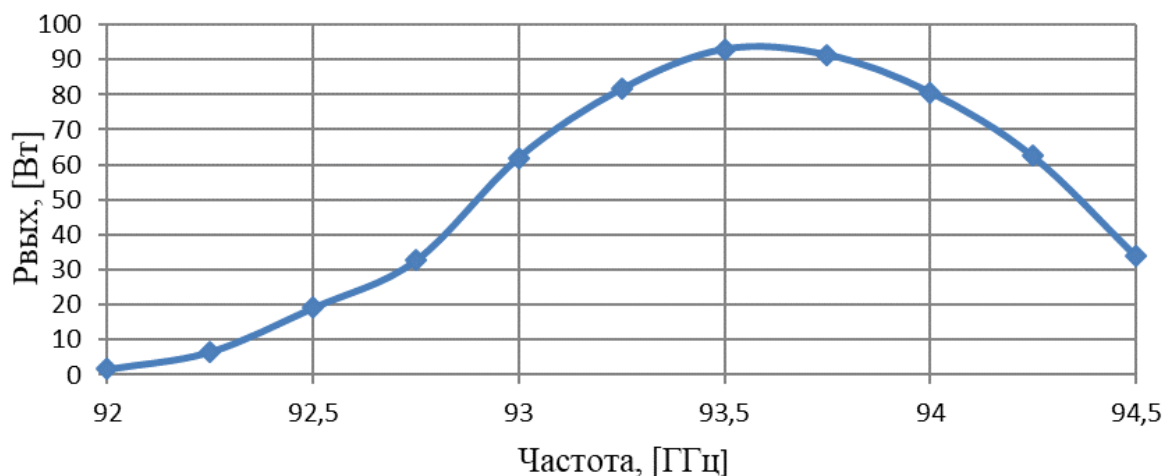
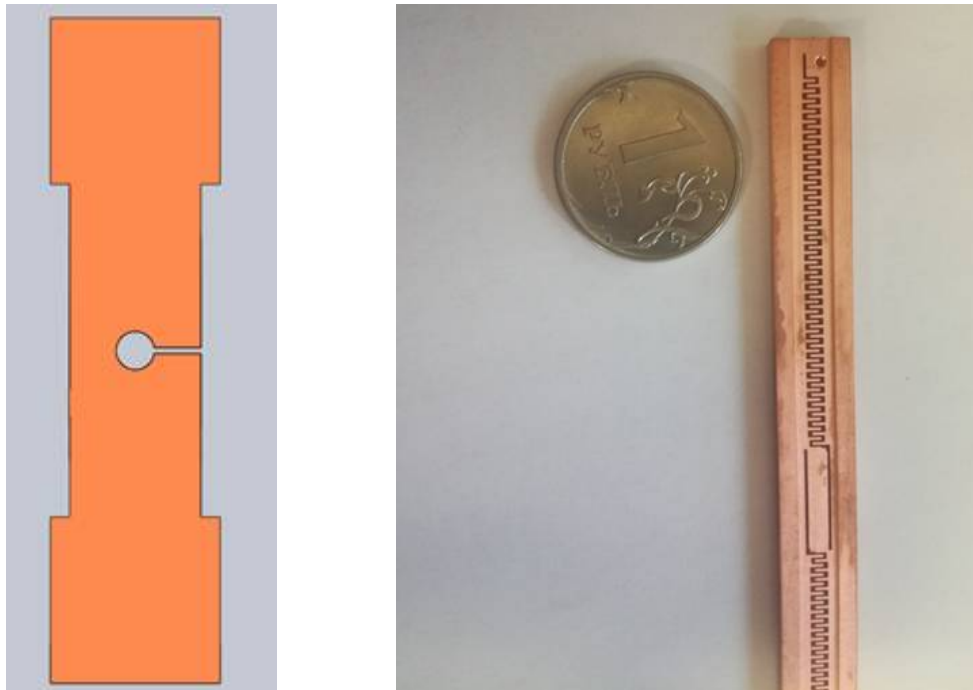


Рис. 4. Расчетная АЧХ при напряжении катода $U_{кат} = 16.4$ кВ, токе катода $I_{кат} = 0,094$ А, входной мощности $P_{вх} = 0.01$ Вт, длина ЗС 62 мм

Изготовление структуры ЗС выполнялось электроискровым методом, причем двухсекционная система изготавливалась в единой детали, представляющей из себя медный профиль. Изображение медного профиля, а также внешний вид изготовленной ЗС представлены на рисунке 5. Величина разбросов зазоров между элементами ЗС исследовалась на видеоизмерительном микроскопе Norgau и составила несколько микрометров (рисунок 6).



а) б)
Рис. 5. а) медный профиль ЗС; б) ЗС типа «петляющий волновод»

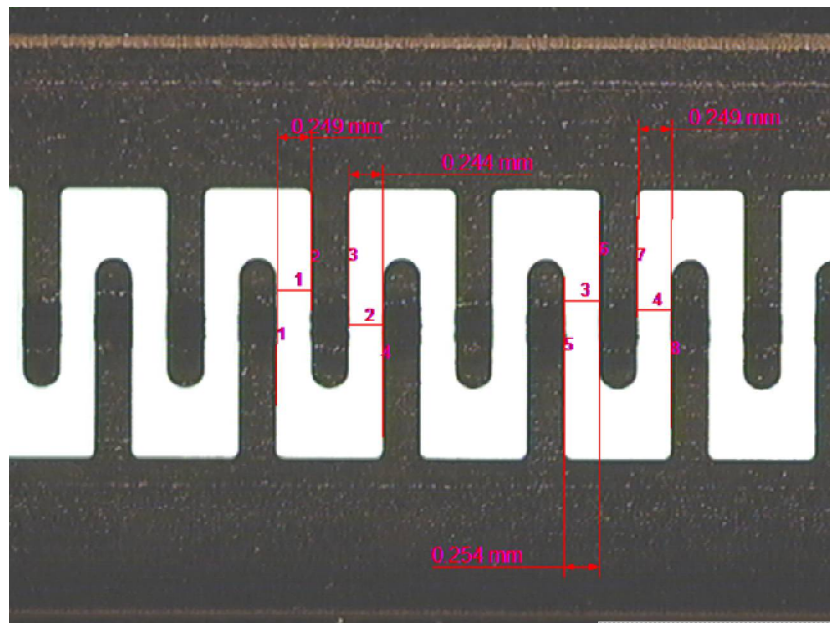
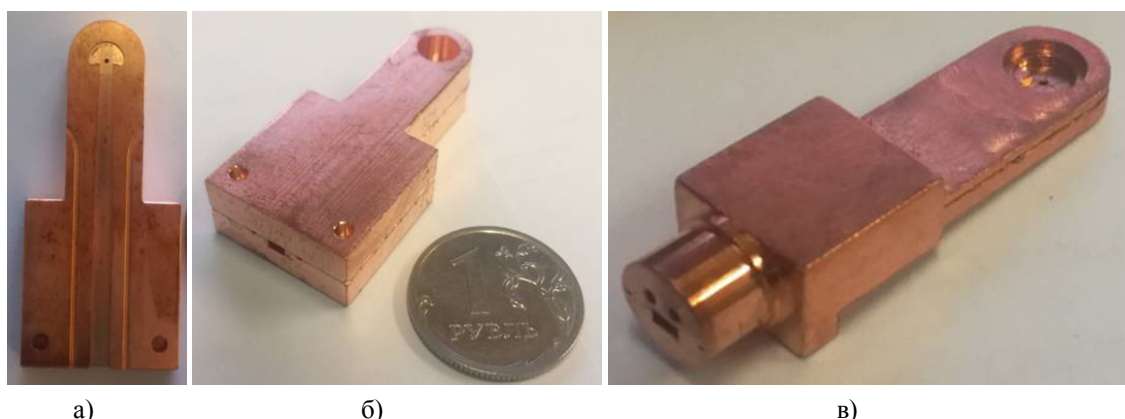


Рис. 6. Изображение фрагмента ЗС на видеоизмерительном микроскопе Norgau

Согласование ЗС с трактом выполняется с помощью клинообразного волновода. Входной и выходной волноводы являются идентичными и выполнены из двух частей. На одной половине фрезеруется вакуумная часть, которая имеет расширение одновременно в двух плоскостях с выходом на стандартное сечение 1,2*2,4 мм. Этапы изготовления волновода представлены на рисунке 7.



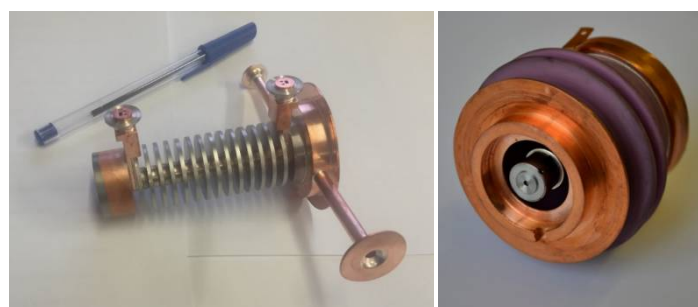
а)

б)

в)

Рис. 7. Волновод после: а) фрезеровки перехода; б) после пайки с крышкой; в) после финишной механической обработки

В процессе работы удалось отработать технологию изготовления основных узлов ЛБВ: анодный блок, электронная пушка, коллектор, ввод энергии. Внешний вид анодного блока, с размещенной внутри ЗС представлен на рисунке 8а. Конструкция коллектора и ввода энергии с небольшими изменениями были заимствованы у прибора-аналога ЛБВ W-20. В целях обеспечения возможности применения прибора в аппаратуре со стандартным модулятором была спроектирована электронная пушка, представляющая собой классическую пушку Пирса с одним фокусирующим электродом (рисунок 8б).



а)

б)



в)

г)

Рис. 8. Основные узлы разрабатываемой ЛБВ:
а) анодный блок, б) электронная пушка, в) коллектор, г) вывод энергии

Изготовленные анодные блоки были исследованы на «холодных измерениях». С помощью панорамного измерителя Rohde&Schwarz измерен КСВн входной и выходной секции ЗС. Результаты измерения представлены на рисунке 9. Как видно из рисунка КСВн входной секций не превышает 1,5 в рабочей полосе частот, что достаточно хорошо согласуется с ре-

зультатами расчета. КСВн выходной секции в большей части диапазона не превышает 1,8, что также является приемлемым результатом.

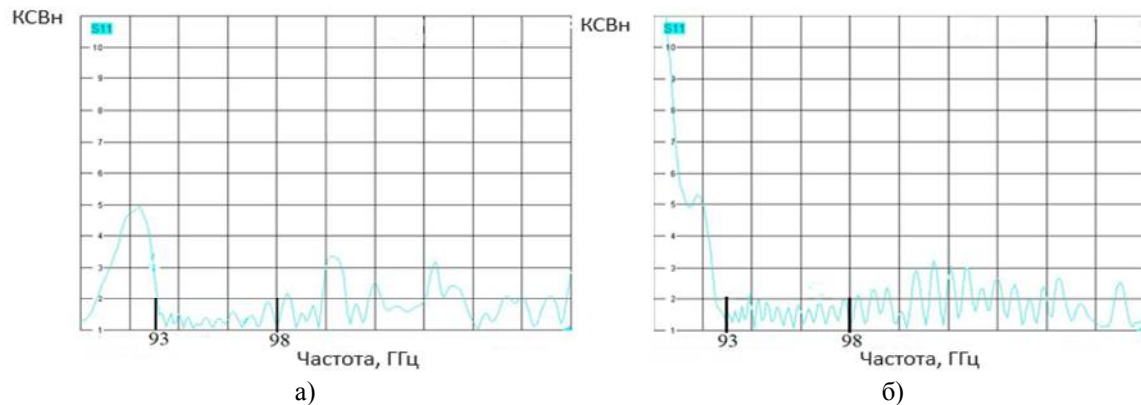


Рис. 9. Результаты измерений КСВн секций ЗС в анодном блоке:
а) входной секции, б) выходной секции

Для оценки потерь в системе был изготовлен «прозрачный» макет. Макет представляет собой часть секции ЗС, на входе и выходе которой изготавливаются интегрированные волноводы. Внешний вид «прозрачного» макета в оправке представлен на рисунке 10. Для измерения потерь также использовался панорамный измеритель Rohde&Schwarz, результаты измерений представлены на рисунке 11.

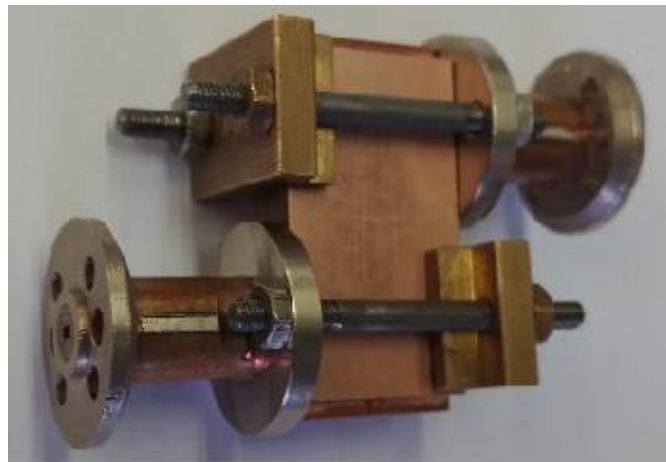


Рис. 10. Внешний вид «прозрачного» макета для измерения потерь в структуре ЗС

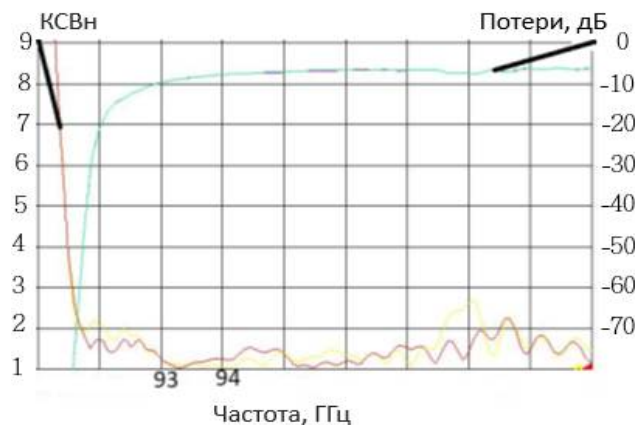


Рис. 11. Результаты измерений «прозрачного» макета

Как видно из рисунка 11, потери в макете составили 7-9 дБ в полосе рабочих частот. Учитывая, что макет представляет собой лишь часть замедляющей системы, можно ожидать уровень потерь в ЗС в 1,5-2 раза выше. Такой уровень потерь является довольно высоким и в дальнейшем потребуются проработать возможности его снижения. Одна из наиболее вероятных причин столь высоких потерь в структуре ЗС заключается в недостаточно высоком классе шероховатости поверхности. В настоящее время проводится отработка режимов резки и химической полировки ЗС с целью снижения шероховатости на ее поверхности.

Достаточно серьезной проблемой в ЛБВ миллиметрового диапазона является достижение нужного токопрохождения, что обусловлено малым диаметром пролетного канала в ЗС. Кроме того, при изготовлении подобных приборов огромное влияние на конечный результат оказывает соблюдение жестких требованиями к точности изготовления деталей электронной пушки и анодного блока, допуски на которые зачастую составляют несколько микрон. Для исследования работы прибора в статическом режиме был изготовлен макет ЛБВ, представленный на рисунке 12. К данному макету не предъявлялись требования по получению СВЧ-параметров, поэтому в анодный блок была установлена система с отклонениями по геометрии. Однако качество изготовления пролетного канала удовлетворяло требованиям.

Фокусировка электронного луча осуществляется магнитной периодической фокусирующей системой, состоящей из 18 кольцевых магнитов. Во время первых включений прибора, не прибегая к настройке магнитной фокусировки, не удавалось получить токопрохождения более 35 %. При этом режим питания и измеренное значение тока катода были близки к расчетным значениям. Однако после настройки магнитного поля с помощью подстроечных элементов и тренировки прибора удалось достичь токопрохождения 90% при токе катода 75 мА. Необходимость применения столь значительного числа подстроечных элементов говорит о том, что электронно-оптическая система не является оптимальной и в дальнейшем нуждается в доработке. В настоящее время проводится измерение магнитного поля, полученного в результате настройки макета ЛБВ.



Рис. 12. Макет ЛБВ

В процессе измерения электрических параметров макета было также экспериментально установлено минимальное запирающее напряжение. По результатам исследования определено, что полное запирающее макета обеспечивается при напряжении на управляющем электроде 700 В относительно катода и более. В настоящее время ведется активная работа по исследованию СВЧ параметров ЛБВ, а также работа по модернизации электронно-оптической и магнитной систем.

Библиографический список

1. Состояние разработки ЛБВ и ЛОВ мм-диапазона для задач 21-го века. Информационный сборник «Новости СВЧ техники» «АО НПП «Исток» им. Шокина», 2021г., №8, стр.3-29.
2. Н.М. Коломийцева, Г.В. Бакунин, Т.И. Полянская, В.И. Паницков, Ю.Ю. Филин. Проектирование замедляющей системы типа «петляющий волновод» для разработки промышленной базовой технологии изготовления ЛБВ в W-диапазоне [электронный ресурс]. – 2018. – Режим доступа: https://mwelectronics.etu.ru/assess/2018/1/05_06.pdf. – Дата доступа: 01.02.2022.

УДК 544.42.2; ГРНТИ 32.15.03

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ ПРИРОДА КОВАЛЕНТНОЙ СВЯЗИ

И.В. Васильев

*ТОО «Специальное конструкторско-технологическое бюро «Гранит»
(ТОО «СКТБ «Гранит»), Казахстан, Алматы, iv@granit.kz*

Аннотация. Предложена модель образования ковалентной связи между атомами с участием электростатических сил электрически нейтральных атомов.

Ключевые слова: атом, гравитация, ковалентная связь, кулоновские силы, напряжённость электрического поля, электронная оболочка.

THE ELECTROSTATIC NATURE OF THE COVALENT BOND

I.V. Vassilyev

*JSC “Special Design and Technology Bureau “Granite”
(JSC “SDTB “Granite”), Kazakhstan, Almaty, iv@granit.kz*

Abstract. A model of the formation of a covalent bond between atoms with the participation of electrostatic forces on electrically neutral atoms is offered.

Keywords: atom, gravitation, covalent bond, Coulomb forces, electric field strength, electron shell.

Физические эффекты, к которым может приводить неравномерное распределение электрических зарядов в телах, являющихся в целом электрически нейтральными, продолжают оставаться предметом внимания учёных. Так, неравномерное распределение зарядов в молекулах за счёт ионных связей между атомами, структурированных под действием силы гравитации, позволило сформулировать гипотезу о природе возникновения магнитного поля Земли и планет [1]. Эта гипотеза позволила объяснить большинство «загадок» земного магнитного поля и вычислить его величину, очень близко совпавшую с результатами измерений.

В 2015 году, исследуя атомы меди и железа методами сканирующей зондовой микроскопии, учёные из Германии обнаружили, что полученные изображения этих атомов (рис. 1) напоминают тороиды [2].

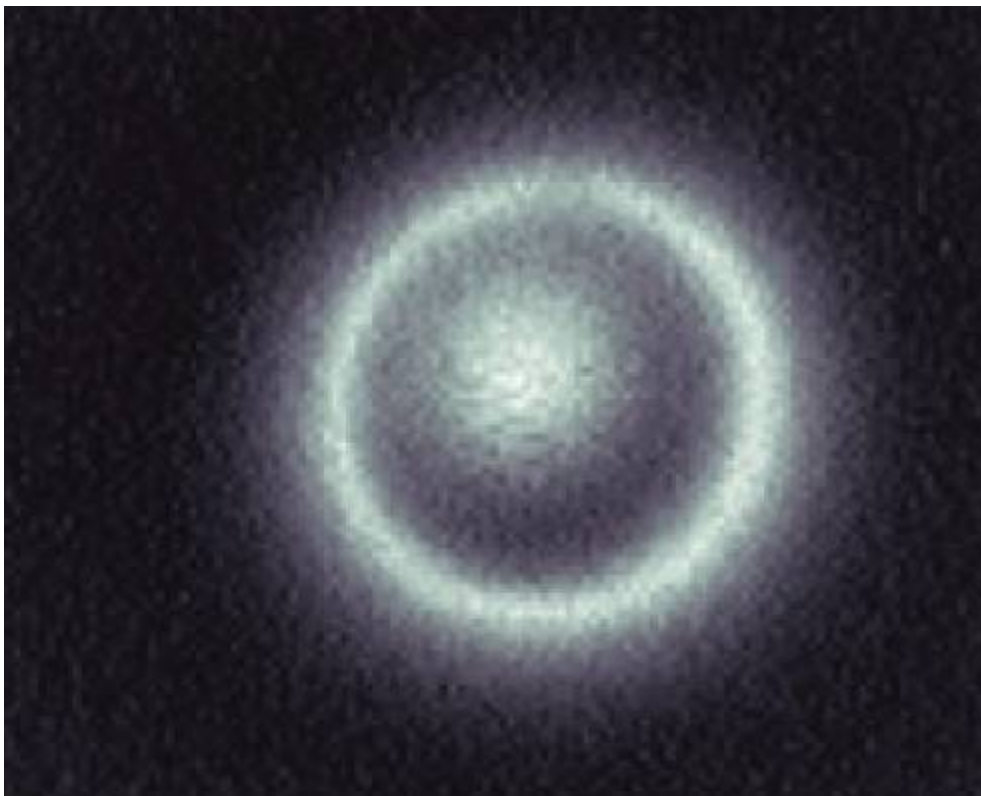


Рис. 1. АСМ-изображение атома Cu на поверхности Cu (111) (Matthias Emmrich et al./Scienceexpress, 2015)

Данные результаты позволяют по новому взглянуть на природу межатомных связей в веществе и, в частности, на природу ковалентной связи. Ведь, если в атоме отсутствует сферическая симметрия в распределении заряда на электронной оболочке, то за её пределами, в некоторых пространственных направлениях, должно наблюдаться электрическое поле, приводящее к появлению кулоновских сил отталкивания.

Идея о том, что при взаимодействии атомов участвуют кулоновские силы отталкивания, далеко не нова. Ещё в 1940 г. была предложена модель отталкивания электронных пар, развитая в последующем Р. Гиллеспи [3]. Однако эта модель позволяла относительно точно описывать взаимодействия атомов только в соединениях непереходных элементов. В соответствии с данной моделью, ориентация облаков электронных пар валентных орбиталей определяется максимальным взаимным отталкиванием заполняющих их электронов, располагая их по сфере электронной оболочки. А конфигурация связей многовалентного атома определялась числом электронных пар в его валентной оболочке.

Основная проблема при объяснении сил межатомного отталкивания кулоновскими силами заключалась в том, что силы отталкивания должны расти с уменьшением расстояния между атомами в степени большей, чем вторая, характерная для кулоновских сил. Так, например, Кудрявцев [4] в своём курсе физики приводит приближённое выражение для результирующей силы взаимодействия двух атомов, избегая описания природы этих сил

$$F = \frac{a}{R^{n+1}} - \frac{b}{R^{m+1}}, \quad (1)$$

где n и m , a и b – константы, R – расстояние между атомами, и $n > m$.

Такой формулой можно оперировать в практических целях при моделировании поведения атомов кристаллической решётки в ограниченном диапазоне расстояний между атомами и с индивидуальным подбором констант для каждого вещества.

Представление же структуры атома в виде планетарной модели, в которой электронную оболочку можно представить в виде равномерно заряженного кольца, а ядро - в виде точечного заряда в его середине, существенно упрощает понимание природы взаимодействия соседних атомов, особенно в случае неполярной ковалентной связи (разность электроотрицательностей равна нулю) у гомоядерных молекул: Н-Н, О-О, N-N. В своей работе [5] Сомских обосновывает необходимость учёта взаимодействий между собой всех элементов тел, обладающих структурой.

Для проверки этой гипотезы произведём расчёт кулоновских полей между двумя атомами. Электрические заряды ядра и электронной оболочки Q будут равны и компенсируют друг друга. Однако на оси и в плоскости электронной оболочки напряжённость электрического поля ядра и электронной оболочки будут несколько различны. В общем виде результирующее поле, которое создаст атом на расстоянии R , будет представлять сумму полей, создаваемых его ядром и электронной оболочкой.

Поле точечного заряда на расстоянии R от его центра

$$E_m = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^2} \quad (2)$$

Поле на оси кольцевого заряда с радиусом r на расстоянии R от его центра

$$E_{ко} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{R}{(R^2 + r^2)^{3/2}} \quad (3)$$

Поле в плоскости кольцевого заряда с радиусом r на расстоянии R от его центра

Удельный заряд точки на кольце $q=Q/2\pi$

$$E_{кп} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \oint \frac{q(R + \cos \alpha)}{(R^2 - 2rR \cdot \cos \alpha + r^2)^{3/2}}, \quad (4)$$

где α – угол между радиус-вектором точки на кольце и осью ординат

Введём коэффициент $\psi=R/r$, позволяющий выразить расстояние R через радиусы кольца r . Подставим этот коэффициент в выражения (2-4), заменив эллиптический интеграл в выражении (4), который аналитически не решается, на сумму конечных элементов, удобную для программирования методом моментов. Получится

Поле точечного заряда

$$E_m = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot \frac{1}{\psi^2} \quad (5)$$

Поле на оси кольцевого заряда

$$E_{ко} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot \frac{\psi}{(\psi^2 + 1)^{3/2}} \quad (6)$$

Поле в плоскости кольцевого заряда

$$E_{кп} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \frac{\psi - \cos \alpha_i}{(\psi^2 - 2\psi \cdot \cos \alpha_i + 1)^{3/2}}, \quad (7)$$

где N – число элементов, на которое разбивается кольцо.

Разность полей точечного и кольцевого заряда на его оси в процентах

$$\Delta E_o = \frac{E_m - E_{ко}}{E_m} \cdot 100 \quad (8)$$

Разность полей точечного и кольцевого заряда на плоскости в процентах

$$\Delta E_n = \frac{E_m - E_{кп}}{E_m} \cdot 100 \quad (9)$$

Результаты расчёта разностей полей полученные при разбиении кольцевого заряда на 16 элементов приведены в таблице. Точечный заряд принимался положительным, а кольцевой – отрицательным.

Таблица. Результаты расчёта разностей полей

ψ	2	4	8	16	32	64
ΔE_o	24,4	4,9	1,2	0,3	0,07	0,017
ΔE_n	-28,4	-8,7	-2,3	-0,6	-0,15	-0,037

Как видно из таблицы, результирующее поле, как на оси системы «точка-кольцо», так и в её плоскости не является нулевым и снижается на большом удалении от неё приблизительно пропорционально второй степени от расстояния. На расстояниях, соизмеримых с радиусом кольца (от 2 до 4 радиусов) напряжённость разностного поля вдоль оси растёт в степени 2,3, а в плоскости – в степени 1,7.

Таким образом, если 2 системы «точка-кольцо» ориентированы в пространстве под 90 градусов друг к другу, то они должны притягиваться под действием не только гравитационных, но и кулоновских сил. При этом величина этих сил во много раз превосходит действие гравитационных. Однако, при приближении таких систем друг к другу, взаимодействие двух систем становится более сложным, и силы притяжения должны уравниваться силами отталкивания одноимённых зарядов, создавая устойчивую пространственную конструкцию. Расстояния между точечными зарядами в такой системе будет не намного превышать радиусы колец, что соответствует экспериментальным данным о расстояниях между атомами в двухатомных молекулах газа. Такая конструкция позволяет, в рамках классической физики, объяснить природу возникновения ковалентной связи атомов газа, не прибегая к модели объединения электронных облаков вокруг двух ядер.

Библиографический список

1. Васильев И.В. Влияние гравитации на формирование магнитного поля Земли // Журнал проблем эволюции открытых систем, Алматы, т.1 (16), 2014. - С.48-55.
2. Matthias Emmrich, Ferdinand Huber, Florian Pielmeier, Joachim Welker, Thomas Hofmann, Maximilian Schneiderbauer, Daniel Meuer, Svitlana Polesya, Sergiy Mankovsky, Diemo Ködderitzsch, Hubert Ebert, Franz J. Giessibl. Supplementary Materials for Subatomic resolution force microscopy reveals internal structure and adsorption sites of small iron clusters // Published 19 March 2015 on Science Express DOI: 10.1126/science.aaa5329
3. Гиллеспи Р. Геометрия молекул // Пер. с англ. Е. З. Засорина и В. С. Матрюкова, под ред. Ю. А. Пентина. - М.: Мир, 1975. – 278 с.
4. Кудрявцев Б.Б. Курс физики. Теплота и молекулярная физика // Учебное пособие. - 2-е изд. М.: Просвещение, 1965. - 224 с.
5. Сомсиков В.М. К основам физики эволюции // Монография, Алматы, 2016.-356с.

УДК 621.373.826; ГРНТИ 29.33.15

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ ВОЛНОВОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГИРОСКОПА

И.С. Дюба, М.В. Востриков, В.В. Климаков, В.Ю. Мишин, Д.А. Морозов, А.Е. Серебряков

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,

Российская Федерация, Рязань, sea89s@yandex.ru

Аннотация. Собрано рабочее место для регистрации сигналов волнового твердотельного гироскопа с металлическим резонатором. Выполнена регистрация сигналов волнового твердотельного гироскопа, при различных скоростях вращения основания. Определены требования к разрабатываемой системе регистрации сигналов волнового твердотельного гироскопа.

Ключевые слова: ВТГ, металлический резонатор, обработка сигналов

DEVELOPMENT OF A SIGNAL RECORDING SYSTEM WAVE SOLID-STATE GYROSCOPE

I.S. Dyba, M.V. Vostrikov, V.Yu. Mishin, V.V. Klimakov, D.A. Morozov, A.E. Serebryakov

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,

Russia, Ryazan, sea89s@yandex.ru

The summary. A workstation for recording signals from a wave solid-state gyroscope with a metal resonator was assembled. The registration of signals of a wave solid-state gyroscope is performed at various speeds of rotation of the base. The requirements for the developed system for recording signals of a wave solid-state gyroscope are determined.

Keywords: GBEW, metal resonator, processing signals

Введение

Волновой твердотельный гироскоп (ВТГ) является перспективным датчиком инерциальной информации, используемых в составе навигационных систем летательных аппаратов [1-3]. Физический принцип действия данного датчика, заключается в инертных свойствах упругих волн, возбуждаемых в осесимметричном твердом теле. ВТГ обладают такими преимуществами как: высокое соотношение точности и цены, малое время готовности, небольшой вес и габариты, небольшое энергопотребление, способность сохранять навигационную информацию при отключении питания. В настоящее время широкое распространение получили ВТГ с металлическим резонатором. На рисунке 1 приведена конструкция ВТГ с цилиндрическим резонатором [4]. Датчик представляет собой основание 4, на котором с помощью крепежного винта 2, закреплен цилиндрический резонатор 3. На дне резонатора ВТГ, по окружности расположены восемь пьезоэлементов, которые используются для возбуждения колебаний и регистрации информации. Сверху конструкция закрывается корпусом 1 и откачивается до остаточного вакуума порядка 10^{-3} мм.рт.ст.

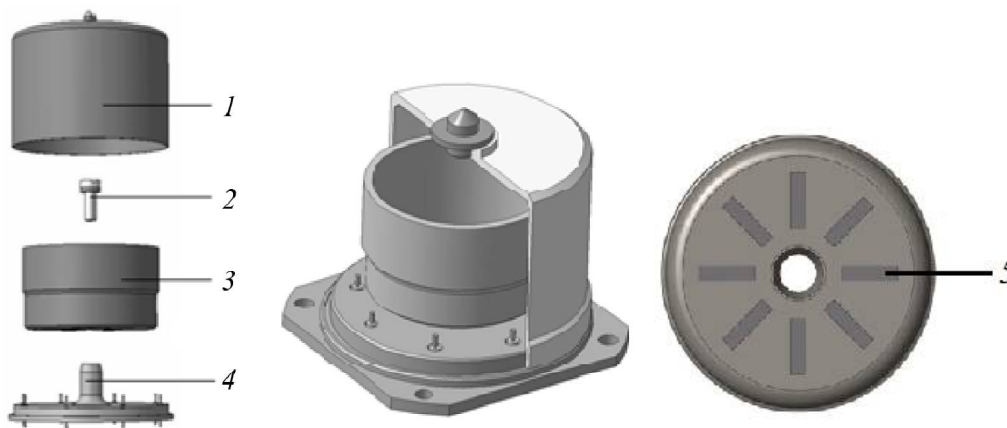


Рис. 1. Конструкция ВТГ с металлическим резонатором [3]: 1 – корпус, 2 – крепежный винт, 3 – резонатор, 4 – основание, 5 – пьезоэлементы

В настоящее время ВТГ способен обеспечить требуемую точность при решении задач высокоточной навигации и прецизионного наведения. С точки зрения соотношения себестоимости изготовления и точности получаемой навигационной информации, он является одним из перспективных современных инерциальных датчиков.

В гироскопических датчиках активно разрабатывается и внедряется цифровая сервисная электроника на базе микроконтроллеров или ЦСП. [5] Такие системы позволяют сделать гибче управление работой датчиков, вводить различного рода компенсации без вмешательства в аппаратную часть. Для разработки таких систем требуются математические модели волнового твердотельного гироскопа и соответственно эталонные сигналы датчиков.

Для решения данных задач появляется необходимость в разработке системы регистрации сигналов волнового твердотельного гироскопа.

Целью данной работы является регистрация сигналов волнового твердотельного гироскопа и определение требований, к разрабатываемой системе регистрации сигналов.

Методы борьбы с явлением захвата встречных волн

Для разработки, производства и испытаний инерциальных датчиков и приборов широко используются вспомогательные поворотные устройства (стенды). В данной работе использовался одноосевой испытательный стенд СИО-3Ц [6] (ООО «Научно-производственный комплекс «Диагностика»), который может обеспечивать стабильную скорость вращения в широком диапазоне угловых скоростей. Для регистрации эталонных сигналов было собрано рабочее место, представленное на рисунке 2.

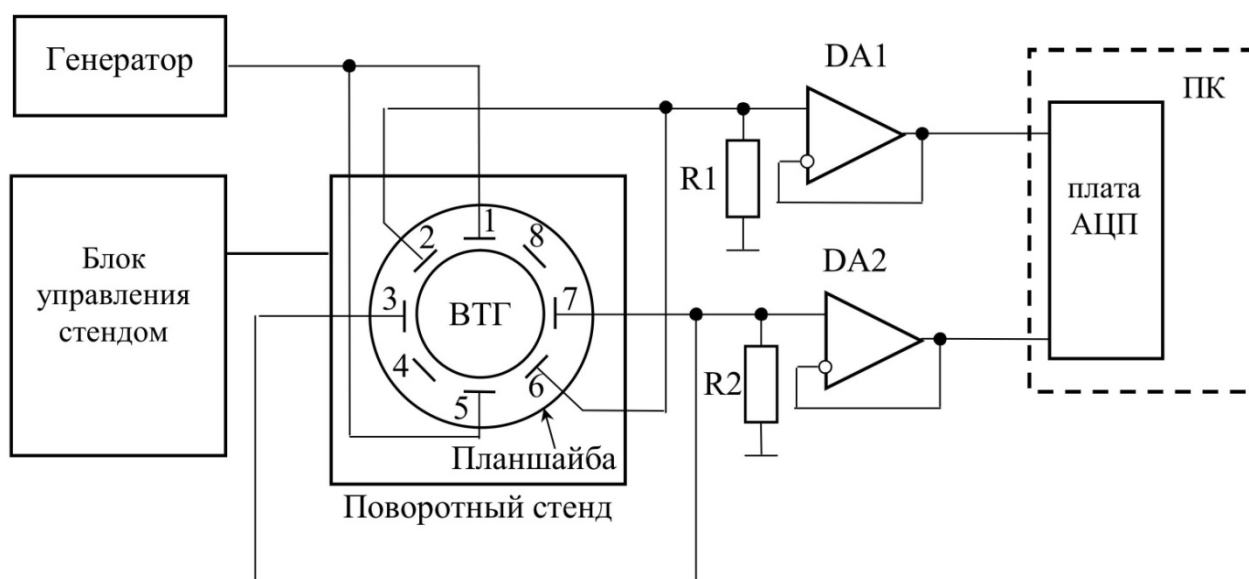


Рис. 2. Структурная схема стенда для регистрации сигналов ВТГ

Датчик и блок предварительных усилителей был закреплен на планшайбе поворотного стенда. Возбуждение колебаний осуществлялось гармоническим сигналом с помощью генератора сигналов специальной формы SFG-71013. Регистрируемые сигналы с выхода ВТГ поступали через повторители DA1 и DA2 на входы двухканальной платы сбора данных ЛАН150-14РСІ (20 МГц, 14 Бит, 2 канала). Повторители необходимы для согласования уровней выходных сигналов.

Для возбуждения второй формы колебаний чувствительного элемента гироскопа с помощью генератора формируется гармонический сигнал с частотой около 5784 Гц (резонансная частота), напряжением 3 В и подается на пьезоэлементы 1 – 5.

Сигналы, регистрировались с пьезоэлементов 2 – 6 и 7 – 3. При этом пьезоэлементы 3-7 и 2-6 соответствуют «пучности» и «узлу» стоячей волны, соответственно. Регистрация

этих сигналов осуществлялась с помощью двухканальной платы сбора данных с высокой чувствительностью, частотой дискретизации 1 МГц. Согласно техническим характеристикам данной карты, амплитуда входных сигналов не должна превышать значения 5 В.

Экспериментальные данные

Осуществлена регистрация сигналов датчика при различных значениях угловой скорости вращения основания. Скорость вращения задавалась в диапазоне от 5 °/с до 30 °/с. Отдельно записывались сигналы при вращении гироскопа по часовой стрелке и против часовой стрелки.

На рисунке 3 представлены некоторые участки записанных реализаций, соответствующие различным угловым скоростям вращения. На рисунке 4, представлен амплитудно-частотный спектр, построенный для одной из записанных реализаций (сигнала в “пучности”, 30 °/с).

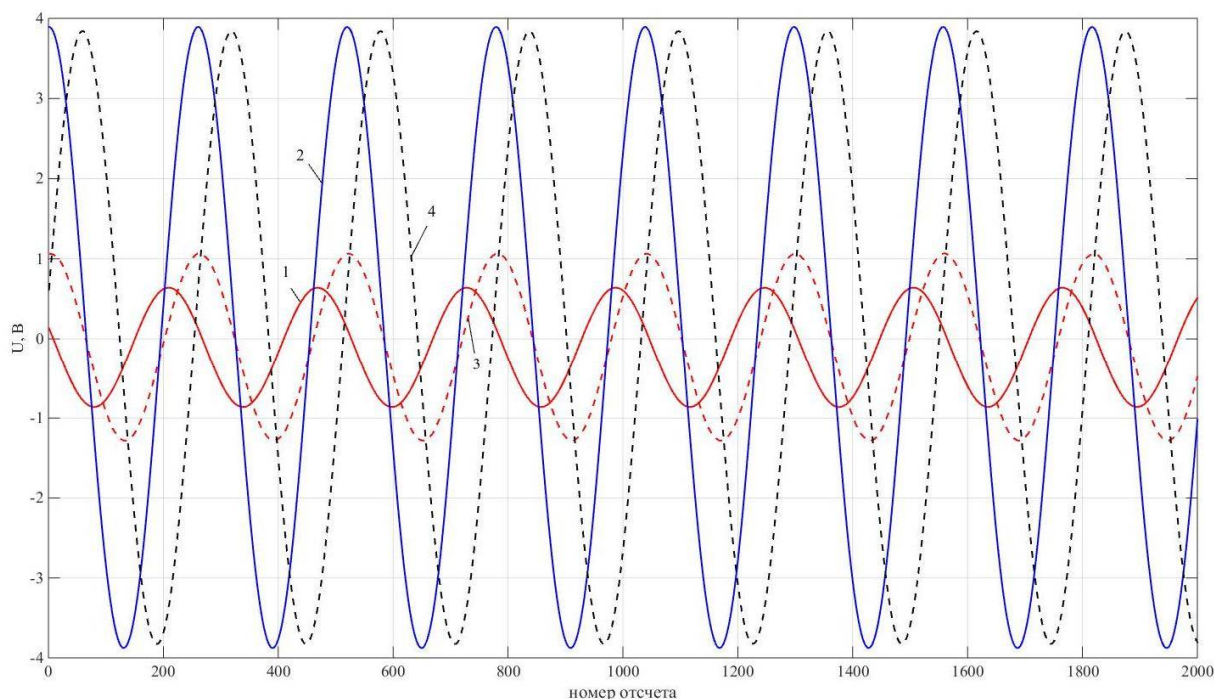


Рис. 3. Участки записанных реализаций угловой: 1 – сигнал в “узле” (угловая скорость 5 °/с), 2 – сигнал в “пучности” (угловая скорость 5 °/с), 3 – сигнал в “узле” (угловая скорость 30 °/с), 4 – сигнал в “пучности” (угловая скорость 30 °/с)

Анализ полученных данных позволяет сформировать требования к разрабатываемой системе регистрации сигналов ВТГ. Собственная частота резонатора, на которой возбуждаются колебания, составляет 5784 Гц. Имеются сигналы от 4-х пар пьезокорректоров. По теореме Найквиста частота дискретизации сигнала должна превышать в 2-а раза максимальную частоту сигнала [7]. На практике частота дискретизации выбирается на порядок больше чем максимальная частота сигнала. Соответственно проектируемая система должна быть четырехканальная и обеспечивать регистрацию сигналов с частотой от 60 кГц.

Был проведен сравнительный анализ существующих микропроцессорных систем. Критериями, определяющими выбор платформы для разработки, являлись: быстродействие, надёжность и наличие необходимых периферийных устройств. В результате был выбран микроконтроллер stm32f429 входящий в состав отладочной платы stm32f429 discovery. Достоинствами данного устройства являются: современная архитектура ARM Cortex M4, под-

держка высокоуровневых языков программирования и различных интегрированных сред разработки, встроенный программатор и подробная техническая документация от производителя.

Полученные данные планируется использовать при разработке мобильной системы регистрации сигналов ВТГ. Также данные, полученные в данной работе, будут использованы для тестирования разработанной системы и в качестве эталонных при разработке некоторых моделей датчиков.

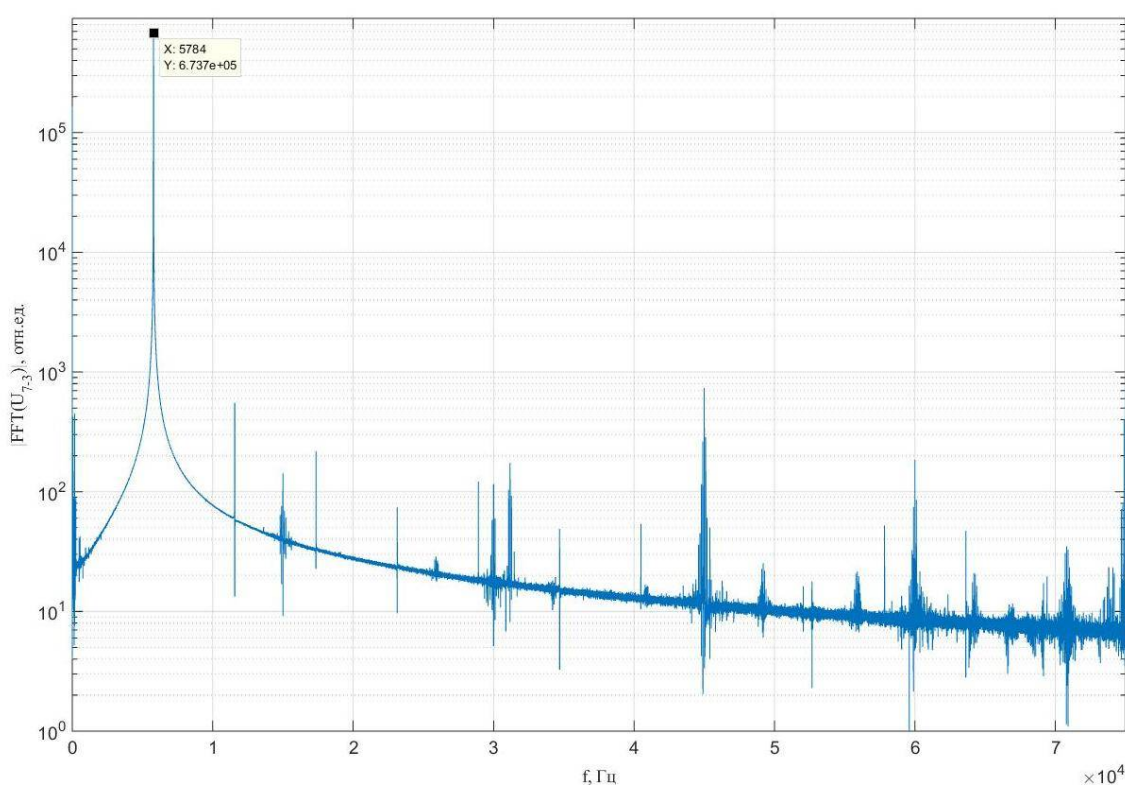


Рис. 4. АЧХ сигнала в пучности (угловая скорость 30 °/с). Выделена гармоника, соответствующая собственной частоте колебаний резонатора

Библиографический список

1. Мейер Д., Розелле Д. Инерциальная навигационная система на основе миниатюрного волнового твердотельного гироскопа // Гироскопия и навигация . 2012., №3(78), С.45-54.
2. Бурмистров Д.А., Лисовецкий Н.А., Мишин В.Ю., Серебряков А.Е., Климаков В.В. Моделирование характеристик чувствительного элемента гироскопа на эффекте Брайана // Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2018. Сборник трудов Международного научно-технического форума. Рязань, 2018. С. 44-50
3. Лунин Б.С., Матвеев В.А., Басараб М.А. Волновой твердотельный гироскоп. Теория и технология / монография. М.: Радиотехника, 2014. – 176 с
4. Басараб М.А., Лунин Б.С., Матвеев В.А., Фомичев А.В. Миниатюрные волновые твердотельные гироскопы для малых космических аппаратов // Электрон. Журн. 2014. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Приборостроение". №4Молчанов А.В., Суминов В.М., Чиркин М.В. Формирование доминирующей погрешности лазерного гироскопа // Авиакосмическое приборостроение, № 9, 2004, с. 12-19.
5. Molchanov A.V., Belokurov V.A., Chirkin M.V., Koshelev V.I., Mishin V.Yu., Morozov D.A. Precision laser gyro with a digital channel for quadrature signal processing // Proceedings of 22nd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. – 25-27 May 2015. Saint Petersburg, Russia. - P. 307-314.
6. Научно-производственный комплекс "Диагностика" > Продукция > Цифровые испытательные стенды СИО-Ц URL: <http://www.npk-spb.ru/sio-d.html> www.npk-spb.ru (дата обращения 17.02.2022)
7. Лэй Э. Цифровая обработка сигналов для инженеров и технических специалистов: практическое руководство / Эдмунд Лэй; пер. Н.С. Соголюб. – М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 336 с.

УДК 621.385.6; ГРНТИ 47.29.37

МОДЕРНИЗАЦИЯ МАГНИТНОЙ ФОКУСИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ МОЩНОГО МНОГОЛУЧЕВОГО КЛИСТРОНА X-ДИАПАЗОНА

И.С. Кузнецов, А.А. Матвеев, В.М. Саблин, Д.А. Терентьев

АО Научно-производственное предприятие "Торий",

Российская Федерация, Москва, npp@toriy.ru

Аннотация. В работе представлены результаты численного моделирования транспортировки электронного потока в клистроне с использованием реверсной и периодической магнитных фокусирующих систем. Показаны преимущества МПФС перед реверсной системой, позволяющие повысить качество фокусировки электронного потока.

Ключевые слова: электронный пучок, электронно-оптическая система (ЭОС), реверсная магнитная фокусирующая система (РМФС), магнитная периодическая фокусирующая система (МПФС).

MODERNIZATION OF THE MAGNETIC FOCUSING SYSTEM OF A POWERFUL MULTIBEAM X-BAND KLYSTRON

I. S. Kuznetsov, A.A. Matveev, V.M. Sablin, D.A. Terentev

JSC RPE "Toriy",

Russia, Moscow, npp@toriy.ru

The summary. The paper presents the materials of numerical simulation of electron flow transportation in a klystron using reverse and periodic magnetic focusing systems. The advantages of the MPFS over the reverse system are shown, which allow to improve the quality of focusing the electron flow.

Keywords: Electron beam, electron-optical system (EOS), reverse magnetic focusing system (RMFS), magnetic periodic focusing system (MPFS).

Мощные вакуумные многолучевые приборы СВЧ уже давно и прочно занимают широкую нишу усилителей СВЧ сигнала в различных устройствах, несмотря на успехи полупроводниковой СВЧ электроники. Значительную роль в повышении удельной мощности вакуумных СВЧ приборов играют вопросы, связанные с формированием и транспортировкой интенсивных электронных потоков в протяженных каналах пространств взаимодействия с электромагнитными волнами. Для транспортировки электронного потока используются реверсные магнитные фокусирующие системы (РМФС) и магнитные периодические системы (МПФС), а также другие типы фокусировки [1-5].

В докладе представлены результаты численного моделирования транспортировки электронного потока в РМФС и МПФС разрабатываемого клистрона, показаны преимущества периодической фокусировки.

Транспортировка электронного потока в РМФС

Основные параметры двурядной многолучевой электронно-оптической системы (ЭОС) указаны в таблице 1.

Таблица 1. Электрические и геометрические параметры ЭОС

Ускоряющее напряжение	55 кВ
Количество лучей	25
Ток катода	4 А
Микропервеанс (одного луча)	0.31 мкА/В ^{3/2}
Диаметр катода	4 мм
Диаметр пролетного канала	3 мм

Для транспортировки электронного потока была разработана РМФС, состоящая из 3 колец радиально намагниченных магнитов и магнитопроводами. Эскиз геометрии фокусирующей системы изображен на рисунке 1.

На рисунке 2 показано распределение модуля продольной составляющей индукции магнитного поля в РМФС.

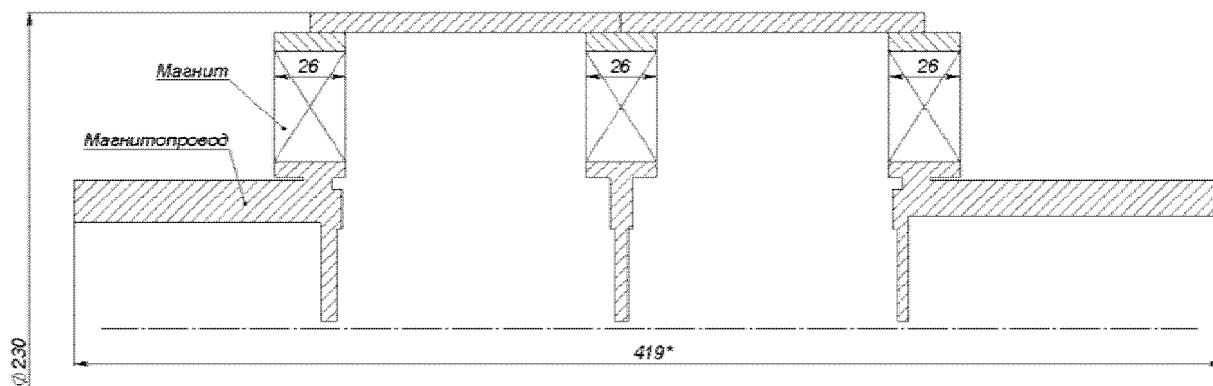


Рис. 1. Эскиз геометрии РМФС

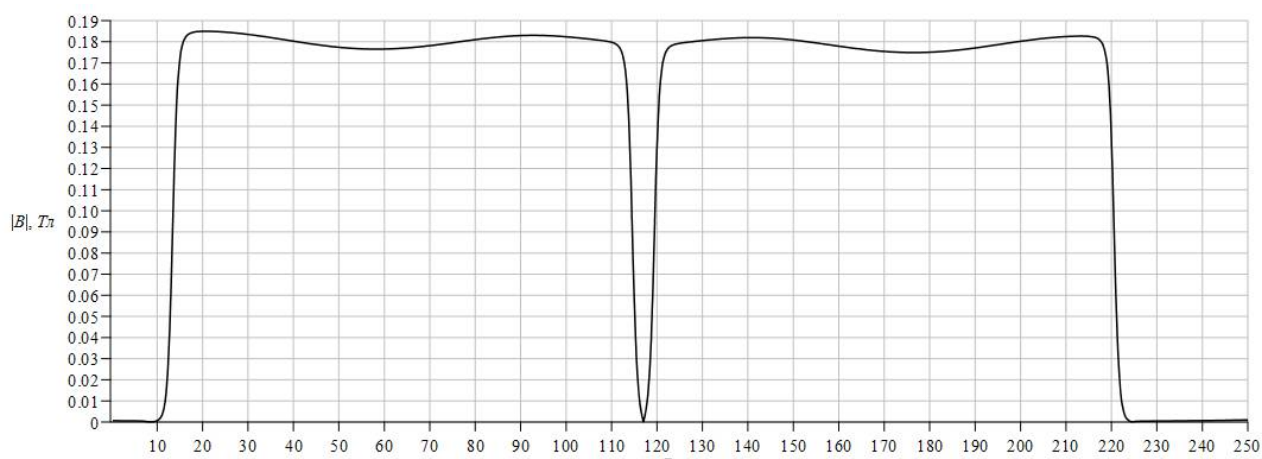


Рис. 2. Распределение модуля продольной составляющей индукции магнитного поля.

На рисунке 3 изображены траектории электронов во внешнем пролетном канале, а на рисунке 4 – смещение центра электронного пучка от оси пролетного канала.

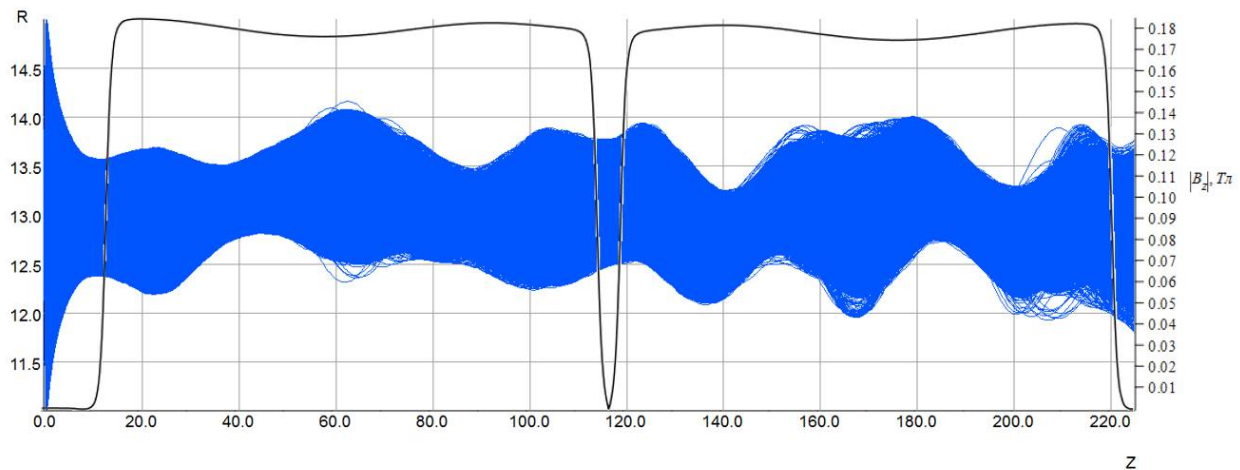


Рис. 3. Траектории электронов во внешнем пролетном канале.

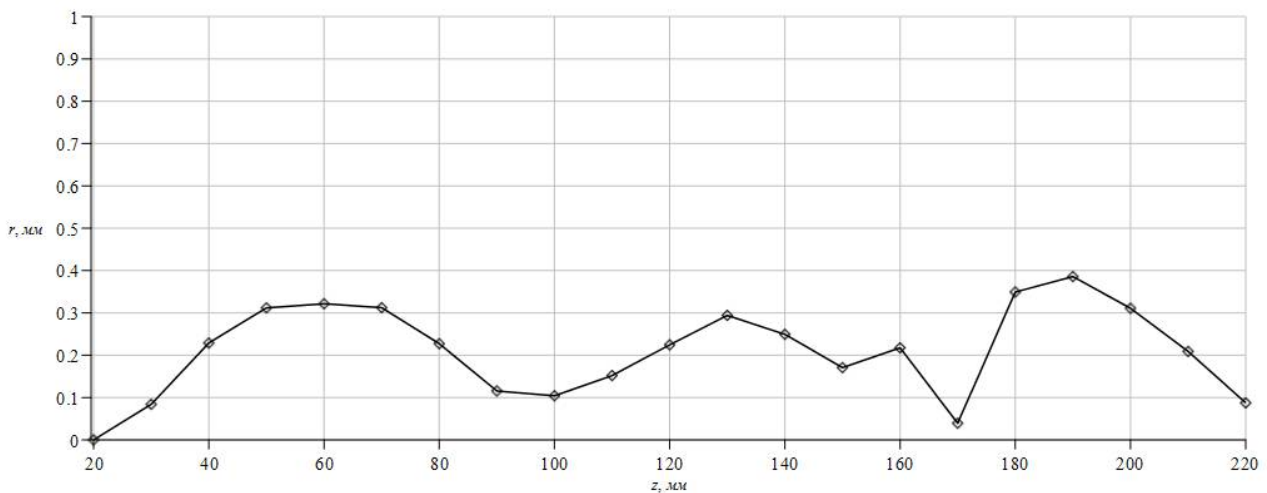


Рис. 4. Изменение центра электронного пучка по длине пролетного канала.

Коэффициент токопрохождения α в данном случае равен 100%, а коэффициент пульсаций Δ равен 28%. Максимальное отклонение электронного пучка составило около 0.4 мм, что составляет 27 % от радиуса канала.

Транспортировка электронного потока в МПФС

Полученная в предыдущем разделе ЭОС обеспечивает необходимое токопрохождение. Однако большие отклонения пучка от оси затрудняют настройку прибора из-за его чувствительности к радиальному отклоняющему полю. Кроме того, полученная система обладает большими габаритами и массой магнитов. В связи с этим было решено модернизировать МФС для уменьшения радиальной компоненты магнитного поля и габаритов магнитной системы. Эскиз геометрии такой фокусирующей системы изображен на рисунке 5, а на рисунке 6 показано распределение модуля продольной индукции магнитного поля в МПФС.

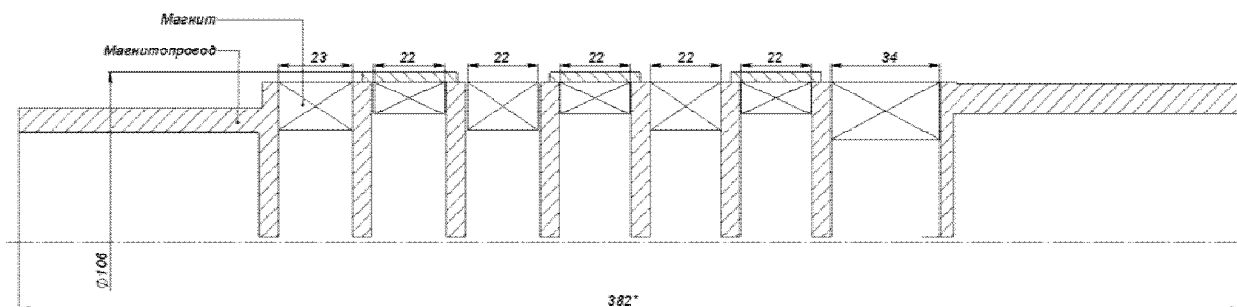


Рис. 5. Эскиз геометрии МПФС

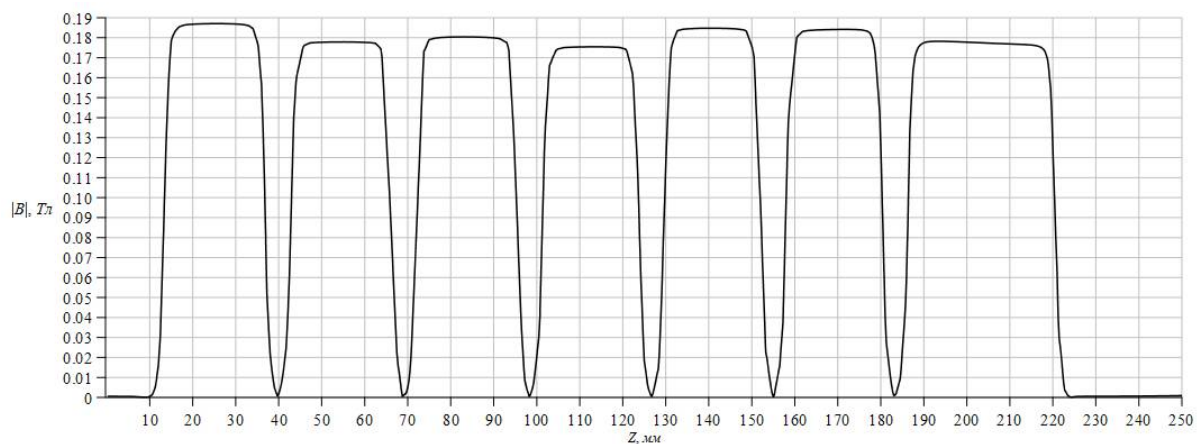


Рис. 6. Распределение модуля продольной индукции магнитного поля.

На рисунке 7 изображены траектории электронов во внешнем пролетном канале.

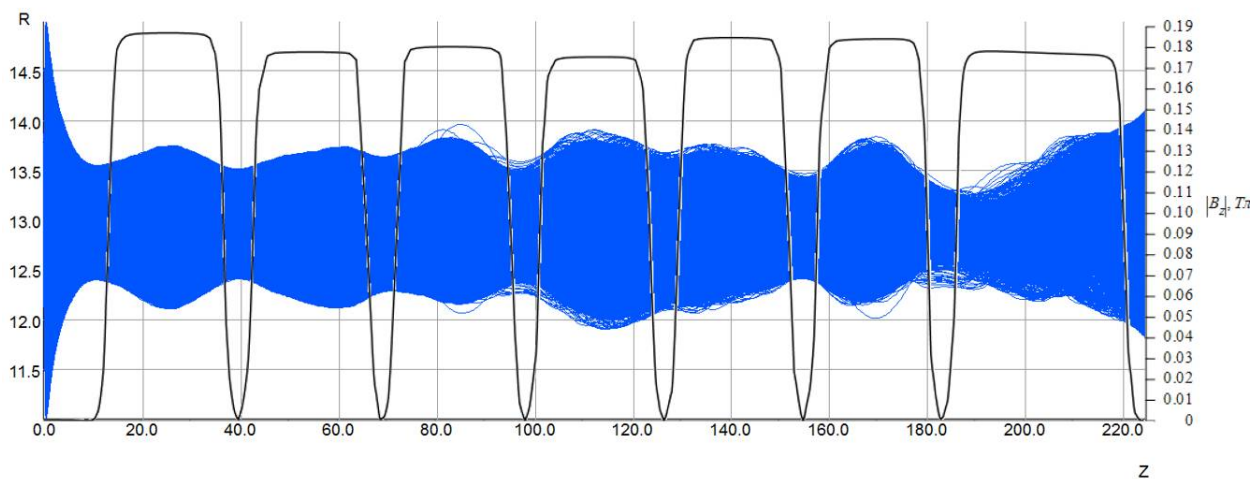


Рис. 7. Траектории электронов во внешнем пролетном канале

На рисунке 8 изображено изменение центра электронного пучка по длине канала.

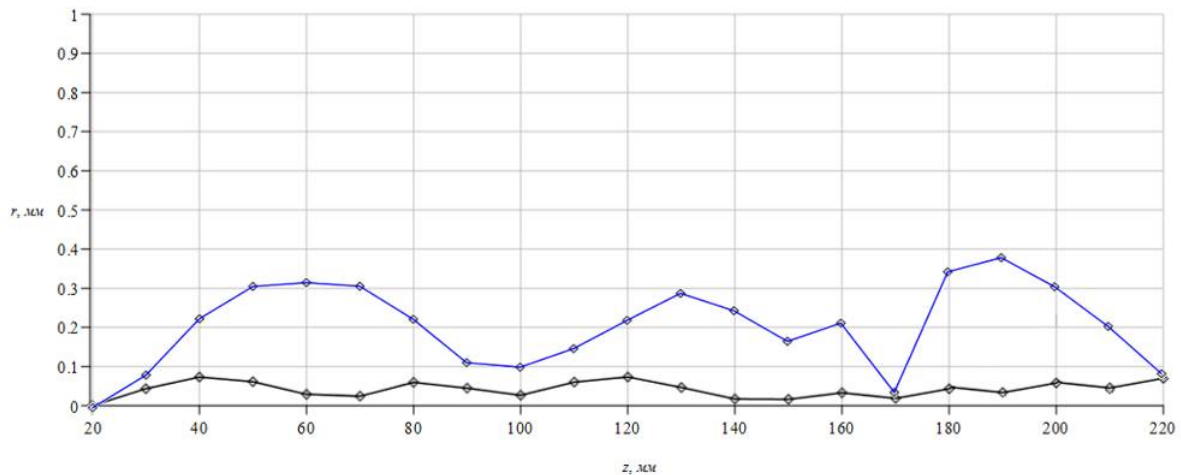


Рис. 8. Изменение центра электронного пучка по длине пролетного канала (Синяя линия – МРФС, черная линия – МПФС)

Коэффициент токопрохождения α в данном случае равен 100%, а коэффициент пульсаций Δ равен 19%. При этом максимальное отклонение пучка от оси канала составило 0,08 мм (5 % от радиуса канала).

Выводы

Использование МПФС, позволило снизить коэффициент пульсаций Δ с 28 % до 19 %, уменьшить внешний диаметр фокусирующей системы с 230 мм до 110мм, уменьшить массу магнитов более чем в три раза, а также в пять раз снизить отклонение пучка от оси пролетного канала.

Библиографический список

1. Darmaev A., Ivanov A., Morev S., Suhoverhiy A. Development of an electron-optical system for compact Ka-band TWT.- 2020 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, September 24-25, 2020, Saratov, Russia. – pp. 103-105
2. Особенности проектирования электрооптической системы мощного вакуумного СВЧ прибора миллиметрового диапазона с реверсной магнитной системой / А.Н. Дармаев, Д.А. Комаров, М.А.Кравченко, С.П. Морев, Э. К. Муравьев // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2016 [текст]: сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-мет. конф.: в 4 т. Т.2./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2022. С.19-23, РГРТУ. – 2-4 марта 2016 года. Т.2. с. 151-154.
3. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. М., 1966.-456с.
4. Дармаев А.Н, Морев С.П., Муравьев Э. К. Приближенное решение задачи о приосевом распределении магнитного поля в реверсной магнитной системе с двумя магнитомягкими вставками для мощных вакуумных СВЧ приборов/ АПЭП-2016 Международная научно-техническая конференция. 22-23 СЕНТЯБРЯ 2016 Г., Г. САРАТОВ, РОССИЯ. Т.1. С.97-99.
5. Улучшение массогабаритных характеристик многолучевого прибора с реверсной магнитной фокусирующей системой / Дармаев А.Н, Морев С.П., Муравьев Э.К., Саблин В.М. // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2021 [текст]: сб. тр. IV междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.2./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2022. С.19-23.

УДК 621.385.6; ГРНТИ 47.29.37

ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭОС С КОЛЬЦЕВЫМ КАТОДОМ И НИЗКОВОЛЬТНЫМ БЕССЕТОЧНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Ю.Ю. Филин, С.П. Морев, Н.М. Коломийцева, О.А. Арион, П.А. Комраков, А.В. Соляников¹

¹АО «НПП «Исток» им. Шокина»,
Российская Федерация, Фрязино, filyur54@gmail.com

Аннотация. В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований переходных процессов в ЭОС с кольцевым катодом и низковольтным бессеточным управлением током пучка. Найдены конфигурация и местоположение пассивного защитного устройства (коллиматора), обеспечивающего надежную защиту от тепловой перегрузки входного участка замедляющей системы (ЗС) в переходных режимах работы ЛБВ.

Ключевые слова: переходные процессы, электроно-оптическая система (ЭОС), коллиматор, тепловая перегрузка.

TRANSIENT PROCESSES OF OPERATION OF EOS WITH A RING CATHODE AND LOW-VOLTAGE GRIDLESS CONTROL

Y.Y. Filin, S.P. Morev, N.M. Kolomiitseva, O.A. Arion, P. A. Komrakov, A.V. Solyanikov¹,

¹JSC "RPC "Istok" named after Shokin",
Russian Federation, Fryazino, filyur54@gmail.com

Annotation. The article presents the results of theoretical and experimental studies of transient processes in an EOS with a ring cathode and low-voltage gridless control of the beam current. The configuration and location of a passive protective device (collimator), which provides reliable protection against thermal overload of the inlet section of the slow-wave system (SWS) in transient TWT operating modes, are found.

Keywords: transient processes, electron-optical system (EOS), collimator, thermal overload.

Лампы бегущей волны (ЛБВ) с магнитной периодической фокусирующей системой (МПФС) и управлением тока пучка нашли широкое применение в современной радиоэлектронной аппаратуре. В качестве электродов для низковольтного управления током пучка вблизи катода электронной пушки обычно размещают фокусирующие электроды, сеточные структуры, штыри, промежуточные аноды и тому подобное [1].

В рассматриваемой ЛБВ низковольтное управление током пучка в электроно-оптической системе (ЭОС) осуществлено соосно расположенными вблизи катода фокусирующим электродом и штырем, за счет чего в электронной пушке был сформирован кольцевой электронный поток, сходящийся в области пролетного канала в сплошной. Дополнительная регулировка тока пучка обеспечивалась потенциалом первого анода U_{a1} , который меньше потенциала спиральной замедляющей системой (ЗС) $U_{зс}$.

Для транспортировки электронного пучка в ЛБВ применена МПФС с несинусоидальным распределением осевой компоненты индукции магнитного поля и значимой величиной третьей гармоники [2], позволившая обеспечить устойчивую транспортировку потока при пониженных потенциалах ЗС.

В процессе испытаний ЛБВ было выявлено, что при переключении режимов работы ЛБВ, при которых время импульса уменьшалось, а скважность оставалась неизменной, наблюдалось увеличение среднего тока ЗС. При дальнейшем анализе было выяснено, что данное увеличение тока ЗС связано с переходными процессами при включении/выключении ЛБВ, когда при определенных значениях напряжений на фокусирующих электродах наблюдалось повышенное токооседание и нагрев входного участка ЗС [3-5]. Проведенный анализ публикаций в отечественной и иностранной научной литературе показал, что формирование электронного потока в переходных процессах включения/выключения таких ЭОС, изучен далеко не полностью.

Для исследования процессов формирования пучка в переходных процессах включения/выключения и определения места токооседания были проведены обширные расчеты пе-

реходных режимов работы ЭОС. Расчеты показали, что в рабочем режиме транспортировка пучка происходила без оседания тока на пролетный канал (рис. 1).

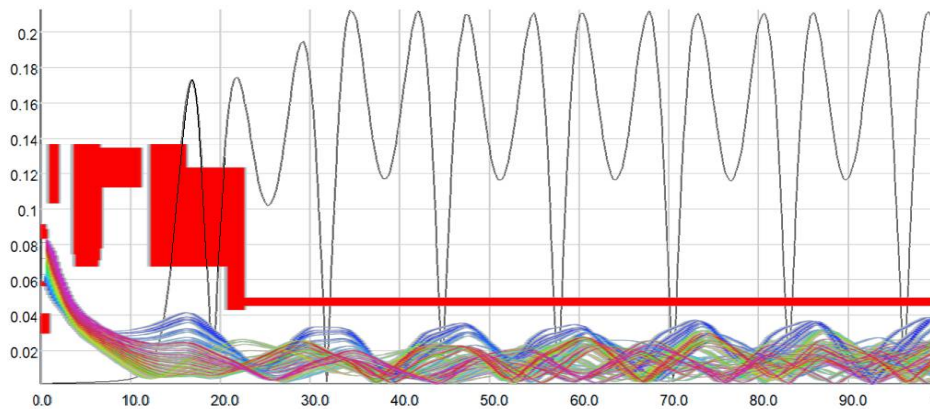


Рис. 1. Транспортировка электронного потока в рабочем режиме

Было выявлено место повышенного токооседания, которое могло вызвать локальный нагрев настроечных элементов ЗС, а также их расплавление и нарушение согласования КСВн входной секции ЛБВ, являющейся начальным участком ЗС (рис. 2).

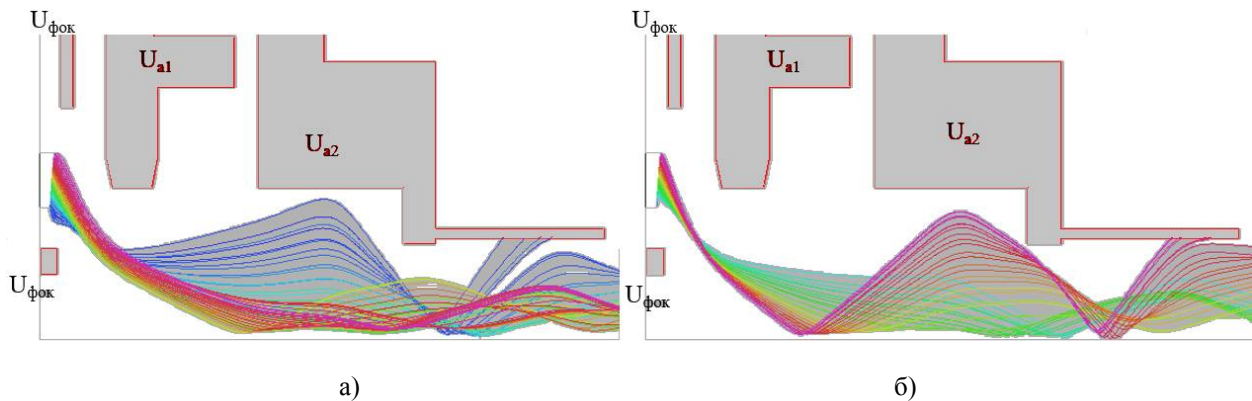


Рис. 2. Токооседание во время переходного режима:
а) $U_{\text{фок}} = -50\text{В}$; б) $U_{\text{фок}} = -250\text{В}$.

Непосредственное измерение распределения токов, оседающих на элементы ЭОС, при быстром нарастании/спаде фронтов модулирующих импульсов, на используемом оборудовании из-за очень короткого (менее микросекунды) времени нарастания/спада напряжений фокусирующих электродов являлось затруднительным. С целью увеличения длительности фронта импульса до нескольких микросекунд в RC-цепь модулятора была установлена дополнительная ёмкость.



Рис. 3. Импульс модулятора и ток ЗС во время включения ЛБВ

На полученных осциллограммах видно увеличение тока ЗС, которое происходило во время переходного процесса при напряжениях управляющих электродов от -50 В до -250 В. Повышение среднего тока ЗС в режиме с малой длительностью импульса происходило из-за увеличивающегося влияния фронтов нарастания/спада фокусирующих напряжений.

На основе проведенных исследований был объяснен механизм anomalно высокого токооседания электронного потока на входной участок ЗС, приводящий к тепловой перегрузке этого участка и возможному выходу из строя ЛБВ.

Найдены пути предотвращения тепловой перегрузки входного участка ЗС ЛБВ за счет применения так называемого «коллиматора» специальной формы, размещенного перед вводом ВЧ энергии, который не препятствует транспортировке электронного потока в рабочем режиме и надежно защищает входной участок ЗС в переходных режимах (рис. 4, рис. 5).

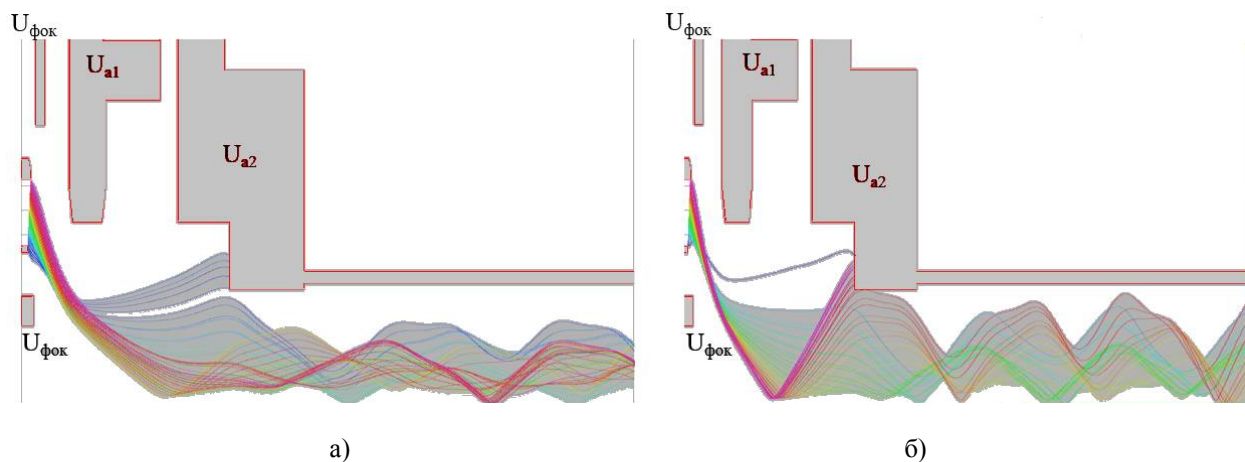


Рис. 4. Токооседание во время переходного режима с новым анодом 2:
а) $U_{\text{фок}} = -50$ В; б) $U_{\text{фок}} = -250$ В.

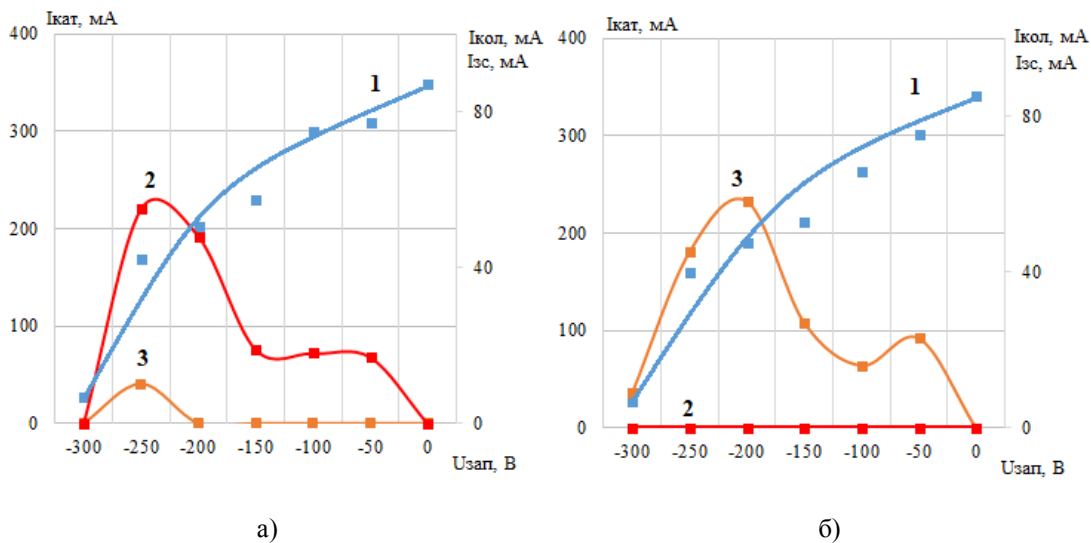


Рис. 5. Зависимости тока катода (1), ток ЗС (2) и тока коллиматора (3) от потенциала на управляющих электродах для исходной (а) и предложенной (б) конструкции входного участка ЛБВ

Экспериментальное исследование ЛБВ с размещенным коллиматором найденной конфигурации, показало, что коллиматор обеспечивает надежную защиту от тепловой перегрузки входного участка в переходных режимах и не ухудшает токопрохождение пучка в номинальном режиме работы ЛБВ.

Библиографический список

1. Григорьев Ю.А., Правдин Б.С., Шестеркин В.И. // Обзоры по электронной технике. Сер.1. Электроника СВЧ. 1987. Вып.7(1246). М.: Изд-во ЦНИИ Электроника. 71 с.
2. Дармаев А.Н., Морев С.П. Повышение параметра магнитного поля в фокусирующих системах с негармоническим распределением магнитного поля / Актуальные проблемы электронного приборостроения. Материалы международной научно-технической конференции // Саратов. 2006. с. 382-3
3. Морев С.П., Якунин А.Н. Исследование особенностей процессов управления током пучка в электронно-оптических системах приборов О-типа //Электронная техника. Сер.1, Электроника СВЧ. - 1987.- Вып. 5.- С. 31-35.
4. Морев С. П., Роговин В. И., Юдин Г. Ю. Уменьшение величины и протяженности области аномального токооседания при управлении током пучка в ЭОС приборов О – типа//Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-98/ Материалы международной научно-технической конференции, 1998, т. 1, с. 209-212.
5. Морев С. П. Уменьшение величины и протяженности области оседания пучка на пролетный канал ЛБВО в режимах модуляции с помощью потенциала фокусирующего электрода электронной пушки//Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2000/Материалы международной научно-технической конференции, 2000, С.150-155.

УДК 621.385.032; ГРНТИ 47.29.37

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ С КЕРАМИКОЙ И МОЛИБДЕНОМ

Р.Ю. Богачев, Л.Т. Баймагамбетова, Е.В. Горшкова, А.С. Емельянов
С.Д. Журавлев, Д.И. Кириченко, Т.М. Крачковская, В.И. Шестеркин
*Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Алмаз»,
Российская Федерация, г. Саратов, BogachevRU@almaz-rpe.ru*

Аннотация. Предложен способ создания неразъемных соединений деталей из углеродных материалов с керамикой и молибденом с целью применения полученных соединений в электровакуумных приборах. Представлены результаты исследования прочностных характеристик неразъемных соединений деталей из углерода с керамикой и молибденом.

Ключевые слова: термоэмиссия, анизотропный пиролитический графит, неразъемные соединения, керамика, молибден, клей

STUDY OF THE POSSIBILITY OF CREATING ALL-IN-ONE JOINTS OF PARTS FROM CARBON MATERIALS WITH CERAMICS AND MOLYBDENUM

R.Yu. Bogachev, L.T. Baimagambetova, E.V. Gorshkova, A.S. Emelyanov
S.D. Zhuravlev, D.I. Kirichenko, T.M. Krachkovskaya, V.I. Shesterkin
*JSC «RPE «Almaz»,
Russian Federation, Saratov, BogachevRU@almaz-rpe.ru*

Annotation. A method is proposed for creating permanent joints of parts made of carbon materials with ceramics and molybdenum in order to use the resulting joints in electrovacuum devices. The results of a study of the strength characteristics of permanent joints of parts made of carbon with ceramics and molybdenum are presented.

Keywords: thermal emission, anisotropic pyrolytic graphite, permanent joints, ceramics, molybdenum, glue

Искусственные графиты находят все более широкое применение в качестве материала для изготовления деталей теплонагруженных узлов электровакуумных приборов, таких как сеточные электроды и токоприемные элементы в коллекторах электронов [1]. Достоинствами данных материалов являются: химическая инертность, высокое значение работы выхода и низкий коэффициент вторичной электронной эмиссии. Первые две характеристики необходимы для подавления паразитной термоэлектронной эмиссии с сеточных электродов, а третья востребована для снижения обратного потока электронов из коллектора и повышения КПД прибора.

Одной из причин, сдерживающих применение искусственных графитов в электровакуумных приборах являются трудности получения неразъемных соединений графитовых деталей с керамикой и металлами, вызванные химической инертностью углерода. В настоящее время технологии пайки деталей из искусственных графитов (различные модификации графитов марки МПГ, пиролитический графит изотропный) с керамикой и металлами разработаны и успешно применяются [2,3].

В последние несколько лет возрос интерес анизотропному пиролитическому графиту (АПГ) и графиту марки МПГ-7, которые хорошо себя зарекомендовали в качестве материала сеточных структур и токоприемных элементов коллекторов для мощных импульсных ЛБВ и клистронов [4,5]. Однако проблема создания неразъемных соединений деталей из углеродных материалов с керамикой и металлами не решена. Это связано с большой анизотропией свойств данных материалов. Так, например, теплопроводность, электропроводность и коэффициент термического расширения (КТР) АПГ вдоль слоев осаждения почти на два порядка

выше, чем поперек слоев и в десятки раз превышает КТР керамики и металлов [6]. Однако, именно перечисленные характеристики АПГ, не желательные для получения неразъемных соединений, являются весьма привлекательными для использования деталей из АПГ в современных электровакуумных приборах.

Технология изготовления деталей из АПГ, основанная на пиролитическом осаждении углерода из газовой фазы на разогретые до 1800°C подложки позволяет получать одновременно партии (несколько десятков штук) тонкостенных деталей (толщина стенки менее 50 мкм) любой формы и сложности.

В этой связи, разработка технологии получения неразъемных соединений деталей из углеродных материалов с металлами и керамикой позволит существенно повысить эксплуатационные параметры приборов и одновременно существенно снизить их массо-габаритные характеристики.

Отличительной особенностью предлагаемого в данной работе способа создания неразъемных соединений деталей из углеродных материалов с керамикой и металлами является использование вместо припоя высокотемпературного клея ФТК-ВК-2 на основе углерода.

Предлагаемый способ неразъемных соединений не требует сложного технологического оборудования по металлизации, вжигания припоя и пайки. Полимеризация клея происходит при температуре 120°C в течение 4 часов. Компоненты клея перемешиваются в стеклянной посуде. Клей наносится на склеиваемые поверхности кисточкой, слоем толщиной в несколько десятых долей миллиметра, сохнет в сушильном шкафу в течение 4 часов. Для удаления органики склеенные детали отжигают в среде водорода при температуре 950°C в течение 2 минут.

Соединение МПГ-7 с керамикой ВК94-2 исследовано на излом на цилиндрических стержнях (рис.1).



Рис. 1. Склеенные образцы графита МПГ-7 с керамикой, а) общий вид склеенных образцов, б) общий вид образцов в оснастке для склеивания

Клей наносился на МПГ-7 с торцевой стороны, а также на торцы стержней из ВК94-2. Было изготовлено два образца, склеенные соединения прошли испытания на излом. Образец №1 (рис.2а) разрушился при нагрузке с усилием 24,48 кгс, разрыв по клею, остатки клея по поверхности графита и керамики. Образец №2 (рис.2б) разрушился при нагрузке с усилием 31,62 кгс, разрыв по графиту. Данные соединения обладают достаточной механической прочностью, что подтверждается показаниями динамометра 24-32 кгс и внешним видом разрушенных образцов.

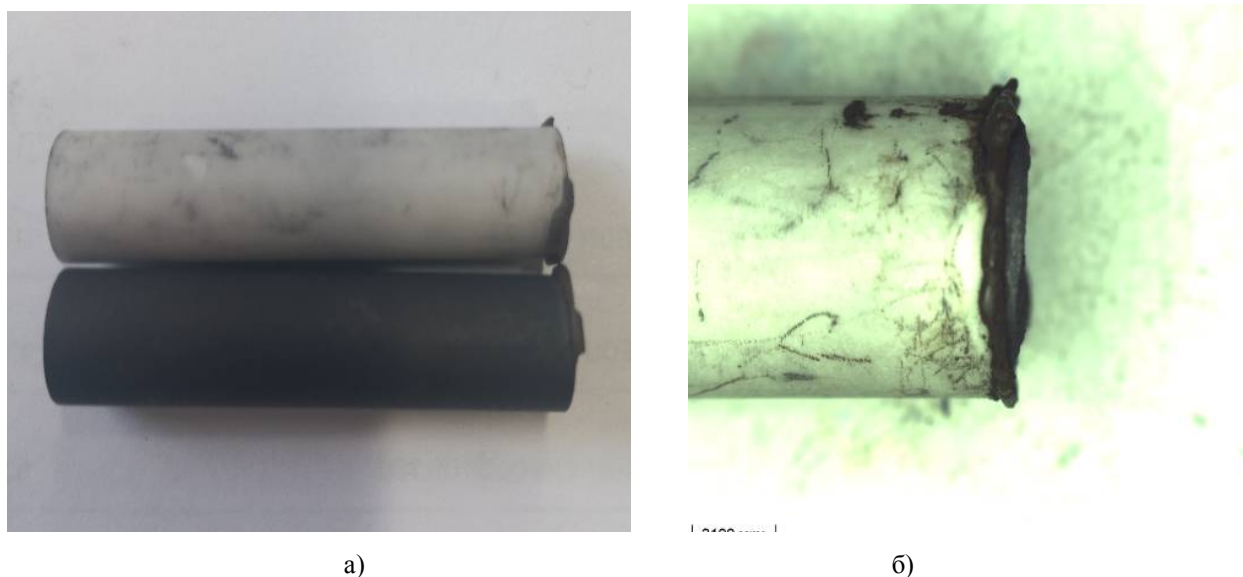


Рис. 2. Общий вид образцов после испытаний на излом: а) разрушение по клеевому соединению, б) разрушение по графиту

Также был изготовлен анод состоящих из диска молибдена к одной стороне которого была приклеена полоса из АПГ (рис. 3). Проводились испытания на разрыв ФТК-ВК-2, разрыв произошел при усиллии 48 кгс.



Рис. 3. Анод, склеенный с помощью ФТК-ВК-2 из молибдена и АПГ

В ходе выполнения данной работы было создано неразъемное клеевое соединение МПГ-7 с керамикой и АПГ с молибденом. Использованный в работе клей позволяет соединять углеродные и керамические материалы без металлизации последних, что упрощает технологию их соединения.

Библиографический список

1. Углеродные материалы в электровакуумных приборах СВЧ диапазона / Бабкова Н.И., Баймагамбетова Л.Т., Богачев Р.Ю., Горшкова Е.В., и др. // Материалы XXI Координационного Научно-Технического семинара по СВЧ технике. 60 лет АО «НПП «Салют». Нижегородская область. п. Хахалы. 7-9 сентября 2021 г. С. 7-10.
2. Сотникова Е.М., Радзимовская Н.М. Углеродные материалы и способы их соединения с металлами: Обзоры по электронной технике. Сер. 7. Технология, организация производства и оборудование. -М.:ЦНИИ «Электроника». 1984. Вып. 7 (1023). 62с.
3. Применение изотропного пиролитического графита в технике СВЧ / Грицук Р.В., Коньков Н.В., Москалев Б.И., Давыдов В.С. и др. // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. 1990. Вып. 10(434). С. 44-50.
4. Журавлев С.Д., Шестеркин В.И. Токонерывающие сетки из анизотропного пиролитического графита в электронных пушках с металлопористым катодом // ЖТФ. 2019. Том 89. Вып. 9. С. 1464-1468.
5. Журавлев С.Д., Кириченко Д.И., Манжосин М.А., Шалаев П.Д., Шестеркин В.И. 400 - Ваттный многолучевой импульсный клистрон Ku –диапазона с теневой сеткой из анизотропного пиролитического графита // Электронная техника. Сер.1 – СВЧ-техника. 2020. Вып. 4(547). С.60-65.
6. Фиалков А.С. Углеродные материалы. М.: Энергия.1979.

УДК: 621.396.6; ГРНТИ 47.33.31

НОВЫЕ ПОКОЛЕНИЯ АНАЛОГОВОЙ СВЧ ЭЛЕКТРОНИКИ НА РАЗНОРОДНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ

В.А. Буробин, С.В. Щербаков,
АО «НПП «Исток» им. Шокина»

141195, г. Фрязино, Московской обл., ул. Вокзальная, 2а
vabpulsar@mail.ru

Аннотация. Благодаря эпитаксиальной инженерии кристаллических структур появился ряд новых многокомпонентных полупроводниковых материалов, улучшенные свойства которых предлагают значительные улучшения производительности по сравнению с кремнием. Способность использовать передовые свойства всего диапазона полупроводниковых материалов, выбирать их оптимальную комбинацию, а не делать ставку на единственный лучший материал, позволит преодолеть возникающие сложные проблемы при объединении различных семейств полупроводниковых материалов. Достигнутый прогресс технологий гетероинтеграции в объединении качественно различных полупроводниковых материалов нового класса позволяет обеспечить наилучшую общую производительность устройств высокотехнологичных многофункциональных микросистем.

Ключевые слова: гетероинтеграция, гетерогенные полупроводники, многофункциональная микросистема, технология.

NEW GENERATIONS OF ANALOG MICROWAVE ELECTRONICS BASED ON DISSIMILAR SEMICONDUCTOR MATERIALS

V.A. Burobin, S.V. Shcherbakov

JSC «RPC «Istok» named after Shokin»

141195, Fryazino, Moscow region, st. Vokzalnaya, 2a
vabpulsar@mail.ru

Abstract. Through epitaxial crystal engineering, a number of new multicomponent semiconductor materials have emerged whose improved properties offer significant performance improvements over silicon. The ability to use the advanced properties of the entire range of semiconductor materials, to choose the optimal combination, rather than relying on the only one best material, will overcome the complex problems that arise when combining different families of semiconductor materials. The progress achieved in heterointegration technologies in combining qualitatively different semiconductor materials of a new class allows providing the best overall performance of devices of high-tech multifunctional microsystems.

Key words: heterointegration, compound semiconductor materials, multifunctional microsystem, technology

Введение

Три источника и три составляющие развития гетероинтеграции

В настоящее время получило широкое развитие нового класса элементной базы СВЧ электроники - гетерогенно-интегрированных приборов на основе A^3B^5 на собственных («нативных») и разнородных подложках, совмещающих аналоговую и цифровую часть, а также фазированные антенные решетки в рамках одной монолитной микросхемы. [1].

Благодаря атомной инженерии кристаллических структур появился и широко развивается ряд новых полупроводниковых материалов, свойства которых предлагают значительные улучшения производительности по сравнению с кремнием.

Способность использовать передовые свойства всего диапазона полупроводниковых материалов открывают новую эру многофункциональных устройств радиоэлектроники на разнородных полупроводниковых материалах.

Технический уровень российской радиоэлектронной продукции во многом зависит от отечественной электронной компонентной базы, которая в настоящее время существенно уступает по своим параметрам аналогичной иностранной базе и не позволяет в полной мере организациям, выпускающим конечную радиоэлектронную продукцию, создавать конкурентоспособные гражданские и специальные системы, комплексы и приборы, востребованные рынком.

Экстремальные требования, предъявляемые к электронной компонентной базе в современных радиоэлектронных системах, требуют создания специальных приборов, интегрированных в аппаратуру, и схемотехнических решений, оптимизирующих их использование. Основными тенденциями развития здесь остаются миниатюризация, увеличение эксплуатационной надёжности и увеличения функциональных возможностей СВЧ компонентов одновременно с прогрессом в получении и совершенствовании новых материалов.

Полупроводниковая промышленность подошла к проблеме гетерогенной интеграции, благодаря значительному прогрессу в области Si и GaAs технологий, которые позволяют реализовать высокую плотность интеграции высокотехнологичных узлов в приемопередающих устройствах, а также благодаря преимуществам широкозонных полупроводников в плане фундаментальных свойств материалов, в первую очередь, таких как GaAs. Производство устройств было обеспечено нативными подложками.

1. Этап. Si и GaAs –собственные («нативные») подложки

❖ Кремний

Начиная с 70-х годов, со времен создания первых кремниевых транзисторов и увеличения плотности их размещения на кристалле, современные мощные СВЧ кремниевые (Si) биполярные транзисторы непрерывного и импульсного режимов широко используются в различных системах радиолокации, авионики и связи.

Выпуск СВЧ ЭКБ – это сложнейшая наукоемкая задача, требующая разработки и модернизации конструкций мощных СВЧ биполярных транзисторов L- и S- диапазонов.

Конструкция транзисторного кристалла мощных транзисторов L-диапазона была выполнена в варианте «сетчатый эмиттер» с двухстадийным термодиффузионным методом формирования активных областей с использованием бора и фосфора.

В технологическом цикле насчитывалось 11 фотолитографий. Технология формирования напыленного нихромового эмиттерного резистора требовала большого количества вспомогательных, в том числе, напылительных операций. Жидкостной «ручной способ травления» напыленных слоев перечисленных металлов с поочередным их травлением травителями разного состава переводил этот процесс в ранг «технологического искусства».

Таким образом, чрезвычайно длительный технологический цикл изготовления, наличие большого количества «ручных» прецизионных операций не позволяли обеспечить устойчивый выпуск указанного транзисторного кристалла с приемлемым процентом выхода годных.

Следующим этапом развития технологической модернизации стал переход на конструкцию с применением 4 транзисторных кристаллов, имеющую двухрядную структуру в каждом (рис. 1.) для получения энергетических параметров более высокого уровня.

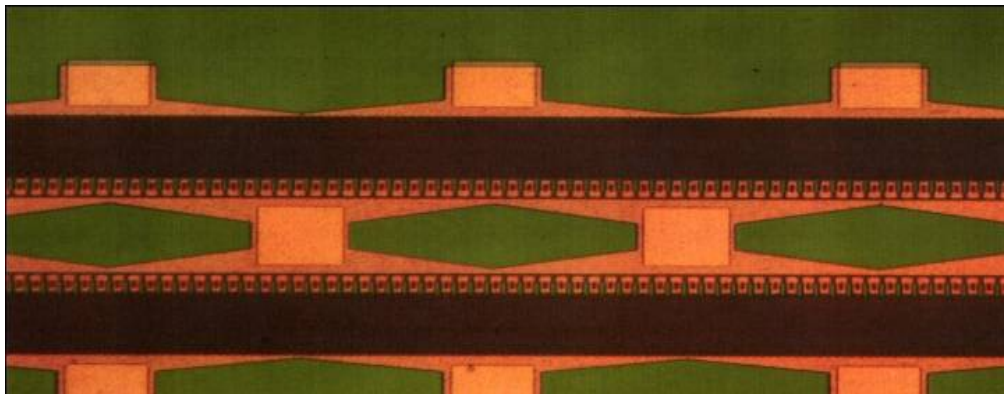


Рис. 1. Топология и фрагмент транзисторной структуры вновь разработанной конструкции

Внедрение новой топологии и модернизации технологических операций привело как к повышению технологичности производства, так и к улучшению параметров за счет большей идентичности кристаллов. При этом, транзисторный кристалл того же размера имеет периметр эмиттера 97,0 мм, площадь эмиттера 42000 мкм² и площадь коллектора 212000 мкм² с минимальным топологическим размером 0,8 мкм и шагом 7 мкм. При этом трудоемкость сборочных операций снизилась в 2 раза.

Разработчики и предприятия-изготовители мощных СВЧ транзисторов на протяжении десятков лет искали экологически чистые материалы с требуемыми диэлектрическими свойствами и теплопроводностью, альтернативные бериллиевой керамике – в настоящее время наиболее перспективными представляются высокотеплопроводные поликристаллический алмаз (полиалмаз) и керамика на основе нитрида алюминия (AlN).

Конструкции мощных СВЧ транзисторов, по сути, представляют сегодня собой сложные гибридные интегральные схемы, имеющие помимо транзисторных кристаллов кристаллы МОП конденсаторов, которые с внутрикорпусными проводниками создают цепи согласования транзистора с внешними волноводными линиями. При высоких значениях рабочей частоты проволочные выводы являются индуктивными схмотехническими элементами, которые входят в состав согласующих контуров и должны обладать высокой воспроизводимостью длин и высоты соединительных проволочных петель, чтобы резонансные значения этих контуров оставались постоянными и воспроизводимыми величинами.

❖ Арсенид галлия

СВЧ микроэлектроника - это глобальный тренд, охватывающий все возможные области электроники, является основным вектором развития всей индустрии электроники – от технологий производства материалов, приборных структур, электронных и вакуумных компонентов до радиоэлектронной аппаратуры, конечных изделий, а также систем и комплексов на их основе. Возможности перспективных аналоговых СВЧ-технологий и тесно связанных с ними цифровых микроэлектронных технологий (которые сегодня по существу тоже являются "сверхвысокочастотными", но оперируют не аналоговыми сигналами, а информационными

ми потоками) позволили развиваться многим смежным направлениям, относящимся практически ко всем видам материального производства.

Разработка и внедрение технологии создания многофункциональных однокристальных СВЧ МИС (типа «система на кристалле»), включающих аналоговые, переключательные и цифровые схемы, основана на традиционном методе реализации рНЕМТ с длиной затвора 0,25 - 0,15 мкм - электронно-лучевой литографии. Однако этот метод имеет низкую пропускную способность и высокую стоимость, что ставит под угрозу производство большого объема.

Номенклатура серийно выпускаемых GaAsМИС (Рис.2.) входит в состав наиболее критичных устройств - приёмников и передатчиков современных средств радио- и спутниковой связи, радиолокационных приёмо-передающих модулей и работают на суше, море, воздухе и космосе.

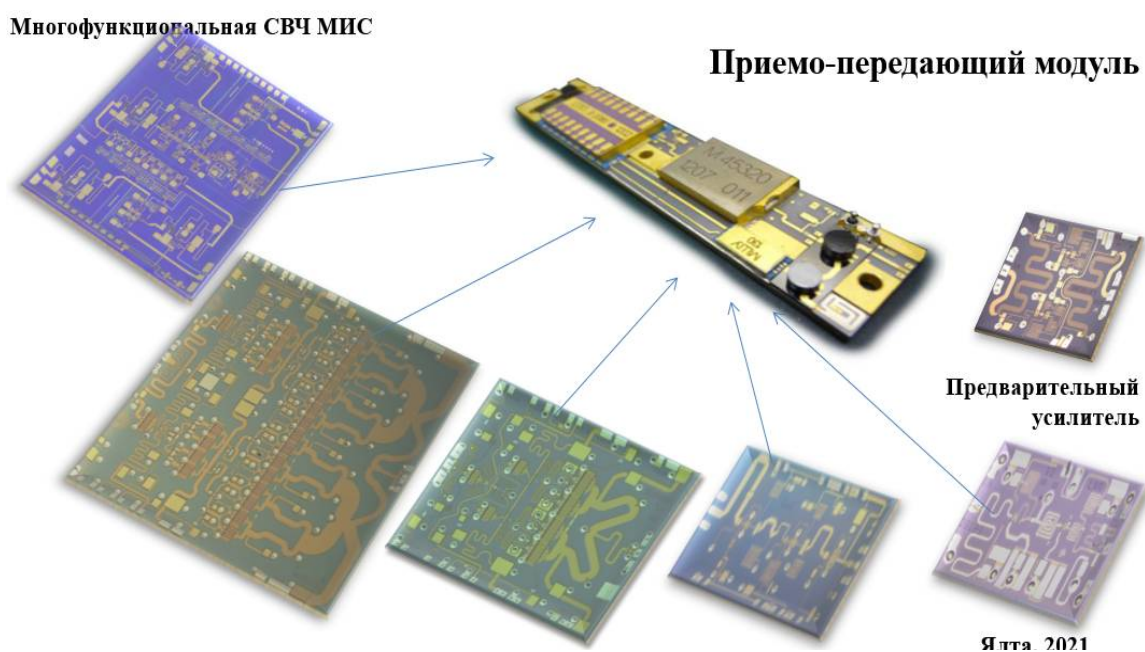


Рис. 2. Серийное производство комплекта GaAs малошумящих и мощных СВЧ МИС для модулей различного назначения. (АО «НПП «Исток» им. Шокина»)

Чтобы стать ведущим коммерческим кристалльным заводом GaAs, необходимо внедрить передовую технологию фотолитографии с глубоким ультрафиолетовым излучением. Технология рНЕМТ с использованием степперас шаговым устройством KrF 248 нм является одной из немногих жизнеспособных способов для производства 5-миллиметровых ММІС для нового поколения высокоскоростной связи 5G и 6G, новых возможностей сенсоров обработки сигналов, радаров и радиочастотных/аналоговых устройств.

2.Этап. GaAs, GaN – гетероинтеграция на карбидкремниевых (SiC) и кремниевых (Si) подложках

Второй этап - дальнейшее масштабирование и функциональная диверсификация на основе интеграции кремния (Si) в качестве инородной подложки с другими материалами, такими как соединения A^3B^5 (например, арсенид галлия, нитрид галлия).

Развиваются программы, направленные на 3D-интеграцию в пределах одного кристалла функциональных элементов, созданных на основе различных технологий

и материалов. Это позволит значительно улучшить характеристики военных и коммерческих систем при сохранении приемлемой стоимости, высокой надежности и стабильных рабочих характеристик.

❖ Карбид кремниевые (SiC) подложки

Радиопередатчики с миллиметровыми диапазонами длин волн (MMW) уже востребованы для настоящих и будущих беспроводных коммуникаций 5G и 6G.

Оценка производительности на частоте малого сигнала в диапазоне от 0,1 ГГц до 67 ГГц дала значение граничной частоты (F_T) и максимальной рабочей частоты (F_{MAX}) в 156 ГГц и 308 ГГц соответственно. Рекорд был достигнут с использованием градуированной структуры эпитаксиального слоя нитрида галлия алюминия (AlGaN) и Т-образной конфигурации мини-полевого электрода (FP) с длиной затвора 60 нм.

Эпитаксиальная структура на карбиде кремния (SiC) с структурой канала, состоящего из AlGaN градуированного слоя выше канала GaN. Барьер содержал 25% Al. На этой структуре были получены значения подвижности электронов $1423 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ и плотности носителей в канале $9,5 \times 10^{12}/\text{см}^2$.

Изготовленные транзисторы (рис. 3) также имели контакты исток-сток с выращенными в углублении слоями n^+ -GaN в интересах снижения контактного сопротивления. Расстояние между истоком и стоком составляло 1,1 мкм. Т-образный затвор с мини-FP имел выступ на 50 нм со стороны стока, предназначенный для уменьшения паразитных емкостных эффектов между затвором и стоком, которые снижают производительность на высоких частотах.

Тестирование мощности с конфигурацией затвора с двумя крыльями по 37,5 мкм от центральной оси (2 x 37,5 мкм) на частоте 30 ГГц показало линейную выходную плотность мощности от 2,5 Вт/мм до 5,5 Вт/мм при увеличении тока стока от 10В до 20В. Линейность выходной мощности является ключевым требованием для многих стандартов беспроводной связи.

Соответствующие показатели коэффициента полезного действия (PAE) составили 70% и 48% соответственно. В этих измерениях использовался фиксированный импеданс нагрузки, который не был оптимизирован по мере увеличения тока стока. Исследователи также обнаружили, что плотность мощности их транзисторов была более чем в 2 раза выше, чем в предыдущих отчетах по приборам GaN с частотой $F_T \sim 150$ ГГц. [2]

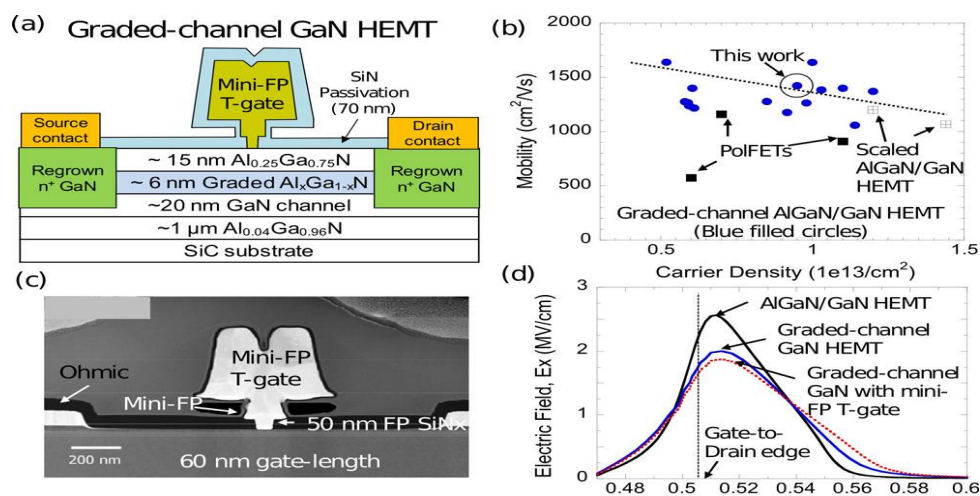


Рис. 3. (а) Схема GaN HEMT с градуированным каналом Mini-FP Т-затвора, (б) измеренная подвижность в зависимости от плотности носителей, (в) изображение Т-затвора в сканирующем электронном микроскопе, (г) рассчитанное электрическое поле в канале между затвором и стоком в сравнении между градуированными каналами GaN HEMT и обычным AlGaN/GaN HEMT.

❖ Нитрид галлия на кремнии

Присущие GaN преимущества в производительности по сравнению с традиционными технологиями быстро стали применяться в аппаратуре специального и двойного назначения, где производительность намного перевешивает соображения стоимости. Чтобы GaN смог пройти свой путь к массовой коммерциализации транзисторов и МИС, необходимо выдерживать требования к соотношению цены и качества, а также габаритным размерам конечных продуктов, включая базовые станции 5G, а также новые приборы высокой мощности - электронная аппаратура для приготовления пищи, освещения, промышленного отопления, медицинская и фармацевтическая аппаратура, автомобильные системы зажигания и др.

Фаза промышленного освоения технологий GaN в России, пока в десятки раз меньше, чем в мире, только началась и в ближайшие годы рынок будет резко расширяться. Проблемными моментами, сдерживающими развитие GaN-приборов, среди прочих, являются необходимость выращивания эпитаксиальных структур GaN на чужеродных (отличающихся по параметрам кристаллической решётки, тепловому расширению и т.д.) подложках и задача обеспечения адекватного теплоотвода от активной структуры.

Для чувствительных к цене коммерческих ВЧ-применений требуется огромный объем производства GaN, соответствующий технологическим требованиям рынка к поставляемым полупроводниковым материалам, и поэтому технология GaN на Si остается сегодня единственно жизнеспособной в коммерческом сегменте (рис. 4).

Тем не менее, для удовлетворения требований к объему, стоимости и импульсной мощности для основных оборонных и коммерческих рынков РЧ производство GaN на Si должно быть масштабировано с кристалльных производств полупроводниковых соединений A^3B^5 на новые высокопроизводительные линии типа КМОП. Современное оборудование, используемое в КМОП-фабриках, предполагает больший уровень автоматизации и возможность более строгого контроля процессов для достижения более воспроизводимого качества продукции и чрезвычайно высокого выхода годных, что приведет к дополнительному снижению затрат.

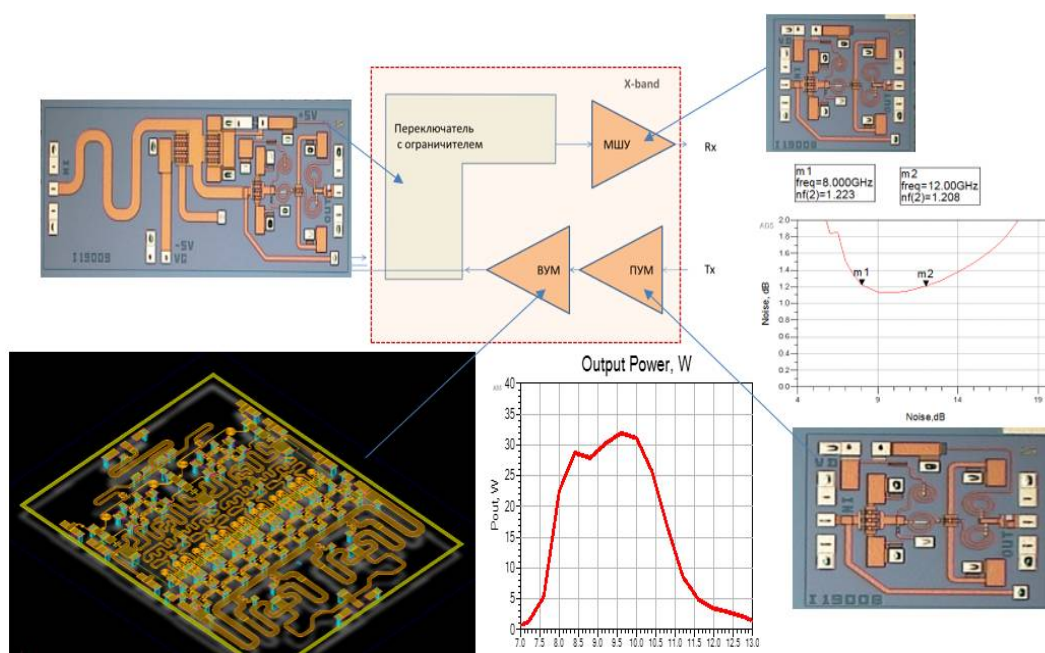


Рис. 4. Монолитные интегральные схемы приемопередающего модуля на основе GaN на кремниевой подложке в стадии испытаний. (АО НПП «Исток» им. Шокина)

3. Этап. Инженерия гетерогенных полупроводниковых материалов

Третий этап - бурное развитие гетероинтеграционных технологий соединения гетерогенных полупроводниковых материалов методом прямого поверхностно-активированного гибридного склеивания пластин для высокоэффективного электрического соединения.

❖ Архитектура GaN finFET и технологии 3D трехмерной интеграции слоев

Данные технологии сыграют важную роль в масштабировании GaN-транзисторов и интеграции большего количества функционалов, включающих соединение GaN и CMOS, чтобы расширить возможности технологий GaN [3].

Транзисторы GaN, сформированные на кремниевой подложке(111) диаметром 300 мм, имеют утопленный затвор и низкоомные, заново выращенные эпитаксией, контакты истока и стока (см. рис. 5).

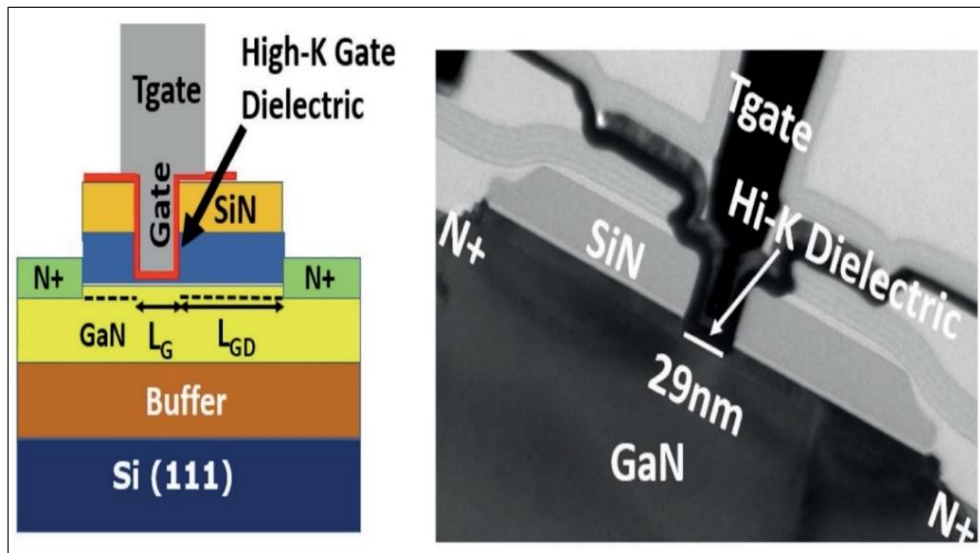


Рис. 5. (а) E-mode GaN-транзистор Intel имеет f_T 300 ГГц и f_{MAX} 400 ГГц. (б) Изображение, полученное с помощью просвечивающей электронной микроскопии, показывает, что длина затвора составляет всего 29 нм

Параметры GaN - транзисторов Intel показывают очень низкий ток утечки, высокий управляющий ток, низкое сопротивление и способность выдерживать напряжение сток-исток до 65 В. Уменьшение длины затвора с 2 мкм до 30 нм привело к увеличению крутизны 1200 мкСм/мкм до 2100 мкСм/мкм. Транзисторы с длиной затвора 30 нм и расстоянием между затвором и стоком 160 нм имеют f_T 300 ГГц и f_{MAX} 400 ГГц.

Были проведены измерения выходной мощности транзисторов с разными диапазонами частот и длиной затвора. Для транзисторов с длиной затвора 90 нм, получены результаты, обеспечивающие выходную мощность 23,4 дБм на частоте 28 ГГц, а также плотность мощности 2,7 Вт/мм и КПД добавленной мощности 50 процентов. Увеличение частоты привело к снижению выходной мощности и КПД, при этом выходная мощность в режиме насыщения падает до 0,4 Вт/мм на частоте 90 ГГц, а КПД по добавленной мощности снижается до 10,5%.

Используя технологию переноса 3D-слоев для объединения кремниевых P_{MOS} и GaN N_{MOS} микросхем, Intel создал 3D-КМОП-инвертор на основе склеивания пластин GaN на кремнии. Схемы этих устройств формируются с использованием четырехуровневых медных

внутренних соединений, которые обеспечивают изготовление тонкопленочных резисторов и конденсаторов металл-изолятор-металл (см. рис. 6)

Изготовление микросхемы включало соединение, скалывание и перенос тонкого слоя монокристаллического кремния на пластину GaN-транзистора до завершения этапов изготовления, необходимых для формирования верхних кремниевых P_{MOS} поверх нижних GaN-транзисторов. Первоначальные результаты являются многообещающими, поскольку гибридная структура обеспечивает низкие токи утечки, что является необходимым условием для логических приложений. Еще одним атрибутом является хорошо согласованное пороговое напряжение между $finFET$ кремниевых P_{MOS} и GaN N_{MOS} .

С помощью склеивания пластин был создан целый ряд новых устройств, включая многопереходные солнечные элементы, силовые устройства с соединениями между материалами с широкой и узкой полосой пропускания, а также FET, в которых для увеличения теплопроводности используются алмазные слои.

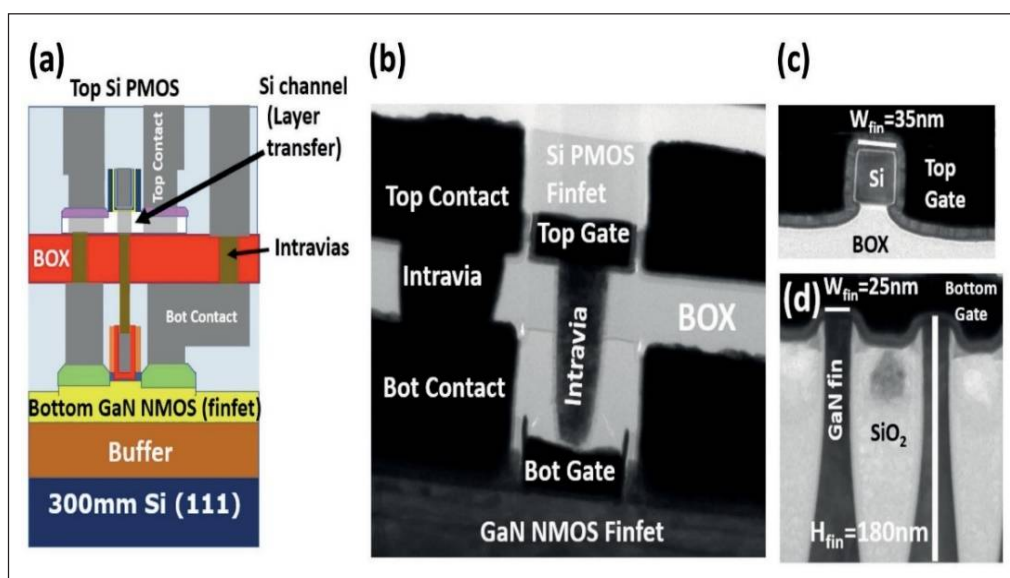


Рис. 6. (а) 3D-КМОП-инвертор на основе GaN-кремния.

Изображения просвечивающей электронной микроскопии показывают:

- (b) многоуровневый инвертор, содержащий нижний GaN E-mode с высоким разрешением $N_{MOS}FinFET$ и верхний кремниевый $P_{MOS}FinFET$;
 (c) кремниевое ребро шириной 35 нм, которое образует верхний канал P_{MOS} ;
 (d) GaN-ребро шириной 25 нм для нижнего канала N_{MOS}

❖ Алмазные суперпереходы (SPADES) со сверхрешеткой (SLCFET) в полевом транзисторе на GaN

По сравнению с планарными транзисторами с высокой электронной подвижностью GaN (HEMTs), с одним каналом 2DEG, несколько каналов 2DEG уменьшают сопротивление включения, улучшая достижимую плотность мощности и коэффициент усиления.[4] Чрезвычайно высокая плотность заряда, возникающая в результате сложения 2DEGs, создает скопление электрического поля в области на стороне затвора к стоку, что приводит к преждевременному пробоя. Для предупреждения пробоя в области затвора к стоку образуется суперпереход из нанокристаллического алмаза (NCD) для управления профилем электрического поля и, таким образом, для повышения напряжения пробоя. Полученное в результате устройство называется усилителем мощности с суперрешеткой с усилением алмазным суперпереходом (SPADES), показанным на рис. 7.

Формирование NCD суперпереходов создает несколько проблем, включая конформный рост NCD в пределах малых соотношений сторон, управление деформацией и достижение контролируемого легирования пленок NCD р-типа.

NCD был нанесен методом микроволнового плазмохимического осаждения из паровой фазы при 750С. Для достижения выращивания алмазов с равномерной толщиной наростов NCD на 4-дюймовых пластинах процесс проходил в реакторе мощностью 6,5 кВт, предназначенный для равномерной толщины NCD на 4-дюймовых пластинах. Включение легирующей примеси Р-типа в пленки NCD было достигнуто путем введения диборана (B₂H₆) во время роста алмаза.

Этот оптимизированный процесс диспергирования семян, образования/ слияния и роста алмаза был реализован на устройстве SPADES, как показано на рисунке 9. Алмазный суперпереход р-типа (SJ) создается в области на стороне затвора к стоку, чтобы разрядить часть заряда канала SLCFET.

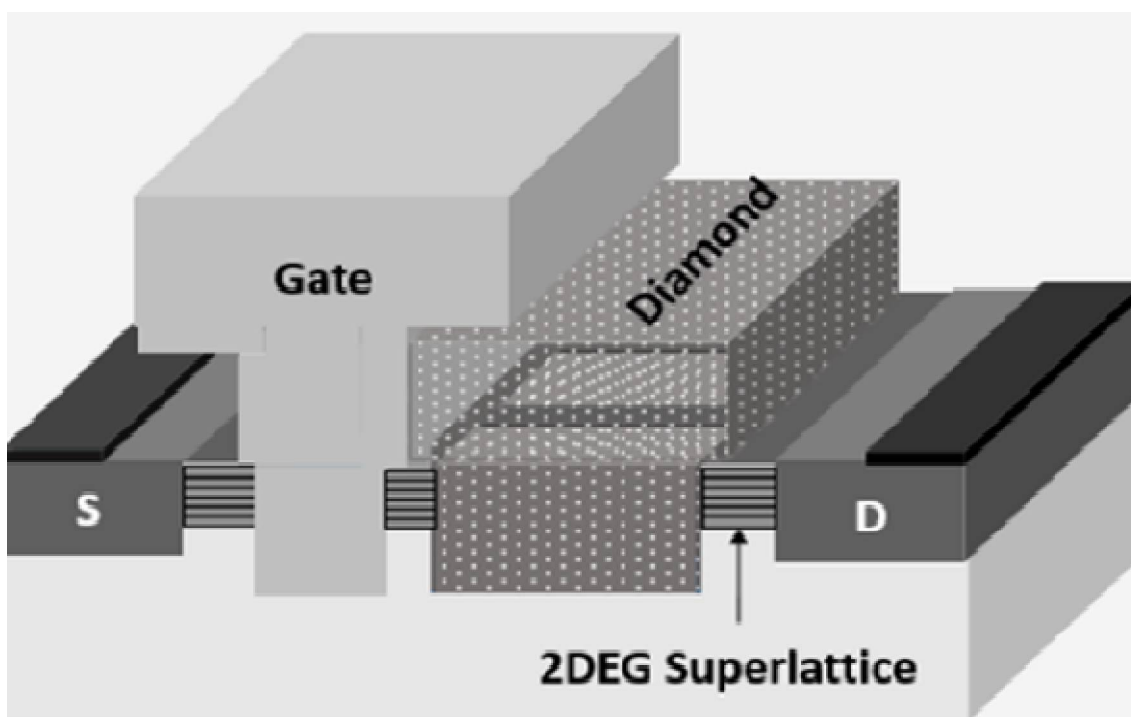


Рис. 7. Схема SLCFET с Т-образным затвором

Силсесквиоксан водорода (Hydrogensilsesquioxane) (HSQ) используется в качестве временной маски для блокирования определенных областей устройства от пленки NCD. Затем для травления алмазной пленки используется O₂ ICP RIE с образованием устройства SPADES, показанного на рис.8.

Пленки NCD Р-типа были выращены методом микроволнового плазменно-химического осаждения из паровой фазы и интегрированы в устройства SLCFET для создания устройства SPADES. Оптимизация роста алмаза привела к обеспечению конформного заполнения мелких деталей с высоким соотношением сторон, контроля легирования, низкого напряжения в 4 -дюймовых пластинах.

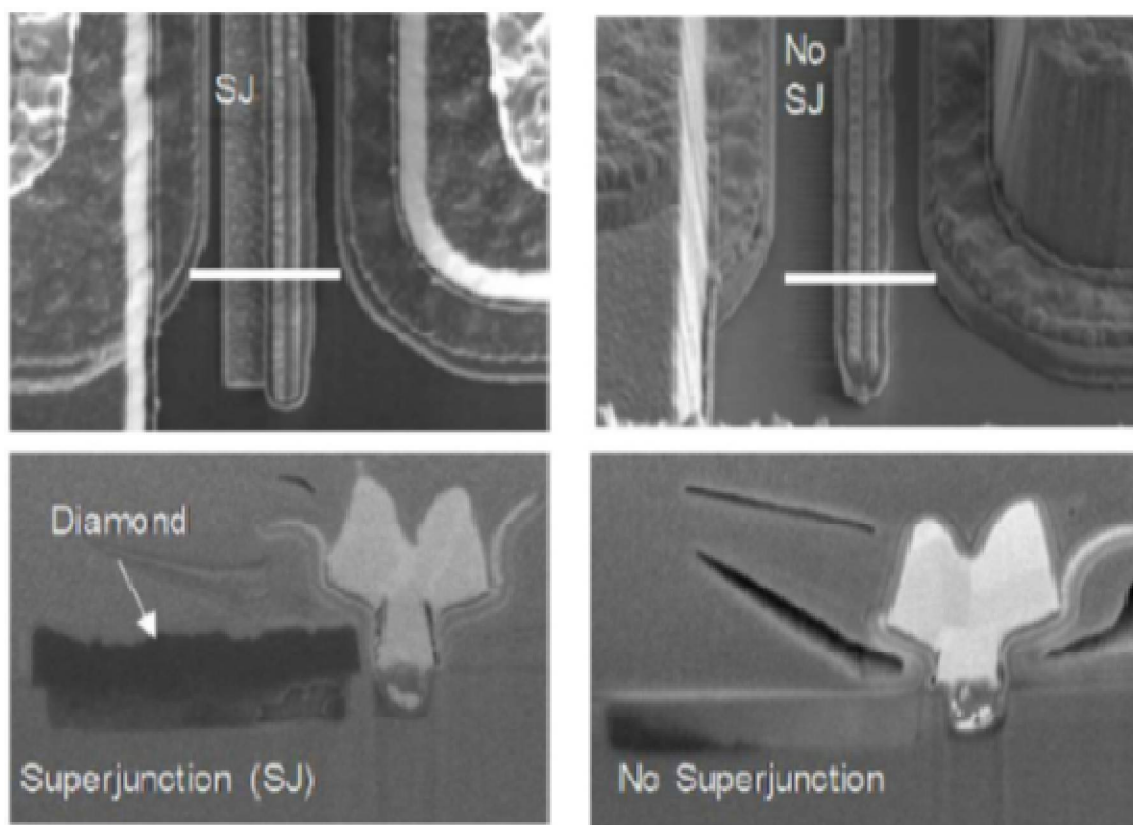


Рис. 8. Изображения, показывающие заполнение нанокристаллического алмаза в области затвора-стока устройства SPADES

❖ Новые архитектуры для снижения теплового сопротивления

В АО «НПП «Исток» им. Шокина» разработан и внедрен в промышленное производство полный технологический маршрут создания теплоотводов на основе поликристаллического алмаза – металлизированных теплоотводящих элементов конструкции (ТЭК) для СВЧ и силовых электронных модулей. (Рис.9.)

ТЭК на основе поликристаллического алмаза в составе электронных СВЧ модулей играют роль тепловых буферов, предотвращая локальные перегревы активных СВЧ или силовых электронных компонентов (транзисторов, монолитных интегральных СВЧ схем). Тепло из точек или линий локального разогрева полупроводниковых приборов, которыми, как правило, являются подзатворные области (области р-п переходов), практически мгновенно равномерно распределяется по объему ТЭК, передавая затем тепло металлическим или композитным основаниям, корпусам или радиаторам, которые могут быть снабжены системами принудительного или кондуктивного охлаждения.



Рис. 7. Применение теплоотводов из CVD алмаза

Новые архитектуры обещают существенное снижение теплового сопротивления. Для формирования устройств берут необработанные эпитаксиальные слои GaN на кремнии, приклеивают к нему подложку-носитель, далее удаляют подложку, выращивая на ее месте слой алмаза, а затем удаляют временный носитель. Поскольку осажденный алмаз образует довольно грубый слой, его необходимо отполировать. Варианты присоединения носителя к эпитаксиальной пластине включают диффузионное склеивание и плазменно-активированное склеивание фритты (стеклообразный материал, который получается при плавлении массы и ее быстром охлаждении), которую можно применять к целой пластине, при этом с сохранением прочности при высоких температурах, используемых впоследствии для выращивания алмазов, и позволяет устранять изгибы, искривления и дефекты в GaN.

Современное состояние алмазных технологий в России позволяет осуществить переход к алмазной электронике – разработке и изготовлению приборов СВЧ и силовой электроники на основе алмазных гетероструктур.

Заключение

Развитие гетерогенной интеграции в электронной промышленности

Согласно Целевому сценарию в рамках Стратегии развития электронной промышленности на период до 2030 года определены цели исследований по созданию прорывных технологий, приборов на их основе и нового поколения производств, ориентированных на долгосрочные потребности полупроводниковой промышленности.

Перспективность гетерогенной интеграции – в возможности сочетания фундаментальных характеристик широкозонных материалов и уплотненной системной интеграции элементов ИС на едином кристалле, характерной для технологий Si.

В настоящее время разработана **Дорожная Карта Гетероинтеграции** по созданию «Современной экосистемы сквозного цифрового производства, включающей организацию дизайн-центра по разработке широкой гаммы ЭКБ и технологической платформы для обеспечения инновационного лидерства отечественных систем и комплексов аналого-цифровой техники. Это позволит обеспечить разработку и внедрение технологических процессов интеграции технологий КМОП и МИС на материалах A^3B^5 на основе квазитрехмерной 2.5D и трехмерной 3D архитектур с целью создания технологических маршрутов для кристалльного производства гетероинтегрированных топологий микросистем с инновационными тополо-

гиями и архитектурами высокого уровня сложности (СнК, СвК) для реализации модели «фаундрии».

Заглядывая в будущее, ключевыми факторами, стимулирующими грядущие инновации, можно назвать резкий рост капитализации полупроводниковой промышленности за счет развития стратегических компетенций, инновационных технологий и интеллектуальной собственности, предоставления предприятиям возможности быть технологически конкурентоспособными, культивирования технологического кадрового резерва для внедрения новых знаний в отрасль.

Библиографический список

1. Борисов А.А., Буробин В.А. Обзор современных технологий гетероинтеграции многокомпонентных полупроводниковых соединений АЗВ5 и кремниевых КМОП для внедрения на рынки оборонной и гражданской продукции [Текст] / – М. : Техносфера, 2020. – 256 с.

2. Jeong-Sun Moon, Bob Grabar, J.C. Wong, Dao Chuong/ Power Scaling of Graded-Channel GaN HEMTs With Mini-Field-Plate T-gate and 156 GHz fT. /HRL Laboratories/ LLC /June 2021/ <https://www.researchgate.net/scientific-contributions/Jeong-Sun-Moon-74975862>.

3. RICHARD STEVENSON, EDITOR, COMPOUND SEMICONDUCTOR. ISSUE I 2022 I WWW.COMPOUNDSEMICONDUCTOR.NET.

4. Geoffrey M. Foster¹, Tatyana I. Feygelson² et al, Formation of Diamond Superjunctions to Enable GaN-Based Super-Lattice Power Amplifiers with Diamond Enhanced Superjunctions (SPADES), IASEE Postdoctoral Fellow Residing at NRL, Washington, DC 22310, https://csmantech.org/wpcontent/acfrcwdownloads/field_5e8cddf5ddd10/post_812/0385_0560_000081.docx

УДК 521.373.826; ГРНТИ 29.33.15

МЕТОД КОМПЕНСАЦИИ ПОРОГА ЗАХВАТА В ВЫХОДНОМ СИГНАЛЕ КОЛЬЦЕВОГО ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА

М.В. Чиркин, Г.В. Давыдов, В.Ю. Мишин, А.Е. Серебряков

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, sea89s@yandex.ru*

Аннотация. С помощью математической модели лазерного гироскопа, выполнена проверка алгоритма компенсации порога захвата в выходном сигнале лазерного гироскопа. Алгоритм позволяет корректно восстанавливать параметры порога захвата и минимизировать составляющую, связанную с захватом в выходном сигнале датчика.

Ключевые слова: лазерный гироскоп, квадратурные сигналы, порог захват

METHOD FOR COMPENSATING THE LOCK THRESHOLD IN THE OUTPUT SIGNAL OF A RING LASER GYROSCOPE

M.V. Chirkin, G.V. Davydov, V.Yu. Mishin, A.E. Serebryakov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, sea89s@yandex.ru*

The summary. Using a mathematical model of a laser gyroscope, the algorithm for compensating the lock-in threshold in the output signal of a laser gyroscope was tested. The algorithm makes it possible to correctly restore the parameters of the lock-in threshold and minimize the capture-related component in the output signal of the sensor.

Keywords: laser gyroscope, quadrature signals, lock-in threshold

Введение

В качестве датчиков угловых скоростей в бесплатформенных инерциальных навигационных системах (БИНС) летательных аппаратов широко используются лазерные гироско-

пы. Основным элементом лазерного гироскопа является кольцевой гелий-неоновый лазер (рис. 1).

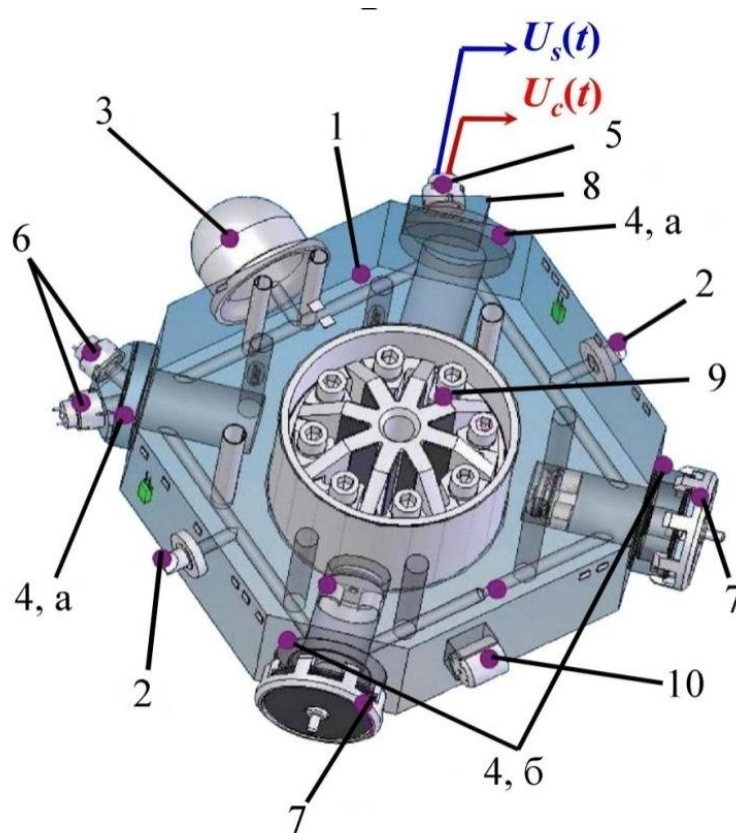


Рис. 1. Кольцевой лазер гироскопа ЛГ-1 [1]: 1 – моноблок из ситалла, 2 – аноды, 3 – катод, 4 – плоские (а) и сферические зеркала оптического резонатора, 5 – фотодиод для регистрации информационных сигналов, 6 – фотодиоды системы регулирования периметра, 7 – пьезоэлектрические преобразователи, 8 – смесительная призма, 9 – виброподвес, 10 – магнитоэлектрический датчик угловой скорости

Кольцевой лазер генерирует две оптические волны, распространяющиеся во встречных направлениях внутри оптического резонатора, образованного зеркал 4. Лазерные пучки выводятся в смесительную призму 8 и образуют на выходе из нее интерференционную картину. Вращение гироскопа вокруг оси, перпендикулярной плоскости резонатора, изменяет разность фаз встречных волн ψ (фазу Саньяка), что приводит к перемещению интерференционных полос. Для регистрации информационных сигналов служит фотодиод 5 с двумя чувствительными площадками, расстояние между центрами которых составляет четверть интерференционной полосы. В результате на выходе фотодиода формируются квадратурные сигналы: $U_s(t) = U_{s0} + U_{sm} \sin(\psi)$, $U_c(t) = U_{c0} + U_{cm} \cos(\psi)$. Обработывая эти сигналы методом клиппирования, рассчитывается угловая скорость.

В результате рассеяния лазерного излучения на шероховатостях зеркал, существует слабая связь между генерируемыми волнами, которая может привести к их синхронизации при малых угловых скоростях вращения. Данное явление приводит к нечувствительности гироскопа к малым угловым скоростям вращения. Для устранения данного эффекта используются различные методы, один из которых механическая вибрационная частотная подставка: кольцевой резонатор совершает вращательные колебания относительно корпуса с частотой 400 герц и амплитудой, изменяющейся хаотически. Использование вибрационной частотной подставки требует ее исключения из выходного сигнала датчика.

В выходном сигнале датчика имеется случайная ошибка. Наибольший вклад в эту ошибку вносит компонента обусловленная явлением захвата.

При слабой связи встречных волн в кольцевом лазерном гироскопе для фазы Саньяка справедливо соотношение [2]:

$$\frac{1}{K} \frac{d\psi}{dt} = \Omega + \omega_d \sin(2\pi ft) - \omega_L \sin(\psi + \rho), \quad (1)$$

где Ω – постоянная угловая скорость вращения;

ω_d и f – амплитуда и частота гармонических колебаний (гармоническая вибрационная частотная подставка);

ω_L и ρ – параметры порога захвата;

K – масштабный коэффициент.

Третье слагаемое в уравнении (1) отражает влияние явление синхронизации встречных волн.

Авторы работы [3] предложили метод компенсации составляющей, связанной с порогом захвата в выходном сигнале лазерного гироскопа. В качестве входных данных метод использует три сигнала: квадратурные сигналы U_c , U_s и переменную составляющую vac суммы сигналов с фотодиодов δ , измеряющих мощность лазерного излучения. Метод включает следующие этапы:

- регистрация 3-х цифровых сигналов лазерного гироскопа U_c , U_s и vac ;
- восстановление разности фаз встречных волн ψ по квадратурным сигналам;
- восстановление параметров порога захвата ω_L и ρ путем синхронного детектирования сигнала vac ;
- формирование сигнала ошибки ψ_{err} ;
- вычитание сигнала ошибки ψ_{err} из восстановленной фазы ψ .

В результате выходной сигнал датчика очищается от случайной составляющей связанной с явлением захвата.

Цель данной работы – проверка метода компенсации порога захвата в выходном сигнале лазерного гироскопа с помощью математического моделирования.

Математическая модель первичных сигналов лазерного гироскопа

Использовалось соотношение (1), описывающее связь встречных волн и угловую скорость вращения на интервале времени 1 сек. Дифференциальное уравнение решалось численно методом Рунге-Кутты 4-го порядка. Были выбраны следующие параметры: периметр резонатора 28 см, амплитуда подставки, параметры захвата $\omega_L = 0,01$ °/с, $\rho = 0,15$ рад; $\omega_d = 120$ °/с, $f = 400$ Гц – амплитуда и частота гармонической вибрационной частотной подставки; $\Omega = 12$ °/час – заданная угловая скорость вращения. Частота дискретизации 5 МГц.

По рассчитанной разности фаз встречных волн формировались идеальные квадратурные сигналы:

$$U_s(t) = \sin(\psi), U_c(t) = \cos(\psi). \quad (2)$$

Переменная составляющая сигнала, пропорциональная мощности лазерного излучения рассчитывалась по формуле [3]:

$$vac(t) = 2A_1A_2E_0 \sin(\psi + \rho). \quad (3)$$

Параметры E_0 и ρ имеют вид

$$E_0 = \left[\left(r_1 \frac{A_2}{A_1} \right)^2 + \left(r_2 \frac{A_1}{A_2} \right)^2 + 2r_1 r_2 \cos(\beta_1 + \beta_2) \right]^{0,5}, \quad (4)$$

$$\tan(\rho) = \frac{r_2 \frac{A_2}{A_1} \sin(\beta_2) - r_1 \frac{A_1}{A_2} \sin(\beta_1)}{r_2 \frac{A_2}{A_1} \cos(\beta_2) + r_1 \frac{A_1}{A_2} \cos(\beta_1)}, \quad (4)$$

где A_1, A_2 – амплитуды первичных сигналов;

$r_{1,2}$ – амплитуды коэффициентов связи встречных волн;

β_1, β_2 – фазы коэффициентов связи встречных волн.

Значения коэффициентов связи встречных волн ($r_{1,2}$ и $\beta_{1,2}$) были рассчитаны по заданным параметрам захвата ω_L и ρ . Амплитуды первичных сигналов полагались равными 1. Параметр E_0 пропорционален заданному порогу захвата ω_L .

Для проверки алгоритма коррекции порога захвата также были рассчитаны идеальные сигналы. Аналитическое решение дифференциального уравнения (1), полученное при $\omega_L = 0$.

$$\psi_{ideal} = K\Omega t - \frac{K\omega_d}{2\pi f} \cos(2\pi ft) + \frac{K\omega_d}{2\pi f}. \quad (5)$$

Эталонный сигнал ошибки $\psi_{errideal}$, был получен путем вычитания из результата численного решения дифференциального уравнения (1) ψ идеального сигнала ψ_{ideal} .

$$\psi_{errideal} = \psi - \psi_{ideal}. \quad (6)$$

Алгоритм компенсации порога захвата в выходном сигнале лазерного гироскопа

По материалам работы [2] был написан алгоритм компенсации порога захвата в выходном сигнале лазерного гироскопа. На рисунке 2 представлена блок-схема разработанной программы.

Считываются массивы квадратурных сигналов U_c, U_s и переменная составляющая v_{ac} . В блоках 1-4 по отсчетам квадратурных сигналов восстанавливается разность фаз встречных волн ψ . Восстановленная фаза Φ (свернутая фаза) в блоке 1, содержит скачки фазы на 2π . В блоках 2-4 выполняется коррекция скачков фазы (разворачивание фазы).

В блоках 5-10 восстанавливается составляющая разности фаз встречных волн, связанная с порогом захвата – сигнал ошибки ψ_{err} . В блоках 5-8 выполняется демодуляция переменной составляющей мощности встречных волн v_{ac} с помощью квадратурных сигналов U_c, U_s . В результате получаем синфазный I и квадратурный Q сигналы, которые несут в себе информацию о параметрах порога захвата

$$I \sim A_1 A_2 E_0 \cos(\rho), \quad Q \sim A_1 A_2 E_0 \sin(\rho).$$

В блоке 9 восстанавливаются мгновенные значения параметров Ω_L и ρ . В блоке 10 рассчитывается сигнал ошибки. В блоке 11 выполняется компенсация составляющей, связанной с порогом захвата, путем вычитания из массива ψ сигнала ошибки ψ_{err} . В результате получаем фазу ψ_0 .

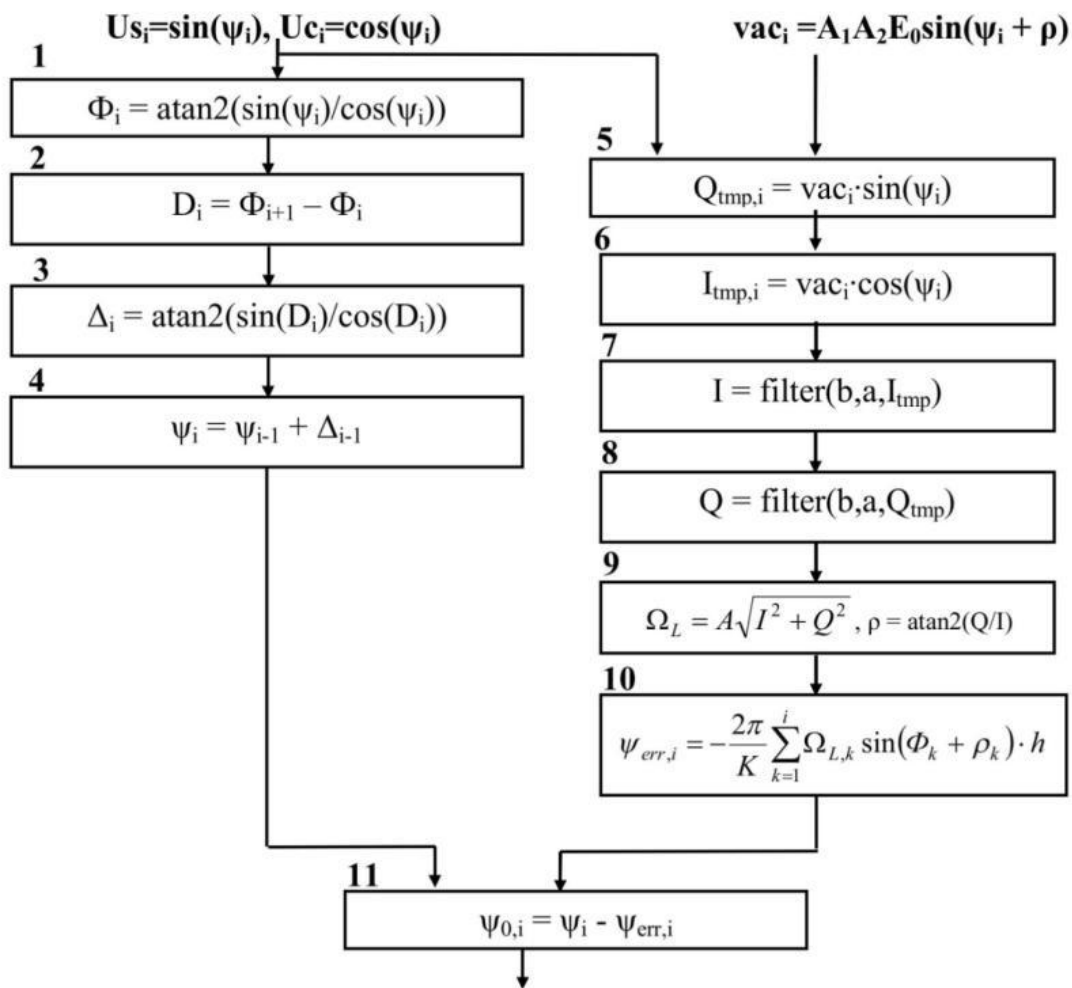


Рис. 2. Блок-схема алгоритма компенсации порога захвата в выходном сигнале лазерного гироскопа

Результаты моделирования

На рисунке 3 представлены некоторые результаты работы алгоритма. На рисунке 3, а представлен восстановленный сигнал ошибки ψ_{err} и результат теоретического расчета ошибки $\psi_{errideal}$. Есть некоторое расхождение, которое связано с неоптимальными параметрами цифрового фильтра использованного в блоках 7 и 8 рис. 2. На рисунке 3, б показана невязка между восстановленной разностью фаз встречных волн ψ_0 (после коррекции захвата) и теоретическим решением ψ_{ideal} . Ошибка в выходном сигнале была минимизирована. Разработанный алгоритм позволяет корректно восстанавливать информацию о параметрах захвата и минимизировать составляющую, связанную с захватом, в выходном сигнале лазерного гироскопа.

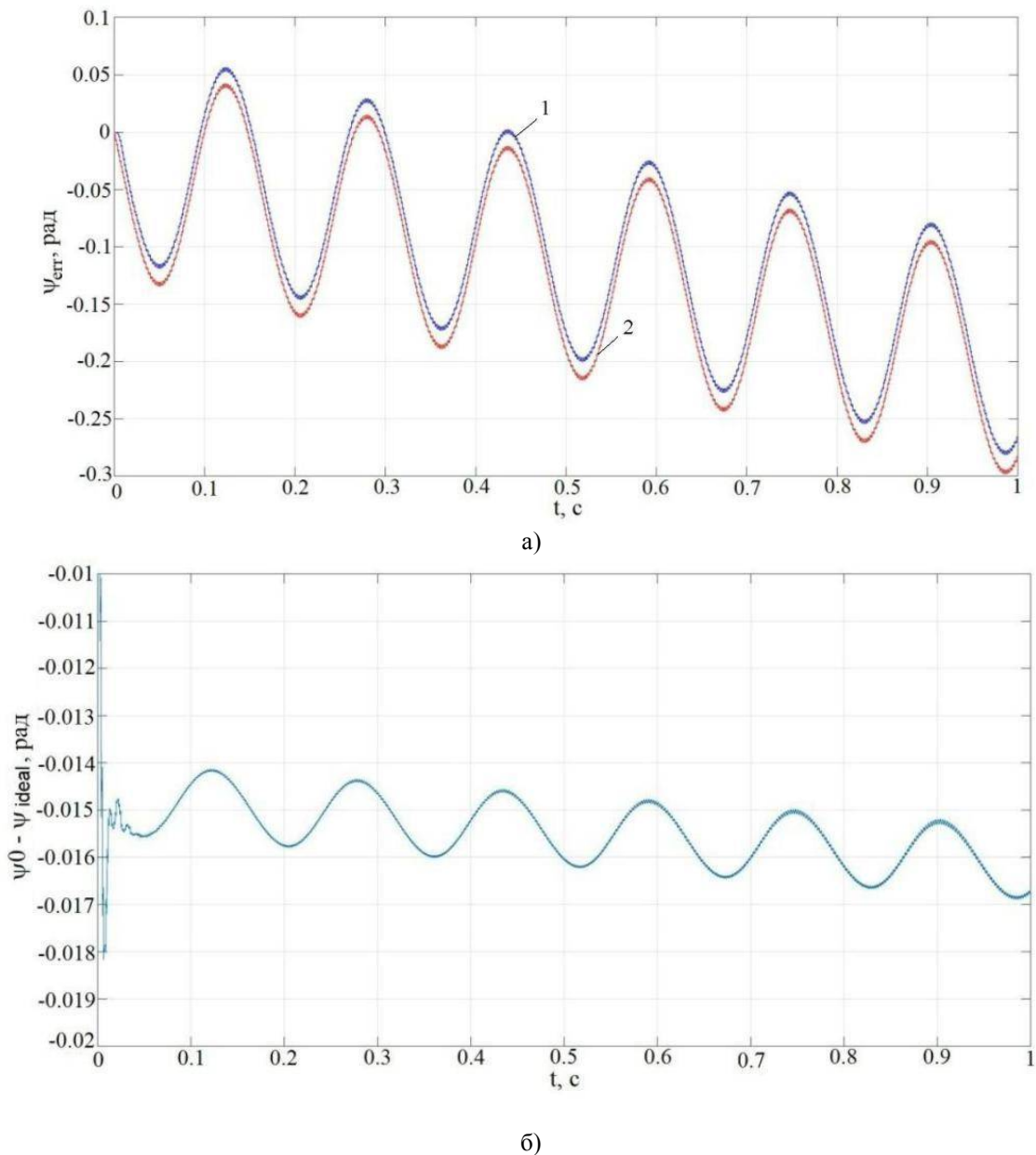


Рис. 3. Восстановленный сигнал ошибки (а) и невязка между восстановленным сигналом разности фаз встречных волн ψ_0 и теоретическим решением ψ_{ideal} (б):

1 – восстановленный сигнал ошибки, 2 - сигнал ошибки, рассчитанный по формуле (6)

Библиографический список

1. Кузнецов А.Г., Молчанов А.В., Чиркин М.В., Измайлов Е.А. Прецизионный лазерный гироскоп для автономной инерциальной навигации // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 1. с. 78-88.
2. Aronovitz F., Fundamentals of the ring laser gyro // Optical Gyros and their Application.- RTO-AG-339., 1999. pp.3-1 - 3-45.
3. Jae-Cheul Lee, Hyun-Ju Cho, Ho-Soon Yang Zero lock-in implementation by phase wrapping/unwrapping in a ring laser gyroscope // Applied optics, Vol. 60, No. 34, 2021, 10529.

УДК 621.387.322; ГРНТИ 59.14.21

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ МАНОМЕТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ФОТОКАТОДОМ ПРИ НИЗКОМ ВАКУУМЕ

В.К. Базылев, А.М. Жидков, В.А. Коротченко

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина
Рязань, bazylev.v.k@rsreu.ru*

Аннотация. Экспериментально исследована работа манометрического преобразователя в виде цилиндрического магнетрона с фотокатодом, устойчивым к действию воздуха при атмосферном давлении, в диапазоне давлений воздуха (0,01 – 760 Торр). В качестве материала фотокатода использовались плёнка галлия. Установлено, что при облучении фотокатода ультрафиолетовым излучением светодиода на длине волны 265 нм при атмосферном давлении происходило существенное (до 50%) уменьшение тока фотокатода, после чего величина тока не изменялась. Поскольку в диапазоне давлений, когда длина свободного пробега электрона намного меньше межэлектродных расстояний, о давлении газа в исследуемом манометрическом преобразователе предполагалось судить по величине тока катода, то при измерении давления необходимо предусматривать время для установления тока фотокатода. Получена градуировочная зависимость манометрического преобразователя по воздуху в диапазоне (0,01 – 760 Торр).

Ключевые слова: манометрический преобразователь, фотокатод, ультрафиолетовое излучение, светодиод, давление воздуха.

JOB RESEARCH PRESSURE GAUGE CONVERTER WITH A PHOTOCATHODE AT LOW VACUUM

V.K. Bazylev, A.M. Zhidkov, V.A. Korotchenko

*Ryazan State Radio Engineering University
Ryazan, bazylev.v.k@rsreu.ru*

Annotation. The operation of a pressure gauge converter in the form of a cylindrical magnetron with a photocathode resistant to the action of air at atmospheric pressure in the air pressure range (0.01-760 Torr) has been experimentally investigated. Gallium film was used as the photocathode material. It was found that when the photocathode was irradiated with ultraviolet radiation of an LED at a wavelength of 265 nm at atmospheric pressure, a significant (up to 50%) decrease in the photocathode current occurred, after which the current value did not change. Since in the pressure range, when the free path of the electron is much smaller than the interelectrode distances, the gas pressure in the manometric converter under study was supposed to be judged by the magnitude of the cathode current, then when measuring pressure, it is necessary to provide time to establish the photocathode current. The calibration dependence of the pressure gauge converter by air in the range (0,01 – 760 Torr) is obtained.

Keywords: pressure gauge converter, photocathode, ultraviolet radiation, LED, air pressure.

Введение

В работе [1] нами исследован манометрический преобразователь на основе цилиндрического магнетрона, работа которого основана на рассеянии электронов молекулами газа в скрещенных электрическом и магнитном полях. В конструкции манометрического преобразователя использовался фотокатод на основе плёнки галлия, устойчивый к действию воздуха при атмосферном давлении, облучаемый ультрафиолетовым излучением с длиной волны 254 нм. Исследование подтвердило возможность измерения давления газа в диапазоне $10^{-7} - 10^{-3}$ Торр. В настоящей работе приведены результаты исследования возможности измерения давления воздуха в диапазоне 0,01 – 760 Торр.

Конструкция манометрического преобразователя и экспериментальная установка

Объектом исследования служил манометрический преобразователь открытого типа в виде цилиндрического магнетрона с установленной магнитной системой и фотокатодом в виде плёнки галлия на медной подложке. Конструкция манометрического преобразователя (рис. 1) содержала фотокатод (1), расположенный на первой торцевом электроде (2), осевой электрод (3), анод (4), второй торцевой электрод (5).

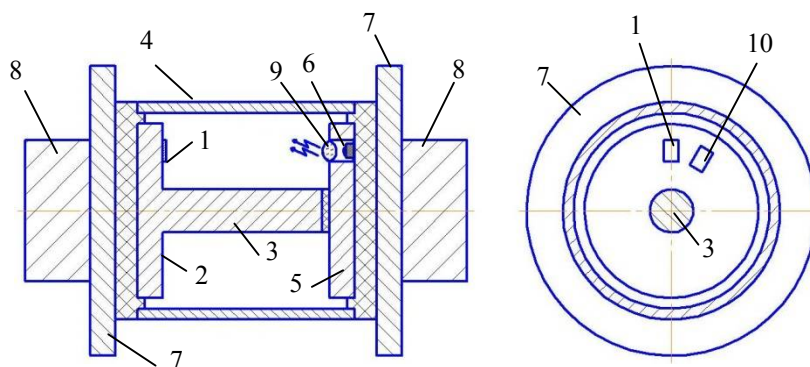


Рис. 1. Конструкция манометрического преобразователя

Первый торцевой электрод был электрически соединён с осевым электродом. Вторым торцевой электрод был изолирован от осевого электрода. Светодиод (6) был укреплен на втором торцевом электроде (5). Во втором торцевом электроде имелось отверстие для прохождения ультрафиолетового излучения с длиной волны 265 нм от светодиода закрытое металлической сеткой с прозрачностью 60 %. Для фокусировки излучения светодиода на поверхность фотокатода в отверстие второго торцевого электрода была установлена кварцевая линза (9). Магнитная система состояла из постоянных магнитов (8) и полюсных наконечников (7) и обеспечивала индукцию осевого магнитного поля 63 мТл. Фотокатод (1) и коллектор электронов (10) имели размер 2x5 мм. Торцевые электроды имели диаметр 31 мм. Анод был выполнен в виде цилиндра диаметром 33 мм, осевой цилиндрический электрод имел наружный диаметр 9 мм. Расстояние между катодом и вторым торцевым электродом составляло 30 мм.

Манометрический преобразователь помещался под колпак установки вакуумного напыления, который мог откачиваться форвакуумным и турбомолекулярным насосами. Давление воздуха под колпаком измерялось деформационным манометром и манометром ВДГ.

В режиме измерения давления на анод и коллектор электронов (10) подавалось напряжение 9 В относительно фотокатода (1). На первый и второй торцевые электроды и осевой электрод подавалось напряжение -2 В относительно фотокатода. Фотокатод облучался ультрафиолетовым излучением мощностью порядка 2 мВт. В отличие от измерения давления на высоком вакууме, где мерой давления служил ток анода, на низком вакууме в качестве меры давления использовался ток фотокатода. Ток фотокатода измерялся электрометрическим усилителем. УФ светодиод ТО-3535BC-UVC265-30-6V-E был napаян на медную пластину, которая крепилась винтом к массивному полюсному наконечнику. Ток светодиода поддерживался равным 30 мА, при этом светодиодом выделялась тепловая мощность порядка 200 мВт. Как показал эксперимент, теплоёмкость системы охлаждения светодиода обеспечивала постоянство мощности излучения при давлении 0,01 Торр в течение не менее 10 минут.

Экспериментальные результаты

Для исследования стабильности фотоэмиссии галлиевого фотокатода на воздухе при атмосферном давлении измерялась зависимость тока фотоэмиссии от времени после включения УФ светодиода. На рисунке 2 представлена зависимость тока фотокатода от времени при давлении 741 Торр при напряжении на аноде и втором торцевом электроде 20 В. На осевом электроде, первом и втором торцевых электродах устанавливалось напряжение -2 В относительно катода.

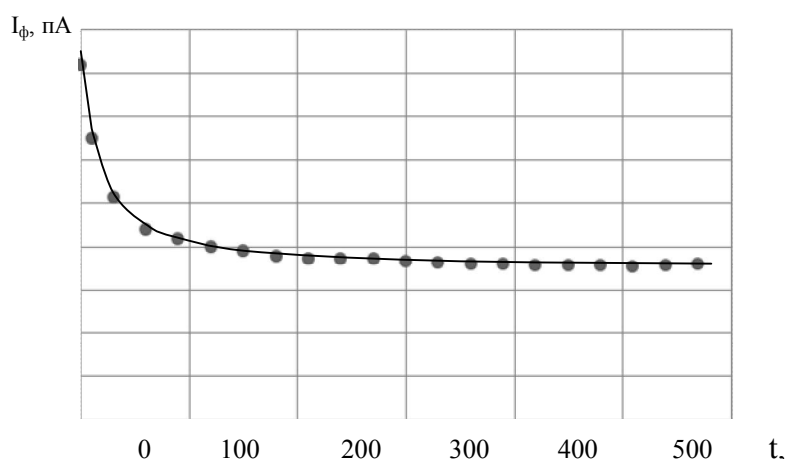


Рис. 2. Зависимость тока галлиевого фотокатода от времени действия УФ излучения на длине волны 265 нм мощностью 2 мВт при напряжении на аноде и втором торцевом электроде 20 В

После начала облучения фототок уменьшался до уровня 0,55 от наибольшего значения в момент начала облучения за 200 секунд и затем не изменялся. Уменьшение тока фотоэмиссии при облучении можно объяснить разложением плёнки окиси галлия на поверхности фотокатода. Энергия диссоциации плёнки GaO при температуре 298,15 К составляет 3,66 эВ [2], что меньше энергии кванта УФ излучения на длине волны 265 нм, равной 4,7 эВ. Работа выхода электронов для чистого галлия равна 3,9 эВ. Плёнка окиси уменьшает работу выхода видимо по тому же механизму, как плёнка окиси тория на вольфрамовом катоде, или плёнка окиси цезия на цезии, путём создания двойного электрического слоя. Уменьшение работы выхода электронов приводит к росту тока. При мощности УФ излучения порядка 2 мВт скорость разложения окиси галлия оказывается намного меньше скорости образования окисла при атмосферном давлении воздуха. Поэтому величина тока стабилизируется.

После выключения светодиода начинается процесс образования плёнки за счёт окисления галлия кислородом воздуха. На рисунке 3 представлена зависимость фототока от времени после прекращения облучения фотокатода.

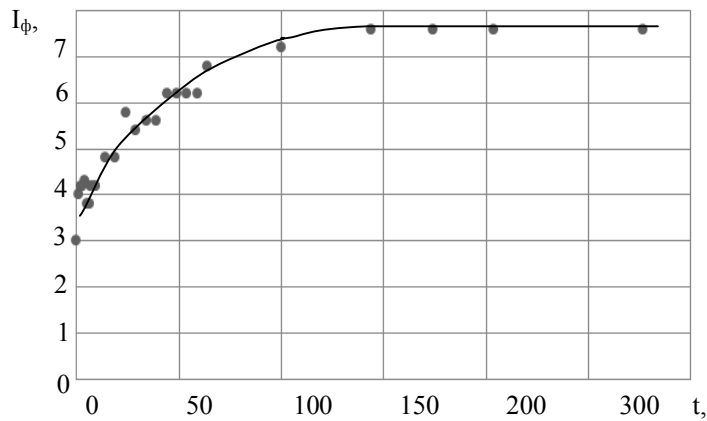


Рис. 3. Зависимость фототока от времени после прекращения облучения фотокатода при напряжении на аноде 20 В

Измерение фототока проводилось при кратковременном (на 3 секунды) включении УФ светодиода в каждой точке графика зависимости. На восстановление уровня фототока требуется время порядка 150 минут, что намного меньше времени установления тока при включении облучения фотокатода (3,3 минуты). Это указывает на то, что скорость окисления намного меньше скорости диссоциации окисла при мощности УФ излучения порядка 2 мВт. Поскольку манометрический преобразователь может быть включен при любом давлении, то необходимо предусматривать время для установления фототока.

На рисунке 4 приведена зависимость тока фотокатода от давления воздуха в диапазоне 0,01 – 759 Торр. С ростом давления ток фотокатода уменьшался за счёт увеличения доли фотоэлектронов возвращающихся на фотокатод при соударении с молекулами воздуха и увеличения отрицательного объёмного заряда у фотокатода.

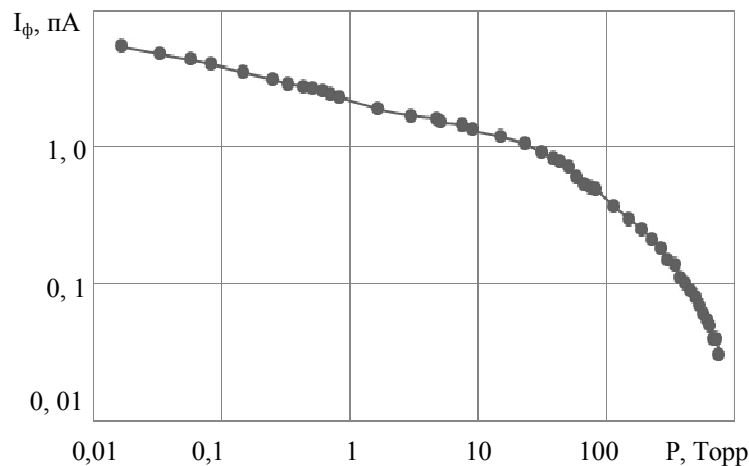


Рис. 4. Зависимость тока фотокатода от давления воздуха в диапазоне 0,01 – 759 Торр при напряжении на аноде 9 В

Выводы

Проведённое исследование показало, что под действием УФ излучения с длиной волны 265 нм происходит диссоциация окисла галлия, что приводит к уменьшению фототока и последующей стабилизации его значения. Поэтому при измерении давления необходимо предусматривать время установления фототока. С ростом давления воздуха в диапазоне дав-

ления (0,01 – 759 Торр) фототок снижается за счёт возрастающей доли фотоэлектронов, возвращающихся на фотокатод за счёт столкновений с молекулами воздуха. Величина фототока может служить мерой давления.

Библиографический список

1. В.К. Базылев, А.М. Жидков, А.А. Рогов. Исследование токопрохождения в манометрическом преобразователе с фотокатодом. Актуальные проблемы современной науки и производства. Материалы V Всероссийской научно-технической конференции. Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина. Рязань, 2020, С. 25-32.

2. Самсонов Г. В. , Борисова А. Л. Жидков Т. Г. и др. Физико-химические свойства окислов. Справочник. Изд-во «Металлургия», 1978. 472 с.

УДК 621.385

РАЗРАБОТКА ГЕНЕРАТОРА САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА КЛИСТРОННОГО ТИПА

О.А. Горлин, Д.С. Голова

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, gorlinoo@yandex.ru*

Аннотация. Представлены результаты создания 18-ти лучевого генератора на многозазорных резонаторах. Проведён аналитический расчёт и численное моделирование многозазорного резонатора на π - и 0-видах колебаний. Численное моделирование процессов в резонаторах показало максимальную возможность получения электронного коэффициента полезного действия (КПД) до 95%. Двумерный нелинейный анализ процессов взаимодействия показал возможность получения в автогенераторе на трехзазорном резонаторе π -вида колебаний 18-ти лучевой конструкции КПД около 45%.

Ключевые слова: многозазорные резонаторы, многолучевой автогенератор, Ku-диапазон.

DEVELOPMENT OF A CENTIMETER RANGE KLYSTRON-TYPE GENERATOR

O.A. Gorlin, D.S. Golova

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, gorlinoo@yandex.ru*

The abstract. The results of the creation of an 18 beam generator on multi-gap resonators are presented. Analytical calculation and numerical simulation of a multi-mode resonator on π - and 0-types of oscillations are carried out. Numerical simulation of processes in resonators has shown the possibility of obtaining an efficiency up to 95%. Two-dimensional nonlinear analysis of interaction processes has shown the possibility of obtaining a three-gap resonator in the generator with π -types of oscillations in multi-beam design with the efficiency of about 45%.

Keywords: multi-gap resonators, multi-beam generator, Ku-range.

Введение

Стремительно-развивающиеся потребности в компактных и в тоже время мощных источниках СВЧ излучения сантиметрового диапазона нашли своё применение в различных сферах: телевидении, радиолокации, а также в бытовых устройствах [1,2]. Источниками сантиметрового диапазона длин в основном являются полупроводниковые диоды и лампы бегущей волны, но данные приборы и устройства не удовлетворяют выходной мощностью, которая в настоящее время не превышает нескольких мВт. Широкого применения достигли одно- и многолучевые конструкции генераторов и усилителей клистронного типа. Развитие приборов СВЧ диапазона в России начинается с середины 20-ого века, на таких предприятиях, как НПП «Исток» и НПП «Торий» [3-5]. С использованием однолучевой конструкции данные приборы уступают по основным параметрам ЛБВ и полупроводниковым приборам.

Для устранения недостатков, присущих однолучевым конструкциям, а именно узкая полоса частот, большие габариты и масса, а также высокое ускоряющее напряжение и побудило к разработкам многолучевых клистронов [5]. Значительные практические успехи в разработке многолучевых автогенераторных и усилительных клистронов достигли в конце 20-ого века США, Канада и Германия [6].

Целью работы является исследование с помощью программ процессов взаимодействия электронов внутри резонансной системы с СВЧ полями в 18-ти лучевом автогенераторе на многозачерном резонаторе и получение оптимальных размеров и электрических параметров для повышения КПД прибора.

Конструкция резонансной системы и результаты моделирования

Конструкция резонатора была выбрана из разработанных ранее вариантов на предприятии НПП "Исток" (рис. 1 и рис. 2). Восемнадцатилучевая конструкция резонатора позволяет снизить массогабаритный показатель прибора по сравнению с использованием меньшего количества лучей за счет магнитной системы.

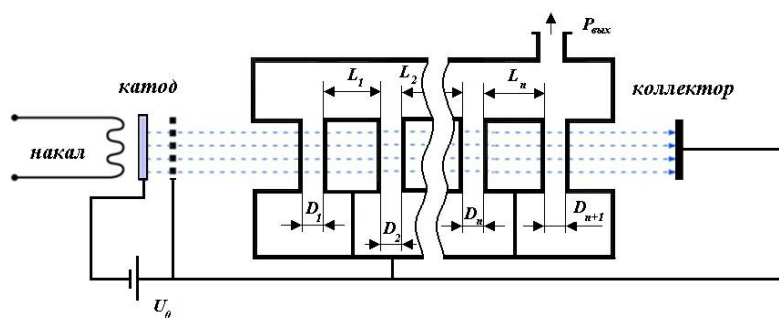


Рис. 1. Эскизное изображение многорезонаторного автогенератора

Начальный расчет для быстрого нахождения основных электрических параметров и геометрических размеров проводился по аналитическим формулам, а затем с использованием программ различного уровня проводилась корректировка. При создании резонансной системы была взята ранее разработанная на предприятии НПП "Исток" конструкция 18-ти лучевого резонаторного блока с рабочей частотой 15 ГГц (рис.2).

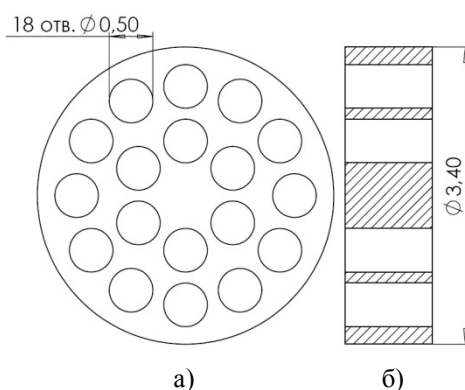


Рис.2 Схематическое изображение катода (а) и резонансной шайбы (б)

Для получения наибольшей эффективности взаимодействия электронов с СВЧ полем на заданной частоте, необходимо найти оптимальный радиус пролетной трубы a из следующего условия [7]:

$$\gamma a = (\beta_e^2 - k^2)^{\frac{1}{2}} \leq 1,3, \quad (1)$$

где $\gamma = (\beta_e^2 - k^2)^{\frac{1}{2}}$ - радиальное волновое число;

$\beta_e = \frac{\omega}{V_0}$ - электронная постоянная распространения;

$k = \frac{\omega}{c}$ - волновое число;

$\omega = 2\pi f$ - угловая частота;

$v_0 = 5,93 \cdot 10^5 \sqrt{U_0}$ - скорость электронов.

Из выражения (1) найдём ускоряющее напряжение:

$$U_0 = \frac{10^7}{39,5 + (\gamma a)^2 \left(\frac{\lambda}{a}\right)^2}, \quad (2)$$

Приняв радиус пролётной трубы $a=0,5$ мм, ускоряющее напряжение $U_0 \geq 9$ кВ. Далее по программе произведено уточнение ускоряющего напряжения. Исследование коэффициента взаимодействия и активной проводимости показало, что наибольшую вероятность самовозбуждения автогенератора на трехззорном резонаторе следует ожидать при ускоряющем напряжении порядка 12 кВ, так как при этом достигается максимальное значение отрицательной электронной проводимости ($Ge/G0=-0,45$).

Дальнейшие оптимизационные расчёты проводились по программе *EXPRAN*, разработанной в РГРТУ[8]. Программа основана на нелинейной численно-аналитической модели процесса взаимодействия в многоззорных резонаторах. По этой программе были проведены расчёты, направленные на получение максимального электронного КПД (η_e) на 0-виде колебаний. Оптимизация проводилась методом покоординатного спуска. В качестве функции цели была выбрана максимальная величина КПД без учета пространственного заряда. Электронный КПД трехззорного резонатора на π -виде колебаний является функцией восьми нормированных внутренних управляемых параметров:

$$\eta_e = f(D_1, D_2, D_3, L_1, L_2, \xi),$$

где D_1 - длина первого зазора;

D_2 - длина второго зазора;

D_3 - длина третьего зазора;

L_1 - длина первой трубы дрейфа;

L_2 - длина второй трубы дрейфа;

$\xi = U_m / U_0$ - нормированное напряжение на зазоре, для 0-вида на всех зазорах ξ могут быть разные;

U_m - переменное напряжение на зазоре;

U_0 - ускоряющее напряжение.

Программа *EXPRAN* все размеры и электрические параметры рассчитывает в нормированных величинах и для перевода с систему СИ используют следующие формулы:

$$\gamma = \frac{\omega}{v_0} = \frac{3170}{\lambda\sqrt{U_0}}, \quad d(\text{мм}) = \frac{D(\text{рад})}{\gamma}, \quad l(\text{мм}) = \frac{L(\text{рад})}{\gamma},$$

где γ – приведенная длина;

ω – круговая частота;

v_0 – скорость электронов на входе в пространство взаимодействия зазора; λ – длина волны.

В оптимизированном варианте при использовании трехзазорного резонатора в режиме генерации на π -виде колебаний был получен максимальный электронный КПД 70.2 % при оптимальных параметрах $D_1=4.7$ рад, $D_2=8.4$ рад, $D_3=1$ рад $L_1=3.7$ рад, $L_2=2.9$ рад, $\xi=0.6$ (таблица 1). Процесс оптимизации трехзазорного резонатора показан на рис.3. Аналогичные оптимизационные расчеты были проведены и для другого числа зазоров, а также для 0-вида колебания. В таблице 1 показан максимальный электронный КПД при разном числе зазоров резонатора на π - и 0-видах колебаний, где видно, что с увеличением числа зазоров (до 6-ти) происходит увеличение η_e до 95 %. Расчеты по программе *EXPRAN* показали рост электронного КПД при увеличении числа зазоров в резонаторе, как на π -, так и на 0-видах колебаний.

Таблица 1

Вид колебаний	3-х зазорный резонатор	4-х зазорный резонатор	5-х зазорный резонатор	6-х зазорный резонатор
π -вид	70.2	75.1	80.5	85.4
0-вид	74	83	90.6	95.4

По программе двумерного анализа *MEP_GR* [8, 9] для π -вида трехзазорного резонатора уточнен полученный результат КПД с учетом пространственного заряда. С увеличением количества зазоров в резонаторе и пространственного заряда, а также применением многолучевой конструкции привело к резкому снижению электронного КПД, поэтому для повышения η_e проводили повторную корректировку геометрических размеров и электрических параметров, которые показали на π -виде колебаний 18-ти лучевой трехзазорной резонаторной системе КПД прибора 45%.

На рисунке 3 представлены результаты численного моделирования электронного КПД для различных значений конструктивных параметров трехзазорного резонатора, в результате чего были определены оптимальные значения следующих конструктивных параметров:

- величина первого зазора;
- длина первой трубы дрейфа;
- величина второго зазора;
- длина второй трубы дрейфа;
- величина третьего зазора,
- номинированная амплитуда напряжения на зазорах.

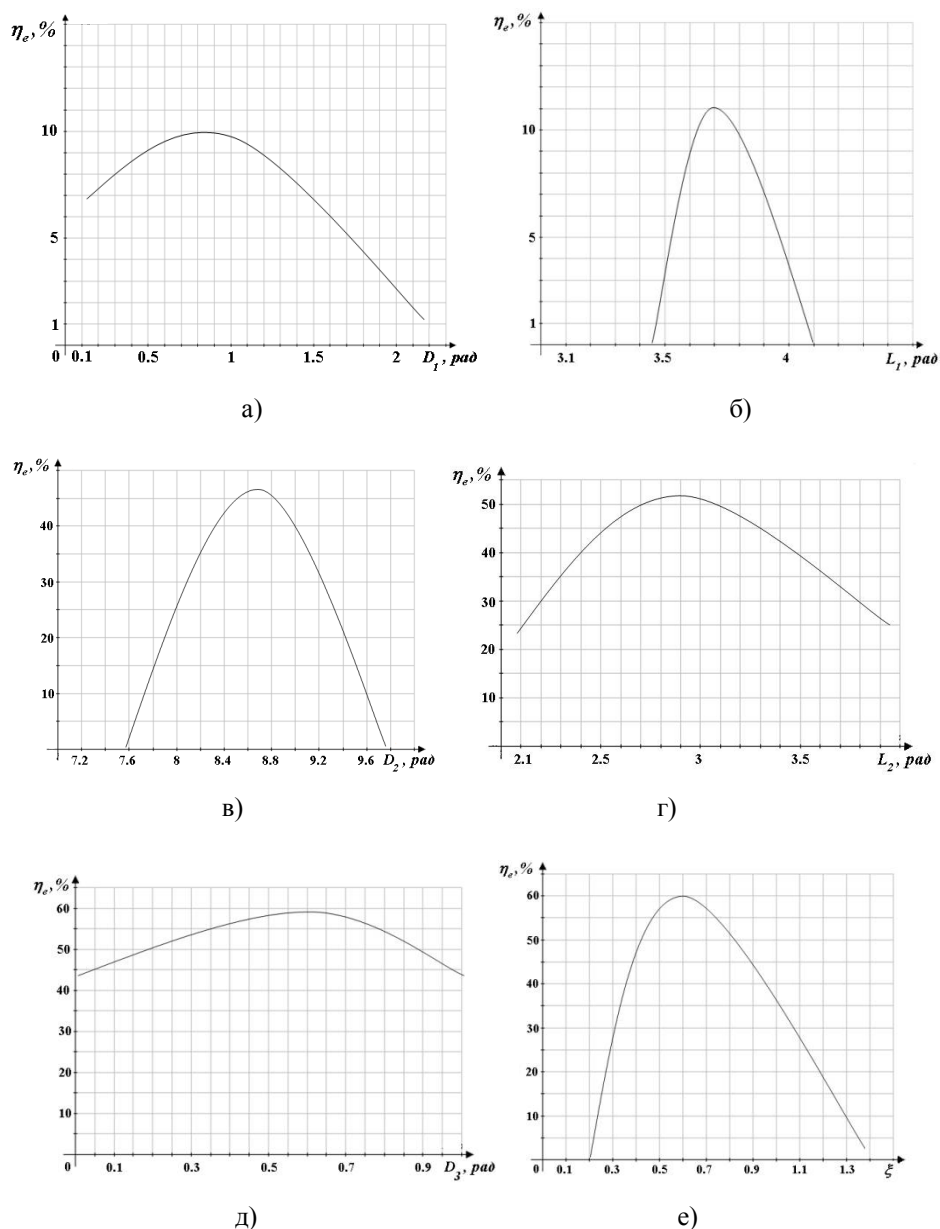


Рис. 3. Оптимизация трехзазорного резонатора: а – зависимость электронного КПД от величины первого зазора; б – зависимость электронного КПД от длины первой трубы дрейфа; в – зависимость электронного КПД от величины второго зазора; г – зависимость электронного КПД от длины второй трубы дрейфа; д – зависимость электронного КПД от величины третьего зазора; е – зависимость электронного КПД от номированной амплитуды напряжения на зазорах

Заключение

Исследована возможность создания 18-ти лучевого генератора на высших зонах π - и 0-видах колебаний. Численное моделирование процессов в резонаторах показало, что с увеличением зоны генерации происходит рост электронного КПД до 95 %. Исследовано влияние пространственного заряда на многозазорные и многолучевые резонаторные блоки, где были выявлены резкие спады η_e до 25 %. Проведено 2-D моделирование 18-ти лучевой трехзазорной резонаторной системы на π -видах колебаний, который показал возможность получения выходной мощности около 1 кВт при общем КПД 45% на частоте 15 ГГц

Библиографический список

1. В.А. Царёв, А.Ю. Мирошниченко, И.О. Чигуров Исследование многолучевого клистрона с двухмодовым промежуточным резонатором // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – Т.4, №1. – С.76-80.
2. Закурдаев А.Д. Мощные малогабаритные и миниатюрные многолучевые клистроны для бортовых РЛС // Радиотехника. – 2006. – №3. – С.31-33.
3. Л. Борисов, Г. Щелкунов Мощные и сверхмощные СВЧ-источники: от клистронов до нового класса приборов // Электроника НТБ. – 2012. – № 4. – С.58-64.
4. Э.А Гельвич, Е.В. Жарый, А.Д. Закурдаев, В.И. Пугнин Многолучевые клистроны. Тенденции развития // Вакуумная СВЧ электроника. Сборник обзоров. Н.Новгород. – 2002. С.54.
5. И.А. Фрейдович, А.К. Балабанов, П.И. Акимов и др. Перспективы развития многолучевых клистронов // ФГУП НПП «Торий». – 2014. <http://mwelectronics.ru/2014>.
6. Chin. Development of Toshiba L-Band Multy-Beam Klystron for European XFEL Project / Chin et all // – Particle Accelerator Conference. – PAC-2005 Proceedings. – May 16-20. – 2005. pp. 3153-3155.
7. Ю.А. Кацман Вопросы теории многорезонаторных клистронов. М.: Связьиздат. – 1958. – 176 с.
8. Горлин О.А., Козлов Е.И., Федяев В.К. Программа расчета многоззорного резонатора “EXPRAN” // Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ № 2016610736 от 18 января 2016 г.
9. Федяев, В.К. Программа анализа двумерных динамических процессов в клистропах / В.К. Федяев, В.И. Юркин // Вакуумная и плазменная электроника: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГРТА. – 1986. – С. 101 – 105.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНТРОЛЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ МПФС ЛБВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИСКРЕТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ

В.А. Шальнев, О.А. Горлин

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, gorlinoo@yandex.ru.*

Аннотация. Предложена идея для ускорения настройки магнитной периодической фокусирующей системы по анализу распределения продольной составляющей магнитного поля в лампе бегущей волны (ЛБВ) с выходной мощностью до 1 кВт. Компьютерное моделирование выполнено для разработанной замедляющей системы ЛБВ малой мощности.

Ключевые слова: лампа бегущей волны, магнитное поле, магнитная периодическая фокусирующая система, преобразование Фурье.

APPLICATION OF CONTROL METHOD USING DISCRETE THE MPFS TWT MAGNETIC FIELD FOURIER TRANSFORM

V.A. Shalnev, O.A. Gorlin

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, gorlinoo@yandex.ru.*

The abstract. An idea is proposed to accelerate the tuning of a magnetic periodic focusing system by analyzing the distribution of the longitudinal component of the magnetic field in a traveling wave tube (TWT) with an output power of up to 1 kW. Computer simulation was performed for the developed low-power decelerating TWT system.

Keywords: traveling wave tube, magnetic field, magnetic periodic focusing system, Fourier transform.

Введение

Магнитная фокусирующая система (МФС) является одним из главных узлов, определяющим выходные и массогабаритные параметры ЛБВ О-типа [1]. Создание магнитного поля осуществляется, преимущественно, двумя методами – соленоидом с источником питания (мощные СВЧ приборы), либо магнитной фокусирующей системой на постоянных магнитах. Фокусировка электронных пучков с помощью магнитной периодической фокусирующей системы (МПФС) является наиболее распространенной системой фокусировки электронного пучка в ЛБВ малой и средней мощности. Практически ко всем современным приборам СВЧ

диапазона предъявляется требование максимального токопрохождения. От данных параметров напрямую зависят рабочие характеристики прибора, при этом они особенно важны в разработке ЛБВ с малым диаметром пролетного канала, где даже минимальный угол отклонения оси электронного потока от оси прибора приводит к существенному возрастанию токооседания в замедляющей системе [1-3].

МПФС собираются так, что смежные ячейки имеют противоположное направление поля в зазоре полюсных наконечников. При этом образуется знакопеременное периодическое магнитное поле. Основным и наиболее важным требованием к МПФС является минимальный разброс амплитудных значений магнитной индукции B , её заданное распределение (в современных ЛБВ космического назначения принято считать таким пределом величину, равную 0,5 % от амплитудной величины продольной составляющей магнитной индукции данного магнита в составе МПФС) [3]. На данный момент контроль этих параметров осуществляется с помощью аналоговых самописцев после проведения предварительного подбора магнитов с последующим анализом полученных данных вручную. Многократный повтор измерений занимает много времени.

Широко применяемым методом при анализе сигналов является математический аппарат преобразования Фурье. Преобразование Фурье позволяет выполнить переход из временной области представления сигнала в частотную, благодаря чему можно определить гармонический состав сигнала. По результатам преобразования Фурье строится амплитудная характеристика, при необходимости можно также построить фазовую характеристику. Если исследуемый сигнал задан в виде дискретных значений, то используют дискретное преобразование Фурье (ДПФ). Для решения данной проблемы предлагается производить анализ данных в цифровом виде с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ) [4-6]. ДПФ позволяет разложить сигнал на синусоидальные составляющие (гармоники). Для ускорения вычисления используется быстрое преобразование Фурье. Математический аппарат преобразования Фурье совмещает в себе универсальность и эффективность при анализе данных. Расчет ДПФ в комплексной форме выполняется при помощи соотношения (1):

$$C_k = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} f_n \cdot e^{-i \frac{2\pi}{N} kn},$$

где f_n – измеренное значение модуля магнитной индукции;

k – номер вычисляемого коэффициента;

N – число точек в выборке [7].

По результатам преобразования строится спектральная (амплитудная) характеристика, по которой можно делать вывод о настройке МПФС.

В данной работе была исследована ячейка МПФС используемая в ЛБВ малой мощности (рис.1).

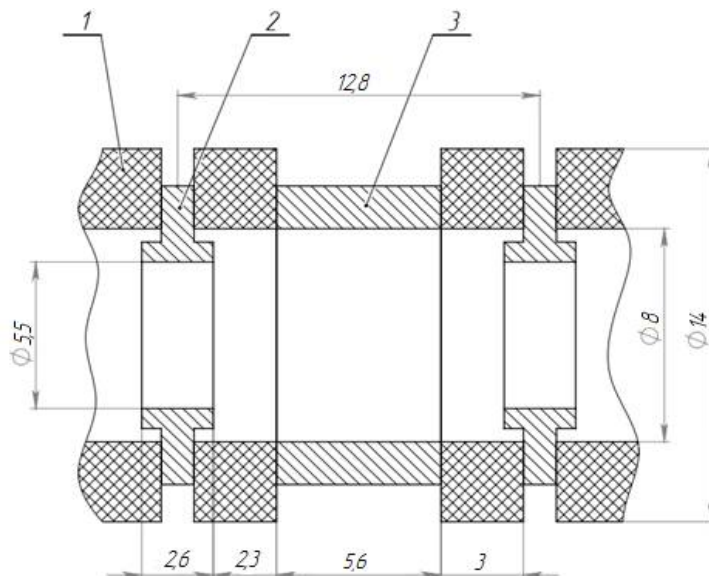


Рис. 1. Исследуемая ячейка МПФС:
1 – магнит; 2 – полюсный наконечник; 3 – ферромагнитная втулка

В данной работе была исследована ячейка МПФС (рис.1), используемая в ЛБВ малой мощности. Геометрические подобраны под ранее разработанную систему на предприятии НПП “Исток”. Ячейка МПФС состоит из кольцевых магнитов, разделенных полюсными наконечниками из магнитомягкого материала.

По программе, разработанной Курбатовым П.А., было рассчитано продольное распределение магнитной индукции на оси МПФС на магнитах $14 \times 8 \times 3$ с намагниченностью 107 кА/м (рис.2). Расчет конфигурации магнитов и ячеек МПФС, представленных на рисунке 1, производился на основе самарий-кобальтовых магнитов с типовыми размерами $12 \times 8 \times 3$ мм.

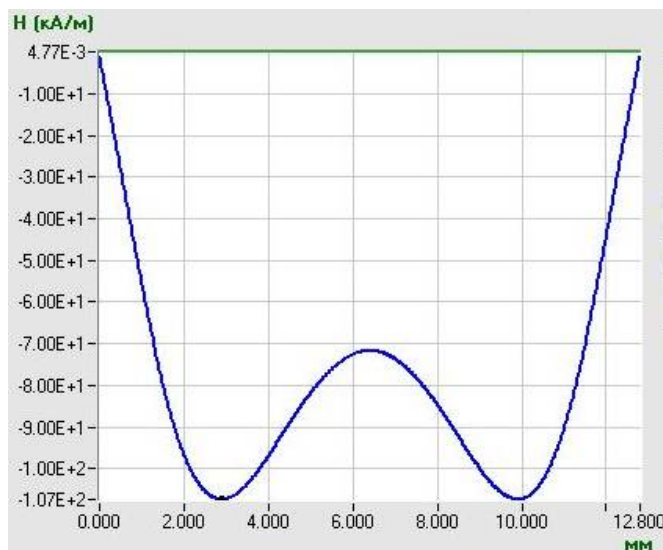


Рис. 2. Распределение намагниченности в ячейке

В ходе экспериментов была взята магнитная система с синусоидальным распределением магнитной индукции на 3-ей гармонике. Несинусоидальное распределение магнитной индукции на оси системы получается за счёт суперпозиции двух распределений магнитной индукции: синусоидального первой и третьей гармоники. Распределение с третьей гармони-

кой потребовалось для уменьшения пульсаций в ЛБВ, для которой предназначена МПФС и повышения устойчивости электронного пучка.

После математической обработки собранных данных получены графические результаты (рис. 3 отображает наиболее явный случай), которые подтверждают, что настройку магнитных систем можно проводить не по распределению магнитной индукции, а по спектральной характеристике.

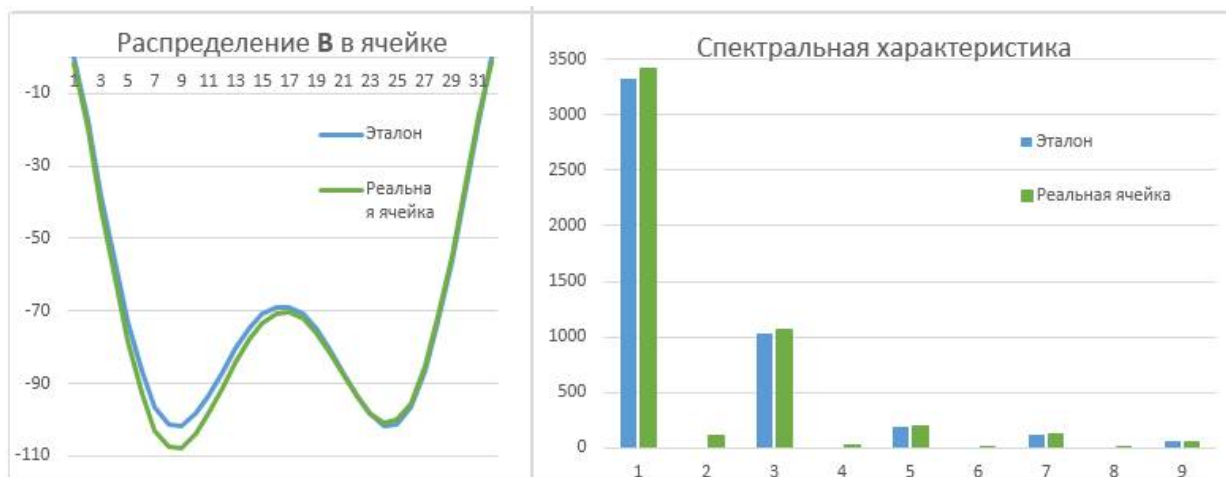


Рис. 3. Распределение магнитного поля в ячейке и его спектральная характеристика

Заключение

Практическим путём были проверены остальные варианты отклонения магнитной индукции от идеального распределения и определена зависимость амплитуд гармоник от распределения магнитного поля в ячейке. Выявленная зависимость позволит использовать устройства цифровой обработки данных, что ускорит и упростит процесс настройки МПФС.

Библиографический список

1. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. // Москва: «Советское радио» - 1966, 455 с.
2. Гилмор А.С. / Лампы с бегущей волной. – М.: Техносфера, 2013.
3. Царев В.А. Магнитные фокусирующие системы электровакуумных микроволновых приборов О-типа: учебное пособие // В. А. Царев, Р. В. Спиридонов. Саратов: изд-во «Новый ветер», 2010. 352 с.
4. Сато Юкио. Цифровая обработка сигналов. / Юкио Сато: пер. с яп. Селиной Т. Г. – М.: Додэка-XXI, 2010. – 176 с.
5. Ричард Лайонс. Цифровая обработка сигналов. / Лайонс Ричард: пер. с англ. Под редакцией Бритова А. А. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2006. – 656 с.
6. Гоноровский И. С. /Радиотехнические цепи и сигналы. // Изд-во М.: Радио и связь, 1986. с. 21-36.
7. Емельянов, Е. А. Контроль структуры магнитного поля МПФС ЛБВ методом дискретного преобразования Фурье / Е. А. Емельянов, А. А. Захаров. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2015. – № 11 (91). – С. 317-320.

УДК 621.396; ГРНТИ 47.47

РАЗВИТИЕ МЕТОДА ЧЕНА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О РАСПРЕДЕЛЕНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЯЧЕЙКЕ МПФС С КОЛЬЦЕВОЙ ВСТАВКОЙ

С. П. Морев, Ю. Ю. Филин

*АО Научно-производственное предприятие «Исток»,
Российская Федерация, г. Фрязино, spmor@yandex.ru*

Аннотация. В приближении магнитостатического потенциала представлена постановка задачи о нахождении аналитические выражения для продольной и радиальной компонент индукции магнитного поля в ячейках магнитной системы с магнитомягкой вставкой, внутренний диаметр отверстия в которой существенно больше внутреннего диаметра отверстия в полюсных наконечниках.

Ключевые слова. Электронно-оптическая система (ЭОС), магнитная периодическая фокусирующая система (МПФС), фокусировка электронного пучка в магнитном поле

DEVELOPMENT OF CHEN'S METHOD FOR SOLVING THE PROBLEM OF MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION IN AN MPFS CELL WITH AN ANNULAR INSERT

S.P. Morev, Y.Y. Filin.

*JSC "RPC "Istok" named after Shokin",
Russian Federation, Fryazino, spmor@yandex.ru*

Annotation. In the magnetostatic potential approximation, the formulation of the problem of finding an analytical expression for the longitudinal and radial components of the magnetic field induction in the cells of a magnetic system with a magnetically soft insert, the inner diameter of the hole in which is significantly larger than the inner diameter of the hole in the pole pieces, is presented.

Keywords: Electron-optical system (EOS), magnetic periodic focusing system (MPFS), focusing of an electron beam in a magnetic field.

Введение

Мощные вакуумные многолучевые приборы СВЧ уже давно и прочно занимают широкую нишу источников СВЧ сигнала в различных устройствах. Для надежной работы таких приборов требуется обеспечить транспортировку интенсивных электронных потоков в протяженных каналах пространств взаимодействия с электромагнитными волнами. Для транспортировки электронных потоков применяются магнитные фокусирующие системы различного типа, в частности, магнитные периодические фокусирующие системы (МПФС) со сложной структурой распределения магнитного поля и большим периодом. Для обеспечения минимальных пульсаций электронного потока в области транспортировки к структуре магнитного поля, содержащей значимые величины высших гармонических составляющих, также как и для обычной синусоидальной МПФС с малым периодом, предъявляются повышенные требования. Конструкции МПФС с требуемым спектром гармоник в распределении магнитного поля, зачастую находятся в результате трудоемкого перебора (экспериментального или расчетного) геометрических размеров магнитов и наконечников.

В ряде работ (например [1-3]), для МПФС со сложной структурой магнитного поля, создаваемого магнитомягкими вставками, размещенными между полюсными наконечниками ячейки МПФС, с помощью метода Чена [4], в приближении магнитостатического потенциала, найдены аналитические выражения для продольной и радиальной компонент индукции магнитного поля. Однако непосредственное применение метода Чена ограничено тем, что диаметры внутренних отверстий в полюсных наконечниках и вставках одинаковы, что позволяет задать точные граничные условия на верхней границе области решения. В представленной работе предложено аналитическое решение задачи о нахождении знакопеременного

распределения магнитного поля с магнитомягкой вставкой, внутренний диаметр отверстия в которой существенно больше диаметра отверстий в наконечниках.

Постановка задачи

Обычная магнитная периодическая фокусирующая система со знакопеременным магнитным полем состоит из намагниченных колец с чередующимся направлением намагниченности и магнитопроводов (полюсных наконечников и втулок) с равными диаметрами отверстий в них. Такая система обеспечивает распределение магнитного поля вдоль оси системы со значимой величиной третьей гармоники магнитного поля (рис. 1а).

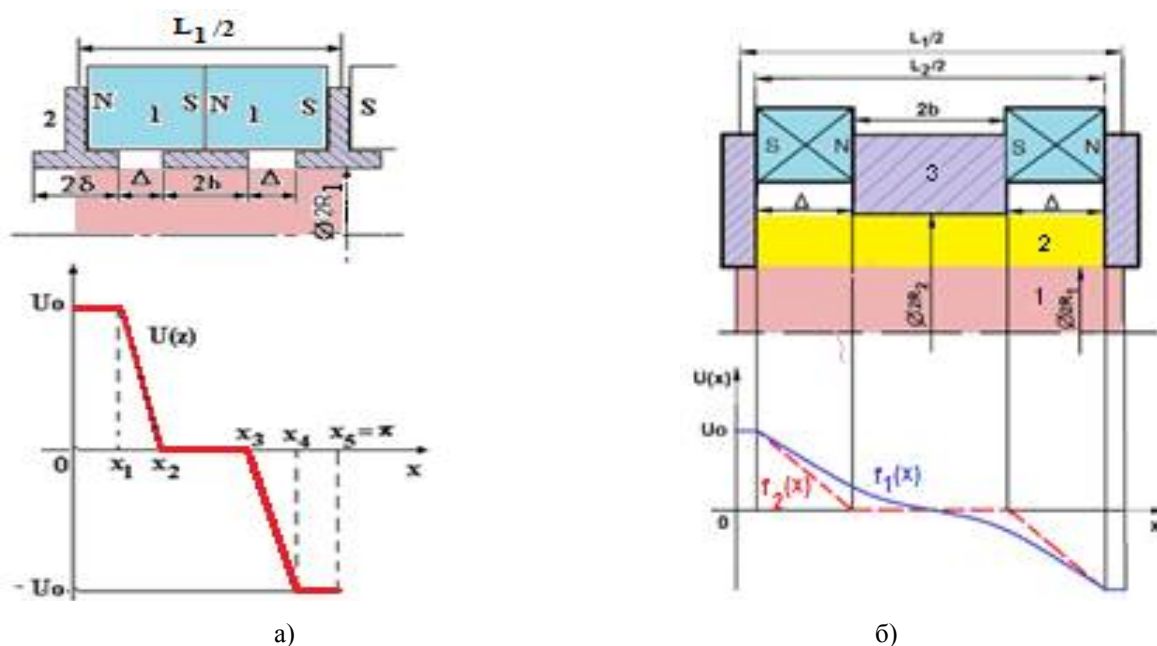


Рис. 1. Ячейка МПФС с одинаковыми (а) и разными (б) диаметрами отверстий полюсных наконечников 2 и магнитомягкой вставки и распределение магнитного потенциала $U(x)$ на границе области (б):
1 – магниты, 2 – полюсные наконечники, 3 – магнитомягкая вставка
 $x_1 = \pi/2 - \alpha - \beta$, $x_2 = \pi/2 - \beta$, $x_3 = \pi/2 + \beta$, $x_4 = \pi/2 + \alpha + \beta$, $x_5 = \pi$.

Решение задачи о распределении магнитного поля вдоль оси бесконечной МПФС в области, не содержащей магнитов (то есть ограниченной внутренним диаметром одинаковых отверстий в магнитопроводах), сводится к решению уравнения Лапласа для магнитостатического потенциала [4], распределение которого на границе области считается известным и задается в виде ломаной линии (рис. 1а). Производные от потенциала в продольном и поперечном направлении дают соответствующие компоненты индукции магнитного поля.

Однако для ячейки МПФС, представленной на рис. 1б, граничное условие при $r=R_1$ неизвестно и решение задачи путем задания приближенного граничного условия, как это сделано в работе [5] для реверсной фокусирующей системы, может приводить к существенным ошибкам. Решение задачи о распределении магнитного поля для ячейки МПФС, представленной на рис.1б, может быть получено путем нахождения распределения потенциала в кольцевой области 1 с последующим «сшиванием» потенциалов и их нормальных производных на внутренней границе кольцевой вставки и на границе цилиндрической области 2 при $r=R_1$, после чего распределение магнитного поля в цилиндрической области находится стандартным образом в соответствии с методом Чена.

Нахождение распределения потенциала в ячейке МПФС с кольцевой вставкой

Для нахождения распределения магнитостатического потенциала в ячейке МПФС (рис. 2) необходимо решить уравнение Лапласа в кольцевой области 1 с граничными условиями

$$\nabla^2 U = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

$$U(r, z) = U(r, z + L_2), \quad (1.1)$$

при $r = R_2$, $U(R_2, z) = U_{\text{зад}}(z)$, $U_{\text{зад}}(z)$ - заданная функция на внутреннем радиусе кольцевой вставки.

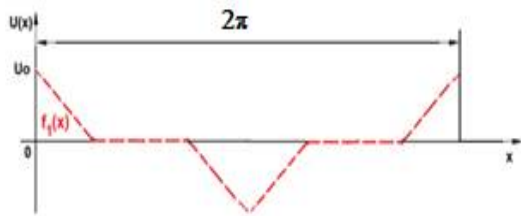


Рис. 2. Распределение магнитостатического потенциала $U(x)$ на верхней границе кольцевой области 1 (функция $f_1(x)$ построена до полного периода L_2): $x_1 = \alpha_2$, $x_2 = \alpha_2 + 2\beta_2$, $x_3 = 2\alpha_2 + 2\beta_2 = \pi$. $f_1(x)$ - граничное условие при $r = R_2$, $\alpha_2 = 2\pi\Delta/L_2$, $\beta_2 = 2\pi b/L_2$.

Вид функции решения $U(r, z) = R(r)Z(z)$. Общий вид решения в области 1 кольцевой вставки

$$U(r, z) = \sum_k (A_k \cos kz + B_k \sin kz) [C_k I_0(kr) + D_k K_0(kr)] \quad (2)$$

Если $f_1(z)$ четная функция, $B_k = 0$,

$$A_k = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi f_1(z) \cos(kz) dz, \quad (3)$$

Переменная z связана с координатой x соотношением $z = 2\pi x/L_2$, $r = y/R$. Граничное условие при $r = R_2$

$$f_1(z) = \begin{cases} U_0 \left(1 - \frac{z}{\alpha_2}\right), & 0 < z < \alpha_2 \\ 0, & \alpha_2 < z < \pi - \alpha_2 \\ -U_0 \left(\frac{z - (\pi - \alpha_2)}{\alpha_2}\right), & \pi - \alpha_2 < z < \pi \end{cases} \quad (4)$$

Тогда

$$A_k = \frac{16U_0(b+\Delta)}{\Delta k^2 \pi^2} \sin^2 \left(\frac{\pi k}{2}\right) \sin^2 \left(\frac{\pi k \Delta}{4(b+\Delta)}\right) \quad (5)$$

Решение уравнения Лапласа для кольцевой области 1 с учетом заданного распределения скалярного магнитного потенциала на внешней границе области

$$U(y, x) = \sum_k A_k \cos(\gamma_2 kx) \frac{C_k I_0(\gamma_2 ky) + D_k K_0(\gamma_2 ky)}{C_k I_0(\gamma_2 kR_2) + D_k K_0(\gamma_2 kR_2)}. \quad (6)$$

Здесь $\gamma_2 = 2\pi/L_2$.

При $y=R_1$

$$U(R_1, x) = \sum_k A_k \cos(\gamma_2 kx) \frac{C_k I_0(\gamma_2 kR_1) + D_k K_0(\gamma_2 kR_1)}{C_k I_0(\gamma_2 kR_2) + D_k K_0(\gamma_2 kR_2)} = \sum_k \tilde{A}_k \cos(\gamma_2 kx), \quad (6a)$$

где

$$\tilde{A}_k = A_k \frac{C_k I_0(\gamma_2 kR_1) + D_k K_0(\gamma_2 kR_1)}{C_k I_0(\gamma_2 kR_2) + D_k K_0(\gamma_2 kR_2)}.$$

После приравнивания значений функций и их производных на границе областей при $y=R_1$ для всех x получается система уравнений для определения C_k, D_k

$$\begin{cases} C_k I_0(\gamma_2 kR_2) + D_k K_0(\gamma_2 kR_2) = 1 \\ C_k I_0(\gamma_2 kR_1) + D_k K_0(\gamma_2 kR_1) = C_1 k I_0(\gamma_1 kR_1) \\ C_k I_1(\gamma_1 kR_1) - D_k K_1(\gamma_1 kR_1) = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} C_1 k I_1(\gamma_1 kR_1) \end{cases}. \quad (7)$$

Здесь $\gamma_2 = 2\pi/L_2$, $\gamma_1 = 2\pi/L_1$. Из системы (7) можно получить, что

$$C_k = \frac{T_k}{K_0(\gamma_2 kR_2) + T_k I_0(\gamma_2 kR_2)}, \quad (8)$$

$$D_k = \frac{1}{K_0(\gamma_2 kR_2) + T_k I_0(\gamma_2 kR_2)}, \quad (9)$$

где

$$T_k = \frac{\gamma_2 K_1(\gamma_1 kR_1) I_0(\gamma_1 kR_1) + \gamma_1 I_1(\gamma_1 kR_1) K_0(\gamma_2 kR_1)}{\gamma_2 I_1(\gamma_2 kR_1) I_0(\gamma_1 kR_1) - \gamma_1 I_0(\gamma_2 kR_1) I_0(\gamma_1 kR_1)}. \quad (9a)$$

Общий вид решения в цилиндрической области вставки 2

$$U(r, x) = \sum_n A_n^* \cos(\gamma_1 nx) \frac{I_0(\gamma_1 nR)}{I_0(\gamma_1 nR_1)} \quad (10)$$

Коэффициент B_n отсутствует, так как распределение потенциала является четной функцией, а коэффициенты $D_{1n}=0$, иначе на оси системы будет особенность.

Распределение потенциала в цилиндрической области в соответствии с рисунком 1б имеет вид

$$f_1(z) = \begin{cases} U_0, & 0 < x < \delta_1 \\ U(R_1, z) & \delta_1 < x < \pi - \delta_1 \\ -U_0, & \pi - \delta_1 < x < \pi \end{cases} \quad (11)$$

где $U(R_1, x)$ определяется из (6а) с учетом сдвига на δ_1 .

Граничные условия для уравнения Лапласа в цилиндрической области

$$U(r, x) = U(r, x + 2\pi), \text{ при } r = 0, \frac{\partial U}{\partial r} = 0, \text{ при } r = r_1, U(r, x) = U(R_1, x).$$

Коэффициенты A_n^* в разложении в ряд Фурье определяются соотношением

$$A_n^* = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f_1(x) \cos(nx) dx \quad (12)$$

и равны

$$A_n^* = \frac{4U_0}{\pi n} \sin \frac{\pi n}{2} \cos \frac{2\pi(b + \Delta)}{L_1} + \frac{4}{L_1} \sum_k A_k \sin \frac{\pi n}{2} \sin \frac{2\pi(b + \Delta)}{L_2} \times \\ \times \left\langle \frac{\sin[(\gamma_2 k - \gamma_1 n)(b + \Delta)]}{(\gamma_2 k - \gamma_1 n)} - \frac{\sin[(\gamma_2 k + \gamma_1 n)(b + \Delta)]}{(\gamma_2 k + \gamma_1 n)} \right\rangle.$$

Тогда, дифференцируя (10), по z получим продольную компоненту индукции магнитного поля $B_z(r, z)$, а дифференцируя (10) по r , получим радиальную компоненту индукции магнитного поля $B_r(r, z)$. Типичное распределение продольной компоненты индукции магнитного поля на оси МПФС представлено на рис.3

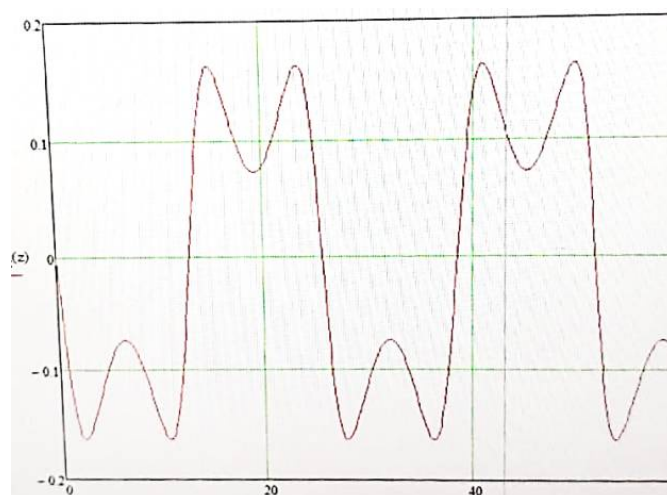


Рис. 3. Распределение магнитного поля на оси МПФС

Библиографический список

1. Кобец Е.Н., Левченко С.И. Магнитные периодические фокусирующие системы с большой амплитудой высших гармоник в распределении магнитной индукции // Электронная техника. Серия 7. Ферритовая техника, 1971, Вып.3, С.58.
2. Дармаев А. Н., Морев С. П. Приближенный расчет распределения поля в МПФС с магнитомягкими вставками и неодинаковой намагниченностью магнитов // Материалы науч.-техн. конф «Электроника и вакуумная техника: Приборы и устройства. Технология. Материалы» - Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2007, с. 22-27.
3. Архипов А.В., Дармаев А.Н., Морев С.П. Расчёт оптимальных параметров МПФС с негармоническим распределением магнитного поля //Актуальные проблемы электронного приборостроения. Материалы международной научно-технической конференции. — Саратов, 2008. — с. 63-67.
4. Chang K K. N. "Optimum Design of Periodic Magnet Structures for Electron Beam Focusing" // RCA Rev., Vol. 6, N. 1, 1955. с. 65-81.
5. Дармаев А.Н, Морев С.П., Муравьев Э. К. Приближенное решение задачи о приосевом распределении магнитного поля в реверсной магнитной системе с двумя магнитомягкими вставками для мощных вакуумных СВЧ приборов // АПЭП-2016 Международная научно-техническая конференция. 22-23 сентября 2016 г., г. Саратов, Россия. Т.1. С.97-99.

УДК 621.373.826; ГРНТИ 29.33.15

СТЕПЕНЬ ДИССОЦИИИ ДВУОКСИ УГЛЕРОДА И СОДЕРЖАНИЕ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА В ВОЛНОВОДНЫХ CO₂ ЛАЗЕРАХ С РАЗРЯДНЫМ КАНАЛОМ ИЗ ЧЕТЫРЕХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТЕНОК

И.Г. Веснов

*Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина,
Россия, Рязань, sdfburt@rambler.ru*

Аннотация. Установлено, что отношение площади внутренней боковой поверхности разрядного канала, полностью ограниченного диэлектрическими стенками, к его объёму однозначно определяет степень диссоциации CO₂ и относительное содержание атомарного кислорода в активной среде отпаянных волноводных CO₂ лазерах с поперечным ВЧ возбуждением; получены аппроксимационные выражения для степени диссоциации CO₂ и относительного содержания атомарного кислорода как функций данного отношения.

Ключевые слова: отпаянный волноводный CO₂ лазер с поперечным ВЧ возбуждением, степень диссоциации двуокиси углерода, относительное содержание атомарного кислорода, аппроксимационные зависимости.

CARBON DIOXIDE DISSOCIATION DEGREE AND ATOMIC OXYGEN CONCENTRATION IN WAVEGUIDE CO₂ LASERS WITH DISCHARGE CHANNEL OF FOUR DIELECTRIC WALLS

I.G. Vesnov

** V.F. Utkin Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, Russia, sdfburt@rambler.ru*

Abstract. It was found that the S/V ratio where S is inner lateral surface area of discharge channel completely formed by dielectric walls and V is discharge channel volume definitively determines the degree of carbon dioxide dissociation and the relative concentration of atomic oxygen in RF-excited sealed-off CO₂ waveguide lasers; approximate formulae for the degree of carbon dioxide dissociation and the relative concentration of atomic oxygen as functions of S/V have been obtained.

Keywords: RF-excited sealed-off CO₂ waveguide laser, degree of carbon dioxide dissociation, relative concentration of atomic oxygen, approximate formula.

В [1÷5] была разработана теоретическая модель, описывающая кинетику диссоциации и регенерации двуокиси углерода в активной среде отпаянных CO₂ лазеров с поперечным ВЧ возбуждением. Она позволяет вычислить относительные содержания CO₂, CO, O₂ и O в

активной среде в результате решения самосогласованной системы следующих уравнений: 1) кинетического уравнения Больцмана для электронов; 2) уравнения теплопроводности для газовой смеси; 3) уравнений непрерывности для CO_2 и O_2 ; 4) уравнений баланса по углероду и кислороду. Анализ численного решения этой системы уравнений для различных условий поддержания разряда и начального состава активной среды показал, что разложение и регенерация CO_2 пространственно разделены: диссоциация происходит в объёме активной среды, а регенерация – преимущественно на диэлектрической боковой поверхности разрядного канала.

Будем называть разрядный канал волноводного CO_2 лазера полностью ограниченным диэлектрическими стенками, если две его боковые стенки изготовлены из керамики (например, из алюмооксидной керамики АИ-1), а металлические электроды покрыты слоем из диэлектрического материала (например, Al_2O_3). Использование такой конструкции разрядного канала позволяет снизить величину степени диссоциации CO_2 на 20÷25% по сравнению с таковой в лазерах с металлокерамическими волноводами [1, 2]. В этом случае, учитывая пространственное разделение процессов диссоциации и регенерации двуокиси углерода, становится удобным ввести в упомянутую выше самосогласованную систему уравнений в качестве параметра отношение S/V , где S – площадь внутренней боковой поверхности разрядного канала, V – объём разрядного канала [3, 4].

Экспериментальное и теоретическое изучение разложения CO_2 в отпаянных волноводных CO_2 лазерах при неизменной конструкции разрядного канала показало [1÷3], что степень диссоциации двуокиси углерода α в пределах погрешности её измерения не зависит от удельной мощности накачки, характера возбуждения (ВЧ или импульсно-периодический режим накачки) активной среды, давления и начального состава активной среды. Следовательно, относительные содержания CO_2 , CO , O_2 и O в активной среде работающего лазера с разрядным каналом, полностью ограниченным диэлектрическими стенками, являются функциями отношения S/V . В лазерах с металлокерамическим волноводом содержание продуктов разложения CO_2 является функцией двух переменных – отношения S/V и межэлектродного расстояния d . Это связано с тем, что на поверхности металлических электродов скорость реакции $\text{O} + \text{O} \rightarrow \text{O}_2$ обратно пропорциональна d^2 , а реакция $\text{CO} + \text{O} \rightarrow \text{CO}_2$ не протекает [4].

Помимо степени диссоциации α двуокиси углерода другой важнейшей характеристикой состава активной среды является относительное содержание атомарного кислорода $[\text{O}]$. С одной стороны, его содержание должно быть достаточным для эффективной регенерации CO_2 на диэлектрических поверхностях и обеспечения приемлемой величины α . С другой стороны, атомарный кислород снижает инверсию населённостей, и относительное содержание последнего на уровне 0.5 % снижает мощность генерации примерно на 30% [3].

На рисунке представлены результаты расчёта α и $[\text{O}]$ в активной среде отпаянных CO_2 лазеров с поперечным ВЧ возбуждением в зависимости от отношения S/V для разрядного канала, полностью ограниченного диэлектрическими стенками. Ввиду отмеченной выше независимости α от условий поддержания разряда и начального состава активной среды, результаты расчёта остаются практически неизменными (с точностью не хуже 5%) при варьировании удельной (на единицу площади электродов) мощности накачки от 5 до 16 Вт/см² и относительного содержания CO_2 в газовой смеси при наполнении лазера от 10 до 20%. Видно, что α и $[\text{O}]$ являются монотонно убывающими функциями отношения S/V , что является очевидным следствием пространственного разделения процессов диссоциации и регенерации CO_2 . Кроме того, отношение S/V можно рассматривать в качестве параметра подобия для α и $[\text{O}]$ в активной среде.

Поскольку самосогласованный расчёт относительного содержания продуктов

разложения двуокиси углерода в активной среде волноводных CO_2 лазеров с разрядным каналом, полностью ограниченного диэлектрическими стенками, достаточно сложен, а результаты расчёта являются монотонно убывающими функциями отношения S/V , то для быстрой оценки α и $[\text{O}]$, весьма полезной разработчикам и производителям таких лазеров, проведём нелинейную регрессию общего вида представленных на рисунке зависимостей с помощью функции вида $\exp[A - B \cdot (S/V) - C \cdot (S/V)^2]$. Находя параметры A , B и C из условия минимума среднеквадратичной погрешности аппроксимации, получим, что при $S/V = 0.5 \div 4 \text{ мм}^{-1}$:

$$\alpha = \exp[4.282 - 0.219 \cdot (S/V) + 0.019 \cdot (S/V)^2], \% \quad (1)$$

$$[\text{O}] = 10^{-2} \cdot \exp[4.251 - 0.247 \cdot (S/V) + 0.027 \cdot (S/V)^2] \% . \quad (2)$$

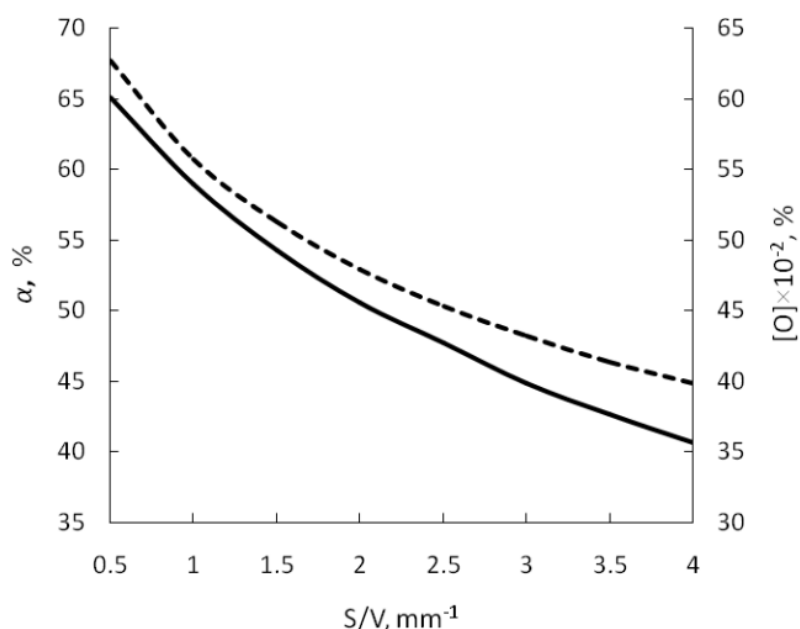


Рис. 1. Зависимости степени диссоциации α двуокиси углерода (сплошная кривая) и относительной концентрации атомарного кислорода $[\text{O}]$ (пунктирная кривая) в активной среде отпаянных волноводных CO_2 лазеров с поперечным ВЧ возбуждением от параметра S/V разрядного канала, полностью ограниченного диэлектрическими стенками

Степень диссоциации CO_2 , измеренная в лазере 2 [1] с разрядным каналом, полностью ограниченным диэлектрическими стенками, и отношением $S/V = 1.82 \text{ мм}^{-1}$ при удельных (на единицу площади электродов) мощностях ВЧ накачки $7.84, 11.75$ и 15.67 Вт/см^2 составила $0.49, 0.54$ и 0.56 соответственно. Вычисленное по аппроксимационной формуле (1) значение α равно 0.52 . В лазере 3 из [2, 3] с аналогичной конструкцией разрядного канала и отношением $S/V = 2.22 \text{ мм}^{-1}$ при удельной мощности ВЧ накачки 5.22 Вт/см^2 экспериментально была определена зависимость относительного содержания CO_2 от времени. Рассчитанная на основе этой зависимости степень диссоциации CO_2 после двух и более часов работы составила 0.54 . Вычисленное по формуле (1) значение α равно 0.49 .

Таким образом, в работе показано, что отношение S/V площади внутренней боковой поверхности разрядного канала, полностью ограниченного диэлектрическими стенками, к

его объёму однозначно определяет α и $[O]$ в активной среде отпаянных волноводных CO_2 лазерах с ВЧ возбуждением; получены аппроксимационные выражения для степени диссоциации CO_2 и относительного содержания атомарного кислорода как функций отношения S/V .

Библиографический список

1. Веснов И.Г., Мольков С.И., Степанов В.А., Шишканов Е.Ф. Диссоциация двуокиси углерода в отпаянных волноводных CO_2 -лазерах с высокочастотным возбуждением. Квантовая электроника. 1999. Т. 27. № 1. С. 55-57.
2. Cherezov V.M., Kyun V.V., Samorodov V.G., Shishkanov E.F., Sipaylo A.A., Stepanov V.A., Vesnov I.G. CO_2 dissociation in sealed-off RF-excited CO_2 waveguide lasers. В сборнике: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 2000. С. 100-110.
3. Веснов И.Г. Стабилизация состава активной среды отпаянных лазеров на углекислом газе с поперечным высокочастотным возбуждением. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Рязань, 2001.
4. Веснов И.Г. Кинетика диссоциации и регенерации двуокиси углерода в активной среде отпаянных CO_2 -лазеров с поперечным высокочастотным возбуждением. Квантовая электроника. 2010. Т. 40. № 4. С. 310-313.
5. Vesnov I.G., Mol'kov S.I., Stepanov V.A., Shishkanov E.F. Optimization of the thermal regime in RF CO_2 lasers with large-area planar electrodes. Quantum Electronics. 1999. Т. 29. № 4. С. 337-338.

УДК 53.06; ГРНТИ 44.14.07

БЕСПЛАТФОРМЕННАЯ ИНЕРЦИАЛЬНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ МАЛЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А.Е. Куцев, А.В. Звонков

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, zvonkov.av@yandex.ru*

Аннотация. В данной работе рассмотрены основные параметры навигации и ориентации, описан способ их нахождения с применением кватернионных матриц, спроектирована бесплатформенная инерциальная навигационная система на базе микроконтроллера STM32 и произведено экспериментальное счисление пути летательного аппарата с помощью разработанного устройства.

Ключевые слова: ориентация и навигация, бесплатформенная инерциальная навигационная система, кватернион, микроконтроллер, STM32.

STRAPDOWN INERTIAL NAVIGATION SYSTEM FOR SMALL UNMANNED AERIAL VEHICLES

A.E. Kutsev, A.V. Zvonkov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, zvonkov.av@yandex.ru*

The summary. In that work, the main parameters of navigation and orientation are considered, a method for finding them using quaternion matrices is described, a strapdown inertial navigation system based on an STM32 microcontroller is designed, and an experimental reckoning of the aircraft's path is performed using the developed device.

Keywords: orientation and navigation, strapdown inertial navigation system, quaternion, microcontroller, STM32.

Введение

Одной из задач при создании летательных аппаратов, механических и электронных устройств является определение их положения в пространстве. В случае создания системы определения положения тела в пространстве для самолётов, ракет возникает важный момент: эта система не должна давать сбой при изменении погодных условий и не зависеть от каких-

либо ориентиров. В таком случае создаются автономные навигационные системы, способные по своим внутренним данным определять положение летательного аппарата при начальном задании координат.[1]

Различают платформенные и бесплатформенные навигационные системы (БИНС). БИНС являются более развитым устройством, в котором компенсация угловых вращений тела производится электронным образом, то есть используется цифровой процессор. Сама БИНС установлена в корпус летательного аппарата и вырабатывает сигналы, пропорциональные угловым и ускоренным перемещениям тела. Возникает задача обработки полученных данных, переводу их от связанной системы координат с летательным аппаратом к географической или другой заданной системе координат.[2]

Целью данного исследования является создание готового электронного устройства - БИНС на базе микроконтроллера, использующего для обработки сигналов алгоритм на основе кватернионов.

Решение задачи навигации и ориентации на базе кватернионов

В бесплатформенных навигационных системах (БИНС) вычисление производится по двум алгоритмам: ориентации и навигации. Алгоритм ориентации осуществляет определение углового положения подвижного объекта относительно его центра масс. Задача ориентации может быть решена с помощью различных кинематических параметров, например: углы Эйлера-Крылова, направляющие косинусы, параметры Родрига-Гамильтона, кватернионы и другие. С математической точки зрения все способы приводят к одинаковым результатам, поэтому выбор параметров следует из простоты реализации на вычислительной машине, при наименьшем использовании её ресурсов. Поэтому отдается предпочтение при численной реализации параметрам Родрига-Гамильтона или их гиперкомплексной конструкции – кватерниону. Такие уравнения линейны, имеют четвёртый порядок и определены для любых углов и подчиняются одному уравнению нормировки. Умножение кватернионов удобно осуществлять с помощью кватернионных матриц, что сводится к обычному умножению матриц (размера 4×4 и 4×1) [3].

Начальное ориентирование

Для начала работы алгоритмов БИНС вначале необходимо ввести значения координат местоположения ЛА, его скорости и параметров ориентации. Определение углового положения тела по отношению к географической системе координат при подготовке запуска БИНС – начальное ориентирование.

Начальное ориентирование может осуществляться с привлечением внешних систем (систем спутниковой навигации, магнитометра) или автономно [4].

Задача навигации

Алгоритм навигации – определение положения центра массы подвижного тела относительно какой-либо выбранной системы координат (например, географической). В нашем случае используются показания акселерометров в связанной системе координат.

Акселерометры измеряют кажущееся ускорение, которое является суммой ускорения силы тяжести с кориолисовым и относительным ускорениями.

После получения кажущегося ускорения необходимо произвести пересчёт из связанной системы к географической системе координат. Пересчёт данных возможен, когда известен кватернион Λ [5].

$$2\dot{\Lambda} = \Lambda \circ \Omega - U_g \circ \Lambda$$

При перемещении вдоль Земли нужно компенсировать ускорение кориолиса и ускорения, связанные с криволинейностью движения тела. Эти «вредные» составляющие ускорения равны:

$$\begin{aligned}n_{Xg} - a_{Xg}^k &= \dot{V}_{Xg}; \\n_{Yg} - a_{Yg}^k &= \dot{V}_{Yg}; \\n_{Zg} - a_{Zg}^k &= \dot{V}_{Zg}.\end{aligned}$$

Составляющие относительной скорости движения ЛА с учётом ввода начальных скоростей:

$$\begin{aligned}V_{Xg} &= V_{Xg}(t_0) + \int_{t_0}^t (n_{Xg} - a_{Xg}^k) dt = V_{Xg}(t_0) + \int_{t_0}^t \dot{V}_{Xg} dt; \\V_{Yg} &= V_{Yg}(t_0) + \int_{t_0}^t (n_{Yg} - a_{Yg}^k) dt = V_{Yg}(t_0) + \int_{t_0}^t \dot{V}_{Yg} dt; \\V_{Zg} &= V_{Zg}(t_0) + \int_{t_0}^t (n_{Zg} - a_{Zg}^k) dt = V_{Zg}(t_0) + \int_{t_0}^t \dot{V}_{Zg} dt;\end{aligned}$$

Второе интегрирование позволяет рассчитать координаты объекта (так же учитываются начальные значения координат и высоты):

$$\varphi = \varphi(t_0) + \int_{t_0}^t \frac{V_{Xg}}{R} dt; \lambda = \lambda(t_0) + \int_{t_0}^t \frac{V_{Zg}}{R \cos \varphi} dt; h = h(t_0) + \int_{t_0}^t V_{Yg} dt.$$

Экспериментальные исследования

В качестве вычислителя, решающего задачу ориентации и навигации, было решено использовать компонентную базу на основе 32-битного микроконтроллера STM32F103RCT6. В качестве датчиков угловых перемещений и линейных ускорений были выбраны гироскопы и акселерометры, относящиеся к микроэлектромеханическим системам (МЭМС) - ITG3205 и ADXL345 соответственно.

Полученные с датчиков данные были обработаны разработанными алгоритмами, то есть произведён переход к географической системе координат со следующим вычислением координат объекта.

Для отображения результатов была выбрана часть пути летательного аппарата, отображающая момент его набора высоты. Далее осуществлялась обработка в вычислителе и передача данных о координатах объекта на компьютер, затем строился график перемещения ЛА в течении 100 с (рис. 1). Высота объекта не определяется полученными алгоритмами, так как информация уже снимается с других приборов, например, барометров. Это связано с тем, что мы не можем знать точно ускорение свободного падения для каждой точки пути, что приводит к накоплению большой погрешности. На графике для наглядности пути представлено и перемещение по оси высот, не вдаваясь в подробности получения данных.

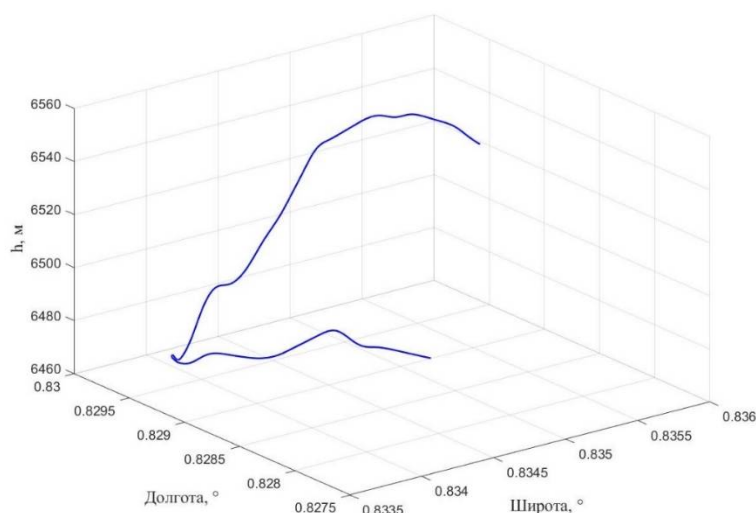


Рис. 1. График пути в географических координатах

Стоит отметить, что вычислитель такого типа с данным алгоритмом не пригоден для использования в высокоманевренных объектах и других сложных устройств, требующих высокой точности к навигации. Это связано с тем, что разрядность вычислений в данной случае составляет 32 бита, следовательно, ошибка, связанная с дискретизацией данных, накапливается более быстрыми темпами, что приводит со временем к расхождениям с действительным положением тела.

Рассмотрим сложность вычислений. Для реализации алгоритмов ориентации и навигации с помощью кватернионов были использованы массивы типа float, использовать double не имеет смысла, так как его разрядность превышает разрядность самого процессора вычислителя. Данный тип данных имеет разрядность 4 байт с точностью до 7 знаков после запятой. Следовательно, 7 знак после запятой, например, для Экватора эквивалентен приблизительно 10-5 км, так если частота обновления составляет 400 Гц (что на практике и встречается чаще), то за час полёта накопится погрешность примерно в 10 км, что уже неприемлемо для авиации и оборонной промышленности. Всего используется 6 массивов длиной в 3 слова и одна двумерная матрица размерами 4x3 для хранения значений кватернионов, две константы – ускорение свободного падения и угловая скорость вращения Земли, две переменные для вывода координат и начальное угловое положение в трёх переменных. Задействован один таймер-счётчик для организации прерываний. Таким образом, за один период таймер-счётчика вычисляется одна точка на сферической поверхности Земли. В таблице 1 приведена информация о сложности вычислений.

Таблица 1. Информация о сложности вычислений

Задействовано памяти для хранения величин	35 Байт
Циклов за период	1
Операции умножения и деления	68
Операции сложения и вычитания	54
Присваиваний для сдвига данных	14
Тригонометрических функций	6

В таблице 2 представлены краткие технические характеристики полученной устройства.

Таблица 2. Технические характеристики вычислителя

Процессор	STM32F103C8T6
Потребляемая мощность не более	0,5 Вт
Напряжения питания	5 В
Масса	0,3 кг
Габариты	0,2x0,1x0,1 м3

Выводы

В данном исследовательском проекте реализован алгоритм определения положения тела по входным данным с датчиков БИНС на базе микроконтроллера STM32 с использованием перемножения матриц кватернионов при решении кинематического уравнения.

Данный вычислитель пригоден для проведения экспериментов в образовательных целях, так как обладает достаточно высокой накапливающейся погрешностью вычислений из-за низкой разрядности, но полностью отражает принцип функционирования алгоритмов БИНС на основе кватернионов. Поэтому имеется перспектива применения устройства для выполнения лабораторных работ.

Библиографический список

1. В. В. Матвеев. Инерциальные навигационные системы: Учебное пособие / С. Ф. Коновалов – ТулГУ, 2012. – 199 с.
2. Бромберг П.В. Теория инерциальных систем навигации.-М.: Наука,1979-296 с.
3. Кильчевский Н. А. Курс теоретической механики. Т 1./ М.: Наука,1977.– 480 с.
- 4.Анучин О.Н., Емельянцева Г.И. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов/Под общей ред.чл.-кор. РАН В.Г. Пешехонова.- СПб., 1999. – 357с.
5. Барабанов О.О., Барабанова Л.П. Математические задачи дальномерной навигации. – М.:Физматлит, 2007. – 272с.

СЕКЦИЯ «ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА»

УДК 53.084.6, 53.084.872-876; ГРНТИ 29.19.31

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРОВ НЧ ШУМА ГЕРКОНОВЫХ КОНТАКТОВ С ПОВЫШЕННЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

А.А. Зинуков, Д.С. Логинов, Т.А. Холомина, А.Р.Семенов

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина.
Российская Федерация, Рязань, zin1211@mail.ru*

Аннотация. Экспериментально изучены параметры спектров низкочастотного (НЧ) шума партии герконов с повышенным сопротивлением. Проанализированы графики зависимости СПМ шума от частоты.

Ключевые слова: геркон, низкочастотный шум, спектральная плотность мощности шума.

STUDY OF THE PARAMETERS OF THE LF NOISE SPECTRA OF REED CONTACTS WITH INCREASED RESISTANCE

A.A. Zinukov, D. S. Loginov, T. A. Kholomina A.R, Semenov.

*Ryazan State Radio Engineering University named after V. F. Utkin.
Russia, Ryazan, zin1211@mail.ru*

Annotation. The parameters of low-frequency (LF) noise spectra of a batch of reed switches with increased resistance were studied experimentally. Plots of the SPM noise dependence on frequency were analyzed.

Keywords: Reed switch, low-frequency noise, noise power spectral density.

Введение

Применение современных экспериментальных методов и цифровых технологий обработки результатов позволяет создавать достоверные методики прогнозирования надежности электронных приборов. Из-за высокого уровня шума в электронном приборе может стать недоступен полезный сигнал, что ограничивают рабочий диапазон основных характеристик. С другой стороны, диагностика приборов по спектрам НЧ шума – это метод, который позволяет прогнозировать ресурс работы электронных компонентов. Анализ спектров НЧ шума позволяет сделать выводы о состоянии системы и протекающих в ней процессах.

Магнитоуправляемый контакт (геркон) – миниатюрная цилиндрическая стеклянная колбочка, в противоположные концы которой впаяны два контакта, изготовленные из материалов, обладающих ферромагнитными свойствами: подвижный и неподвижный. Колба либо вакуумирована, либо наполнена инертным газом, для продления срока службы прибора [1]. Герконы имеют гораздо меньшие размеры, нежели классические реле, а также вносят незначительные искажения сигнала.

Целью настоящей работы явилось изучение флуктуационных характеристик герконов с золотым покрытием контактов, отбракованных по одному из параметров - высокому сопротивлению. Образцы для исследования предоставлены предприятием АО «РЗМКП».

Экспериментальные результаты

Исследования проведены при помощи разработанного автоматизированного измерительно-аналитического комплекса для исследования спектров НЧ шума. Комплекс дает возможность производить заданное число измерений одного образца, минимизировать количество ошибок путем усреднения полученных данных [2]. Принципиальная схема усилительного блока приведена на рисунке 1.

Измерения герконов проводились при коэффициенте усиления $K_{yc}=21$. Этот режим работы обеспечивает необходимую чувствительность установки, что позволяет получить качественные данные распределения спектральной плотности мощности (СПМ) НЧ шума.

Первоначально была измерена спектральная плотность мощности собственного шума измерительного комплекса без измеряемого образца с замкнутыми входами. Результаты представлены на рисунке 2. На основе полученных результатов можно сделать вывод, что СПМ собственного шума - постоянная величина, не зависящая от частоты, равная $10^{-13} \text{ В}^2/\text{Гц}$.

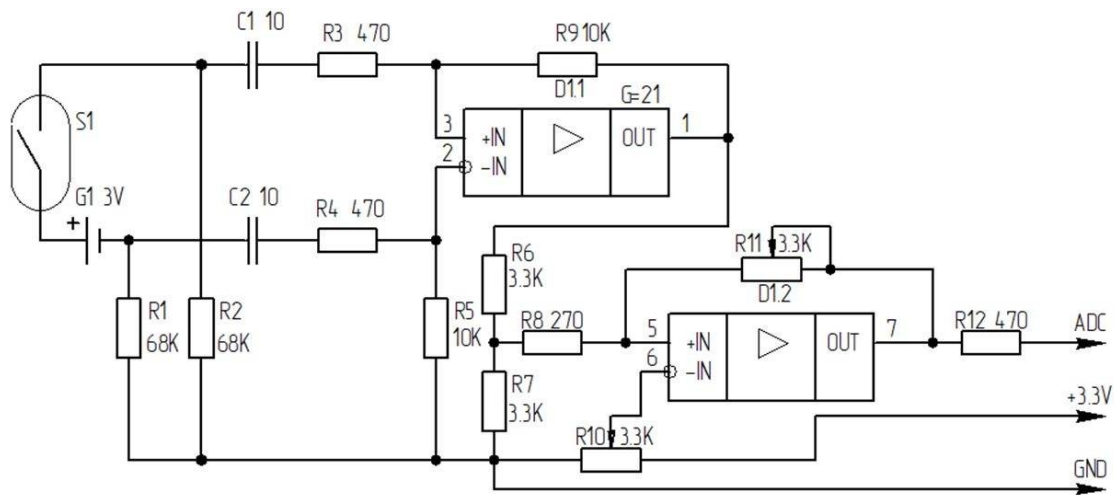


Рис. 1. Принципиальная схема усилительного блока

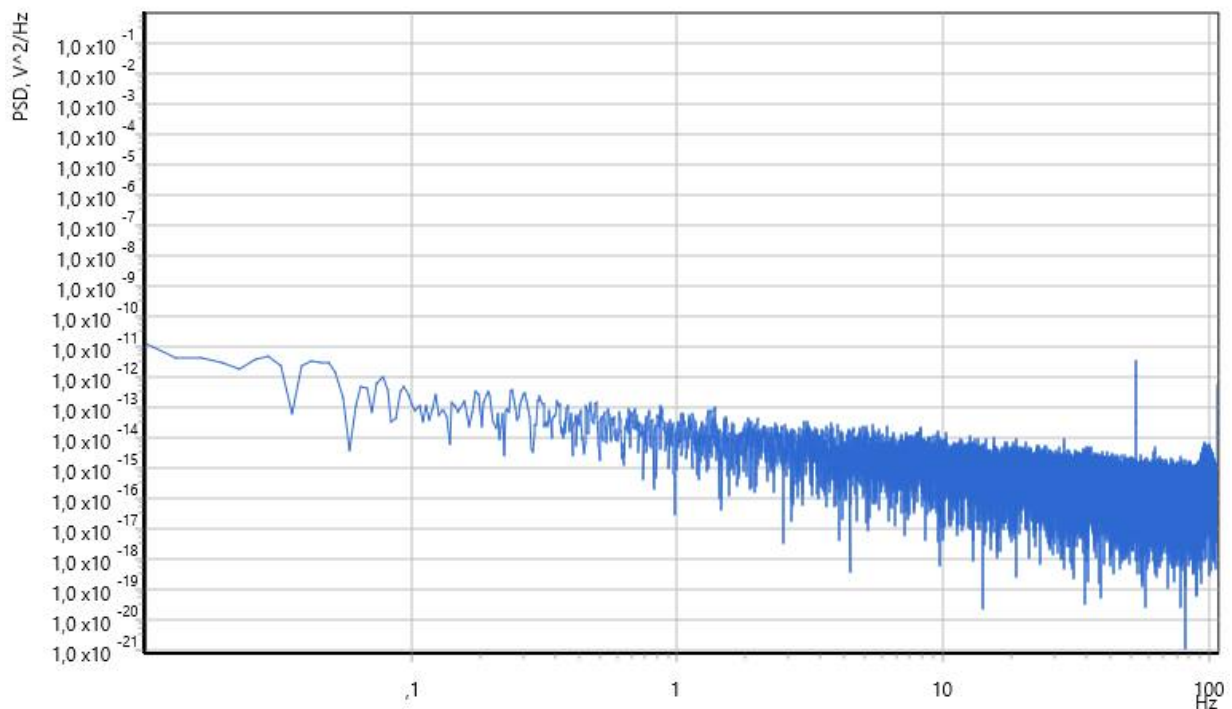


Рис. 2. Спектр собственного шума измерительно-аналитического комплекса

Для получения СПМ НЧ шума герконов было выполнено и усреднено по 10 измерений. Образцы измерялись в диапазоне частот от 0,01 до 100 Гц. Однако наиболее интересен диапазон частот от 0,01 до 10 Гц. Полученные массивы данных измерений были обработаны

в среде математического моделирования MathCad, в ходе чего были получены значения амплитуды СПМ и значения показателя формы спектра β .

Обработка полученных результатов включала аппроксимацию спектров НЧ шума методом линейной регрессии на частоте до 1 Гц. Основной интерес вызывает шум типа $1/f^\beta$. Степень β обычно находится в диапазоне от 0,6 до 2,5 и позволяет делать предположения и выводы о природе НЧ шума [3–5]. Исследованная партия состояла из 10 герконов с напылением золота на ферромагнитные (пермаллоевые) контакты. Спектры некоторых образцов герконов, аппроксимированные методом линейной регрессии, представлены на рисунке 3.

Частотные зависимости СПМ НЧ шума характеризуются наличием изменения наклона кривых в области низких частот. На частотах до 1 Гц частотная зависимость СПМ НЧ шума подчиняется закономерностям изменения фликкер-шума.

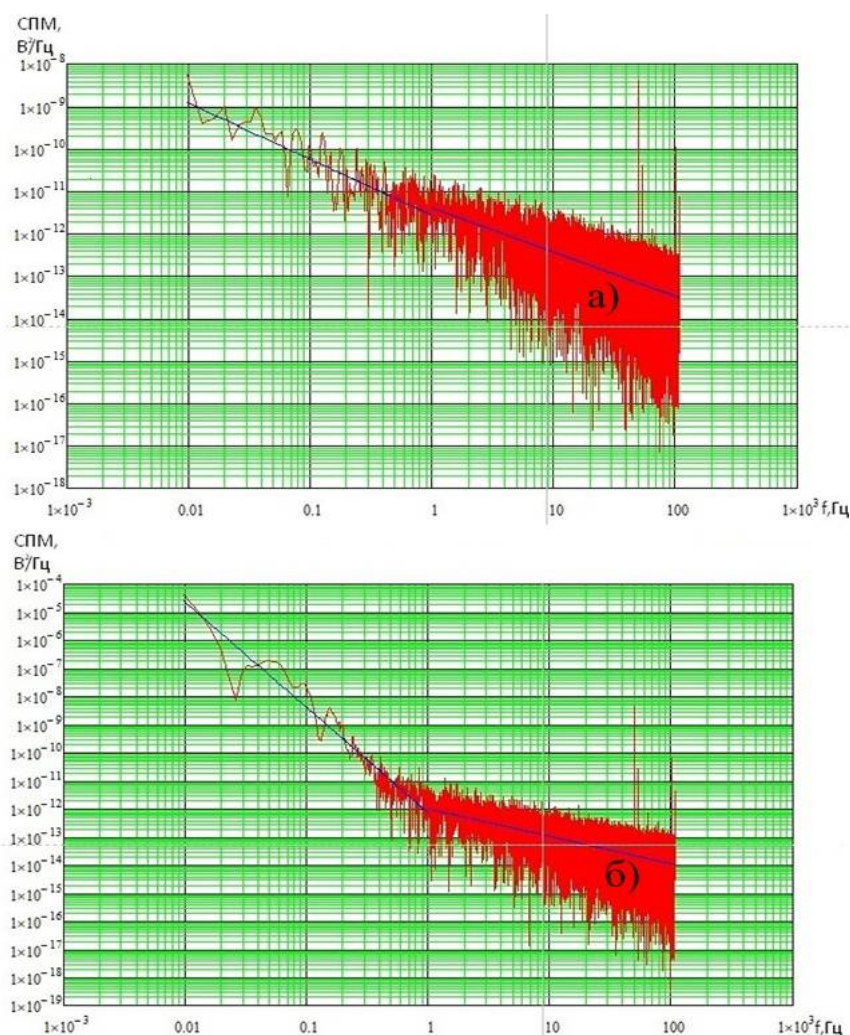


Рис. 3. Спектры низкочастотного шума магнитоуправляемых контактов:
а - образец 1, б – образец 7

В приведённой ниже таблице указаны параметры спектров НЧ шума исследованной партии герконов. Обозначения в таблице: СПМ – спектральная плотность мощности НЧ шума, измеренная на частоте 1 Гц; β – показатель степени при линейной аппроксимации начального участка спектра.

Согласно работе [6], большим значениям коэффициента β соответствуют большие механические напряжения в проводящих пленках.

Таблица. Параметры НЧ шума исследованных образцов

№	R, Ом	СПМ, В ² /Гц	β
1	0,039	$3,8 \cdot 10^{-12}$	1,31
2	0,021	$4,2 \cdot 10^{-12}$	3,96
3	0,120	$6,7 \cdot 10^{-13}$	1,06
4	0,860	$7,0 \cdot 10^{-13}$	1,18
5	0,065	$7,7 \cdot 10^{-13}$	0,85
6	0,250	$7,9 \cdot 10^{-13}$	1,15
7	1,050	$8,1 \cdot 10^{-13}$	3,75
8	0,168	$8,6 \cdot 10^{-13}$	1,02
9	0,162	$7,5 \cdot 10^{-13}$	0,96
10	0,580	$9,2 \cdot 10^{-13}$	1,00

Отметим, что в ранее исследованной партии герконов без золотого покрытия контактов с сопротивлением, равным 0,08 – 0,16 Ом наблюдалась аналогичная тенденция, однако СПМ НЧ шума на частоте 1 Гц изменялась в диапазоне $(5,6 – 12,8) \cdot 10^{-9}$ В²/Гц [2]. Таким образом, при увеличении сопротивления магнитоуправляемого контакта значение СПМ НЧ шума существенно снижается. Диапазон изменения показателя степени β, рассчитанный при линейной аппроксимации начального участка спектра, указанный в таблице, соответствует полученному в работе [2].

Заключение

Результаты, полученные в работе, указывают на связь между параметрами магнитоуправляемых контактов и характеристиками спектров НЧ шума. Обнаружено, что СПМ НЧ шума снижается при увеличении сопротивления магнитоуправляемых контактов.

Опираясь на полученные результаты, можно сделать вывод, что природа возникновения НЧ шума и особенности спектральных характеристик связаны с флуктуациями концентрации электронов в проводящих покрытиях электродов герконов, проявление которых коррелирует с особенностями структуры (возникновением больших механических напряжений) поверхности образцов в соответствии с вакансионной моделью Г.П. Жигальского [3–5].

Анализ данных, полученных в ходе экспериментов над образцами герконов с покрытием контактов из благородных металлов и без покрытия, позволяет предположить, что герконы с покрытием имеют более высокую надежность и стабильные рабочие характеристики.

Разработанная методика, основанная на спектроскопии НЧ шума, может служить инструментом диагностики качества и прогнозирования надежности магнитных контактов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003) с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина (РГРТУ).

Библиографический список

1. Геркон [электронный ресурс]. – 2021. URL: <https://electrikmaster.ru/gerkony/> (дата обращения 10.02.2022).
2. Баскакова А.В., Логинов Д.С., Исследование низкочастотных шумов в магнитных контактах - Современные технологии в науке и образовании: СТНО-2020. III международный научно-технический форум, Рязань, апрель 2020 г. – С. 87-89.
3. Жигальский Г.П. Шумы вида 1/f и нелинейные эффекты в тонких металлических плёнках //УФН. 1997. Т. 167. № 6. С. 623-647.
4. Жигальский Г. П. Неравновесный 1/f-шум в проводящих пленках и контактах// УФН. 2003. Т. 173, № 5. С. 465–490.
5. Жигальский Г.П., Краев А.В., Сиранашвили И.Ш., в кн. Флуктуационные явления в физических системах. Тез. докл. 5-й Всес. Конф. (Вильнюс, 1988). С. 117.

УДК 538.97; 539.2; 539.216.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НА СВОЙСТВА DLC ПЛЕНОК МОДИФИЦИРОВАННЫХ НАНОЧАСТИЦАМИ ПАЛЛАДИЯ

А.Р. Асембаева

¹Satbayev University, Алматы, Республика Казахстан

²ННЛОТ КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Республика Казахстан

эл. почта: a.assembayeva@satbayev.university

Аннотация. В работе приведены результаты исследования влияния условий синтеза на структуру и свойства алмазоподобных углеродных пленок (DLC), модифицированных наночастицами палладия, полученных методом магнетронного ионно-плазменного со-распыления комбинированной мишени на постоянном токе (DC). Показана зависимость структуры синтезируемых DLC пленок от мощности DC разряда и подложки. Методом спектроскопии комбинационного рассеяния света выявлено влияние мощности DC разряда, подложки и концентрации наночастиц Pd на локальную структуру получаемых пленок.

Ключевые слова: алмазоподобные углеродные пленки, магнетронное распыление, постоянного тока ионно-плазменного разряда, модифицирование, наночастицы палладия

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SYNTHESIS CONDITIONS ON THE PROPERTIES OF DLC FILMS MODIFIED WITH PALLADIUM NANOPARTICLES

A.R. Assembayeva^{1,2},

¹Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan

²NNLOT Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan

E-mail: a.assembayeva@satbayev.university

The summary. The paper presents the results of a study of the effect of synthesis conditions on the structure and properties of diamond-like carbon films (DLC) modified with palladium nanoparticles obtained by magnetron ion-plasma co-sputtering of a combined target at direct current (DC). The dependence of the structure of synthesized DLC films on the DC discharge power and the substrate is shown. Raman spectroscopy revealed the effect of the DC discharge power, substrate and concentration of Pd nanoparticles on the local structure of the synthesized films.

Keywords: diamond-like carbon films, magnetron sputtering, direct current ion-plasma discharge, modification, palladium nanoparticles

В настоящее время уделяется большое внимание синтезу и исследованию аморфных алмазоподобных углеродных пленок [1,2]. DLC пленки обладают уникальными механическими [3], трибологическими [4]. свойствами. Высокий показатель твердости, теплопроводности, оптической прозрачности в видимом и УФ диапазонах спектра [5], химическая и коррозионная устойчивость. делают их перспективным материалом для микроэлектроники и электронной промышленности.

Возможность управления структурой алмазоподобных пленок как путем изменения условий синтеза так и путем внедрения атомов различных металлов позволяет расширить спектр применения данных пленок [6,7]. Модифицируя алмазоподобные углеродные пленки, атомами металлов которые не вступают в химическую связь с углеродом, можно получить новый класс наноструктурированных композитных материалов, с расширенными функциональными свойствами, которые могут использоваться как в качестве защитных покрытий так и базового материала для опто- и микроэлектроники. Уникальная способность палладия проводить реакцию «сшивки» углеродных атомов [8], делает его перспективным материалом для проведения примесной модификации алмазоподобных пленок.

В представленной работе синтез DLC пленок с наночастицами Pd проводился методом ионно плазменного со – распыления, при значениях мощности DC разряда 17,5 и 19,5 Вт. Для получения модифицированных a-C<Pd> пленок использовалась комбинирован-

ная углеродная (99,9999%) мишень и тонкие проволоки палладия (99,9%) расположенные радиально в зоне разряда. Синтез пленок проводился при температурах подложки $<50^{\circ}\text{C}$ в атмосфере газа аргона (99,9999%). Давление в рабочей камере аргона составляла 0,7 Па. Изменение концентрации палладия в пленках осуществлялось путем изменения количества проволок палладия на поверхности мишени. Пленки а-C<Pd> были синтезированы на кремниевых (100) и на а-SiO₂ пластинах.

Методом рамановской спектроскопии было изучено влияние наночастиц палладий на локальную структуру а-C пленок. По рамановским спектрам, полученным при возбуждении лазерами 473 нм и 633 нм, была изучена дисперсия G пика ($G_{disp.}$) и определена по формуле (1).

$$G_{disp} = \frac{G_{pos}(473nm) - G_{pos}(633nm)}{(633 - 473)nm} \quad (1)$$

На рисунке 1 показано изменение дисперсии G пика пленок полученных при 17,5 и 19,5 Вт DC разряда, в зависимости от концентрации палладия. Дисперсия G пика позволяет провести оценку sp^2/sp^3 гибридинизованных узлов в формируемых пленках. Как видно из рисунка значение дисперсии G пика в чистых пленках принимает значение $\sim(0,34 - 0,39 \text{ см}^{-1}/\text{нм})$. Согласно литературным данным [9] в таких пленках содержание sp^3 гибридинизованных узлов достигает $\sim 70\%$. Модифицирование а-C пленок палладием приводит к уменьшению $G_{disp.}$ При концентрациях палладия $\sim 2,5 \text{ ат.}\%$ $G_{disp.}$ примет значения $\sim 0,28 \text{ см}^{-1}/\text{нм}$. Таким образом можно сказать, что увеличение концентрация палладия приводит к уменьшению sp^3 гибридинизованных атомов и увеличивает степень графитизации в а-C пленках. Кроме этого, видно что пленки, синтезированные при значениях мощности 17,5 Вт DC разряда, в основном формируют алмазоподобные структуры.

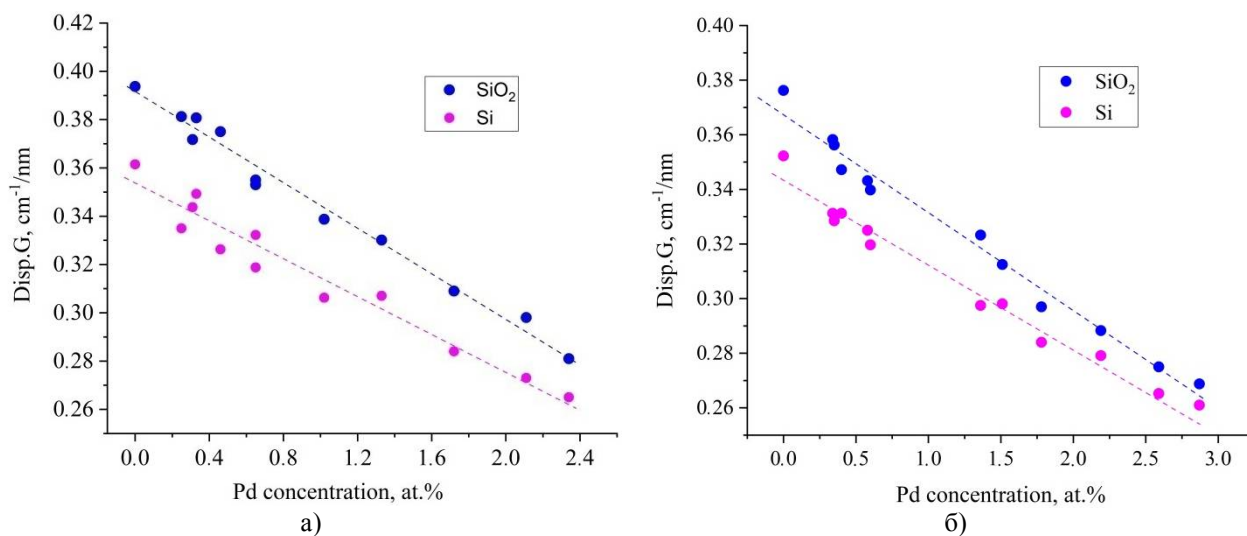


Рис. 1. Дисперсия G пика а-C<Pd> пленок полученных при а – 17,5 Вт, б – 19,5 Вт, на Si и SiO₂ подложках

Кроме того, видна зависимость влияния структуры подложки на формирование структуры пленки. Эти данные согласуются с результатами в [10]. Как видно из рисунка аморфные алмазоподобные пленки, синтезированные на кварцевых подложках, имеют большие значения дисперсии G пика, чем у пленок, синтезированных на кремниевых подложках. Это говорит, что на кварцевых подложках аморфные углеродные пленки имеют больший процент содержания sp^3 гибридинизованных связей, чем в пленках, выращенных на кремниевых (100) подложках. Но, при этом также как и в а-C<Pd> синтезированных на кварцевых подложках, с увеличением концентрации палладия, приводит к уменьшению дисперсии G

пики. Таким образом, можно заключить, что изменение мощности разряда и структуры подложки существенно влияют на структурообразование а-C<Pd> пленок.

Библиографический список

1. Teruyuki K., Noriaki T., Harushige T., Jiro M., Isao Y. Comparison of irradiation effects between cluster and monomer for dlc film deposition. - Novel Materials Processing by Advanced Electromagnetic Energy Sources, 2005, v. 2, – pp.245-248
2. Rajak D.K. , Kumar A., Behera A. Pradeep L. Menezes. Diamond-Like Carbon (DLC) Coatings: Classification, Properties, and Applications. - Appl. Sci., 2021,v.11 (10), - p. 4445
3. Weia Q., Sharma A.K., Sankara J., Narayan J. Mechanical properties of diamond-like carbon composite thin films prepared by pulsed laser deposition. - Composites: Part B: Engineering, 1999, v. 30, (7). – pp. 675-684
4. Erdemir A, Donnet C. Tribology of diamond-like carbon films: recent progress and future prospects. - J. Phys. D: Appl. Phys., 2006,v. 39, - pp. 311–327
5. Lina C.R., Weia D.H., Changb C.K., Liao W.H. Optical Properties of Diamond-like Carbon Films for Antireflection Coating by RF Magnetron Sputtering Method. - Physics Procedia, 2011, v. 18. – pp. 46–50
6. Ryaguzov, R.R. Nemkayeva, O.I. Yukhnovets, N.R. Guseinov, S.L. Mikhailova, F. Bekmurat, A.R. Assembayeva The effect of nonequilibrium conditions on the structure and optical properties of amorphous carbon films. - Optics and spectroscopy, 2019. v.127 (2). – pp. 251-259.
7. Delfin, F., Brühl, S. P., Forsich, C., Heim, D. Carbon based DLC films: Influence of the processing parameters on the structure and properties. - Revista Matéria, 2018, v. 23, (2).
8. [The Nobel Prize in Chemistry 2010](#)
9. Cui W.G., Lai Q.B., Zhang L., Wang F.M. Quantitative measurements of sp³ content in DLC films with Raman spectroscopy// Surface & Coatings Technology. –2010. –V.205. –P.1995–1999.
10. Ryaguzov A.P, Yermekov G. A., Nurmamyrtov T.E., Nemkayeva R. R., Guseinov N.R., Aliaskarov R. K. Visible Raman spectroscopy of carbon films synthesized by ion-plasma sputtering of graphite. - Journal of Materials Research, 2016, v.31 (1). – pp.127-136

УДК 538,97; 539.23; 539.216.1 ГРНТИ 29.19.22; 29.19.16

XPS АНАЛИЗ АМОΡФНЫХ АЛМАЗОПОДОБНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК С НАНОЧАСТИЦАМИ ИРИДИЯ

Ф. Бекмурат

*Национальная нанотехнологическая лаборатория открытого типа
КазНУ им аль-Фараби, Алматы, Казахстан, zh.farizal@mail.ru*

Аннотация. Синтез аморфных алмазоподобных углеродных пленок с наночастицами иридия (а-C<Ir>) осуществлялся методом магнетронного ионно-плазменного распыления на постоянном токе. Аморфные пленки а-C<Ir> были синтезированы при разных значениях мощности разряда. Микроструктура пленок изучена методом просвечивающей электронной микроскопией (ТЕМ). Показано, что иридий в аморфной углеродной пленке формирует наночастицы. Концентрация формирующих пленку элементов определялась при помощи рентгеновской фотоэлектронной спектроскопией (XPS).

Ключевые слова: наночастицы Иридия, алмазоподобная углеродная пленка, структура DLC, магнетронное со-распыление, DC разряд, XPS .

XPS ANALYSIS OF AMORPHOUS DIAMOND-LIKE CARBON FILMS WITH IRIIDIUM NANOPARTICLES

F. Bekmurat

*National nanotechnology laboratory of open type
KazNU named after al-Farabi, Almaty, Kazakhstan, zh.farizal@mail.ru*

Abstract. Synthesis of amorphous diamond-like carbon films with iridium nanoparticles (a-C<Ir>) is realized by magnetron ion-plasma sputtering at direct current. Amorphous a-C<Ir> films were synthesized at various values of the discharge power. The microstructure of films studied by the method of transmission electron microscopy (TEM). It is shown that iridium forms nanoparticles

in an amorphous carbon film. The film-forming concentration of the elements was sensed by developing photoelectron spectroscopy (XPS).

Keywords: Iridium nanoparticles, diamond-like carbon film, DLC structure, magnetron co-sputtering, DC discharge, XPS.

1. Введение

В последнее десятилетие наблюдается интенсивный рост исследований в области аморфных алмазоподобных углеродных пленок. DLC пленки получили широкое применение в качестве твердых покрытий, обладающих высокими антифрикционными свойствами и химически стойкими в агрессивных средах. Добавление иридия в DLC пленки повышает их коррозионную стойкость. Иридий выступает в углеродной матрице как самостоятельный элемент структуры, так как связей с углеродом не образует. Кроме этого, иридий как и углерод химически инертен к кислотам при нормальных условиях, что и позволяет использовать модифицированные углеродные пленки в качестве покрытий деталей применяемые в агрессивных средах.

2. Методика эксперимента

Метод синтеза тонких аморфных алмазоподобных углеродных пленок с наночастицами иридия описывался ранее в работах [1-3]. а-C<Ir> пленки были получены на кварцевых и кремниевых пластинах. Микроструктура аморфных алмазоподобных углеродных пленок с наночастицами иридия определена на просвечивающем электронном микроскопе JEOL JEM-2100F (Japan). Изучение элементного состава и определение энергии связи было осуществлено на приборе Thermo Scientific (USA).

В работе был использован метод магнетронного ионно-плазменного со-распыления комбинированной мишени на постоянном токе. Использование данного метода позволяет проводить структурно-примесную модификацию углеродных пленок. Синтез пленок осуществлялся в атмосфере аргона (99,9999%) при давлении 0,7 Па и температуре подложки менее 50°C. Методом масс-спектрометрии было установлено, что остаточные газы в вакуумной камере после откачки составляют парциальные давления, а именно молекул H₂O менее 10⁻⁵ Па, молекул O₂ на уровне 10⁻⁷ Па, другие молекулярные соединения составляют парциальные давления меньше 10⁻⁸ Па.

3. Результаты и обсуждение

Для изучения структуры пленок методом ТЕМ, образцы были синтезированы на свежем сколе NaCl. На рисунке 1 представлены ТЕМ изображения образцов при разных концентрациях иридия. На рисунке 1(а) показана чистая аморфная углеродная пленка и на рисунке 1(б, в) с двумя различными концентрациями. Из приведенных снимков видно что с увеличением концентрации иридия появляются темные точки. Размер и их количество зависит от концентрации иридия и составляет в пределах 10-30 нм.

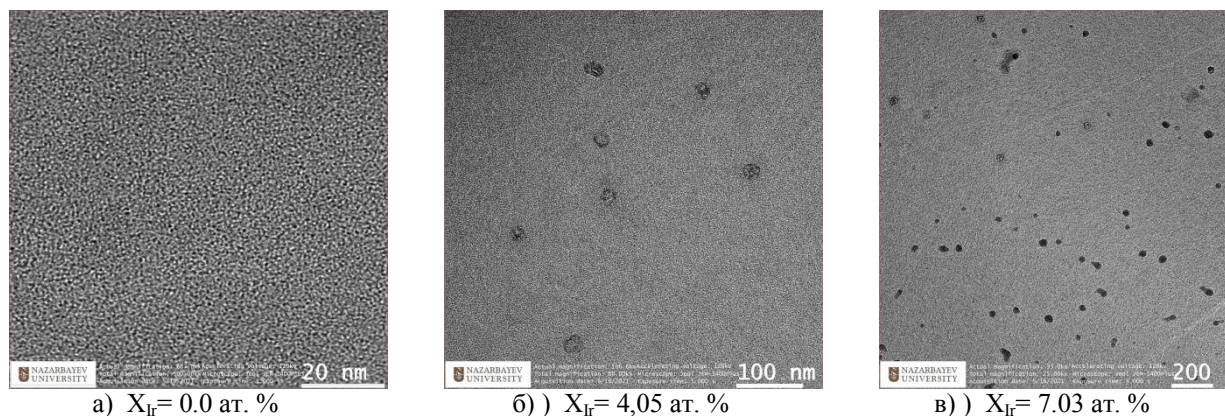


Рис. 1. ТЕМ изображение а-С<Ir> пленок

Структура и концентрация пленок определялась на установке рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. XPS анализ образцов проводился на глубине пленок до 10 нм. XPS - это мощный метод измерения поверхности, который можно использовать для точного определения присутствия и относительного количества элементов в образце. На рисунке 2 представлены типичные спектры XPS от чистой а-С пленки и пленки модифицированной наночастицами иридия. Из рисунка 2 видно, что кроме элементов углерода, кислорода и иридия других элементов в спектре нет. Появление кислорода связано с его адсорбцией в виде молекул O_2 или H_2O , т.к. структура поверхности а-С пленки пористая. Появление наночастиц иридия увеличивают пористость структуры, что и приводит к увеличению концентрации кислорода. Травление поверхности пленок перед измерением сигнала XPS не проводили из-за возможного повреждения структуры поверхностного слоя. Сравнение площадей под пиками дает относительное процентное содержание элементов, обнаруженных в образце, который показан на таблице 1 для чистой пленки и пленки с частицами иридия. Из таблицы видно, что появление иридия в углеродной матрице приводит к изменению положения пика энергии связи (BE) в а-С<Ir> пленках. Для C1s он находится в области $\sim 285 \pm 0,3$ eV, что характерно для атомов углерода с sp^3 гибридизацией связей. Появление иридия незначительно смещает его в низкоэнергетическую область.

Таблица 1. Элементный состав а-С<Ir> пленки при разных концентрациях иридия

Элемент	Пик BE	At, %	Элемент	Пик BE	At, %
C1s	285,24	89,61	C1s	284,91	81,76
O1s	533,03	10,39	Ir4f	62,57	7,03
			O1s	532,3	11,2

Из приведенных данных видно что, пик BE для C1s находится в области от 285,24 до 284,91 eV, и атомное содержание с появлением иридия уменьшается с 89,61 до 81,76 %. Процентное содержание sp^3 гибридизированных связей с и без примеси иридия может составлять порядка 60-70 %. При смещении BE на 0,33 эВ в низкочастотную область с появлением наночастиц иридия говорит об увеличении плотности π электронов с sp^2 гибридизированными связями.

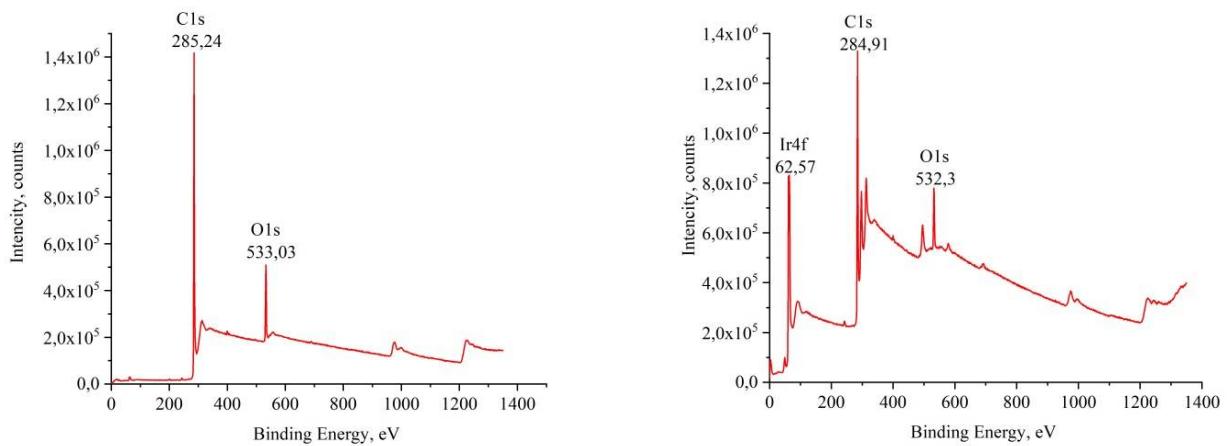


Рис. 2. Обзорный спектр XPS аморфных алмазоподобных углеродных пленок с наночастицами иридия

Заключение

Из проведенных исследований показано, что иридий не образует с углеродом химических связей и формирует наночастицы в аморфной углеродной матрице. При этом не оказывает существенного влияния на структуру алмазоподобной углеродной пленки. Появление пиков кислорода связано с его молекулярным состоянием в виде O₂ или H₂O, которые образуются в результате адсорбции на пористую поверхность аморфной алмазоподобной пленки.

Библиографический список

1. Бекмурат Ф., Немкаева Р., Гусейнов Н., Рягузов А.П. Влияние наночастиц иридия на структуру аморфных алмазоподобных углеродных пленок// СТНО 2019, том 2, 69 стр
2. Ryaguzov A.P., Nemkayeva R.R., Yukhnovets O.I., Guseinov N.R., Mikhailova S.L., Bekmurat F., Assembayeva A.R. The effect of nonequilibrium conditions on the structure and optical properties of amorphous carbon films. *Optics and spectroscopy*, -2019. –V.127, №2. –P. 251-259.
3. Бекмурат Ф., Немкаева Р., Гусейнов Н., Маркизат М., Раисова Т., Рягузов А.П. Изучение влияния условий синтеза на структуру и оптические свойства аморфных алмазоподобных углеродных пленок с наночастицами иридия// СТНО 2021, том 2, 66 стр

УДК 621.315.592

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГРАФЕНОВЫХ СТРУКТУРАХ

К.В. Бухенский¹, А.Б. Дюбуа^{1*}, А.Н. Конюхов¹, С.И. Кучерявый²,
С.Н. Машнина¹, А.С. Сафoshкин¹, К.А. Ципоркова¹

¹ Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, *abd-69@mail.ru

² Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ,
Российская Федерация, Калужская область, Обнинск

Аннотация. В работе рассмотрен процесс распространение поверхностного поляритона вдоль границы раздела полупроводник – графен. Получены значения амплитуд отраженно-го и прошедшего излучений.

Ключевые слова: графен, поверхностный поляритон.

THE PROPAGATION OF ELECTROMAGNETIC RADIATION IN GRAPHENE STRUCTURES

K.V. Bukhensky¹, A.B. Dubois^{1*}, A.N. Koniuchov¹, S.I. Kucheryavyy²,
S.N. Mashnina¹, A.S. Safoshkin¹, K.A. Tsiporkova¹

¹Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, *abd-69@mail.ru

²National Research Nuclear University (NRNU) MEPHI Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering,
Russia, Kaluga region, Obninsk

The summary. The paper considers the process of surface polariton propagation along the semiconductor-graphene interface. The values of the amplitudes of the reflected and transmitted radiations are obtained.

Keywords: graphene, surface polariton.

Открытие графена и создание терагерцовых лазеров на графене [1] стимулировали теоретические [2-10] и экспериментальные [11-14] исследования процессов перераспределения электромагнитных волн на планарных структурах.

В работе [10] исследована дифракция электромагнитных волн для ТЕ и ТМ поляриза-ций для изотропных и анизотропных структур. При этом рассматривался процесс отражения падающей волны из воздуха ($\varepsilon_1 = 1$) в среду с проницаемостью $\varepsilon_2 = (\varepsilon_t, \varepsilon_t, \varepsilon_n)$ (графен). Из классической электромагнитной теории [15] коэффициенты отражения для ТМ- и ТЕ-волн выводятся как

$$r_{1|2}^{\text{TM}} = \frac{\varepsilon_t \cos \theta - \sqrt{\varepsilon_t - \left(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_n}\right) \sin^2 \theta}}{\varepsilon_t \cos \theta + \sqrt{\varepsilon_t - \left(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_n}\right) \sin^2 \theta}}, \quad (1)$$

$$r_{1|2}^{\text{TE}} = \frac{\cos \theta - \sqrt{\varepsilon_t - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\varepsilon_t - \sin^2 \theta}}, \quad (2)$$

где θ - угол падения.

Таким образом, коэффициенты пропускания для ТМ- и ТЕ-волн составляют

$$t_{1|2}^{\text{TM}} = \frac{2\varepsilon_t \cos \theta}{\varepsilon_t \cos \theta + \sqrt{\varepsilon_t - \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_n} \sin^2 \theta}}, \quad (3)$$

$$t_{1|2}^{\text{TE}} = \frac{2 \cos \theta}{\cos \theta + \sqrt{\varepsilon_t - \sin^2 \theta}} \quad (4)$$

соответственно; в идеальном случае без потерь пропускная способность ТЕ-волн равняется $T^{\text{TE}} = 1 - |r_{1|2}^{\text{TE}}|^2$. Когда область 2 является изотропной средой (т.е. $\varepsilon_t = \varepsilon_n$), из анализа выражений для коэффициентов отражения следует, что для ТМ- и ТЕ-волн отражательная способность будет отлична от нулевой, за исключением случаев, когда угол падения является углом Брюстера для ТМ-волн [15].

Когда область 2 (графен) является оптически одноосной средой (т. е. $\varepsilon_t \neq \varepsilon_n$), мы находим, что полного поляризационного расщепления можно достичь с помощью $|r_{1|2}^{\text{TM}}| = 1$ и $|r_{1|2}^{\text{TE}}| = 0$, т.е. полной отражательной способности для ТМ-волн и полной пропускной способности для ТЕ-волн для произвольного угла падения. Соответствующим условием является $\varepsilon_t = 1$ и $\varepsilon_n = 0$. В рассмотренной в работе [10] структуре полное поляризационное расщепление не зависит от угла падения благодаря вращательной симметрии структуры относительно нормали к поверхности. Кроме того, полного поляризационного расщепления также можно добиться с помощью тонкого слоя такой одноосной среды.

В работе [10] полагают, что одноосный слой толщиной d окружен воздухом, то есть $\varepsilon_3 = \varepsilon_1 = 1$. Следовательно, коэффициенты отражения и пропускания ТЕ- и ТМ-волн через слой могут быть выведены таким образом [15]:

$$r_{1|3}^{\text{TM}} = r_{1|2}^{\text{TM}} + \frac{t_{1|2}^{\text{TM}} r_{2|3}^{\text{TM}} t_{2|1}^{\text{TM}} e^{2ik_z^{\text{TM}} d}}{1 - r_{2|1}^{\text{TM}} r_{2|3}^{\text{TM}} e^{2ik_z^{\text{TM}} d}}, \quad t_{1|3}^{\text{TM}} = \frac{t_{1|2}^{\text{TM}} t_{2|3}^{\text{TM}} e^{2ik_z^{\text{TM}} d}}{1 - r_{2|3}^{\text{TM}} r_{2|1}^{\text{TM}} e^{2ik_z^{\text{TM}} d}}, \quad (3.5)$$

$$r_{1|3}^{\text{TE}} = r_{1|2}^{\text{TE}} + \frac{t_{1|2}^{\text{TE}} r_{2|3}^{\text{TE}} t_{2|1}^{\text{TE}} e^{2ik_z^{\text{TE}} d}}{1 - r_{2|1}^{\text{TE}} r_{2|3}^{\text{TE}} e^{2ik_z^{\text{TE}} d}}, \quad t_{1|3}^{\text{TE}} = \frac{t_{1|2}^{\text{TE}} t_{2|3}^{\text{TE}} e^{2ik_z^{\text{TE}} d}}{1 - r_{2|1}^{\text{TE}} r_{2|3}^{\text{TE}} e^{2ik_z^{\text{TE}} d}}. \quad (3.6)$$

В приведенных формулах

$$t_{2|1}^{\text{TM}} = t_{2|3}^{\text{TM}} = \frac{2\sqrt{\varepsilon_t - \left(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_n}\right) \sin^2 \theta}}{\varepsilon_t \cos \theta + \sqrt{\varepsilon_t - \left(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_n}\right) \sin^2 \theta}},$$

$$r_{2|1}^{\text{TM}} = r_{2|3}^{\text{TM}} = -r_{1|2}^{\text{TM}}, \quad t_{2|1}^{\text{TE}} = t_{2|3}^{\text{TE}} = \frac{2\sqrt{\varepsilon_t - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\varepsilon_t - \sin^2 \theta}}, \quad r_{2|1}^{\text{TE}} = r_{2|3}^{\text{TE}} = -r_{1|2}^{\text{TE}},$$

$$k_z^{\text{TM}} = \frac{\omega}{c \sqrt{\varepsilon_t - \left(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_n}\right) \sin^2 \theta}}, \quad k_z^{\text{TE}} = \frac{\omega}{c \sqrt{\varepsilon_t - \sin^2 \theta}}.$$

Стоит отметить, что когда плоская волна проходит через одноосный слой с $\varepsilon_2 = (1, 1, 0)$, для произвольного угла падения отражательная способность ТМ-волн равна единице (т.е. $R^{\text{TM}} = |r_{13}^{\text{TM}}|^2 = 1$), и отражательная способность ТЕ-волн равна нулю (т.е. $R^{\text{TE}} = |r_{13}^{\text{TE}}|^2 = 0$). Как R^{TM} , так и T^{TE} не зависят от толщины слоя. Такое поведение может быть объяснено эффектом отсутствия интерференции. Механизм без применения эффекта интерференции дает возможность спроектировать ультратонкий поляризационный сплиттер наноразмерной толщины.

Недостаток данной теории в этом случае состоит, во-первых, в том, что расчеты были выполнены без учета возбуждения поверхностного поляритона, а во-вторых, не была учтена зависимость диэлектрической проницаемости от частоты. Однако при рассмотрении дифракционной задачи возможно достижение необходимых условий для распространения поверхностного поляритона при терагерцовых частотах.

В работе [10] формула Кубо [16] применяется для моделирования поверхностной проводимости монослоя графена, т.е. $\sigma_{\text{gra}} = \sigma_{\text{intra}} + \sigma_{\text{inter}}$, где

$$\sigma_{\text{inter}} = \frac{ie^2 k_B T}{\pi \hbar^2 \left[\omega + \frac{i}{\tau} \right]} \left\{ \frac{\mu_c}{k_B T} + 2 \ln \left[\exp \left(-\frac{\mu_c}{k_B T} \right) + 1 \right] \right\}, \quad (7)$$

$$\sigma_{\text{intra}} = \frac{ie^2 \left[\omega + \frac{i}{\tau} \right]}{\pi \hbar^2} \int_0^\infty \frac{f_d(-x) - f_d(x)}{\left[\omega + \frac{i}{\tau} \right]^2 - \left(\frac{2x}{\hbar} \right)^2} dx. \quad (8)$$

В приведенных выше формулах $f_d(x)$ – распределение Ферми – Дирака при $T = 300$ К, время релаксации $\tau = \mu_c \mu / (ev_F^2)$ при скорости Ферми $v_F = 10^6 \text{ ms}^{-1}$. В работе [10] химический потенциал равен $\mu_c = 0.1484 \text{ eV}$, а подвижность электронов составляет $30\,000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ [17,18]. Таким образом, соответствующее время релаксации составляет $\tau = 0.4452 \text{ ps}$.

Продольная составляющая относительной диэлектрической проницаемости монослоя графена находится по формуле $\varepsilon_{t,\text{gra}} = 1 + i\sigma_s / (\omega \varepsilon_0 d_{\text{gra}})$ [11], где толщина монослоя графена $d_{\text{gra}} = 0.35 \text{ nm}$ [20].

Одноосный материал h -BN характеризуется относительной диэлектрической проницаемостью $\boldsymbol{\varepsilon}_{r,h\text{BN}} = \{ \varepsilon_{t,h\text{BN}}, \varepsilon_{t,h\text{BN}}, \varepsilon_{n,h\text{BN}} \}$, где $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_{t,h\text{BN}}$ и $\varepsilon_z = \varepsilon_{n,h\text{BN}}$. Экспериментальные данные об изотопно-обогащенном слое h -BN [21,22] взяты для моделирования относительной диэлектрической проницаемости h -BN.

Для направления вдоль плоскости слоя

$$\varepsilon_{t,hBN}(\omega) = \varepsilon_{t,\infty} \left(\frac{\omega_{t,LO}^2 - \omega^2 - i\Gamma_t \omega}{\omega_{t,TO}^2 - \omega^2 - i\Gamma_t \omega} \right), \quad (9)$$

где высокочастотная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{t,\infty} = 5.1$, частота продольных оптических колебаний $\omega_{t,LO} = 49.5 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$, частота поперечных оптических колебаний $\omega_{t,TO} = 41.835 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$, скорость затухания фононов $\Gamma_t = 1.8 \text{ cm}^{-1}$ [22].

Для нормальной составляющей диэлектрической проницаемости получено выражение

$$\varepsilon_{n,hBN}(\omega) = \varepsilon_{n,\infty} \left(\frac{\omega_{n,LO}^2 - \omega^2 - i\Gamma_n \omega}{\omega_{n,TO}^2 - \omega^2 - i\Gamma_n \omega} \right), \quad (3.10)$$

где $\varepsilon_{n,\infty} = 2.5$, $\omega_{n,LO} = 25.35 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$, $\omega_{n,TO} = 23.55 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$ и $\Gamma_n = 1 \text{ cm}^{-1}$ [20].

На рисунке 1 представлены частотные зависимости диэлектрических функций для распространения колебаний в направлениях вдоль и перпендикулярно к плоскости планарной структуры.

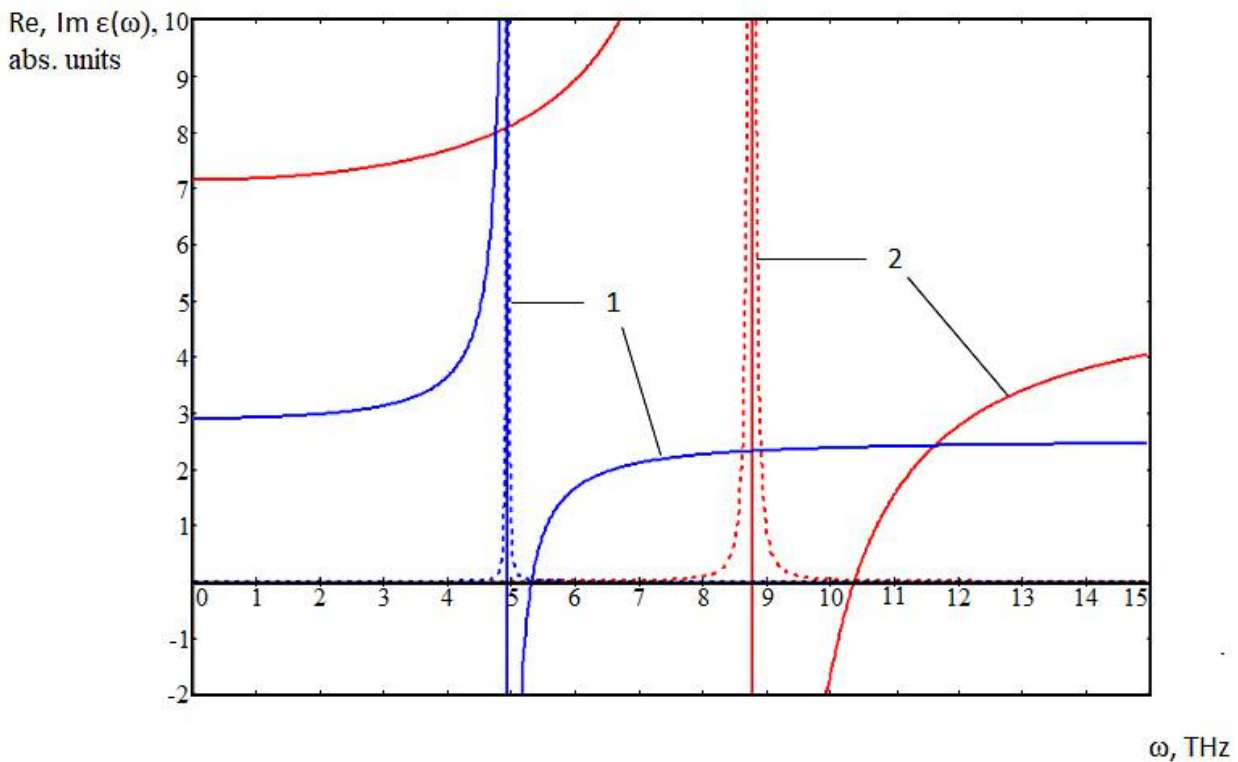


Рис. 1. Частотная зависимость диэлектрической функции для монослоя графена. Сплошные линии – действительная часть диэлектрической функции, пунктирные – мнимая часть.
1 – распространение колебаний в направлении плоскости пленки,
2 – распространение колебаний в направлении, перпендикулярном к плоскости пленки

Библиографический список

1. Chakraborty S., Marshall O.P., Folland T.G., Kim Y.-J., Grigorenko A.N., Novoselov K.S. *Gain modulation by graphene plasmons in aperiodic lattice lasers* // Science. 2016. Vol. 351. No. 6270. P. 246-248.
2. Бухенский К.В., Дюбуа А.Б., Конохов А.Н., Кучерявый С.И., Машнина С.Н., Сафoshкин А.С. *Особенности решения интегро-дифференциальных уравнений Максвелла и возбуждения поверхностного поляритона на планарной структуре*. // Журнал Средневолжского математического общества. 2017. Т. 19. № 3. С. 73–81.
3. Baukov A.A., Bukhenskyu K.V., Dubois A.B., Kucheryavyy S.I., Mashnina S.N., Safoshkin A.S., Shchigorev E.Yu. *Temperature dependences of the time of electron-electron interactions in two-dimensional heterojunction* // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 941. P. 012059.
4. Bukhenskyu K.V., Dubois A.B., Gordova T.V., Kucheryavyy S.I., Mashnina S.N., Safoshkin A.S. *Electron-electron Interactions in Highly Doped Heterojunction* // Physics Procedia. 2015. Vol. 71. P. 359-363.
5. Baskakova A.V., Bukhenskyu K.V., Dubois A.B., Kucheryavyy S.I., Mashnina S.N., Safoshkin A.S. *Kinetic processes in heavily doped semiconductor heterojunctions* // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 747. P. 012026.
6. Дюбуа А.Б., Зилотова М.А., Кучерявый С.И., Сафoshкин А.С. *Кинетические процессы в умеренно легированном гетеропереходе*. // Вестник РГРТУ. 2013. №3 (выпуск 45). С. 88-92.
7. Ambartsumyan V.A., Andryushchenko E.A., Bukhenskyu K.V., Dubois A.B., Dvoretzkova E.A., Gordova T.V., Kucheryavyy S.I., Mashnina S.N., Safoshkin A.S. *Channels of electron-electron interactions in highly doped heterojunction* // Nanosystems: physics, chemistry, mathematics. 2014. Vol. 5. No. 3. P. 343-353.
8. Дюбуа А.Б., Кучерявый С.И., Сафoshкин А.С. *Межподзонные электрон-электронные взаимодействия в двумерном электронном газе* // Известия вузов. Физика. 2021. Т. 64, № 4. С. 163-169.
9. Dubois A.B., Kucheryavyy S.I., Safoshkin A.S. *Inter-subband electron-electron interactions in two-dimensional electron gas* // Russian Physics Journal. Vol. 64. №4. P. 753-760.
10. Shah Sh., Lin X., Shen L., Renuka M., Zhang B. and Chen H. *Interferenceless Polarization Splitting Through Nanoscale van der Waals Heterostructures* // Phys. Rev. Applied. 2018. Vol. 10. No. 3. P. 034025.
11. Afinogenov B.I., Kopylova D.S., Abrashitova K.A., Bessonov V.O., Anisimov A.S., Dyakov S.A., Gippius N.A., Gladush Yu.G., Fedyanin A.A. and Nasibulin A.G. *Midinfrared Surface Plasmons in Carbon Nanotube Plasmonic Metasurface* // Phys. Rev. Applied. 2018. Vol. 9. No. 2. P. 024027.
12. Caloz C., Alù A., Tretyakov S., Sounas D., Achouri K. and Deck-Léger Z. *Electromagnetic Nonreciprocity*. // Phys. Rev. Applied. 2018. Vol. 10. No. 4. P. 047001.
13. Murayama A., Furuta T., Hyomi K., Souma I., Oka Y., Dagnelund D., Buyanova I.A. and Chen W.M. *Dynamics of exciton-spin injection, transfer, and relaxation in self-assembled quantum dots of CdSe coupled with a diluted magnetic semiconductor layer of Zn_{0.80}Mn_{0.20}Se*. // Phys. Rev. B. 2007. Vol. 75. No. 19. P. 195308.
14. García de Abajo F.J. *Optical excitations in electron microscopy* // Rev. Mod. Phys. 2010. Vol. 82. No. 1. P. 209-275.
15. Kong J.A. *Electromagnetic Wave Theory* // EMW Publishing, Cambridge, MA, 2008.
16. Vuong T.Q.P., Liu S., Van der Lee A., Cuscó R., Artús L., Michel T., Valvin P., Edgar J.H., Cassabois G. and Gil B. *Isotope engineering of van der Waals interactions in hexagonal boron nitride* // Nat. Mater. 2018. Vol. 17. No 2. P. 152.
17. Giles A.J., Dai S., Vurgaftman I., Hoffman T., Liu S., Lindsay L. and Tischler J.G.. *Ultralow-loss polaritons in isotopically pure boron nitride* // Nat. Mater. 2018. Vol. 17. No 2. P. 134.
18. Lin X., Rivera N., López J.J., Kaminer I., Chen H. and Soljačić M. *Tailoring the energy distribution and loss of 2D plasmons* // New J. Phys. 2016. Vol. 18. No. 10. P. 105007.
19. Vakil A. and Engheta N. *Transformation optics using graphene* // Science. 2011. Vol. 332. No. 6035. P. 1291.
20. Bolotin K.I., Sikes K.J., Jiang Z., Klima M., Fudenberg G., Hone J., Kim P. and Stormer H.L. *Ultrahigh electron mobility in suspended graphene* // Solid State Commun. 2008. Vol. 146. No. 9-10. P. 351.
21. Dean C.R., Young A.F., Meric I., Lee C., Wang L., Sorgenfrei S., Watanabe K., Taniguchi T., Kim P., Shepard K.L. and Hone J. *Boron nitride substrates for highquality graphene electronics* // Nat. Nanotechnol. 2010. Vol. 5. No. 10. P. 722.
22. Wu J., Jiang L., Guo J., Dai X., Xiang Y. and Wen S. *Turnable perfect absorption at infrared frequencies by a graphene-hBN hyper crystal* // Opt. Express. 2016. Vol. 24. No. 15. P. 17103.

УДК 53.084.6, 53.084.872-876; ГРНТИ 29.19.27

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ НЧ ШУМА МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫХ КОНТАКТОВ С ПОМОЩЬЮ АЦП МИКРОКОНТРОЛЛЕРА STM32

Д.С. Логинов

*Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, skoobel@gmail.com*

Аннотация. Разработаны макет измерительного комплекса и программное обеспечение для измерения низкочастотного (НЧ) шума на базе 32 битного высокопроизводительного микроконтроллера STM32. Разработка позволяет при заранее заданных параметрах выполнять измерение спектров НЧ шума магнитоуправляемых контактов для последующих исследований состава и морфологии поверхности контактов с целью прогнозирования надежности приборов.

Ключевые слова: магнитоуправляемые контакты, исследование низкочастотного шума

INVESTIGATION OF THE LF NOISE SPECTRA OF MAGNETO-CONTROLLED CONTACTS USING THE ADC OF THE STM32 MICROCONTROLLER

D.S. Loginov

*Ryazan State Radio Engineering University,
Russia, Ryazan, skoobel@gmail.com*

The summary. Based on the 32-bit high-performance STM32 microcontroller, a layout and software for measuring the PSD of low-frequency noise have been developed. The developed layout allows, with predetermined parameters, to measure the PSD of the LF noise of magnetically controlled contacts for subsequent studies of the spectra of low-frequency (LF) noise, the composition and morphology of the contact surface in order to predict the reliability of devices.

Keywords: magnetically controlled contacts, low frequency noise survey

Введение

Современные цифровые технологии позволяют значительно повысить точность и достоверность экспериментальных результатов. Спектроскопия низкочастотного (НЧ) шума является чувствительным методом изучения физических процессов практически в любых материалах, а также прогнозирования надежности приборов, изготовленных на их основе. Исследование металлических контактов с помощью спектроскопии НЧ шума предполагает высокую точность измерения параметров образцов. Для достижения точности и повторяемости получаемых результатов, необходимо учитывать множество факторов, влияющих на измерения. Одним из наиболее сложных аспектов является достижение измерительных частот ниже 1 Гц без утраты точности и достоверности.

Цель настоящей работы – разработка макета измерительного комплекса спектроскопии НЧ шума для исследования магнитоуправляемых контактов на базе высокопроизводительного микроконтроллера STM32, а также необходимого программного обеспечения (ПО), позволяющих повысить точность измерения, сократить время и упростить процесс исследования [1].

Схемотехническое решение

Макет измерительного комплекса спектроскопии НЧ шума разработан на базе отладочной платы Nucleo-F746ZG фирмы STMicroelectronics [2]. Значительное количество выводов макета, наличие готового звена питания и USB обеспечивают полноценное использование двенадцатиразрядного АЦП. В данном случае АЦП используется для измерения сигнала с усилительного тракта с целью измерения спектральной плотности мощности (СПМ) НЧ шума. Наличие готового звена позволяет обеспечить питание отладочной платы непосредственно.

венно от USB ПК, что значительно упрощает методику разработки. Достаточное количество фильтрующих элементов питания обеспечивают бесперебойную работу микроконтроллера и минимальные шумы АЦП. Интерфейс USB обеспечивает обмен данными между ПК и микроконтроллером на высокой скорости, что является необходимым условием ускорения процесса исследования образца. Блок-схема макета измерительного комплекса представлена на рисунке 1.

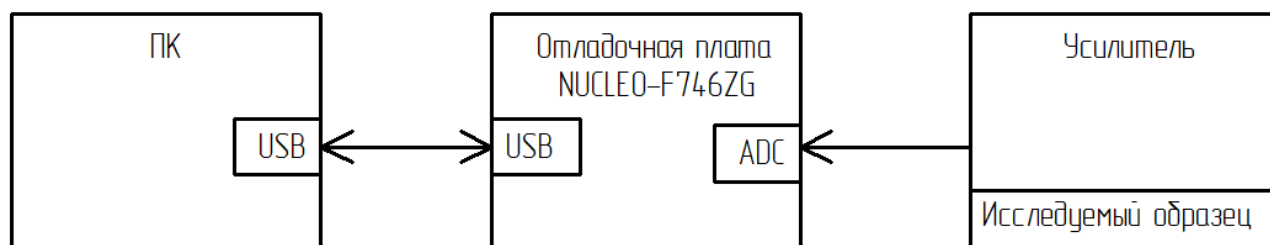


Рис. 1. Блок - схема макета измерительного комплекса

Для обеспечения измерения необходимых параметров используется усилительный тракт на базе малошумящего, широкополосного ОУ AD8512BR фирмы Analog Devices [3]. С помощью усилительного тракта обеспечивается усиление и смещение сигнала для корректной работы с АЦП микроконтроллера. Измерения проводятся при напряжении $\pm 12\text{В}$ от гальванических источников для исключения помех по цепям питания. При двухполярном питании диапазон выходного напряжения близок к указанному выше напряжению и середина диапазона находится в точке нуля, а у АЦП микроконтроллера диапазон напряжения равен $0-3,3\text{В}$, соответственно середина диапазона находится в точке $1,65\text{В}$. Для обеспечения смещения напряжения и согласования используется еще один ОУ AD8512BR. Схема усилительного тракта приведена на рисунке 2.

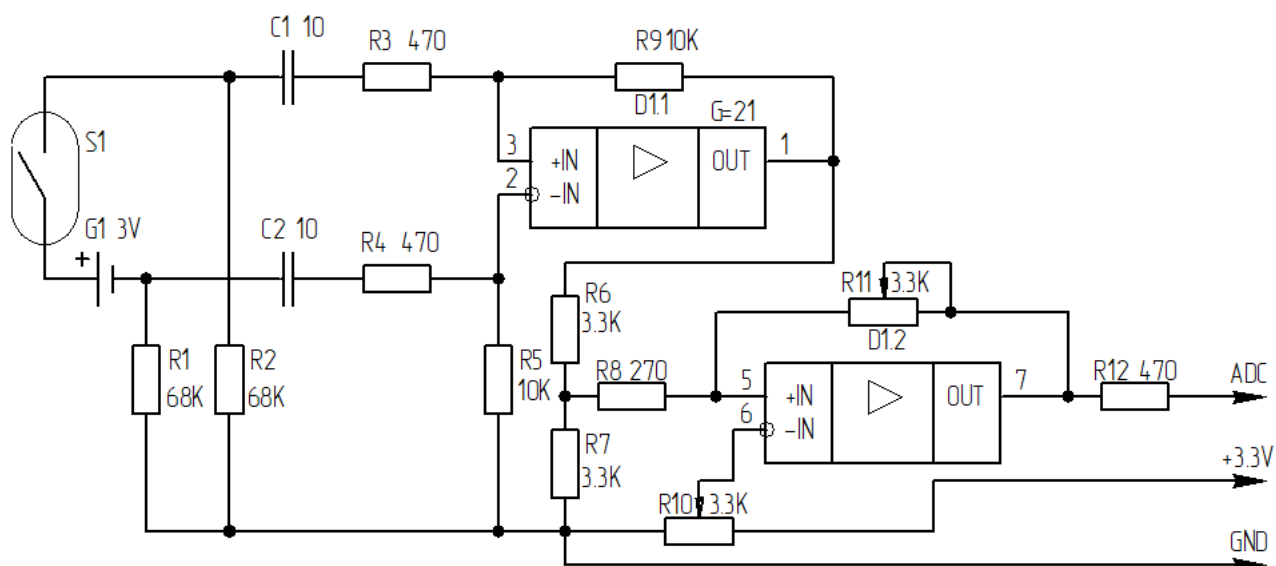


Рис. 2. Схема электрическая принципиальная усилительного тракта

Для создания тока через испытуемый образец используется гальванический элемент питания с номинальным напряжением 3В и резисторы $R1, R2$ благодаря которым создается ток $1,8^{-5}\text{А}$. Ранее в наших работах экспериментальным путем доказано, что такого тока достаточно для обеспечения необходимой чувствительности измерительной установки.

Конденсаторы C1 и C2 служат для фильтрации постоянной составляющей. Резисторы R3 и R4 необходимы для согласования входного сигнала с ОУ. Резисторы R5 и R9 задают необходимый коэффициент усиления, который в данном случае составляет 21. С помощью ОУ D1.2 сигнал приводится к 1,65 В для обеспечения согласования с АЦП микроконтроллера.

Программное обеспечение

Для обеспечения правильного функционирования макета измерительного комплекса разработано программное обеспечение для микроконтроллера в среде STM32CubeIDE v1.7.0 и для ПК в среде Delphi v10.4.

Микроконтроллер под управлением ПО обеспечивает измерение сигнала при помощи АЦП с высокой частотой, обеспечивает обмен данными с ПК для передачи информации с АЦП и осуществляет обмен пакетами управления и конфигурации по интерфейсу USB. Кроме того, микроконтроллер выполняет функцию отладочного генератора, имеющего 4 частоты, кратные частоте кварцевого резонатора для проверки тракта усилителя и работоспособности АЦП в диапазоне 0,1-100 Гц. Кнопка отладочной платы, благодаря которой можно включить генератор и изменять его частоту в необходимом диапазоне, обеспечивает удобный режим использования генератора. В функции микроконтроллера добавлена возможность слежения за циклом обмена и измерения. При сбое в процессе измерения, ошибках АЦП, сбое питания и других нештатных ситуациях, микроконтроллер выдаст ошибку с помощью соответствующего индикатора.

Программа, разработанная для ПК, выполняет функции обеспечения связи по интерфейсу USB с микроконтроллером, обработку данных, настройку параметров измерений и вывод информации в текстовом или графическом виде. При запуске программы предусмотрен выбор порта, к которому подключен микроконтроллер и настройка разрешения. Окно запуска программы представлено на рисунке 3.

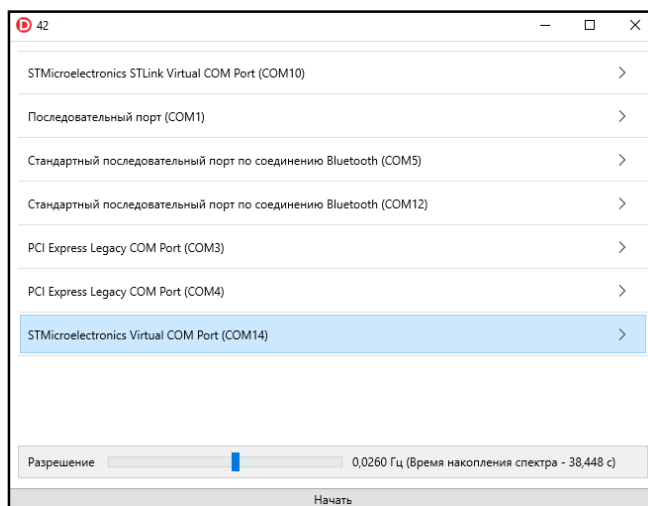


Рис. 3. Окно запуска программы

Настройка разрешения позволяет изменять количество усредненных данных для обеспечения оптимального построения спектра НЧ шума с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) [4]. Чем выше установленное разрешение, тем точнее полученные данные и больше время проведения измерения. Программа позволяет проводить измерения длительностью от 0,6 секунд (для наблюдения корреляции в реальном времени и настройки стенда) до 20 минут (для обеспечения максимального разрешения на низких частотах порядка 0,01

Гц). Для проверки частотного диапазона и оптимального разрешения используется генератор частот микроконтроллера, который позволяет наглядно увидеть полосу пропускания при построении спектра [5]. Проверка частотного диапазона при помощи генератора показана на рисунке 4.

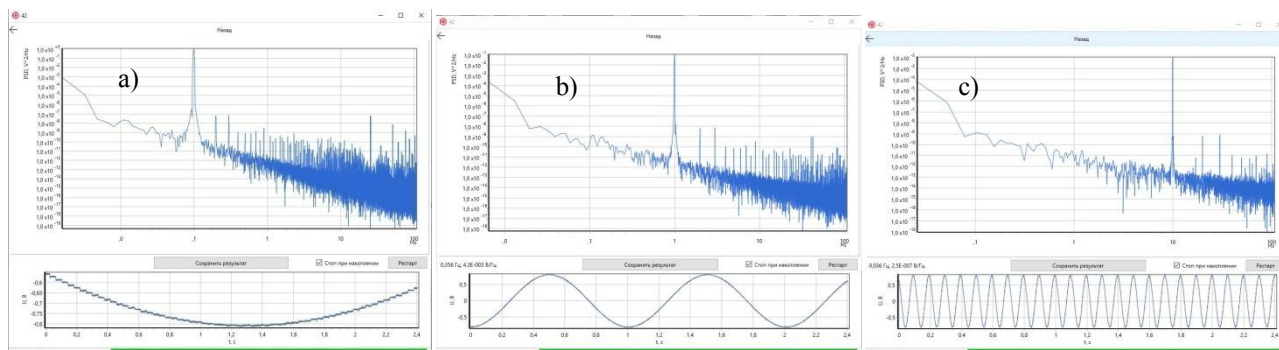


Рис. 4. Окна проверки работоспособности макета:

- а) с частотой 0,1 Гц;
- б) с частотой 1 Гц;
- в) с частотой 10 Гц

Во время измерения в окне программы отображается отсчет времени до завершения процесса измерения, окна программы имеют автоматическое и ручное масштабирование для более детального изучения полученного спектра НЧ шума объекта. Пример измеренного спектра НЧ шума магнитоуправляемого контакта приведен на рисунке 5.

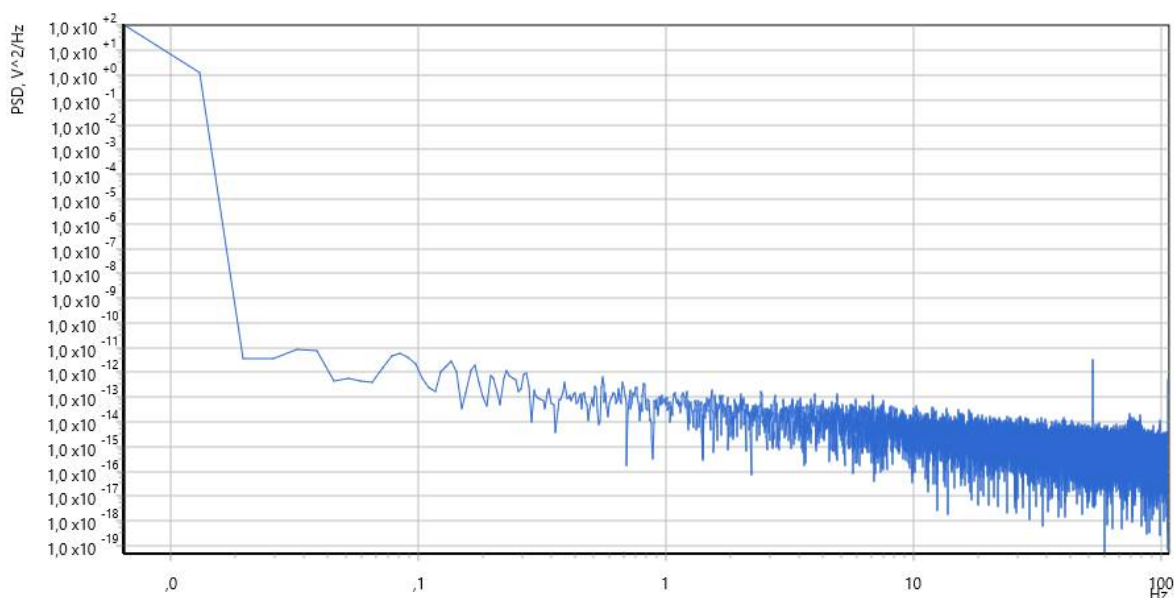


Рис. 5. Результат измерения, полученный при разрешении 0,0065 Гц

После измерения спектра и программного сохранения массива полученных экспериментальных результатов предусмотрен импорт данных для последующей обработки, например, в среде MathCad. Пример построения графика из экспортированного файла в программе MathCad, представлен на рисунке 6.

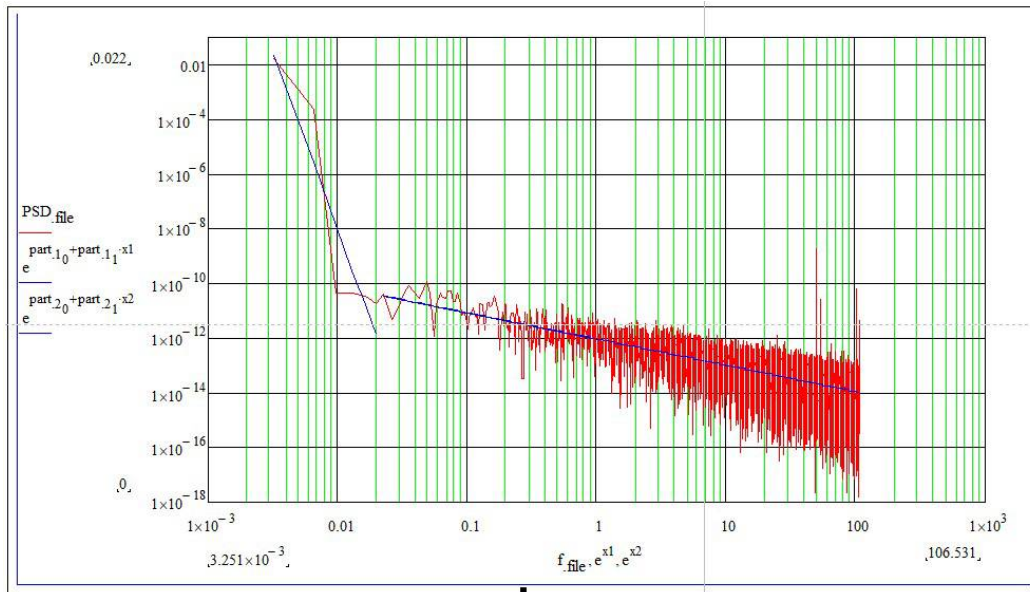


Рис. 6. Результат математической обработки массива данных, полученного из программы макета измерительного комплекса

Выводы

Разработаны макет и программное обеспечение измерительного комплекса, при помощи которого можно проводить эксперименты по измерению СПМ НЧ шума с последующим исследованием параметров и характеристик, состава и морфологии поверхности контактов.

Приведены схмотехническое решение и особенности реализации разработанного программного обеспечения. Устройство реализовано на базе 32 битного высокопроизводительного микроконтроллера STM32, что позволяет организовать измерения с помощью встроенного АЦП с последующим обменом данными с ПК.

Приведены экспериментально полученный спектр НЧ шума магнитоуправляемого контакта, а также результат обработки экспортированного файла в программе MathCad.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003) с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования РГРТУ.

Библиографический список

1. Куликов Е.И. Методы измерения случайных процессов. М.: Радио и связь. – 1986. – 272 с.
2. Описание (datasheet) электронного компонента «NUCLEO-F746ZG» производства "ST Microelectronics" [электронный ресурс]. – 2022. URL <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-f746zg.html> (дата обращения: 07.02.2021).
3. Описание (datasheet) электронного компонента «AD8512BR» производства " Analog Devices " [электронный ресурс]. – 2022. URL https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/ad8510_8512_8513.pdf (дата обращения: 08.02.2022).
4. Семенов А.Р., Литвинов В.Г., Холомина Т.А., Ермачихин А.В., Кострюков С.А., Логинов Д.С. Разработка автоматизированного комплекса для исследования спектров низкочастотного шума в элементах и структурах электронной техники // Радиотехника. 2017. № 5. С. 179-185.
5. Loginov D.S., Krutchenko O.N., Litvinov V.G. et.al. Study of Low Frequency Noise Parameters of Metal Contacts // ICNF 2019 – 25th International Conference on Noise and Fluctuation, Neuchâtel (Switzerland), 2019. P. 1-4.

УДК 53.082.63; ГРНТИ 29.19.15

МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРОВ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ КАЛОРИМЕТРИИ ТОНКИХ ПЛЕНОК МАТЕРИАЛОВ ФАЗОВОЙ ПАМЯТИ

Ю.В. Воробьев, А.В. Ермачихин

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, vorobjov.y.v@rsreu.ru*

Аннотация. В работе предложена математическая модель, позволяющая осуществлять расчет спектров дифференциальной сканирующей калориметрии некристаллических материалов. Особенностью модели является учет влияния толщины пленки на результаты измерений. Показано сравнение результатов моделирования с опубликованными экспериментальными данными по кристаллизации $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$.

Ключевые слова: дифференциальная сканирующая калориметрия, тонкие пленки, материалы фазовой памяти.

MODELLING OF DIFFERENTIAL SCANNING CALORIMETRY SPECTRA FOR THE THIN FILMS OF PHASE-CHANGE MEMORY MATERIALS

Y.V. Vorobyov, A.V. Ermachikhin

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, vorobjov.y.v@rsreu.ru*

The summary. A mathematical model of differential scanning calorimetry spectra are proposed for non-crystalline thin films. The distinctive feature is the ability to demonstrate the influence of the film thickness on the measurement results. The paper is concluded with the comparison of modeling results with the published data regarding crystallization of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$.

Keywords: differential scanning calorimetry, thin films, phase-change materials.

Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) является эффективным методом изучения фазовых переходов в различных материалах. В зависимости от природы фазового перехода, он может реализовываться с выделением энергии (экзотермический процесс, например, кристаллизация) или с поглощением энергии (эндотермический процесс, например, плавление). В основе метода ДСК лежит наблюдение теплового эффекта изучаемого процесса. При этом фазовый переход индуцируется нагревом либо охлаждением материала с постоянной скоростью. Анализ зависимости динамики фазового перехода от скорости изменения температуры позволяет определять, в частности, энергию активации фазового перехода. На практике, для повышения чувствительности измерений используется дифференциальная схема, позволяющая наблюдать разницу тепловых потоков между экспериментальным образцом в контейнере и пустым контейнером, что дает возможность проводить измерения для очень малых объемов материала. Последний фактор обеспечивает применимость метода к исследованию тонких пленок. Кроме того, в настоящее время доступна так называемая сверхбыстрая ДСК [1], позволяющая достигать скоростей нагрева до 40 000 К/с за счет размещения малого объема материала непосредственно на нагревательном элементе. Этот метод широко применяется при исследовании халькогенидных материалов, используемых для создания активных областей современных запоминающих устройств фазовой памяти [2]. Особенностью данных материалов является высокая скорость рекристаллизации, позволяющая реализовывать быстродействующие запоминающие устройства с энергонезависимым хранением информации. Несмотря на широкое применение метода ДСК для исследования материалов фазовой памяти, при интерпретации экспериментальных данных используются классические математические модели, предложенные для объемных материалов. Такой подход не позволяет объяснить некоторые наблюдаемые при исследовании тонких пленок результаты, в частности, зависимость скорости кристаллизации и ее энергии активации от толщины пленки, а также зависимость энергии активации от доли кристаллической фракции.

Целью настоящей работы является моделирование кристаллизации тонкой пленки в условиях проведения эксперимента по методу ДСК с учетом микроскопических процессов, сопровождающих кристаллизацию: зародышеобразования и роста центров кристаллизации.

Используемая в работе математическая модель основана на подходе, предложенном нами в работе [3]. Модель основана на следующих представлениях о течении процесса кристаллизации. Образование новых центров кристаллизации происходит на обеих границах пленки с равной скоростью возрастания их поверхностной концентрации I . Центры кристаллизации имеют форму сферических куполов, описываемых значением краевого угла θ , которое остается неизменным на протяжении всего процесса. Параметры кристаллизации, то есть скорости зародышеобразования I и роста c , определяются исключительно температурой материала. При данных допущениях, решение модельной задачи для одной из границ пленки имеет вид:

$$\ln[1 - p(z, t)] = -\pi \int_0^t I(\tau) \left[\left(r_0 + \int_{\tau}^t c(t') dt' \right)^2 - \left(\left(r_0 + \int_{\tau}^t c(t') dt' \right) \cdot \cos \theta + z \right)^2 \right] d\tau. \quad (1)$$

где $p(z, t)$ — искомая величина, показывающая вероятность произвольной точки объема пленки, расположенной на расстоянии z от ближайшей ее границы, к моменту времени t быть включенной в состав кристаллической фракции. Величина r_0 обозначает начальный радиус центра кристаллизации. Присутствие этого параметра в модели призвано учесть вероятность растворения центров кристаллизации, которые еще не достигли некоторого критического размера, гарантирующего их стабильность [4].

Формула (1) позволяет учесть временные зависимости параметров кристаллизации I и c . Так как в рассматриваемом контексте их величины считаются зависящими только от температуры, соответствующие временные зависимости строятся на основе температурного профиля материала. При проведении экспериментов по методу ДСК осуществляется нагрев или охлаждение материала с постоянной скоростью β , что позволяет записать

$$T(t) = T_0 + \beta t, \quad (2)$$

где T_0 обозначает начальную температуру материала.

В общем случае, температурные зависимости скоростей зародышеобразования и роста имеют сложный вид. Однако, с учетом того, что в данном случае рассматривается относительно узкий температурный интервал, в котором при нагревании происходит кристаллизация материала, обозначенные зависимости можно аппроксимировать Больцмановской экспонентой:

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{E_N}{k_B T}\right), \quad (3)$$

$$c = c_0 \exp\left(-\frac{E_G}{k_B T}\right), \quad (4)$$

где E_N и E_G обозначают энергии активации зародышеобразования и роста. В итоге, (1)–(4) определяют требующую решения модельную задачу.

Модельные параметры, участвующие в (3) и (4), можно получить из имеющихся литературных данных. На рисунках 1 и 2 собраны результаты разных исследовательских групп [5–8], касающиеся кристаллизации материала $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$.

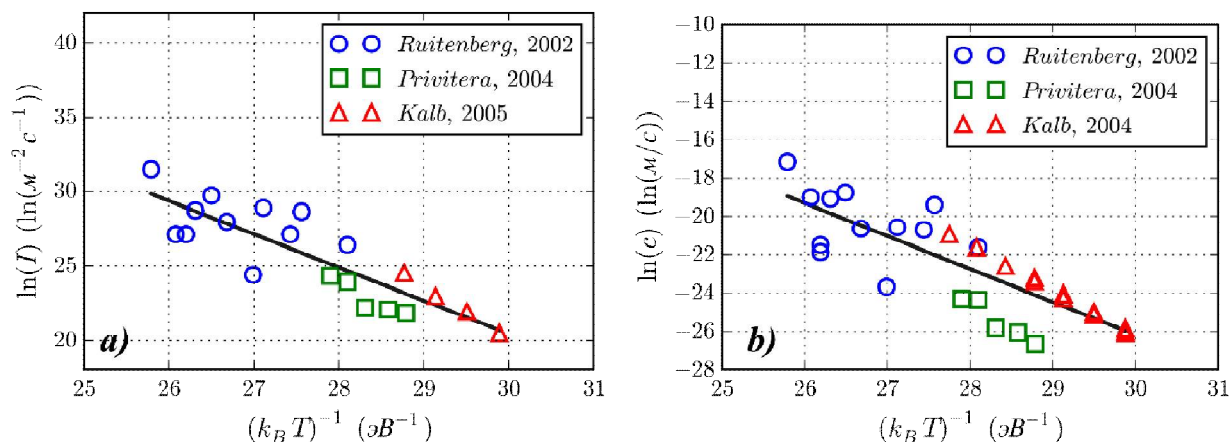


Рис.1. Температурная зависимость скорости поверхностного зародышеобразования (а) и скорости роста центров кристаллизации (b) $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$

Прямые линии на рисунке 1 обозначают аппроксимацию экспериментальных данных согласно (3) и (4).

При проведении измерений методом ДСК регистрируется величина теплового потока ϕ , который выделяется кристаллизующимся материалом. Эта величина находится в прямой пропорциональной зависимости от скорости фазового перехода [9]. Если фазовый переход описывается временной зависимостью доли кристаллической фракции $\alpha(t)$, то величину теплового потока можно выразить как:

$$\phi = \Delta H_c \frac{d\alpha}{dt}. \quad (5)$$

где ΔH_c — удельное изменение энтальпии материала при кристаллизации (скрытая теплота кристаллизации). Для $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ эта величина в среднем равна 95 Дж/см^3 [10].

В итоге, разработанная математическая модель позволяет вычислять спектры ДСК, получаемые при различных скоростях нагрева; пример результатов расчета для пленки $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ толщиной 100 нм приведен на рисунке 2.

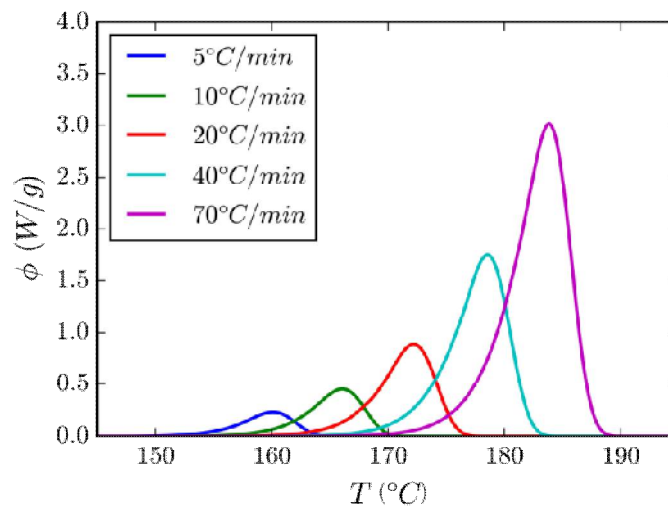


Рис. 2. Результаты моделирования спектров ДСК для Ge₂Sb₂Te₅ при различных скоростях нагрева

Традиционный подход к интерпретации результатов ДСК предполагает определение энергии активации кристаллизации по формуле Киссинджера [11]:

$$E_C = -k_B \frac{d \ln \left(\frac{\beta}{T_C^2} \right)}{d \left(\frac{1}{T_C} \right)}, \quad (6)$$

где T_C — значение температуры, соответствующее пику на ДСК спектре, соответствующем скорости нагрева β .

Используя полученные на основании моделирования результаты (рисунок 2), величина E_C оказывается равной 1.828 эВ. Величины энергий активации процессов зародышеобразования и роста, определенные по углу наклона аппроксимирующих прямых на рисунке 1, равны соответственно 2.234 эВ и 1.717 эВ. Таким образом, в рассматриваемом случае тонких пленок, кристаллизующихся по механизму поверхностного зародышеобразования, величина энергии активации кристаллизации, определяемая по спектрам ДСК, находится ближе к энергии активации роста. Этот результат является логичным, так как при таком механизме зародышеобразования обе границы пленки заполняются кристаллической фазой на ранней стадии кристаллизации, после чего процесс зародышеобразования прекращается. Дальнейшее течение процесса кристаллизации обеспечивается исключительно за счет роста ранее образованных центров кристаллизации. Также стоит отметить, что полученная на основании моделирования величина энергии активации кристаллизации соответствует результатам работы [12], в которой для пленки Ge₂Sb₂Te₅ получено значение 1.7–1.8 эВ, что подкрепляет достоверность приведенных в настоящей работе расчетов. Можно заключить, что предложенный подход к моделированию кристаллизации тонких пленок является полезным дополнением к методу ДСК, позволяющим анализировать микроскопическую природу процессов, происходящих во время проведения соответствующих экспериментов.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-1155.2021.1.3 и РФФИ № 20-07-01092 А.

Библиографический список

1. Pries, J. Switching between Crystallization from the Glassy and the Undercooled Liquid Phase in Phase Change Material $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ / J. Pries, S. Wei, M. Wuttig, P. Lucas // *Adv. Mater.* 2019. Vol. 31, № 39. P. 1900784.
2. Le Gallo, M. An overview of phase-change memory device physics / M. Le Gallo, A. Sebastian // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2020. Vol. 53, № 21. P. 213002.
3. Vorobyov, Y. Kinetics of volume and surface driven crystallization in thin films / Y. Vorobyov, P. Lazarenko, A. Sherchenkov, N. Vishnyakov, A. Ermachikhin, S. Kozyukhin // *J. Phys. Condens. Matter.* IOP Publishing, 2020. Vol. 32, № 35. P. 355401.
4. Kashchiev, D. Nucleation. Basic Theory with Applications / D. Kashchiev. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. 530 p.
5. Ruitenbergh, G. Determination of the isothermal nucleation and growth parameters for the crystallization of thin $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ films / G. Ruitenbergh, A.K. Petford-Long, R.C. Doole // *J. Appl. Phys.* 2002. Vol. 92, № 6. P. 3116–3123.
6. Privitera, S. Crystal nucleation and growth processes in $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ / S. Privitera, C. Bongiorno, E. Rimini, R. Zonca // *Appl. Phys. Lett.* 2004. Vol. 84, № 22. P. 4448–4450.
7. Kalb, J.A. Crystal morphology and nucleation in thin films of amorphous Te alloys used for phase change recording / J.A. Kalb, C.Y. Wen, F. Spaepen, H. Dieker, M. Wuttig // *J. Appl. Phys.* 2005. Vol. 98, № 5. P. 054902.
8. Kalb, J.A. Atomic force microscopy measurements of crystal nucleation and growth rates in thin films of amorphous Te alloys / J.A. Kalb, F. Spaepen, M. Wuttig // *Appl. Phys. Lett.* 2004. Vol. 84, № 25. P. 5240–5242.
9. Málek J. Kinetic analysis of crystallization processes in amorphous materials / J. Málek // *Thermochim. Acta.* 2000. Vol. 355, № 1–2. P. 239–253.
10. Krusin-Elbaum, L. Evidence for segregation of Te in $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ films: Effect on the “phase-change” stress / L. Krusin-Elbaum, C. Cabral, K.N. Chen, M. Copel, D.W. Abraham, K.B. Reuter, S.M. Rossnagel, J. Bruley, V.R. Deline // *Appl. Phys. Lett.* 2007. Vol. 90, № 14. P. 141902.
11. Yinnon, H. Applications of thermoanalytical techniques to the study of crystallization kinetics in glass-forming liquids, part I: Theory / H. Yinnon, D.R. Uhlmann // *J. Non. Cryst. Solids.* 1983. Vol. 54, № 3. P. 253–275.
12. Yakubov, A. Influence of the adjacent layers on the crystallization kinetics of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ thin films / A. Yakubov, A. Sherchenkov, A. Babich, P. Lazarenko, I. Sagunova, E. Kirilenko // *J. Therm. Anal. Calorim.* 2020. Vol. 142, № 2. P. 1019–1029.

УДК 537.312.51-53, 537.312.6; ГРНТИ 29.19.31

**ИССЛЕДОВАНИЕ КВАНТОВОГО ВЫХОДА СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР**

А.А. Корнеев, А.В. Ермачихин

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, korneev97a@gmail.com*

Аннотация. В работе приведены исследования солнечного элемента типа HIT методом вольт-амперных характеристик и температурные зависимости спектральной дисперсии квантового выхода при различных температурах.

Ключевые слова: солнечные элементы, вольт-амперная характеристика, квантовый выход.

**INVESTIGATION OF THE QUANTUM EFFICIENCY OF SOLAR CELLS
IN A WIDE RANGE OF TEMPERATURES**

A.A. Korneev, A.V. Ermachikhin

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, korneev97a@gmail.com*

The summary. The paper presents studies of a solar cell of the HIT type by the method of current-voltage characteristics and temperature dependences of the spectral dispersion of the quantum efficiency at different temperatures.

Keywords: solar cells, current-voltage characteristic, quantum efficiency.

Электронно-дырочные пары, сгенерированные при поглощении падающего излучения на поверхность солнечных элементов (СЭ), разделяются потенциальным рельефом полупроводниковой структуры. Эти пары носителей создают электрический ток при

подключении нагрузки к СЭ. Не каждый падающий фотон участвует в создании пары носителей заряда. Часть излучения отражается от поверхности СЭ, часть поглощается без образования носителей заряда. Вследствие рекомбинации не все сгенерированные носители смогут достигнуть электродов СЭ. Все эти процессы приводят к снижению эффективности преобразования светового излучения в электрический ток. Характеристикой эффективности с этой точки зрения является отношение числа носителей заряда, составляющих ток СЭ, к количеству квантов света, падающих на поверхность СЭ. Эта характеристика получила название квантового выхода СЭ. Данная величина дает возможность измерения её спектральной дисперсии, которая показывает эффективность использования солнечной энергии и вклад отдельных областей спектра в преобразование излучения.

СЭ на основе гетероперехода аморфного гидрогенизированного и монокристаллического кремния a-Si:H/c-Si носит название НІТ (Heterojunction with Intrinsic Thin layer). Данные СЭ имеют повышенную эффективность фотоэлектрического преобразования относительно СЭ на кристаллическом кремнии. А также меньшие значения падения эффективности с ростом температуры, что положительно влияет на стабильность характеристик СЭ [1-3].

Измерение спектральной дисперсии квантового выхода в СЭ позволяет получить параметрическую характеристику, которая показывает отношение сгенерированных носителей заряда к числу падающих на поверхность СЭ фотонов [4]. Если для измерения таких параметров вольт-амперных характеристик как: напряжение холостого хода, ток короткого замыкания, фактор заполнения, необходимо наличие имитатора солнечного света, чтобы полученные данные были приближены к реальным. То для измерения квантового выхода подойдет лампа любого белого света, со стабильным по времени спектром.

Для измерения температурных зависимостей вольт-амперных характеристик СЭ использовался комплекс, основанный на гелиевом криостате замкнутого цикла Janis CCS-400/204N и электрометре Keithley 6517B [5, 6]. Квантовый выход СЭ измерялся с помощью установки для измерения спектральной дисперсии квантового выхода в широком температурном диапазоне [7]. Температурные зависимости вольт-амперных характеристик образца СЭ типа НІТ [3] показаны на рисунках 1 и 2. Температура менялась в пределах 80-360 К, положительное смещение на образце от 0 до 2 В, отрицательное – от 0 до -5 В. При положительном смещении ток с ростом температуры увеличивался незначительно, но его рост начинался при более низких напряжениях. При отрицательном смещении рост тока более значителен при увеличении температуры (рис. 3).

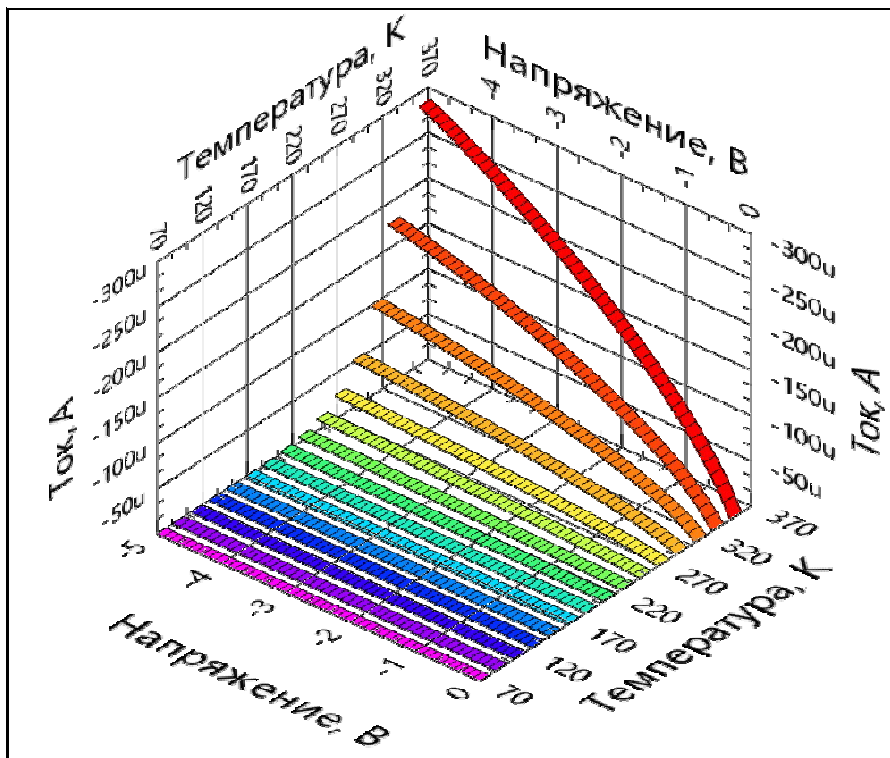


Рис. 1. Температурная зависимость вольт-амперной характеристики при отрицательном смещении на образце

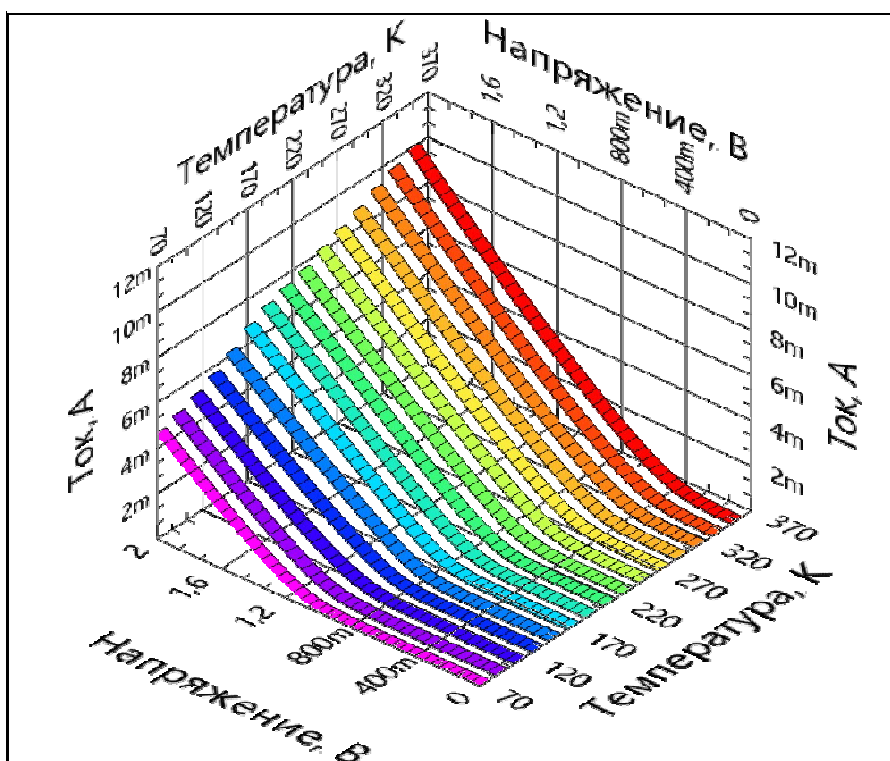


Рис. 2. Температурная зависимость вольт-амперной характеристики при положительном смещении на образце

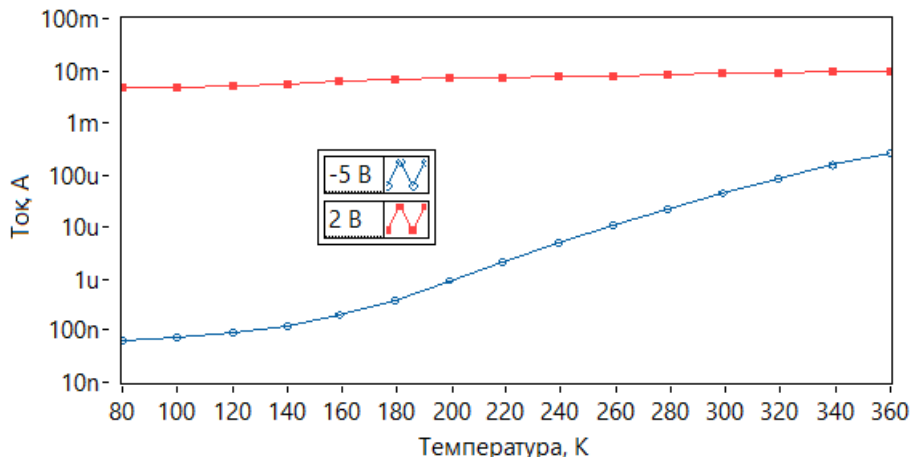


Рис. 3. Значение тока при фиксированном напряжении при разной температуре

Механизмы роста тока при прямом и обратном смещениях различаются. Если посмотреть на 2 температурных зависимости (рис. 4) ВАХ в полулогарифмическом масштабе, то заметно, что форма ВАХ при положительном смещении при разных температурах отличается по форме намного сильнее, чем при отрицательном смещении на образце. Рост тока становится более резким, то есть напряжения для примерно одинакового тока при высоких температурах имеют более низкие значения.

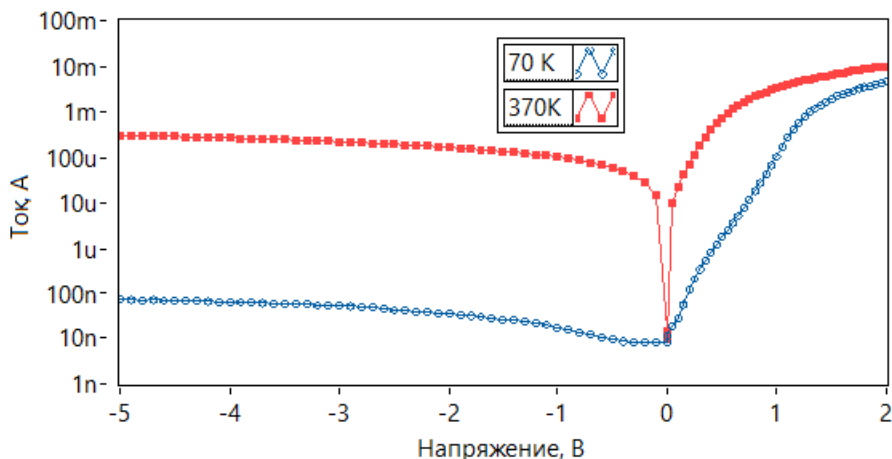


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика образца при температуре 70 и 370 К

На рисунке 5 представлено сравнение квантового выхода СЭ и спектра излучения Солнца AM 1.5 на уровне моря.

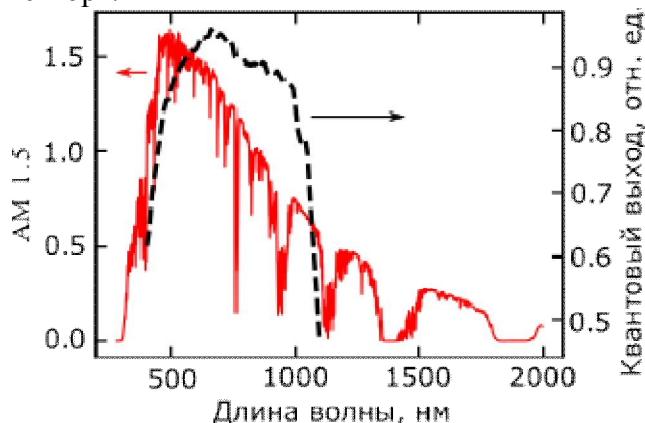


Рис. 5. Квантовый выход СЭ и спектр солнечного излучения AM 1.5 [8]

Исходя из данных квантового выхода СЭ (рис. 5), были выбраны 3 длины волны излучения для построения температурных зависимостей – это начало подъема, середина плато и середина спада квантового выхода (рис. 6). Видно, что рост квантового выхода с увеличением температуры более заметен на длинах волн 450 и 1050 нм, что коррелирует с литературными данными.

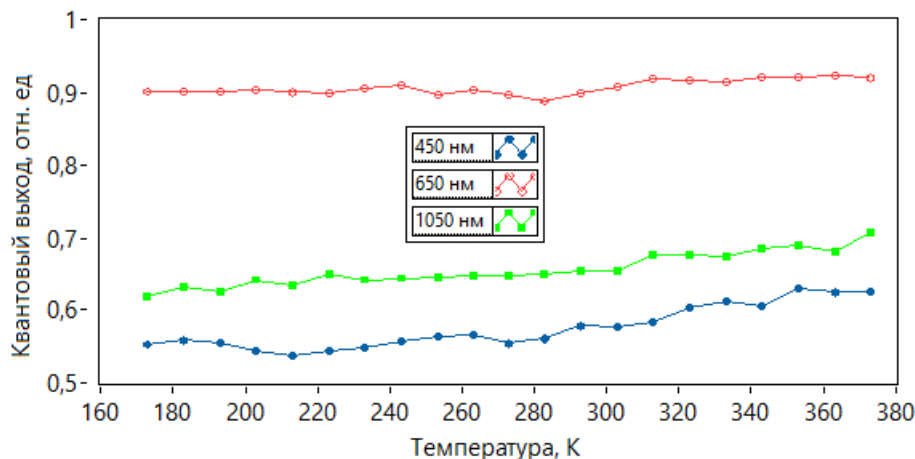


Рис. 6. Температурные зависимости квантового выхода на разных длинах волн излучения

Общий положительный рост квантового выхода связан с увеличением тока короткого замыкания при повышении температуры, но в противовес этому напряжение холостого хода уменьшается, что сказывается негативно на коэффициенте преобразования солнечной энергии в электрическую, а так же к изменению фактора заполнения. Стоит учитывать, что структура СЭ типа НІТ сложнее обычных СЭ на кристаллическом кремнии из-за влияния гетеропереходов аморфного и монокристаллического кремния a-Si:H/c-Si.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № 075-15-2021-460 с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования при Рязанском государственном радиотехническом университете им. В.Ф. Уткина.

Библиографический список

1. Wakisaka K., Taguchi M., Sawada T., Tanaka M., Matsuyama T., Matsuoka T., Tsuda S., Nakano S., Kishi Y., Kuwano Y. Proc. 22nd Photovoltaic Specialists Conf. Las Vegas, 1991. P. 887-892.
2. Sakata H., Tsunomura Y., Inoue H., Taira S., Baba T., Kanno H., Kinoshita T., Taguchi M., Maruyama E. R & D progress of next-generation very thin HIT solar cells // 25th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf. Exh. Valencia, 2010, p. 1102.
3. Вихров С.П., Вишняков Н.В., Гудзев В.В., Ермачихин А.В., Жилина Д.В., Литвинов В.Г., Маслов А.Д., Мишустин В.Г., Теруков Е.И., Титов А.С. Исследование глубоких энергетических уровней в солнечном элементе типа НІТ // ФТП, 2018, том 52, вып. 7. С. 787-791.
4. Plis E., Rodriguez J.B., Krishna S. // Comprehensive Semiconductor Science and Technology. 2011. V. 6. P. 229.
5. Litvinov V.G., Ermachikhin A.V., Kusakin D.S., Vishnyakov N.V., Maslov A.D. and Semenov A.R. Measurement complex to investigate electrophysical and noise characteristics of semiconductor micro- and nanostructures // 2017 International Conference on Noise and Fluctuations (ICNF), 2017, pp. 1-4.
6. Ermachikhin A., Litvinov V., Vorobyov Y. and Maslov A. Application of Adaptive Algorithms for Measuring Temperature Current-Voltage Characteristics of Electronic Elements // 2018 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), 2018, pp. 1-5.
7. Ермачихин А.В., Воробьев Ю.В., Трусов Е.П. Установка по измерению спектральной дисперсии квантового выхода // Приборы и техника эксперимента, 2022, №1. С. 134-138.
8. Ермачихин А.В., Воробьев Ю.В., Маслов А.Д., Трусов Е.П., Литвинов В.Г. Квантовый выход двусторонних солнечных элементов типа НІТ // ФТП, 2020, том 54, вып. 10. С. 1066-1071.

УДК 51-73; ГРНТИ 29.19.16

АНАЛИЗ МОДЕЛЬНЫХ ТЕКСТУР С РАЗЛИЧНЫМ ТИПОМ СТРУКТУРЫ

С.Е. Школин, Н.В. Рыбина

Рязанский государственный радиотехнический университет
Рязань, serega-shkolin@yandex.ru

Аннотация. В данной работе был проведен анализ модельных поверхностей с различным типом структуры для получения их информационно-корреляционных параметров.

Ключевые слова: текстура, методы анализа, параметры.

ANALYSIS OF MODEL TEXTURES WITH DIFFERENT STRUCTURE TYPE

S.E. Shkolin, N.V. Rybina

Ryazan State Radio Engineering University
Ryazan, serega-shkolin@yandex.ru

Abstract. In this work, the analysis of model surfaces with different structure type was carried out to obtain their information-correlation parameters.

Keywords: texture, methods of analysis, parameters.

Для выполнения текстурного анализа были смоделированы следующие поверхности: броуновский шум (рис. 1), решеточная структура (рис. 2), волновая структура (рис. 3) и столбчатая поверхность (рис. 4). Эти поверхности были выбраны из принципов схожести с рельефом поверхности большинства материалов, которые часто используются в СВЧ электронике, оптоэлектронике, силовой электронике, сенсорике и т.д.

При создании определенного вида текстуры изменялся один из её параметров для того, чтобы исследовать, как при этом меняются их информационно-корреляционные параметры.

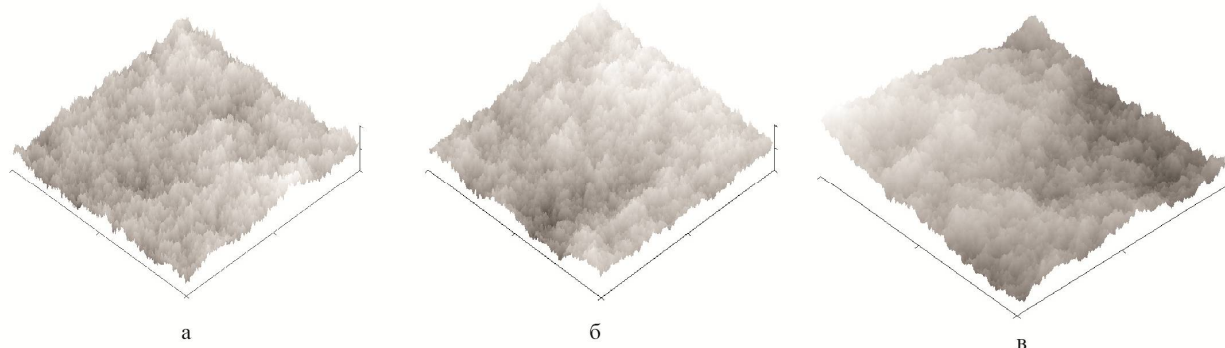


Рис. 1. 3D изображение броуновского шума при экспоненте Хёрста 0,1 (а), при экспоненте Хёрста 0,2 (б), при экспоненте Хёрста 0,3 (в)

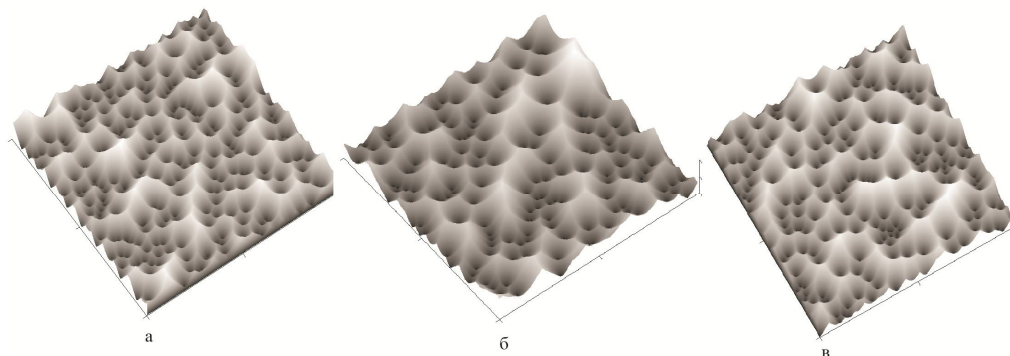


Рис. 2. 3D изображение решеточной структуры с размером решетки 15 пикс. (а), с размером 20 пикс. (б), с размером 25 пикс. (в)

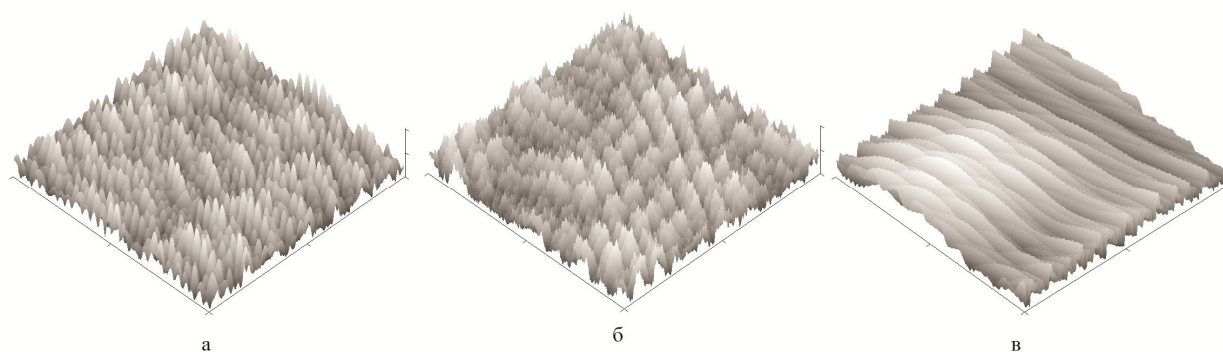


Рис. 3. 3D изображение волновой структуры с частотой разброса 0,037 (а), с частотой разброса 0,359 (б), с частотой 0,823 (в)

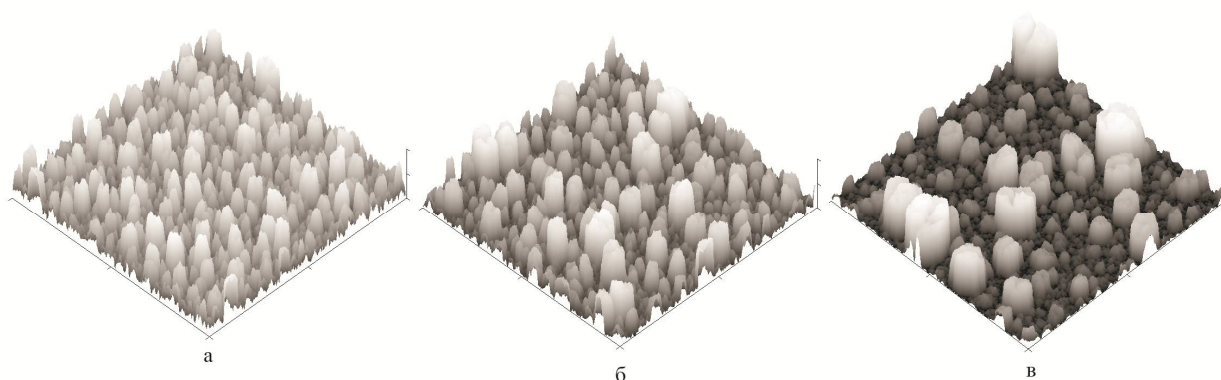


Рис. 4. 3D изображение столбчатой поверхности с высотой частиц 2,2 пикс. (а), с высотой частицы 3,7 пикс. (б), с высотой частицы 7,6 пикс. (в)

Для выполнения анализа полученных текстур использовались следующие методы [1]:

1. Метод средней взаимной информации (СВИ) – позволяет определить хаотическую или упорядоченную структуру материала в зависимости от величины взаимной информации.
2. Двумерный флуктуационный анализ с исключенным трендом (2D detrended fluctuation analysis, 2D DFA) – позволяет определить корреляционный вектор, показывающий периодичность в структуре и скейлинговый показатель, отражающий тип структуры.

В таблице 1 приведены рассчитанные информационно-корреляционные параметры текстур: СВИ, максимальная взаимная информация (МВИ) и α – скейлинговый показатель, который рассчитывался как тангенс угла наклона флуктуационной функции от масштаба в двойном логарифмическом масштабе.

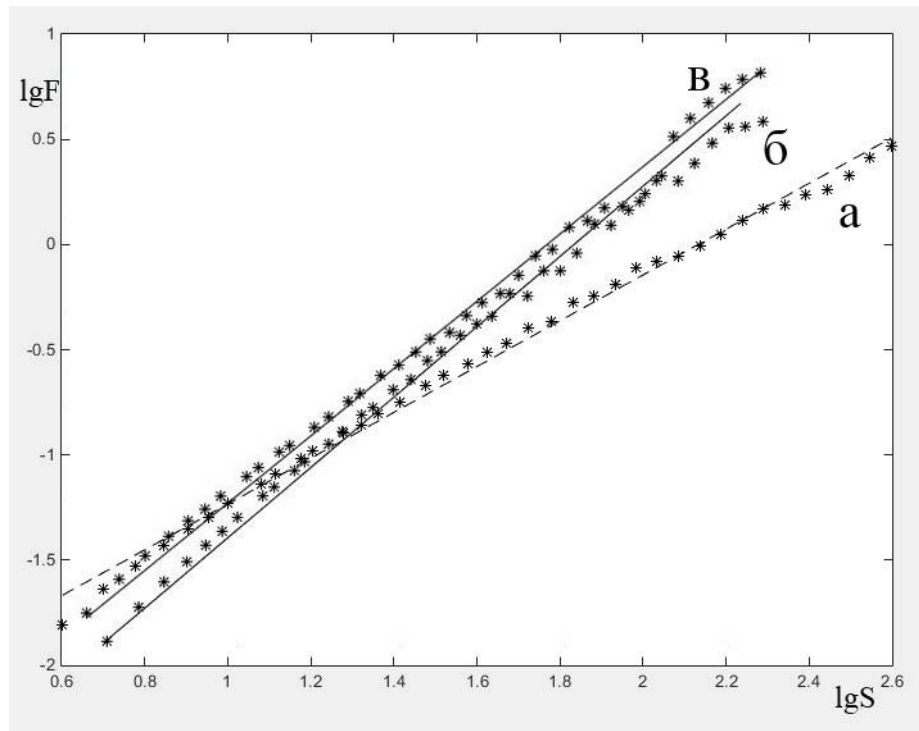


Рис. 5. Зависимость флуктуационной функции от масштаба для броуновского шума: при экспоненте Хёрста 0,1 (а); при экспоненте Хёрста 0,2 (б); при экспоненте Хёрста 0,3 (в)

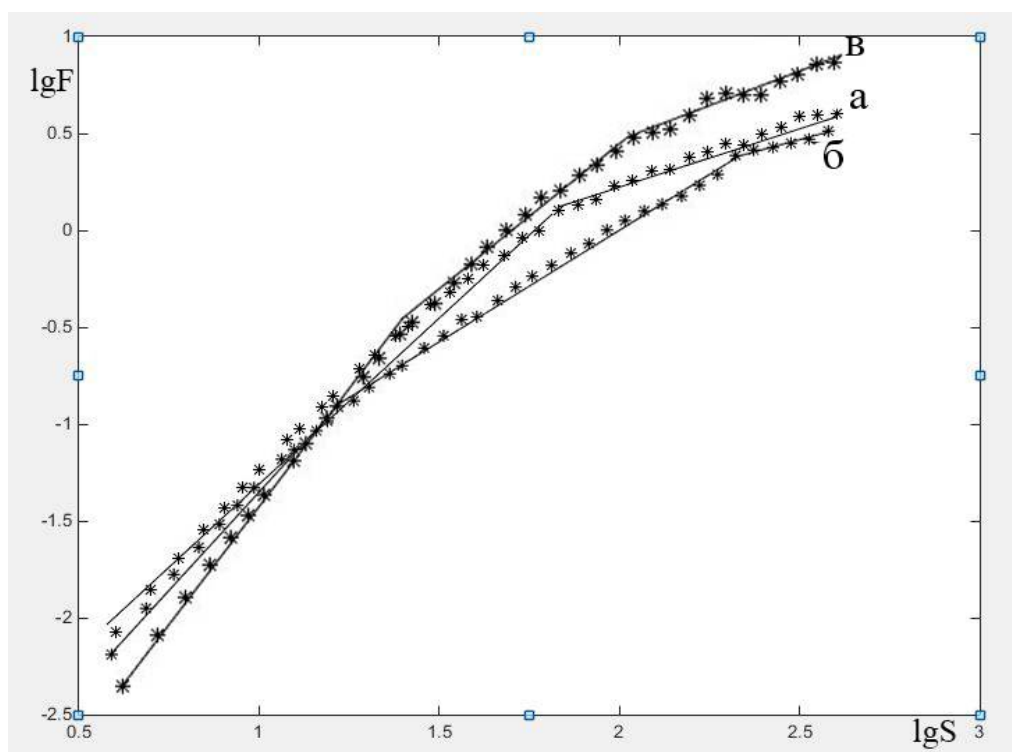


Рис. 6. Зависимость флуктуационной функции от масштаба для решеточной структуры с размером решетки: 15 пикс. (а); с размером 20 пикс. (б); с размером 25 пикс. (в)

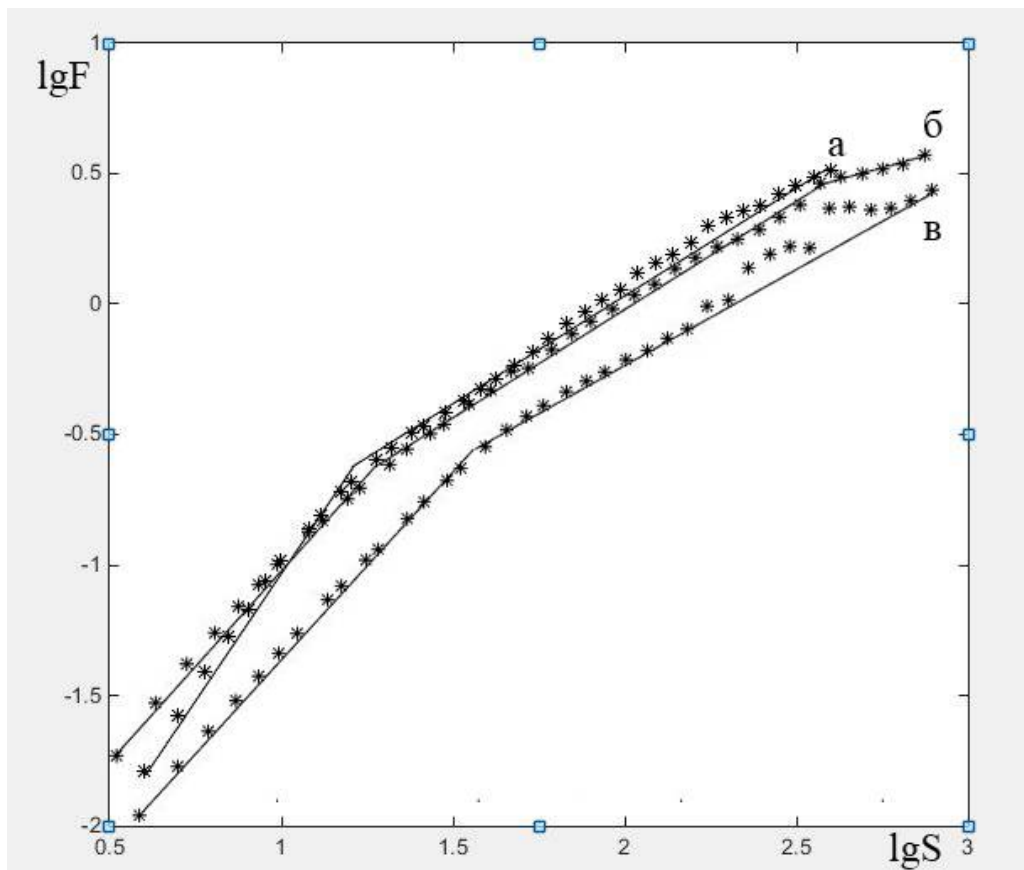


Рис. 7. Зависимость флуктуационной функции от масштаба для волновой структуры: с частотой разброса 0,037 нм (а), с частотой разброса 0,359 нм (б), с частотой 0,823 нм (в)

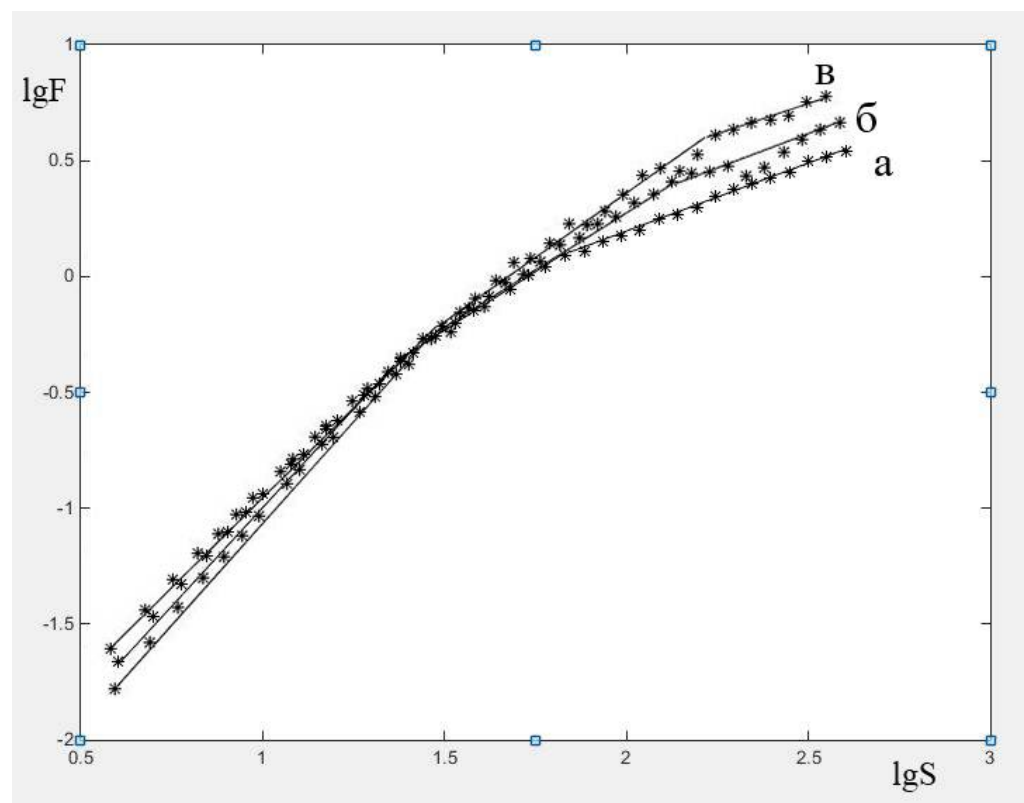


Рис. 8. Зависимость флуктуационной функции от масштаба для столбчатой поверхности: с высотой частиц 2,2 пикс. (а), с высотой частиц 3,7 пикс. (б), с высотой частиц 7,6 пикс. (в)

Таблица 1. Информационно-корреляционные параметры текстур

	СВИ	МВИ	α
Броуновский шум (Экспонента Херста 0,1)	0,11	0,55	0,71
Броуновский шум (Экспонента Херста 0,2)	0,054	0,63	1,17
Броуновский шум (Экспонента Херста 0,3)	0,08	0,61	1,3
Решеточная структура (Размер решетки 15 пикс)	0,012	0,66	2,1
Решеточная структура (Размер решетки 20 пикс)	0,02	0,65	2,25
Решеточная структура (Размер решетки 25 пикс)	0,014	0,68	2,4
Волновая структура (Частота разброса 0,037)	0,005	0,61	0,12
Волновая структура (Частота разброса 0,359)	0,005	0,63	1,2
Волновая структура (Частота разброса 0,823)	0,024	0,68	1,5
Столбчатая поверхность (Высота частицы 2,2 пикс)	0,006	0,66	1,02
Столбчатая поверхность (Высота частицы 3,7 пикс)	0,011	0,65	1,08
Столбчатая поверхность (Высота частицы 7,6 пикс)	0,022	0,58	1,3

Увеличение параметра СВИ наблюдается у столбчатой текстуры; при этом наблюдается закономерность увеличения упорядоченности и степени корреляции за счет увеличения высоты частиц на поверхности.

Максимальное значение СВИ имеют следующие поверхности: броуновский шум при экспоненте Херста 0,1, решеточная структура при размере решетки 25 пикс, волновая структура при частоте разброса 0,823 и столбчатая поверхность при высоте частицы 7,6 пикс. Из этого следует, что данные текстуры являются наиболее упорядоченными.

Минимальное значение СВИ имеет броуновский шум при экспоненте Херста 0,2 решеточная структура при размере решетки 15 пикс, волновая структура при частоте разброса 0,037 и столбчатая поверхность при высоте частицы 2,2 пикс. Таким образом, данные поверхности обладают низкой степенью упорядоченности.

При увеличении частоты разброса у волновой поверхности наблюдается рост МВИ, следовательно, можно сказать, что у них постепенно увеличивается степень хаотичности структуры и энтропия поверхности.

Максимальным значением МВИ обладает броуновский шум при экспоненте Херста 0,2, решеточная структура при размере решетки 25 пикс., волновая структура с частотой разброса 0,823 и столбчатая поверхность с высотой частицы 2,2 пикс., следовательно, они обладают высокой информационной емкостью.

Минимальное значение МВИ имеют броуновский шум при экспоненте Херста 0,1, решеточная структура при размере решетки 20 пикс., волновая структура при частоте раз-

броса 0,037 и столбчатая поверхность при высоте частицы 7,6 пикс., следовательно, у этих текстур присутствует низкая информационная емкость.

Скейлинговый показатель у всех исследуемых поверхностей увеличивается при увеличении изменяемого параметра поверхности.

Для броуновского шума, столбчатой поверхности и волновой поверхности с частотой разброса 0,359 и 0,823 скейлинговый показатель лежит в диапазоне от 0,5 до 2, значит эти поверхности имеют длительные и нестепенные корреляции, фрактальные свойства и процессы типа случайного блуждания.

Решеточная поверхность имеет самые высокие скейлинговые показатели, следовательно, это упорядоченные текстуры.

Минимальный скейлинговый показатель имеет волновая структура с частотой разброса 0,037, таким образом у неё отсутствуют корреляции, и она относится к низкоррелированным системам.

1. Алпатов А.В., Вихров С.П., Вишняков Н.В, Мурсалов С.М., Рыбин Н.Б., Рыбина Н.В, Комплексный метод исследования корреляционных параметров самоорганизованных структур// ФТП, 2015, т. 49, вып.1, 2016 г. С. 23-29.

УДК 621.382: ГРНТИ 29.03.77

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БАРЬЕРНЫХ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР

Н.А. Баскаков, В.Г. Мишустин

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, nikita.baskakov.2012@mail.ru*

Аннотация. В работе рассмотрена барьерная структура металл-полупроводник на примере системы Al/c-Si. Произведен расчет коэффициента прозрачности барьера. Получена зависимость эффективной высоты барьера в зависимости от величины обратного напряжения и концентрации легирующей примеси с учетом эффекта туннелирования и с учетом эффекта Шоттки. Определен преобладающий механизм понижения эффективной высоты барьера.

Ключевые слова: квантово-размерные структуры, контакт металл-полупроводник, эффективная высота барьера, эффект туннелирования, эффект Шоттки.

DETERMINATION OF THE ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF BARRIER QUANTUM-SIZE STRUCTURES

N.A. Baskakov, V.G. Mishustin

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkina,
Russian Federation, Ryazan, nikita.baskakov.2012@mail.ru*

Abstract. The paper considers the metal-semiconductor barrier structure on the example of the Al/c-Si system. The barrier transparency coefficient is calculated. The dependence of the effective height of the barrier is obtained depending on the magnitude of the reverse voltage and the concentration of the dopant, taking into account the tunneling effect and taking into account the Schottky effect. The prevailing mechanism of lowering the effective height of the barrier has been determined.

Keywords: quantum-size structures, metal-semiconductor contact, effective barrier height, tunneling effect, Schottky effect.

По мере развития микро- и нанoeлектроники квантово-размерные структуры получают все большее и большее распространение. В частности они активно используются в оптоэлектронике и телекоммуникациях. На данный момент одним из наиболее перспективным направлением

является разработка датчиков различного назначения на основе многослойных квантово-размерных структур.

Исследование квантово-размерных структур является очень важной задачей, необходимой для понимания физических процессов, происходящих в полупроводниковых структурах при уменьшении их линейных размеров до нанометрового диапазона. Такое понимание требуется для разработки математического аппарата, используемого в САПР при проектировании и моделировании соответствующих полупроводниковых структур.

Целью данной работы является исследование влияния эффекта туннелирования носителей заряда и эффекта Шоттки на высоту потенциального барьера на границе раздела металл-полупроводник. Кроме того необходимо определить, какой из эффектов является преобладающим при различных параметрах полупроводниковой барьерной структуры.

В работе рассматривается барьерная структура на контакте металл-полупроводник на примере алюминия и кремния. Кремний легирован донорной примесью, и структура находится при температуре 300 К.

Для расчетов было использовано распределение Максвелла-Больцмана для электронов по энергиям в металле и теоретическая модель барьера Шоттки [1].

$$f(E) = \frac{1}{e^{kT} + 1}. \quad (1)$$

$$g(E) = \frac{2 \cdot \pi}{h^3} (2 \cdot m_e)^{\frac{3}{2}} \sqrt{E + E_f}. \quad (2)$$

Примем, что количество электронов в металле соответствует количеству атомов. Внутренней границей барьерной области было выбрано место, где значение потенциала равняется тепловому потенциалу [2].

Для анализа влияния эффекта туннелирования носителей заряда через барьер был рассчитан коэффициент прозрачности этого барьера [3]:

$$D(E) = D_0 e^{-\frac{2}{h} \sqrt{2m_e} \int_0^x \sqrt{\phi - E}}. \quad (3)$$

Чтобы определить величину эффективной высоты барьера определялась энергия, при которой количество прошедших через барьер электронов со стороны металла равнялось количеству электронов в полупроводнике [4].

Для оценки влияния эффекта Шоттки определялась величина понижения барьера:

$$\Delta\phi = \sqrt{\frac{e \left(\frac{2U}{W}\right)}{4\pi\epsilon\epsilon_0}}. \quad (4)$$

Эффективная высота барьера определяется с учетом понижения из-за действия контактного поля в ОПЗ полупроводника.

На рисунке 1 показана зависимость эффективной высоты барьера от величины обратного напряжения с учетом эффекта туннелирования носителей заряда сквозь барьер (пунктирная линия) и с учетом эффекта Шоттки (сплошная линия) при концентрации легирующей примеси 10^{23} м^{-3} .

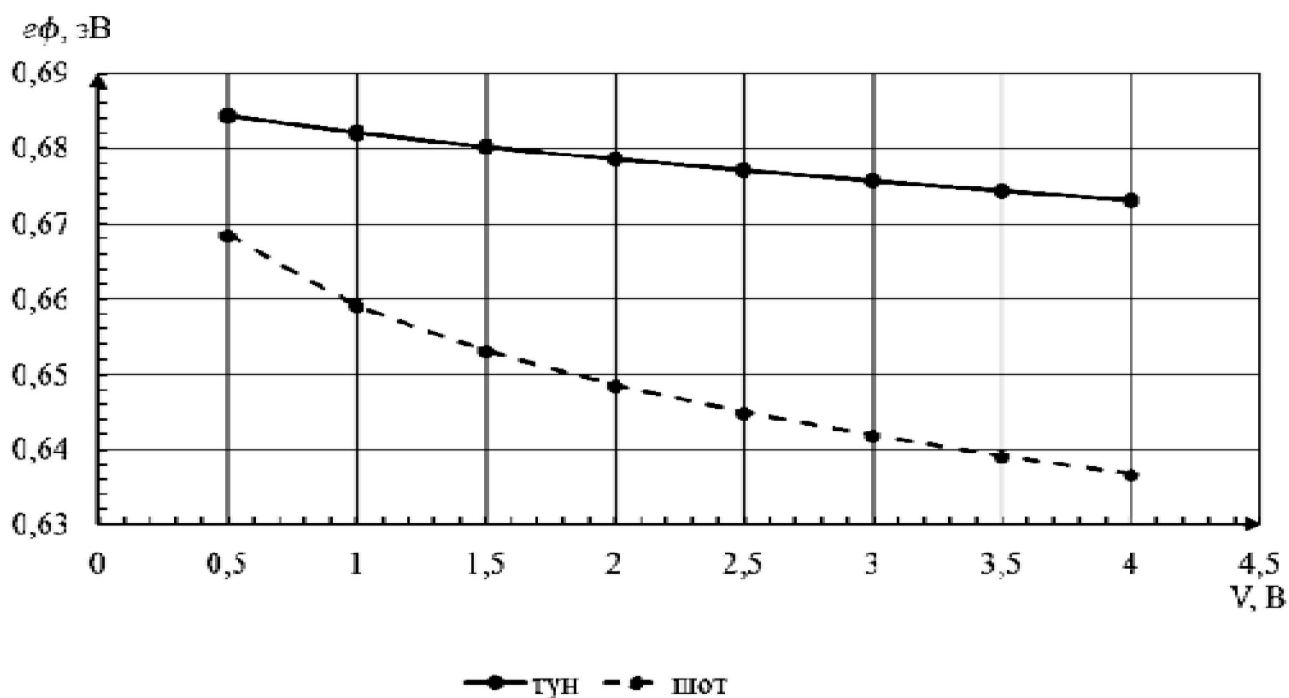


Рис. 1. Зависимость эффективной высоты барьера от обратного напряжения при постоянной концентрации примеси 10^{23} м^{-3}

На рисунке 2 показана расчетная величина эффективной высоты барьера, определенная с учетом эффекта туннелирования (пунктирная линия) и с учетом эффекта Шоттки (сплошная линия) в зависимости от степени легирования полупроводника при постоянном обратном смещении 1 В.

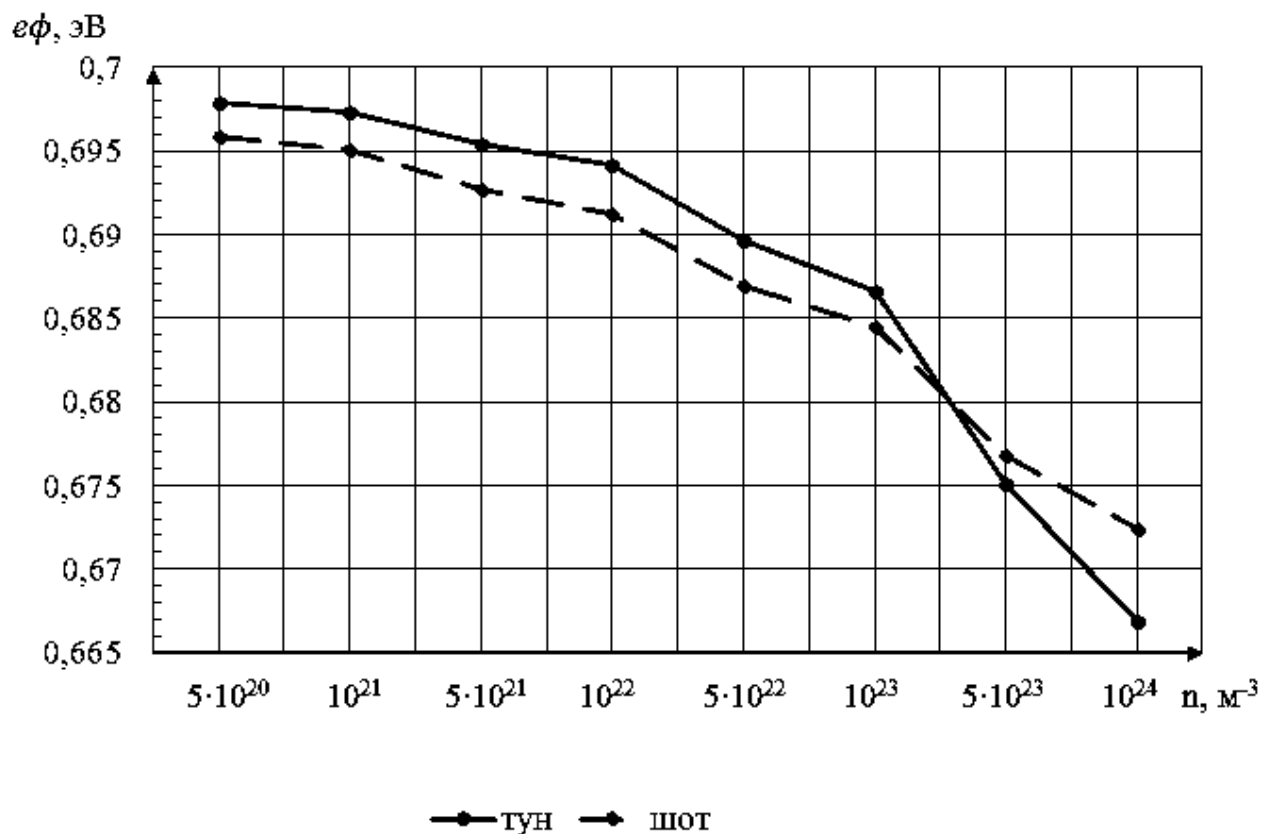


Рис.2. Зависимость эффективной высоты барьера от концентрации примеси при постоянном обратном напряжении 1 В

Исходя из результатов расчетов можно сделать вывод, что при умеренных концентрациях примеси преобладающим эффектом будет эффект Шоттки, но при росте концентрации наступает момент, когда вклад эффектов становится равным, а затем и вовсе туннельный эффект становится основным. Это можно объяснить тем, что при большой концентрации примеси барьер становится значительно тоньше, а следовательно туннельно-прозрачным для носителей заряда.

В заключение следует отметить, что даже классические полупроводниковые структуры при определенных условиях можно считать квантово-размерными. При этом появляется необходимость учитывать квантовые эффекты для точного определения электро-физических параметров таких систем. Это необходимо учитывать при проектировании и производстве полупроводниковых приборов и структур.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003) с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования РГРТУ.

Библиографический список

1. С. Зи Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. Кн. 1. Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
2. Орешкин П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков. М.: Высшая школа, 1977. 447 с.
3. Н.А. Баскаков, В.Г. Мишустин Моделирование параметров барьерной наноструктуры // Сб. тр. XXV Всерос. науч.-техн. конф. НИТ-2020; Рязань, 2020. С. 59 – 60.
4. Н.А. Баскаков Анализ эффективной высоты барьера на контакте металл-полупроводник при туннелировании Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства». – Рязань, 2021. С. 31-37.

УДК 621.315.592; ГРНТИ 29.19.31

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР С ПЛЁНКОЙ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТАЛЛ-СТИМУЛИРОВАННЫМ ТРАВЛЕНИЕМ

В.В. Трегулов, А.И. Иванов, Г.Н. Скопцова

*Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина,
Российская Федерация, Рязань, trwww@yandex.ru*

Аннотация. В работе исследуются спектры отражения и индикатрисы отражения образцов полупроводниковых структур с плёнкой пористого кремния, полученной методом металл-стимулированного травления. Обнаружено, что на характер спектров влияет выбор окислителя в процессе формирования образцов. Установлено, что неоднородности поверхности экспериментальных образцов, полученных в результате травления, имеют сопоставимые размеры.

Ключевые слова: пористый кремний, металл-стимулированное травление, спектры отражения, индикатрисы отражения, фотоэлектрические преобразователи.

OPTICAL PROPERTIES OF SEMICONDUCTOR STRUCTURES WITH A POROUS SILICON FILM OBTAINED BY METAL ASSISTED CHEMICAL ETCHING

V.V. Tregulov, A.I. Ivanov, G.N. Skoptsova

*Ryazan State University named for S.A. Yesenin,
Russia, Ryazan, trwww@yandex.ru*

The summary. In this paper, the reflection spectra and reflection indicatrices of semiconductor structures with a porous silicon film obtained by metal assisted chemical etching are studied. It was found that the spectra are affected by the choice of oxidizing agent during sample formation. It has been established that the surface roughness of the experimental samples obtained as a result of etching have comparable sizes.

Keywords: porous silicon, metal assisted chemical etching, reflection spectra, reflection indicatrices, photoelectric converters.

Использование плёнки пористого кремния на поверхности фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) позволяет повысить их эффективность. Благодаря шероховатой поверхности пористого кремния значительно снижается отражение от поверхности ФЭП без применения специальных антиотражающих покрытий. Такие ФЭП могут применяться при создании солнечных батарей, а также высокочувствительных датчиков оптического диапазона [1].

Метод металл-стимулированного травления позволяет получать полупроводниковые структуры с более низким коэффициентом отражения по сравнению с вышеназванными методами [2]. Исследование полупроводниковых структур с плёнками пористого кремния является актуальным, поскольку метод металл-стимулированного травления позволяет гибко подбирать необходимые химические реагенты для достижения необходимых характеристик плёнки.

Основной задачей данной работы является исследование оптических свойств поверхности полупроводниковых структур с плёнкой пористого кремния, изготовленной методом металл-стимулированного травления.

В качестве подложки для изготовления исследуемых образцов используется кремний р-типа, легированный бором, $\rho = 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и кристаллографической ориентацией (100).

Для исследований были изготовлены 4 образца на основе метода металл-стимулированного травления. Процесс металл-стимулированного травления состоит из двух этапов: на первом создавался слой серебряных частиц на кремниевой пластине в растворе 0,01 М Ag_2SO_4 ; 4,8 М HF ; 92% $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ с соотношением 1:0,1:0,3 в течение 20 с, после которого образцы промывались в дистиллированной воде; на втором производилось формирова-

ние слоя пористого кремния с применением раствора 3% H_2O_2 ; 4,8 М HF; 92% C_2H_5OH (1:0,5:0,25) или 0,06 М $KMnO_4$; 4,8 М HF; 92% C_2H_5OH (10:1:0,5) в зависимости от образца (табл. 1). Время травления слоя пористого кремния составляет 20 мин. Удаление частиц Ag проводилось путём погружения образцов в раствор азотной кислоты HNO_3 в течение 6 мин. Кроме того, для некоторых образцов проводился процесс отжига при температуре 360 ± 10 °С в течение 10 мин (табл. 1). После завершения процесса создания структур проводилась их отмывка в дистиллированной воде.

Образец 5 представляет собой текстурированную кремниевую подложку и предназначен для сравнения спектров образцов 1-4 с исходной поверхностью.

Таблица 1. Основные параметры процесса создания образцов

№ образца	Окислитель	Отжиг
1	H_2O_2	есть
2	H_2O_2	нет
3	$KMnO_4$	есть
4	$KMnO_4$	нет

Для проведения измерений образец располагается на столике, оборудованном двумя креплениями для источника и приёмника излучения. Излучение регистрировалось спектрометром Ocean Optics USB4000 с подключённым к нему оптоволоконным кабелем. В качестве источника излучения для измерения спектров отражения использовалась галогенная лампа, спектр которой расположен в широкой области длин волн, для измерения индикатрис рассеяния – полупроводниковый лазер (диод) с длиной волны 650 нм. Отсчёт положительных углов регистрации излучения производится по часовой стрелке к нормали, проведённой к плоскости поверхности образца, углов падения – против часовой стрелки.

В процессе измерения спектров отражения один из концов оптоволоконного кабеля с закреплённым на нём объективом располагался под углом 25°. Этот угол был подобран для регистрации максимального отражённого сигнала от образца и обеспечения наибольшего соотношения сигнал/шум. На спектрах отражения образцов 1-4 (рис. 1), полученных под углом падения света 25°, наблюдаются изменения со стороны коротковолновой и длинноволновой областей, в окрестности точки 720 нм спектры имеют схожую интенсивность. Наиболее сильно выделяется спектр образца 4, который имеет лучшее отражение в коротковолновой области, а в длинноволновой, напротив, обладает слабым отражением от поверхности.

При изменении углов падения луча в пределах 35-55° образцы 3 и 4 имеют наибольший коэффициент отражения в коротковолновой области, а в длинноволновой – наименьший. В остальном отличия не наблюдаются. В целом все образцы обладают низким коэффициентом отражения – до 2% в диапазоне от 450-950 нм.

Индикатрисы отражения образцов 1-5 были получены для разных углов регистрации излучения в диапазоне от -80° до +80°. На рис. 2 показаны нормированные индикатрисы отражения, полученные под углом падения лазерного луча 25°. Индикатрисы образцов 1-4 имеют схожий вид, поэтому изображены в виде некоторой усреднённой кривой. Наибольшая интенсивность отражённого сигнала наблюдается при угле регистрации около 15-45° для образцов 1-4, для образца 5 – при 11-32°. Кроме того, наблюдается смещение максимума индикатрис отражения для образцов с плёнкой пористого кремния в сторону большего угла регистрации по сравнению с текстурированной подложкой.

При изменении угла падения лазерного луча в пределах -25-25° углы регистрации, в диапазоне которых наблюдается максимум интенсивности отражённого сигнала, меняются слабо. Наиболее сильный отражённый сигнал получен для образца 1.

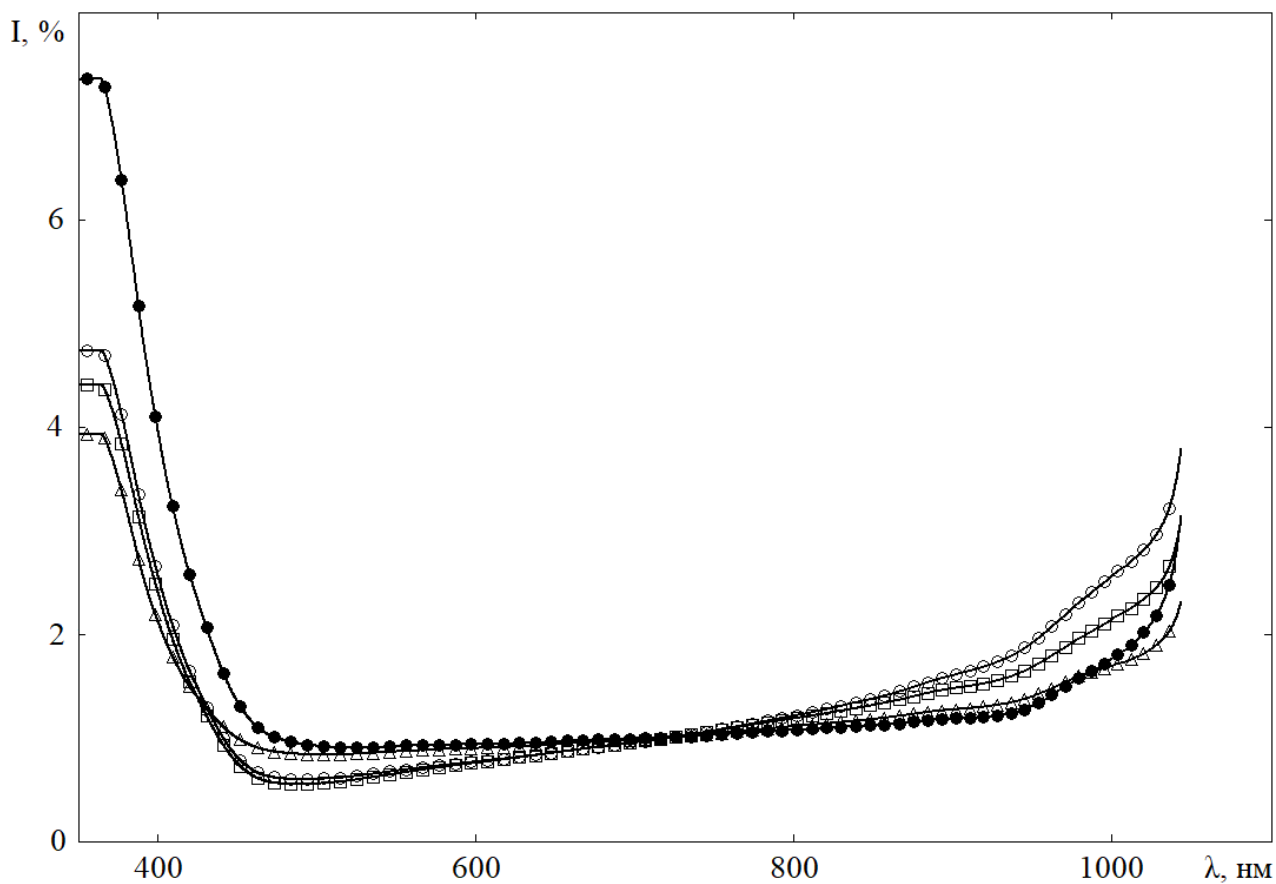


Рис. 1. Спектры отражения образцов 1-4, полученные при угле падения света 25° (1 – \square , 2 – \circ , 3 – Δ , 4 – \bullet)

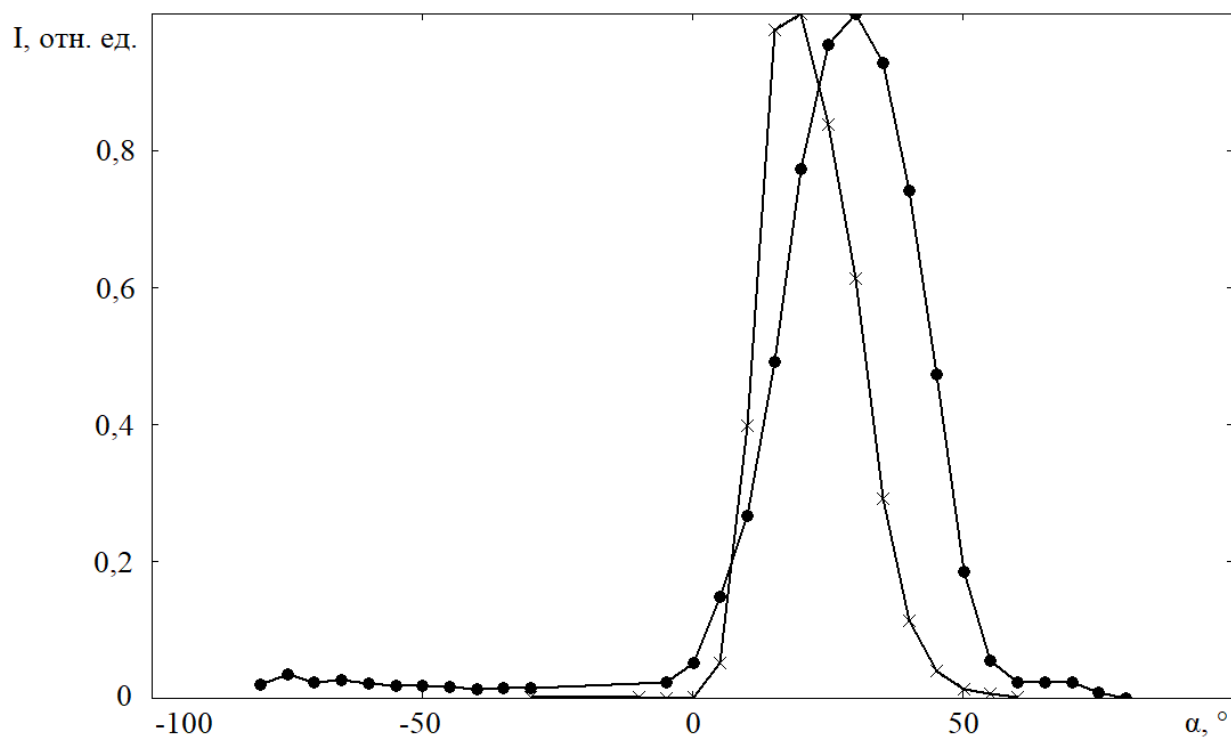


Рис. 2. Нормированные индикатрисы отражения образцов, полученные при угле падения лазерного луча 25° (1-4 – \bullet , 5 – \times)

С помощью индикатрис отражения были получены локальные углы наклона, при которых наблюдается максимум интенсивности отражённого сигнала, в зависимости от угла наклона лазерного луча и размеры неоднородностей поверхности образцов h (табл. 2) [3]:

$$h = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{\ln I_1 - \ln I_2}{\cos^2 \Psi_2 - \cos^2 \Psi_1}}, \quad (1)$$

где λ - длина волны падающего излучения,

Ψ_1, Ψ_2 - углы падения излучения,

I_1, I_2 - зеркальные составляющие интенсивности отражённого излучения от образцов при углах падения излучения Ψ_1, Ψ_2 .

При угле падения лазерного луча -25° наибольший вклад в интенсивность сигнала образцов 1-4 вносят микрограния с углом наклона в диапазоне от -25 до 0° , при 0° – от 4° до 25° , при 25° – от 30° до 50° .

Таблица 2. Распределения локальных углов наклона микрограней поверхности образцов.

№ образца	h , нм
1	673,7
2	662,1
3	907,3
4	717,2
5	1039,1

Таким образом, образцы 3 и 4, изготовленные с использованием в качестве окислителя KMnO_4 , имеют лучшее отражение в коротковолновой области (350-700 нм), чем образцы 1 и 2, полученные с использованием H_2O_2 . В длинноволновой области (800-1000 нм), напротив, образцы 3 и 4 обладают более слабым отражением от поверхности. Из анализа индикатрис отражения следует, что они имеют схожий вид для всех образцов с плёнкой пористого кремния. Интенсивность сигнала при разных углах падения лазерного излучения выше для образца 1, который проходил процедуру отжига, для остальных образцов примерно одинакова. Размеры неоднородностей поверхности образцов 3 и 4 незначительно выше, чем для образцов 1 и 2. Для всех образцов с плёнкой пористого кремния наибольший вклад в сигнал вносят микрограния со схожими углами наклона.

Полученные образцы полупроводниковых структур с плёнкой пористого кремния обладают низким коэффициентом отражения от поверхности и могут применяться для создания высокоэффективных ФЭП.

Библиографический список

1. Black silicon solar cells with interdigitated back-contacts achieve 22.1% efficiency / P. Repo [et al.] // Nature nanotechnology. – 2015. – № 10. – P. 624-628.
2. Study of the properties of the porous silicon synthesized by Ag assisted chemical etching / M. Karanam [et al.] // International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy. – 2016. – № 71. – P. 40-48.
3. Топорец, А.С. Оптика шероховатой поверхности / А.С. Топорец. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1988. – 191 с.: ил.

УДК 621.382.2/.3, ГРНТИ 47.09.29

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ, ПЕРСПЕКТИВНОГО В КАЧЕСТВЕ АНТИОТРАЖАЮЩЕГО ПОКРЫТИЯ ФЭП

А.В. Васин, Н.Б. Рыбин

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, lexasuper6201@gmail.com*

Аннотация. В работе рассматриваются образцы с плёнками пористого кремния, их анализ с помощью методик растровой электронной микроскопии и релаксационной спектроскопии глубоких уровней. Дана характеристика технологическим режимам изготовления образцов в соответствии с их морфологией и электрофизическими характеристиками. Сделаны основные выводы о влиянии глубоких уровней в образцах на эффективность их применения в качестве антиотражающего покрытия фотоэлектрических преобразователей.

Ключевые слова: пористый кремний, растровый электронный микроскоп, релаксационная спектроскопия глубоких уровней (РСГУ), глубокий уровень (ГУ).

INVESTIGATION OF POROUS SILICON, PROMISING AS AN ANTI REFLECTIVE COATING OF PEC

A.V. Vasin, N.B. Rybin

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russian Federation, Ryazan, lexasuper6201@gmail.com*

Annotation. The paper considers samples with porous silicon films and their analysis using scanning electron microscopy and deep-level relaxation spectroscopy. The characteristics of the technological modes of manufacturing samples in accordance with their morphology and electrophysical characteristics are given. The main conclusions are drawn about the effect of deep levels in samples on the efficiency of their use as an antireflection coating of photoelectric converters.

Keywords: porous silicon, scanning electron microscope, deep level relaxation spectroscopy (DLTS), deep level (DL)

В последнее время значительно повысилось внимание к возможности применения пористого кремния (ПК) в технологии производства кремниевых солнечных элементов [2]. Такие физические особенности ПК, как возможность уширения запрещенной зоны, большая активная площадь для взаимодействия света и полупроводника, уменьшение потерь на отражение, специфичность спектра поглощения и др. позволяют исследовать ПК как перспективный материал.

Из-за большого количества кремния в земной породе и уже достаточно широко распространённого производства кремниевых приборов, фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) являются основными элементами наземной и космической фотоэнергетики. На данный момент главной проблемой таких приборов является сравнительно низкий КПД.

Эффективным методом снижения потерь является создание на рабочей поверхности ФЭП специального микрорельефа для увеличения коэффициента поглощения и переход к многослойным структурам на основе кремния. Перспективным направлением повышения эффективности кремниевых ФЭП является переход к многослойным структурам на основе нанокристаллического кремния. Современные фотоэлектрические преобразователи на основе монокристаллического кремния имеют предельный КПД 25-27%. Максимальный КПД получают на пластинах, имеющих рабочую поверхность в виде правильных четырехгранных пирамид, покрытых слоем окисла.

Одним из подходов является использование плёнок пористого кремния в качестве специального покрытия [3]. Простым и эффективным способом получения нанокристаллического кремния, является создание на подложке монокристаллического кремния слоя пористого кремния. Достоинствами полученного пористого слоя являются высокая степень поглощения падающего света на поверхности.

Пористый кремний отличается высокой химической активностью, причем химический состав приповерхностной области можно изменять в процессе обработки [5]. Варьируя размеры наночастиц, можно изменять ширину запрещенной зоны, подвижность электронов и дырок. Изменение структуры зон кремния при переходе к наноразмерным кристаллам в фоточувствительных приборах позволяют значительно расширить спектр поглощения ФЭП в коротковолновую область за счет квантово-размерного увеличения ширины запрещенной зоны кремния в нанокристаллах и за счет поглощения в широкозонном материале высокоэнергичных фотонов.

Основной проблемой, препятствующей широкому использованию структур на основе ПК, является нестабильность его характеристик. Эта особенность тесно связана с характером морфологии поверхности и внутренней структуры пленок. Кроме того, слой ПК, используемый в качестве антиотражающего покрытия для элементов ФЭП, может содержать дефекты с глубокими уровнями (ГУ) [3]. Такие дефекты могут приводить к нежелательной рекомбинации носителей заряда, что, в конечном счёте, снизит эффективность ФЭП. В связи с этим актуальна задача исследования дефектов с ГУ в пленках ПК.

Исследуемые образцы

Для исследования были взяты образцы ПК, изготовленные методом анодного электрохимического травления (в гальваностатическом режиме) в растворе электролита HF: C₂H₅OH: KMnO₄ с соотношением компонентов 0,5: 0,5: 1,0. В качестве подложек использовались пластины монокристаллического кремния р-типа с удельным сопротивлением 1 Ом·см и ориентацией поверхности (100). Подложки имеют текстурированный рельеф в результате химического травления в водном растворе KOH при температуре 90 °С.

Пленки ПК всех образцов были получены без освещения поверхности кремниевой пластины. Конкретные технологические режимы для отдельных образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Технологические режимы получения ПК

№ образца	Концентрация KMnO ₄ в растворе электролита, М	Длительность травления, мин.	Плотность тока травления, mA/cm ²
1	$20 \cdot 10^{-3}$	10	20
2	$20 \cdot 10^{-3}$	20	40
3	$40 \cdot 10^{-3}$	10	20
4	$2,5 \cdot 10^{-3}$	10	70
5	$1,2 \cdot 10^{-3}$	10	70
6	$5,0 \cdot 10^{-3}$	10	70

Исследование

Суть исследования состояла в изучении морфологии полученных образцов ПК и получении данных об их электрофизических характеристиках с помощью метода РСГУ (DLTS). В качестве прибора использовался растровый электронный микроскоп (РЭМ) JSM-6610LV. Для всех исследований использовались следующие одинаковые параметры сканирования: ускоряющее напряжение 30 кВ, метод регистрации вторичных электронов (SEI), рабочее расстояние до образца 10 мм, увеличение в диапазоне от 30 до 10000 раз.

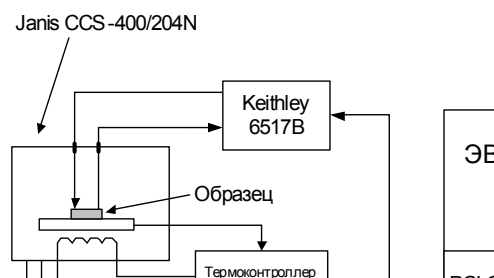


Рис. 1. Структурная схема измерительного комплекса

Электрофизический комплекс построен на базе электрометра Keithley 6517B с разработанным пакетом ПО на основе виртуальной лаборатории LabVIEW. Для измерения вольт-амперных характеристик использовался диапазон напряжений от -10 В до 1 В. Для получения РСГУ спектра использовались такие параметры, как длительность импульса заполнения 1000 мкс, импульса опустошения 10000 мкс, обратное напряжение 1 В, диапазон температур от 70 К до 370 К с шагом 2 К/мин.

Обсуждение

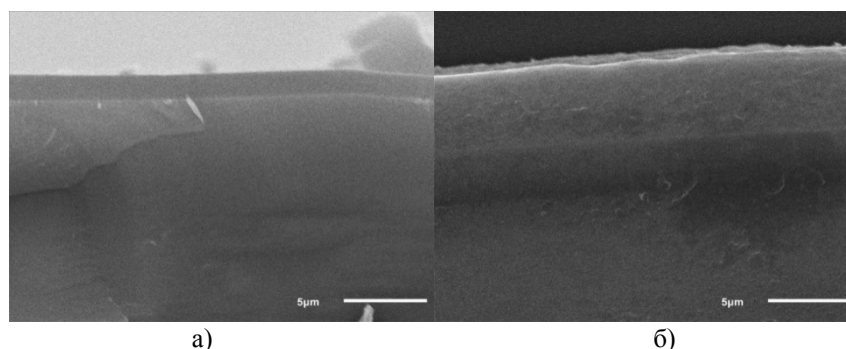


Рис. 2. РЭМ изображения среза образцов № 3 (а) и № 4 (б)

Для образцов №1 и №2 увеличение времени травления и плотности тока приводит к появлению дефектов в виде наростов на поверхности пленки без увеличения толщины пленки. Кроме того, в образце № 2 наблюдалось отслоение пленки пористого кремния от подложки. В образце № 3 с большей концентрацией KMnO_4 была получена сплошная и однородная пленка без явных дефектов. Также следует отметить, что пленка ПК в образце №3 имела наибольшую толщину среди всех образцов.

В образце № 4 наблюдалась значительная деградация поверхности ПК, выражающаяся в растрескивании плёнки. Похожие результаты, но с меньшей толщиной пленки наблюдались у образца № 5, для которого использовался менее концентрированный раствор. В образце № 6 была получена сплошная плёнка без каких-либо наблюдаемых дефектов, хотя толщина её и меньше, чем у образца № 3.

Для дальнейших исследований электрофизическими методами были выбраны образцы, имеющие наибольшую толщину пленки ПК: образцы № 3 и № 4, РЭМ-изображения которых представлены на рисунке 2.

В результате исследований методом вольт-амперных характеристик для образцов № 3 и № 4 были получены зависимости, приведенные на рисунке 3. На основе этих данных были

сделаны выводы о том, что образец №4 имеет большие токи утечки в сравнении с образцом № 3.

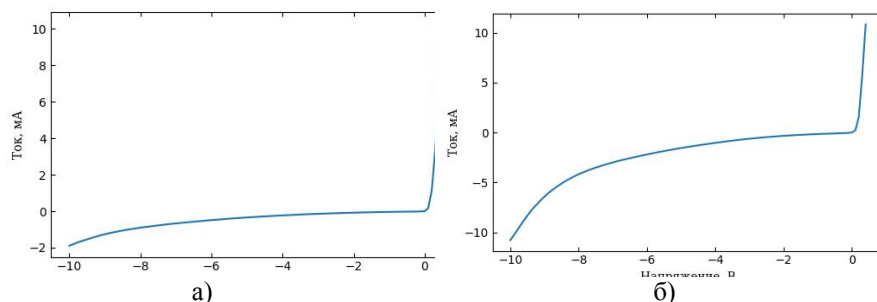


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики образцов № 3 (а) и № 4 (б)

С помощью метода РСГУ для образцов № 3 и № 4 был получен РСГУ спектр и определена энергия активации ГУ, составляющая 0,722 эВ и 0,397 эВ для обоих образцов соответственно. Полученные спектры представлены на рисунке 4. На основе спектров РСГУ была получена информация о том, что образец № 4 имеет два ГУ. Так же его ГУ имеют меньшую величину энергии активации, что может дополнительно вносить вклад в рекомбинацию носителей заряда.

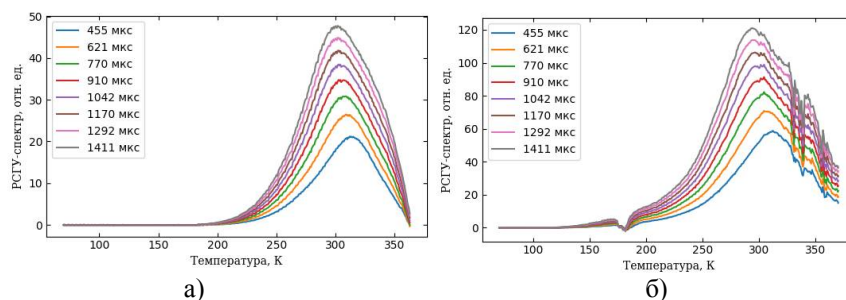


Рис. 4. РСГУ спектр образцов № 3 (а) и № 4 (б)

Так же для количественной оценки были рассчитаны максимальные и минимальные концентрации носителей заряда, обусловленные активацией этих ГУ, соответственно равные $8,41 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $1,154 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ для образца № 3, а так же $2,147 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и $3,462 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ для образца № 4. Так как спектры нормированы относительно времени релаксации, то в конечной формуле для расчёта это было учтено:

$$N = \frac{2 \cdot R_{\text{max}} \cdot \tau}{q \cdot W \cdot S},$$

где W – глубина р-п перехода, S – площадь контакта.

Большие значения концентраций носителей ГУ типичны для ПК из-за наличия большого количества дефектов в пористой структуре. Получившиеся значения пропорциональны току, протекающему через образец. Этот ток обусловлен носителями заряда активированных ГУ. Можно сделать вывод о том, что образец № 4 имеет худшие электрофизические показатели, т.к. концентрация носителей заряда и пропорциональный им ток выше, чем у образца № 3. Таким образом, применение технологии ПК образца № 4 приведёт к ухудшению свойств ФЭП за счёт нежелательной рекомбинации на его ГУ, что в свою очередь повлияет на КПД элемента.

Выводы

В результате исследований морфологии и электрофизики образцов были получены соответствующие изображения плёнок ПК, вольтамперные характеристики и спектры РСГУ, произведён их анализ и соответствующие расчёты.

Было установлено, что повышение концентрации $KMnO_4$ в растворе электролита приводит к получению более толстой и однородной плёнки. При этом повышение плотности тока и значительное уменьшение концентрации раствора создают дефекты на поверхности ПК, которые могут выступать в роли ГУ и центров рекомбинации носителей заряда, что в свою очередь может повлиять на эффективность ФЭП.

Библиографический список

1. Feng Z.C., Tsu R., ed. (1994). Porous Silicon. Singapore: World Scientific. ISBN 981-02-1634-3.
2. Трегулов В.В. Пористый кремний: технология, свойства, применение: моногр. / В.В. Трегулов; Ряз. гос. ун-т им. С.А. Есенина. – Рязань, 2011. – 124 с.
3. Трегулов В.В. Особенности электрофизических процессов в фотоэлектрическом преобразователе солнечной энергии с пленкой пористого кремния; Журнал: Вестник балтийского федерального университета им. И. Канта. серия: физико-математические и технические науки; Учредители: Балтийский федеральный университет им. И. Канта (Калининград), с. 64-73, 2017.
4. Трегулов В.В., Афонин М.В., Воробьев Ю.В., Толкач Н.М. Особенности свойств пленок пористого кремния, сформированных на текстурированной подложке; Журнал: Вестник рязанского государственного радиотехнического университета; Учредители: Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина (Рязань), с. 103-107, 2013.
5. В.В. Трегулов. Пористый кремний: технология, свойства, применение : моногр. Ряз. гос. ун-т им. С.А. Есенина. – Рязань, 2011. – 124 с.

УДК 621.315.592; ГРНТИ 29.19.31

ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КИНЕТИКИ ЗАХВАТА НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА НА ГЛУБОКИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УРОВНИ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ БАРЬЕРНОЙ СТРУКТУРЕ

Е.П. Трусов, А.В. Ермачихин, В.Г. Литвинов

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, eptrusov@yandex.ru*

Аннотация. Описана методика исследования сечения захвата носителей заряда на глубокие энергетические уровни, а также энергии ионизации глубокого уровня для полупроводниковых барьерных структур. Основой описанного метода является получение спектров токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней (ТРСГУ) для барьерной структуры. Приведены особенности измерительного комплекса, используемого для исследования спектров ТРСГУ.

Ключевые слова: сечение захвата, энергия ионизации глубокого уровня, ТРСГУ.

STUDY OF THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF CHARGE CARRIER CAPTURE KINETICS ON DEEP ENERGY LEVELS IN A SEMICONDUCTOR BARRIER STRUCTURE

E.P. Trusov, A.V. Ermachikhin, V.G. Litvinov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, eptrusov@yandex.ru*

The summary. A technique for studying the charge carrier capture cross-section to deep energy levels as well as the deep level ionization energy for semiconductor barrier structures is described. The basis of the described method is to obtain I-DLTS spectra for the barrier structure. The special feature of the measuring complex used for the study of I-DLTS spectra is given.

Keywords: capture cross section, deep level ionization energy, I-DLTS.

Введение

Одной из важных задач, которую необходимо решать разработчикам полупроводниковых приборов, является определение концентрации и параметров дефектов или глубоких центров (ГЦ) образующих глубокие энергетические уровни (ГУ) в запрещенной зоне в полупроводниковых структурах. Связано это с тем, что ГУ отвечают за важные параметры полупроводниковых структур и влияют на характеристики полупроводниковых приборов. Наличие различных по природе ГЦ может придавать полупроводниковым материалам как необходимые, так и отрицательные свойства. Таким образом, исследование параметров ГУ является одним из актуальных векторов развития физики полупроводников [1].

Ширина запрещенной зоны в большинстве полупроводников зависит от температуры. Это приводит к необходимости использования поправок на температурную зависимость энергии ионизации ГУ. Использование метода релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ) позволяет определить энтальпию ионизации глубокого уровня. Отсутствие температурной зависимости энергии ионизации ГУ позволяет сделать вывод, что реакция ионизации не приводит к изменению энтропии. Если не принимать во внимание коэффициент энтропии, то это может привести к большим ошибкам при определении величины сечения захвата ГЦ, и, соответственно, расчетные параметры полупроводниковой структуры будут сильно отличаться от реальных параметров [2,3].

Температурная зависимость величины сечения захвата должна учитываться как при определении собственного значения сечения захвата, так и при оценке энергетического положения ГУ в запрещенной зоне [4].

Описание измерительного комплекса

Для изучения кинетики захвата носителей заряда (НЗ) использовался автоматизированный комплекс токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней (ТРСГУ). Комплекс ТРСГУ состоит из гелиевого криостата замкнутого типа, генератора прямоугольных импульсов, усилителя – преобразователя «ток-напряжение», персонального компьютера с платами контроллера GPIB интерфейсной шины и платой сбора данных NI PCIGPIB и PCIe6361. Управление комплексом осуществляется с помощью программы, написанной в среде инженерного графического программирования LabVIEW. Комплекс позволяет устанавливать и контролировать скорость изменения температуры образца, а также поддерживать заданную постоянную температуру в диапазоне 7–500 К с использованием связки между ПК и термоконтроллером. Управление термоконтроллером и генератором импульсного напряжения осуществляется через интерфейсную шину общего назначения GPIB. Генератор включен в цепь исследуемого образца. Ток релаксации, протекающий через образец, и далее через усилитель, где выполняется преобразование «ток-напряжение». Затем сигнал поступает на АЦП платы сбора данных PCIe6361 с тактовой частотой до 2 МГц. В состав комплекса также входит оборудование, позволяющее провести исследования температурных зависимостей вольтамперных и адмиттансных характеристик полупроводниковых структур, которое используется для выбора режимов измерений ТРСГУ-спектров и их анализа. Структурная схема измерительного комплекса приведена на рисунке 1 [5].

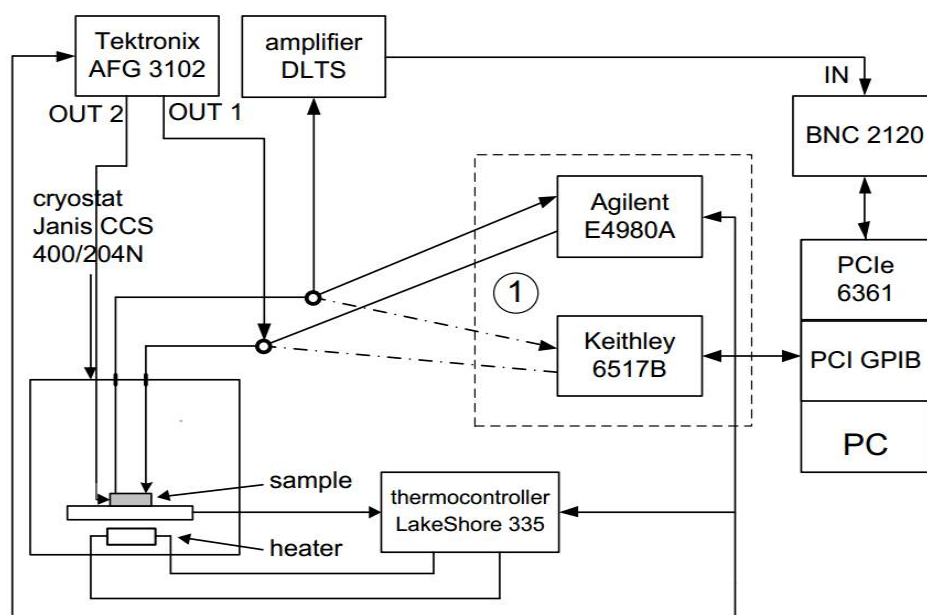


Рис. 1. Блок схема измерительного комплекса ТРСГУ

Метод изучения температурной зависимости кинетики захвата носителей заряда

Методика изучения температурной зависимости кинетики захвата НЗ на ГУ в полупроводниковой барьерной структуре может быть условно разделена на два этапа.

Первый этап заключается в измерении спектров ТРСГУ для полупроводниковой структуры. На данном этапе анализируются пики на ТРСГУ-спектрах. По их температурному положению строится прямая Аррениуса и определяется величина энергии ионизации ГЦ и его сечения захвата в приближении к бесконечно большой температуре. После такого анализа происходит переход ко второму этапу. Второй этап заключается в определении параметров ГУ, которые были найдены на первом этапе путем их заполнением НЗ при подаче импульсов напряжения разной длительности.

Перезарядка ГУ в ТРСГУ осуществляется за счет импульсов напряжения смещения, подаваемых на исследуемую структуру. Различают импульс заполнения и импульс опустошения ГУ. Во время действия напряжения смещения заполняющего импульса толщина слоя обедненного заряда (СОЗ) меньше, чем при подаче импульса напряжения опустошения. Край СОЗ, перемещаясь, как бы сканирует определенную область полупроводниковой структуры. В этой области происходит периодическая перезарядка ГУ. Процесс захвата ГЦ свободных НЗ для ловушек электронов описывается выражением [4]:

$$\frac{dn(t_f)}{dt} = \delta \langle v_T \rangle N_{DM} (N_t - n(t)), \quad 1)$$

Если на начало заполняющего импульса концентрация $n(0) = 0$, то часть ловушек, захвативших электроны, исходя из уравнения (1), будет определяться выражением [4]:

$$\frac{n(t_f)}{N_t} = 1 - \exp[-\delta \langle v_T \rangle N_{DM} t_f], \quad 2)$$

где

- t_f – длительность импульса заполнения;
- δ – поперечное сечение захвата НЗ;
- N_t – концентрация глубоких центров;
- N_{DM} – концентрация мелких доноров;

$n(t_f) \leq N_T$ – концентрация заполненных носителями зарядов глубоких центров;
 $\langle v_T \rangle$ – тепловая скорость движения носителя заряда.

$$\langle v_T \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{\pi m_n^*}} \quad 3)$$

$$N_{DM} = \frac{2C \times (V_{bi} + V - \frac{2kT}{q})}{q \varepsilon_s \varepsilon_0} \times 10^{-6}, \quad 4)$$

где

C – электрическая барьерная емкость перехода;

ε_s – диэлектрическая проницаемость кремния;

ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума;

V_{bi} – контактная разность потенциалов;

V – напряжение, подаваемое на полупроводниковую барьерную структуру, в данном случае $= 0$;

$\frac{kT}{q}$ – тепловой потенциал.

Таким образом, изменяя длительность импульса заполнения и определяя при этом зависимость, полученную из уравнения 2:

$$\ln\left[1 - \frac{n(t_f)}{N_t}\right] = -\delta \langle v_T \rangle N_{DM} t_f \quad 5)$$

Из графической интерпретации уравнения 5 можем сделать следующие выводы:

$$\operatorname{tg} \alpha = \delta \langle v_T \rangle N_{DM} \quad 6)$$

По относительному изменению амплитуды пика на спектре ТРСГУ можно вычислить величину $\delta \langle v_T \rangle N_{DM}$ по наклону зависимости уравнения 5. Если к тому же известно $\langle v_T \rangle N_{DM}$, то становится не сложно определить поперечное сечение захвата НЗ – δ , по уравнению 6. Такое прямое определение поперечного сечения захвата, возможно, сделать благодаря использованию ТРСГУ[4]:

$$\delta_n = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\langle v_T \rangle N_{DM}} \quad 7)$$

С другой стороны для определения поперечного сечения захвата НЗ имеем следующее[4]:

$$\delta_n(T) = \frac{\delta_\infty \times e^{-\Delta E_\sigma}}{kT}, \quad 8)$$

где

δ_∞ – сечение захвата при бесконечной температуре;

ΔE_σ – энергия ионизации глубоких центров;

Тестовая полупроводниковая барьерная структура, легированная золотом

На рисунке 2 представлен типичный спектры ТРСГУ кремневой p^+ - n структуры с золотом в базе в диапазоне температур от 20 К до 370 К, измеренные на описанном выше комплексе ТРСГУ.

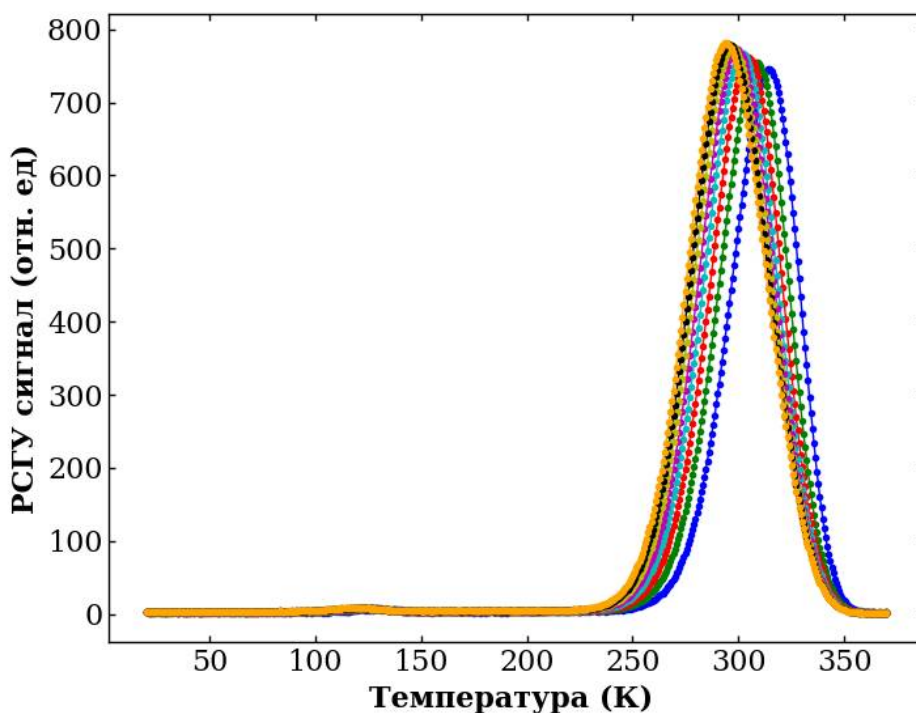


Рис. 2. Спектр ТРСГУ тестовой структуры

На рисунке 3 представлены зависимости, описывающие заполнения ГЦ при различной длительности импульса заполнения и постоянной температуре для исследуемой тестовой структуры с золотом.

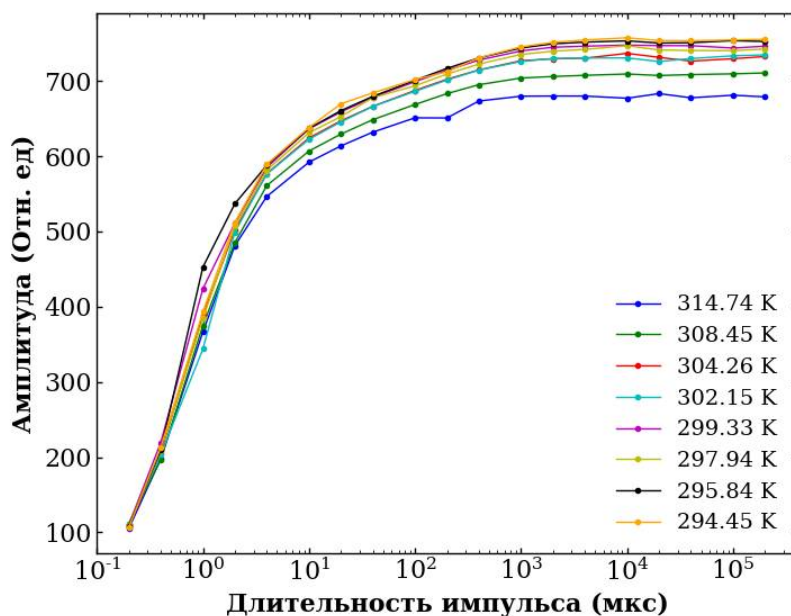


Рис. 3. График заполнения глубоких центров носителями зарядов

Для прямолинейного участка на рисунке 3, используя формулу 5, получаем следующий график (после аппроксимации) – рисунок 4.

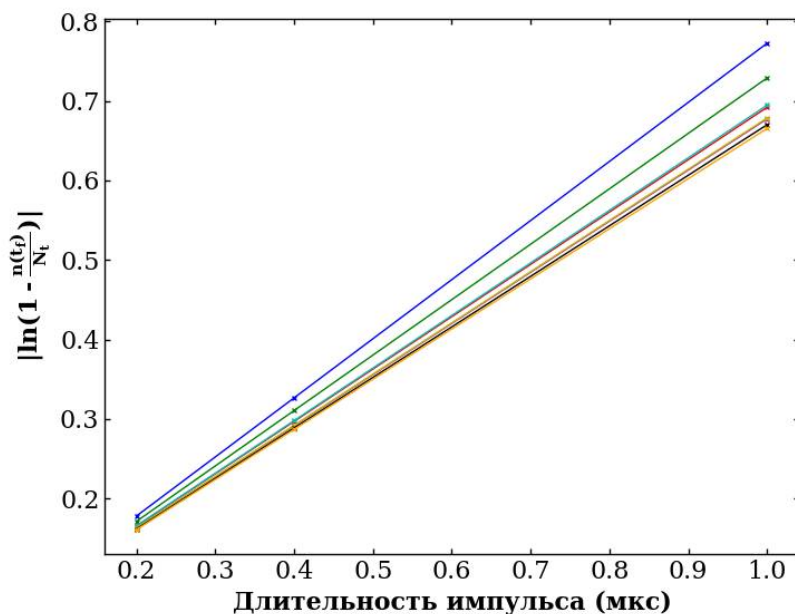


Рис. 4. Аппроксимированная прямолинейная часть график логарифма числа ловушек, захвативших носитель заряда от длительности импульса

По графику из рисунка 4 имеем возможность найти тангенс угла наклона аппроксимирующих прямых tga . Таким образом, для определения сечения захвата решаем уравнения (5,6) для различных температур. Далее получаем температурную зависимость сечения захвата. Температурная зависимость логарифма сечения захвата и ее аппроксимация изображены на рисунке 5. Из рисунка видно зависимость сечения захвата от температуры.

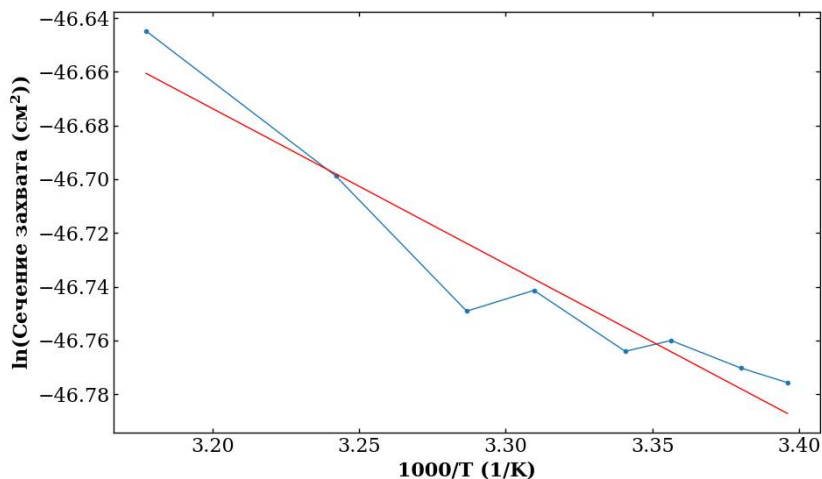


Рис. 5. График зависимости логарифма сечения захвата от обратной температуры

С другой стороны для расчета сечения захвата можно воспользоваться уравнением 8. А имея уже рассчитанную температурную зависимость сечения захвата, воспользовавшись уравнением 8, можем легко рассчитать энергию ионизации глубоких уровней. Таким образом, по зависимости логарифма сечения захвата от температуры, изображенной на рисунке 5, находим $\frac{-\Delta E_{\sigma}}{k}$ как тангенс угла наклона, и определяем энергию ионизации глубокого уровня $\Delta E_{\sigma} = 0,04$ эВ.

Выводы

Таким образом, в работе представлено описание методики исследования сечения захвата НЗ на ГЦ, а также энергию ионизации ГУ для полупроводниковых барьерных структур. Исследования выполнены с использованием автоматизированного измерительного комплекса токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней. Отличительной особенностью методики является возможность проведения комплексного и сложного экспериментального исследования, подразумевающего изучение температурной зависимости тока релаксации через образец, энергию ионизации глубоких уровней, сечение захвата носителей заряда в различных режимах перезарядки глубоких центров.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003) с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования РГРТУ.

Библиографический список

1. Гудзев В.В. Исследование глубоких энергетических уровней в барьерных структурах на основе кристаллического и аморфного гидрогенизированного кремния: дис. канд. физико-математических наук. - Рязань, 2015.- Режим доступа: <https://studylib.ru/doc/2427763/gudzev-v.v.-issledovanie-glubokih-e-nergeticheskikh-urovnej-v>
2. С. Зи. Физика полупроводниковых приборов (М., Мир, 1984). (Пер. с англ.: S.M. Sze. Physics of Semiconductor Devices (N.Y.–Chichester–Brisbane–Toronto–Singapore, A Wiley–Interscience Publication John Wiley & Sons, 1981)].
3. Lang D.V. // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. P. 3023. <http://dx.doi.org/doi.10.1063/1.1663719>
4. Денисов А.А., Лактюшкин В.Н., Садофьев Ю.Г. //Обзоры по электронной технике. 1985. Сер. 7. Вып. 15 (1141).
5. Ермачихин А.В., Литвинов В.Г.// Автоматизированный измерительный комплекс токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней/ Приборы и техника эксперимента, 2018, № 2, с. 118–123

УДК 621.382: ГРНТИ 29.03.37

ИССЛЕДОВАНИЕ И ПОЛУЧЕНИЕ ОБРАЗЦОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР, СОДЕРЖАЩИХ ТОНКИЕ СЛОИ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

А.С. Чернобровкина, В.Г. Литвинов

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, achernovrovkina110898@stud.rsu.edu.ru*

Аннотация. В данной статье рассматривается методика получения полупроводниковых структур, содержащих пористый кремний. Описана теоритическая основа метода, экспериментальные образцы и представлены результаты эксперимента. Эксперимент исследования полученных образцов описан с помощью этой методики.

Ключевые слова: металл-стимулированное травление, поверхность, пористый кремний, вольт-амперная характеристика.

STUDY AND OBTAINING OF THE SEMICONDUCTOR STRUCTURES THAT CONTAINING OF THIN LAYERS POROUS SILICON

A. S. Chernobrovkina, V.G.Litvinov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkina,
Russian Federation, Ryazan, achernovrovkina110898@stud.rsu.edu.ru*

Annotation. This article discusses the technique of study and obtaining as applied to a semiconductor structures that containing on thin layers porous silicon. The theoretical foundations, test structures are described, and the results of the experiment are presented. The semiconductor structures with porous silicon films research experiment is described using this technique.

Keywords: metal assisted chemical etching surface, porous silicon, volt-ampere characteristic..

Введение

Полупроводниковые материалы на основе кремния с конфигурацией наноразмерных структурных элементов имеют многообещающий потенциал применения в приложениях электроники, электрохимии и оптоэлектроники. Наличие таких элементов существенно изменяет типичные свойства объемного кремния, использование которого для создания ряда элементов ограничено его непрямозонностью. Структуры на основе наноструктурированного кремния способны обойти это ограничение. В связи с этим большой интерес у исследователей и разработчиков вызывает пористый кремний (por-Si). Оптические свойства образцов por-Si, а именно эффективная фотолюминесценция (ФЛ) при комнатной температуре в диапазонах видимой и инфракрасной (ИК) области спектра, в частности, относительно низкий коэффициент отражения в ИК, оправдывают применение подобных структур в солнечной энергетике. Благодаря сильно развитой поверхности por-Si может применяться в качестве чувствительного элемента химических датчиков. Таким образом, исследование полупроводниковых структур, содержащих пленки por-Si **актуально**.

Образцы и методы исследования

Объектом исследования является поверхностно-барьерная структура вида металл/пористый кремний/подложка кремния. При изготовлении экспериментальных образцов использованы методы металл-стимулированного травления (МСТ) кремния и химического осаждения металлических частиц. МСТ является наиболее простым, низкзатратным методом формирования por-Si, он позволяет обрабатывать всю поверхность кремния любого диаметра и не приводит к загрязнению por-Si примесью. Более того, только металл-стимулированное травление при выборе параметров травления способно давать крайне низкое (менее 5%) значение коэффициента отражения в видимой и ближней ИК-областях спектра, что крайне важно для солнечных элементов.

Для исследования электрофизических характеристик использованы методы измерения вольт-амперных (ВАХ) и вольт-фарадных (ВФХ) характеристик.

Выявление механизмов формирования por-Si продолжает представлять существенную проблему. Локальное или нелокальное травление кремния, связанное с инъекцией дырок вглубь Si вследствие реакции восстановления катионов металла, требует дополнительных исследований. В связи с этим баланс данных процессов и контроль является фундаментальной задачей в использовании МСТ.

Общая схема изготовления исследуемых образцов включает:

1. осаждение на поверхности кремния металлических частиц из водного раствора, содержащего соли металлов (Ag или Cu), HF, C₂H₅OH;
2. порообразование;
3. удаление металлических частиц из глубины пор;
4. вторичное осаждение металла (Ag или Cu) на кремниевые нанокристаллиты.

Наличие 3 и 4 этапов вызвано необходимостью осадить металлические частицы на кремниевые кристаллиты исключительно в приповерхностном слое пленки por-Si, а не на дне пор. Таким образом предотвращается закорачивание кремниевого кристаллита при электрических измерениях.

Исследуемые образцы представляют собой структуры следующего вида.

Образец №1 (Ag/por-Si/p-Si). Серебро на пористом кремнии, подложка- кремний р-типа солнечного качества, удельное сопротивление 1 Ом·см, кристаллографическая ориентация (100). Поверхность подложки текстурированная.

Образец №2 (Ag/por-Si/n-Si). Серебро на пористом кремнии КЭФ-4,5 n-типа приборного качества с удельным сопротивлением 4,5 Ом·см, кристаллографическая ориентация (100). Поверхность подложки полированная.

Образец №3 (Cu/por-Si/p-Si). Медь на пористом кремнии, подложка - кремний p-типа солнечного качества, кристаллографическая ориентация (100). Поверхность подложки текстурированная.

Исследование особенностей морфологии и структуры экспериментальных образцов

Проводились исследования морфологии фронтальной поверхности, а также поперечного скола экспериментальных образцов №1, №2, №3 методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). Использовался растровый электронный микроскоп JEOL JSM-6610 LV с энергодисперсионным анализатором, который позволил одновременно проводить локальный элементный анализ.

На рисунке 1 представлены изображения поперечного скола (рисунок 1, а) и фронтальной поверхности (рисунок 1, б), полученные с использованием РЭМ, образца №1.

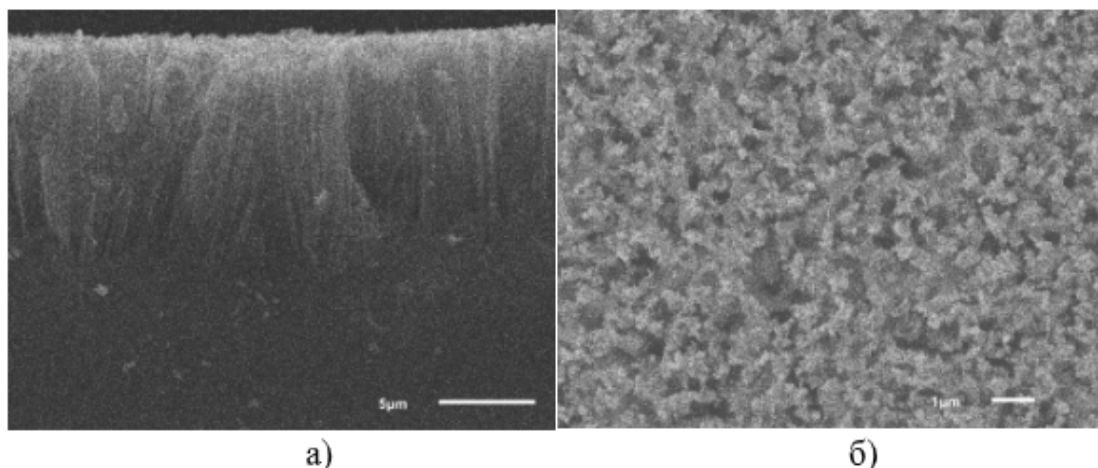


Рис. 1. Изображение поперечного сечения (а) и фронтальной поверхности (б) исследуемого образца №1

Толщина пленки por-Si составляет 12.0 ± 0.5 мкм. Каналы пор параллельны друг другу и имеют столбчатую структуру. Граница между слоем por-Si и подложкой выражена достаточно четко.

Элементный анализ показал, что глубина проникновения частиц Ag, осаждаемых на поверхность por-Si в ходе 4 этапа технологической схемы, внутрь пористого слоя составляет не более 3 мкм. Из этого можно сделать вывод, что нанокластеры Ag проникают вглубь por-Si не более чем на $\frac{1}{4}$ от его толщины. В глубине пор частицы металла отсутствуют. Это может быть объяснено тем, что из-за высокой напряженности электрического поля на остриях кремниевых кристаллитов процесс осаждения Ag наиболее интенсивен на внешней поверхности слоя por-Si. Процесс восстановления катионов Ag^+ имеет электрохимический характер. Нанокластеры Ag осаждаются на поверхности por-Si островковой пленкой (рисунок 1, б).

Изображения поперечного сечения и фронтальной поверхности исследуемых образцов №2 и №3 идентичны изображениям поперечного скола и фронтальной поверхности образца №1. Глубина проникновения металлических частиц внутрь слоя por-Si образцов №2 и №3 так же составляет $\frac{1}{4}$ толщины пористого слоя.

Исследование электрофизических характеристик экспериментальных образцов

С целью изучения электрофизических процессов, протекающих в экспериментальных образцах, проводилось измерение ВАХ и ВФХ. При измерениях прямое и обратное смещения соответствуют следующим полярностям внешнего постоянного напряжения смещения U .

- **Образец №1:** при прямом смещении на контакт к Ag – частицам на поверхности $por-Si$ прикладываются положительные значения U , при обратном – отрицательные.

- **Образцы №2 и №3:** при прямом смещении на контакт к Ag – частицам на поверхности $por-Si$ прикладываются отрицательные значения U , при обратном – положительные.

Измерения ВАХ и ВФХ производятся при температуре образцов 300 К. Измерения ВФХ производятся при следующих значениях частоты измерительного сигнала: 1 кГц, 10 кГц, 100 кГц, 1 МГц. Измерения ВАХ проводятся с целью выяснения механизмов токопрохождения в исследуемых образцах. На рисунках 2-4 представлены ВАХ образцов №1, №2 и №3, соответственно, измеренные при прямом (а) и обратном (б) смещении, соответственно. Для прямого смещения график ВАХ построен в полулогарифмическом масштабе, при обратном – в линейном.

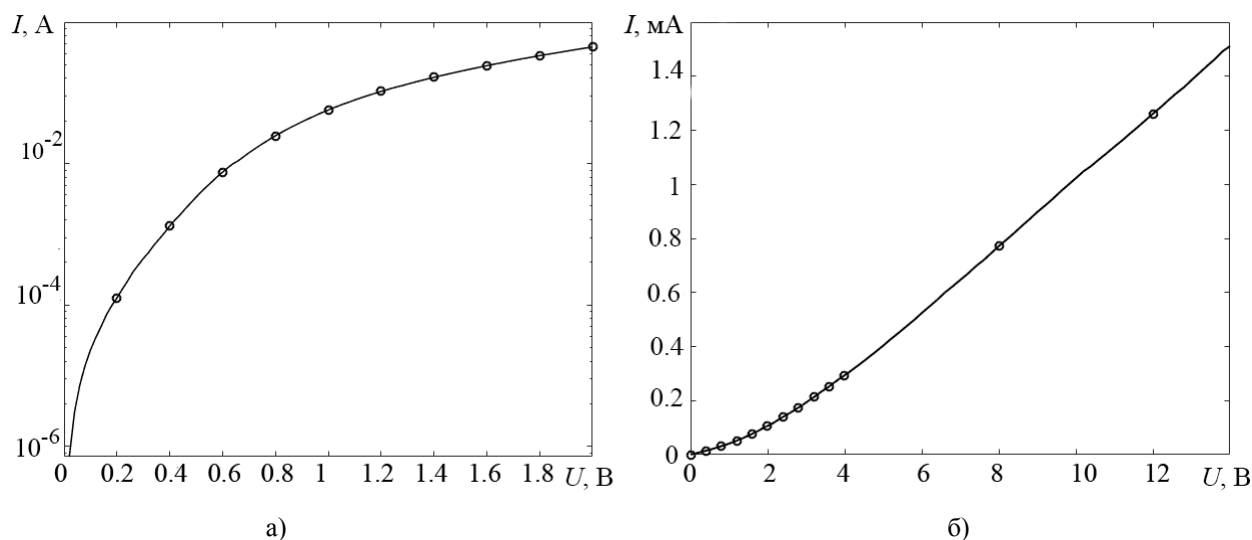


Рис. 2. ВАХ образца №1, измеренные при прямом (а) и обратном (б) смещении

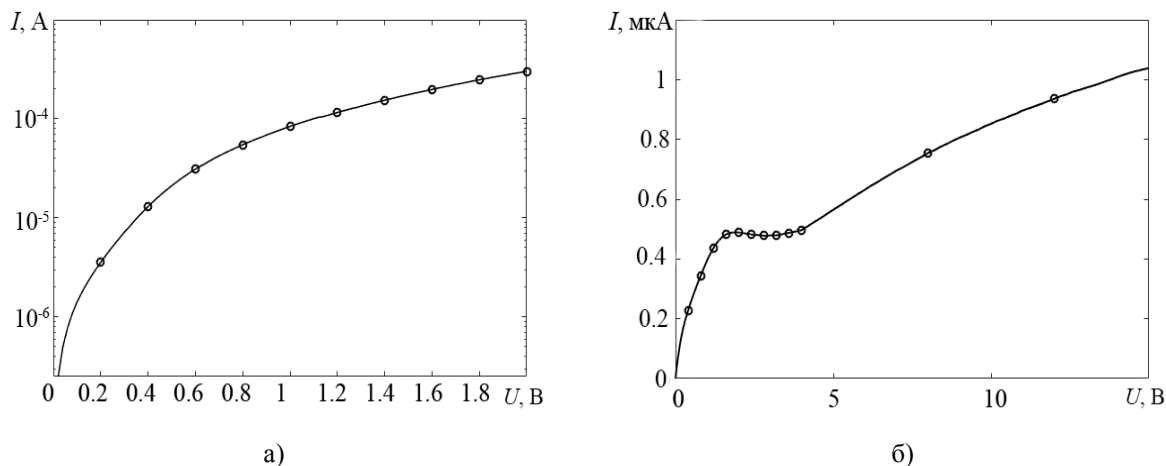


Рис. 3. ВАХ образца №2, измеренные при прямом (а) и обратном (б) смещении

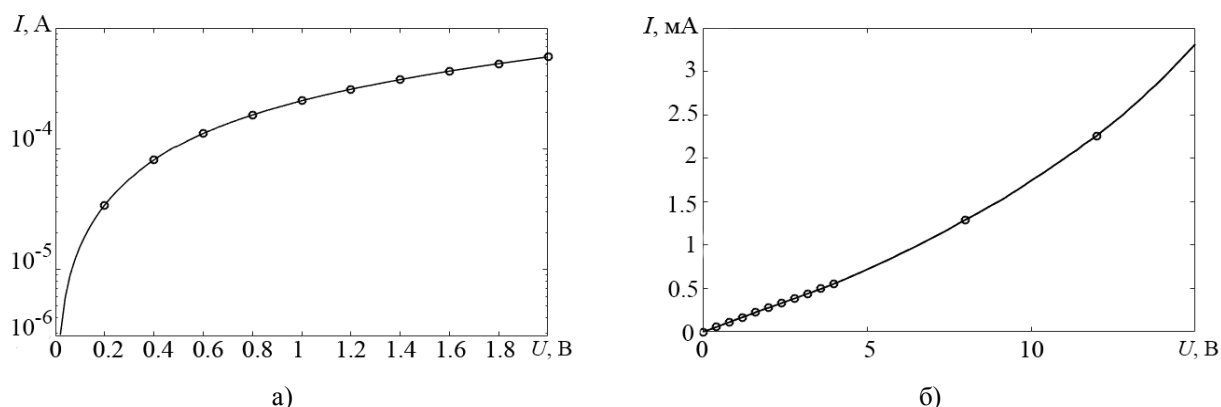


Рис. 4. ВАХ образца №3, измеренные при прямом (а) и обратном (б) смещении

Для всех образцов ВАХ имеет выпрямляющий характер. ВАХ при прямом смещении имеют вид, характерный для полупроводниковых структур, в которых возникает область пространственного заряда (ОПЗ).

В прямом смещении ток растет экспоненциально с увеличением напряжения смещения. На начальных участках прямых ветвей ВАХ исследуемых образцов применимо выражение, характерное для р-п-перехода или контакта металл-полупроводник:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qU}{nkT}\right) - 1 \right].$$

где I – электрический ток;

I_0 – ток насыщения;

q – элементарный заряд;

U – напряжение прямого смещения;

n – показатель неидеальности;

k – постоянная Больцмана;

T – абсолютная температура [1].

Для образцов №1 и №2 величина показателя неидеальности близка к 2 (№1 - $n=1,98$, №2- $n=1,47$), что свидетельствует о рекомбинации носителей заряда с участием ловушек в базовой области структуры [1]. Показатель неидеальности образца №3 близок к 1 ($n=1,23$). Это говорит о преобладании диффузионной составляющей тока в ОПЗ [1]. На обратных ВАХ для образцов №1 и №3 наблюдается постепенный рост тока с увеличением напряжения обратного смещения. Это характерно для так называемого мягкого пробоя. Этот эффект объясняется преобладанием лавинного пробоя с участием ловушек, энергетические уровни которых распределены в широком диапазоне энергий активации [1].

Причиной выявления поверхностных состояний (ПС), оказывающих влияние на характер ВАХ исследуемых структур, является искажение потенциала кристаллической решетки у поверхности кремния, вызванное адсорбированными атомами в ходе МСТ и различного рода поверхностными дефектами. К их числу можно отнести сами поры в por-Si , которые являются объемными дефектами. Согласно зонной структуре наличие дефектов или адсорбированных атомов приводит к возникновению в запрещенной зоне полупроводника разрешенных уровней энергий. Существование поверхностных состояний с глубокими энергетическими уровнями (ПС с ГУ) напрямую связано с окисной пленкой на поверхности полупроводника, в объеме которой они локализуются. ПС с ГУ обладают большим временем релаксации (от 10^{-2} с до нескольких минут или часов) поскольку прохождение электронов через слой окисла затруднено.

Выводы

В ходе проведенных исследований установлено, что при осаждении химическим способом Cu и Ag частиц на поверхность *por-Si*, формируется полупроводниковая структура, обладающая выпрямляющими свойствами. Рассматриваемые экспериментальные образцы могут быть представлены моделью контакта металл-полупроводник с тонким туннельно-прозрачным слоем диэлектрика (SiO_2) на границе между металлом и полупроводником. Диэлектрический слой между пленкой серебра и *por-Si* формируется в ходе МСТ. В процессе травления кремния неустойчивые связи Si-H, пассивирующие химические свойства кремния, заменяются на Si-O. Контакт металл-полупроводник экспериментальных образцов объясняется моделью Мотта, так как в базовой области концентрация мелкой легирующей примеси не постоянна. В приповерхностной области имеет место обеднение мелкой легирующей примесью вследствие частичного вытравливания примесных атомов при МСТ, а также вследствие частичной компенсации примеси.

Установлено, что в ходе химического осаждения частицы Cu и Ag формируются на поверхности кремниевых кристаллитов на расстоянии от внешней поверхности пленки *por-Si* не более $\frac{1}{4}$ толщины пленки *por-Si*. В глубине пор металлические частицы отсутствуют. Это объясняется электрохимической природой формирования металлических частиц. Рост частиц на заостренной верхней части кристаллитов протекает более интенсивно по сравнению с боковой поверхностью вследствие концентрации сильного электрического поля на остриях кристаллитов. На механизмы токопрохождения в исследуемых образцах существенное влияние оказывают генерационно-рекомбинационные процессы с участием ловушек как основных, так и неосновных носителей заряда. Также имеет место механизм туннелирования носителей через слой диэлектрика с участием ловушечных центров. Слой диэлектрика на внешней поверхности кремниевых кристаллитов имеет высокую проводимость за счет наличия в нем дефектов.

Поверхностно-барьерные структуры, исследованные в данной работе, могут быть использованы в оптических датчиках видимого и ближнего ИК-диапазона спектра, солнечных элементах и химических датчиках.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003) в Региональном центре зондовой микроскопии коллективного пользования (РЦЗМкп) при ФГБОУ ВО «РГРТУ». Авторы выражают благодарности А.В. Ермачихину, Н.Б. Рыбину и В.В. Трегулову за помощь в реализации экспериментальных исследований.

Библиографический список

1. С.Зи. Физика полупроводниковых приборов: в 2-х томах./ М.:Мир, 1984. Т.1, 456 с.
2. Берман Л.С., Лебедев А.А. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. Л.: Наука, 1981. 176 с.

СЕКЦИЯ «ПРОМЫШЛЕННАЯ СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ»

УДК 621.314.22.6; ГРНТИ 44.29.39

ПРИМЕНЕНИЕ СУХИХ И МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

М.В. Зайцева

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, graftchikova@gmail.com*

Аннотация: рассмотрим возможности применения сухих и маслонаполненных силовых трансформаторов 6(10)/0,4 кВ для энергоснабжения объектов с учетом их достоинств и недостатков.

Ключевые слова: электроснабжение, электроэнергетика, трансформаторная подстанция.

DRY AND OIL FILLED POWER TRANSFORMER APPLICATIONS

M.V. Zaitseva

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, graftchikova@gmail.com*

The summary: we will consider the possibilities of using dry and oil-filled power transformers 6(10) / 0.4 kV for power supply of objects, taking into account their advantages and disadvantages.

Keywords: an electrical supply, electric power industry, transformer substation.

Для преобразования электрической энергии при электроснабжении потребителей в настоящее время применяются маслонаполненные и сухие силовые трансформаторы.

До недавнего времени в России основным типом используемых силовых трансформаторов являлись маслонаполненные силовые трансформаторы, что было обусловлено их относительно невысокой стоимостью. В масляных трансформаторах обмотки помещены в бак, заполненный трансформаторным маслом, которое выполняет функции изоляции обмоток и способствует отводу тепла от обмоток к корпусу трансформатора, который для улучшения охлаждения делают ребристым.

Сухие трансформаторы представляют собой устройства, в которых обмотки высшего и низшего напряжения залиты литой изоляцией и для обеспечения теплоотвода используется естественный поток воздуха.

Одним из основных недостатков масляных трансформаторов является их высокая пожароопасность, которая обусловлена наличием в баке трансформатора значительного количества трансформаторного масла, имеющего температуру вспышки около 135 °С [1], что требует размещения масляных трансформаторов в отдельно стоящих зданиях трансформаторных подстанций.

Сухие трансформаторы являются пожаробезопасным типом оборудования, что позволяет размещать в производственных и общественных зданиях встроенные и пристроенные трансформаторные подстанции [2]. При этом сокращаются потери электрической энергии в электрических сетях 0,4 кВ из-за уменьшения общей длины электрических сетей 0,4 кВ, не требуется дополнительного места для размещения отдельно стоящих трансформаторных подстанций, что особенно актуально при дефиците свободных мест в городах для строительства новых трансформаторных подстанций.

Как маслонаполненные, так и сухие силовые трансформаторы имеют ряд преимуществ и недостатков.

Для силовых масляных трансформаторов допускается длительная перегрузка по току любой обмотки на 5% номинального тока ответвления, если напряжение на ответвлении не превышает номинального [3].

Допустимые перегрузки сухих трансформаторов устанавливаются заводской инструкцией изготовителя. На практике сухие трансформаторы стараются не перегружать.

В соответствии с [4] в аварийных режимах допускается кратковременная перегрузка силовых трансформаторов сверх номинального тока при всех системах охлаждения независимо от длительности и значения предшествующей нагрузки и температуры окружающей среды в пределах, указанных в таблице 1.

Таблица 1. Допустимая кратковременная перегрузка трансформаторов

Масляные трансформаторы					
Перегрузка по току, %	30	45	60	75	100
Длительность перегрузки, мин	120	80	45	20	10
Сухие трансформаторы					
Перегрузка по току, %	20	30	40	50	60
Длительность перегрузки, мин	60	45	32	18	5

Трансформаторы как оборудование повышенной опасности должны располагаться в отдельных помещениях, доступ в которые возможен только квалифицированным специалистам. Но при проведении периодических осмотров оборудования трансформаторных подстанций риск поражения электрическим током выше в случае применения сухих трансформаторов, поскольку у масляных трансформаторов обмотки дополнительно расположены в герметичной емкости, заполненной жидким диэлектриком. Для обеспечения дополнительной безопасности металлические корпуса трансформаторов заземляются.

Одной из причин выхода из строя силовых трансформаторов является отгорание контактов в местах соединения выводов трансформатора с ошиновкой. Для предотвращения такой аварийной ситуации необходимо проводить периодические осмотры и обслуживание контактных соединений.

При нарушении контакта выводов трансформатора с ошиновкой и перегреве выводов трансформатора возможно разрушение керамических изоляторов и разгерметизация масляного бака. За счет того, что масло эффективно отводит тепло, процесс разрушения контактного соединения протекает медленно, и при своевременно проведенном осмотре можно выявить данную неисправность и принять меры к ее устранению. В сухих трансформаторах перегрев токоотвода практически сразу приводит к выходу из строя обмоток из-за худшего охлаждения.

Кроме того, при эксплуатации трансформаторов сухого типа с монолитными обмотками возможно появление в изоляции микротрещин при нагреве из-за различного коэффициента теплового расширения материалов обмоток и изоляции, при этом в микротрещинах при высоком напряжении может возникать тлеющий разряд, который может перейти в межвитковое и межслойное замыкание обмоток. Данное явление может послужить причиной полного выгорания обмоток и выхода трансформатора из строя.

На стадии производства практически невозможно выявить микротрещины в литых обмотках трансформатора данного типа. Масляные трансформаторы лишены данного недостатка, к тому же масло хорошо отводит тепло, что предотвращает перегрев обмоток и возникновение межвитковых и межслойных замыканий.

Самым главным и известным недостатком сухих трансформаторов является их стоимость, которая превышает стоимость масляного трансформатора в полтора-два раза. Также к недостаткам данного вида оборудования можно отнести отсутствие опыта длитель-

ной эксплуатации и более или менее объективной статистики отказов и их причин. Имеют место отказы сухих трансформаторов при эксплуатации в условиях низких температур и резкопеременных нагрузок из-за разрушения обмоток вследствие недостаточной динамической стойкости. Инструкции производителей также не дают информации по скорости набора нагрузки и режимам прогрева обмоток [5].

Ремонтопригодность и возможность контроля внутреннего состояния обмоток по анализу трансформаторного масла являются несомненным преимуществом маслonaполненного трансформатора, т.к. залитые компаундом обмотки сухих трансформаторов ремонту не подлежат, их необходимо заменять в сборе [6].

На основании вышеизложенного невозможно сделать однозначный вывод об эффективности одного из приведенных типов силовых трансформаторов. Современные развивающиеся технологии позволяют компенсировать ранее проявляющиеся недостатки обоих типов трансформаторов. Решение о необходимости и возможности использования того или иного типа оборудования должно приниматься с учетом индивидуальных потребностей потребителя, условий эксплуатации и характера нагрузок энергопринимающих устройств.

Библиографический список

1. ГОСТ 982-80- Масла трансформаторные. Технические условия;
2. СП 256.1325800.2016. Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа, - Минстрой России, М.: 2016г.
3. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации.
4. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей.
5. Интернет-ресурс <https://mobile.ruscable.ru>
6. Интернет-ресурс: <https://news.elteh.ru>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДОРОДА В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА БУДУЩЕГО

А.А. Цибизов, А.А. Трубицын

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, alexkaratega@icloud.com*

Аннотация. В работе рассматриваются использование водорода, в качестве топлива, особенности его производства и применения, контрольные цифры различных стран.

Ключевые слова: водород, топливо, производство, современная экология, альтернативные источники питания, альтернативное топливо, топливные элементы.

USING HYDROGEN AS FUEL OF THE FUTURE

A.A. Tsibizov, A.A. Trubitsyn

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russian Federation, Ryazan, alexkaratega@icloud.com*

The summary. The work examines the use of hydrogen as a fuel, the peculiarities of its production and use, the control figures of various countries.

Keywords: hydrogen, fuel, production, modern ecology, alternative power sources, alternative fuel, fuel cells.

Одной из главных проблем современности является проблема экологии. Многие ученые ищут способы по снижению выброса углекислого газа в атмосферу от предприятий, электростанций, генераторов и автомобилей. Их поиск альтернативных источников энергии требует большого затрата времени и средств. Есть множество уже доступных способов, таких как ветровые установки, солнечные батареи, использование природного газа в качестве топлива. Но все они, к сожалению, имеют свои негативные факторы. К примеру, использова-

ние турбин в ветряных установках приводит к нарушению флоры и фауны окружающей среды.

На ближайшее десятилетие, одной из самых перспективных разработок альтернативных источников питания является производство водорода. Есть множество способов добычи водорода, одним из них является Производство водорода – это незаменимая часть водородной энергетики, которая является основа составляющей цикла жизни водорода. Производство необходимо, поскольку водород не встречается на Земле в чистом виде, а лишь с примесями других газов. Его же создание заключается в извлечении молекул водорода из других соединений при помощи химических методов.

Водород не является сам по себе источником энергии, он выступает в качестве средства преобразования иных источников энергии в химическую энергию, по форме представляющую резервуар с водородом, который впоследствии используется при его окислении. По своей сути в таком случае, водород будет схож по функциональным признакам с аккумуляторной батареей или же бак с бензином.

Одним из главных преимуществ водорода является разнообразие его добычи. Это позволяет обезопасить добычу в разных условиях и средах, а так же делает добычу водорода не зависимой от выбора сырья. В современном мире выделяют основные способы добычи, такие как:

1. Электролиз воды;
2. Паровая конвекция метана и природного газа;
3. Газификация угля;
4. Пиролиз;
5. Частичное окисление;
6. Биотехнологии.

Но только 4% водорода получают благодаря электролизу воды. Но этот способ рассматривается в Евросоюзе как самый перспективный для стран, которые крайне зависимы от импорта энергетических ресурсов. Согласно данным ПАО “Газпром” для получения 1 куб. м водорода методом пиролиза метана требуется всего 0,7–3,3 кВт·ч, а электролиза — 2,5–8 кВт·ч, то есть почти втрое больше. Цена производства водорода из воды во много раз превышает затраты на производство водорода из природного газа (по статистике, в 3-6 раз). Применение данного метода используется только тогда, когда необходимо получить чистый водород, без иных химических примесей.

Для производства из природного газа применяют метод парового и автотермического риформинга метана, что является в современном мире перспективной разработкой по получению водорода, и значительно дешевле технологии водного электролиза.

Главным элементом парового риформинга является трубчатая печь. Принцип работы заключается в том, что в печи метан, в присутствии катализатора, взаимодействует с паром, образует выделение смеси водорода, оксида углерода и диоксида углерода.

Следующим способом добычи водорода является газификация угля. Для этого было изобретена группа устройств, которые позволяют получить водород и синтез-газ.

Способ включает организацию в подземном газогенераторе окисления угольного материала кислородом, который генерируют непосредственно в зоне горения в результате термического разложения паров воды и экзотермической реакции взаимодействия алюминия с водой, который в первом варианте изобретения подают в зону горения подземного газогенератора в виде приготовленной суспензии порошкообразного алюминия в водной среде с $\text{pH} > 10$.

Недостатком данного способа являются высокие затраты электроэнергии на килограмм полученного водорода. Еще одним методом добычи водорода является пиролиз метана. Пиролиз – это есть термическое разложение органических и неорганических веществ. В

промышленных условиях реакция пиролиза происходит при температуре примерно равной 800-900 градусов Цельсия и при давлениях, равных атмосферному.

Остальные способы менее популярны на данный момент и требуют более точного исследования.

Согласно современной энергетической политике, основанной на том, что предприятия должны снижать выброс CO_2 в атмосферу, заводы, занимающиеся производством водорода, лидируют в снижении выбросов углекислого газа. Но это не исключает полное его отсутствие.

Резкое снижение выбросов водорода подразумевает Парижское соглашение, согласно которому все страны должны совершить переход к “зеленой” энергетике. Исходя из оценок Института Мировых Ресурсов, большинство выбросов CO_2 приходится на транспорт (15,9%), производство (18%), строительство (20,1%). Это означает, что помимо внедрения новых возобновляемых источников энергии, необходимо перевести все эти сферы на энергоресурсы, с низкой долей выброса углеводорода.

Водород идеально подходит для решения данной проблемы, так как водород при производстве выделяет пар, а пар – это вода.

В качестве доказательства актуальности перехода на водородную энергетику, стоит рассмотреть стратегии перехода на водородную энергетику других стран. Первая страна, огласившая стратегию перехода, стала Япония в 2020 году. Затем Южная Корея в 2019 году и Австралия. В 2020 году огласили свою стратегию большинство стран Евросоюза, а так же 12 октября 2020 года заявила о себе и Россия.

Но сразу перейти на “зеленую” энергию не получится. Поэтому необходим постепенный переход. К примеру, это использование газовых инфраструктур для хранения и перевозки газа. Можно добавлять 20% водорода к используемому газу, это снизит примерно до 7% выбрасываемого углеводорода.

Стоит все же рассмотреть, где будет использоваться водород в будущем. Самое простое – это транспорт. Некоторые страны уже давно используют автобусы на водородной тяге. К примеру, Норвежская стратегия подразумевает закупку 50 тысяч автомобилей на водородной тяге к 2024 году.

Многие мировые компании, такие как “Тойота”, еще давно представила свой гибридный автомобиль “Мирай” в котором помимо использования бензинового двигателя применялся водородный.

Помимо использования водорода в качестве топлива автомобилей, подразумевается использование его в качестве топлива для отопительных станций и электроэнергетических. Это важный аспект, так как большое количество CO_2 выделяется при производстве тепла на ТЭЦ и электричества для обычных домов, гипермаркетов, офисных помещений и т.п. Использование водорода подразумевает снижение выбросов примерно в 2-2,5 раза.

Так же водород будет применяться при строительстве, в качестве топлива для переносных генераторов, строительной техники и освещения.

В заключении необходимо сказать, что водород имеет преимущество над другими альтернативными источниками, так как солнечная и ветровая энергия разрушает флору и фауну окружающей среды, электричество требует больших заводов, которые выделяют огромное количество CO_2 . Поэтому в ближайшее будущее стоит за водородной промышленностью.

Библиографический список

1. Полякова Т.В. Состояние и перспективы развития водородной энергетики [Текст] / Полякова Т.В. // Вестник МГИМО. – 2012. - №22. – С. 156-164.
2. Э. Э. Шпильрайд, С. П. Малышенко, Г. Г. Кулешов. Введение в водородную энергетику. М.: Энергоатомиздат, 1984 г., - 256 с.
3. Дей Р. Водород - устойчивое энергетическое решение // Мир стандартов. – 2007. – № 1. – С. 82-84.
4. Макашкин Л. Л. Освоение новых источников энергии // В мире науки. – 2006. – № 9. – С. 86-89
5. Клямкин С. Н. Водородная энергетика: достижения и проблемы / С. Н. Клямкин, Б. П. Тарасов // Возобновляемые источники энергии. Вып. 5 : 6 Всерос. науч.-молодежная школа, Москва, 26-27 нояб. 2008 г. – М., 2008. – С. 147-157.

УДК 620.92; ГРНТИ 44.01.11

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СЕТИ НА СЛУЖБЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

П.М. Закалюкина, М.Н. Махмудов, В.В. Титова, Е.Р. Федорова

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань maratmn77@mail.ru*

Аннотация. В данной статье представлены возможные перспективы развития электроэнергетики в процессе цифровой трансформации. Приведен региональный пример внедрения «умных» счетчиков электроэнергии

Ключевые слова: интеллектуальные сети, «умные» счетчики, информационные системы.

INTELLIGENT NETWORKS IN THE SERVICE OF THE ELECTRIC POWER INDUSTRY

P.M. Zakalyukina, M.N. Makhmudov, V.V. Titova, E.R. Fedorova

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, maratmn77@mail.ru*

The summary. This article presents possible prospects for the development of the electric power industry in the process of digital transformation. A regional example of the introduction of "smart" electricity meters is given

Key words: intelligent networks, smart meters, information systems.

Современное состояние электроэнергетического парка страны, в большей её части требует технологического перевооружения. Это связано, в первую очередь, с морально и физически изношенностью оборудования. Во вторых, возрастающие современные требования к новой энергетической инфраструктуре и непрерывно растущее производство и потребление электроэнергии заставляет нас посмотреть на эту проблему с другой стороны. Имеющиеся, на сегодняшний день, технологии позволяют сформировать новый подход к построению и модернизации сетей генерации, распределения и потребления электроэнергии, предполагающий глубокое внедрение информационных и коммуникационных сетей и технологий для управления потоками электроэнергии и получения информации на всех этапах технологического цикла. Таким образом, в настоящее время Российская энергетическая отрасль находится в «переходном процессе» связанного развитием информационных систем, цифровизации процессов производства, распределения и потребления энергии. Одним из главных трендов является концепция «интеллектуальных» электроэнергетических сетей. В рамках Концепции «Цифровая трансформация 2030» - определены цели и задачи, которые являются важным посылом для внедрения интеллектуальных систем управления на базе цифровых технологий в электроэнергетическом комплексе России. [1].

Развитие концепции «интеллектуальной» сети обусловлено двумя основными факторами. С одной стороны, открываются широкие возможности для эффективного внедре-

ния активного силового электрооборудования, повышающего маневренность и управляемость сети и позволяющего изменять ее топологические параметры. С другой стороны, для управления энергосетями постепенно формируется мощная технологическая инфраструктура, обеспечивающая доступ к единому информационному пространству для всех сетевых компаний и предоставляющая, таким образом, возможность своевременного и согласованного управления режимом работы сети. [2].

Одним из элементов «интеллектуальной» сети являются – «умные» счетчики. Данные интеллектуальные приборы учета электроэнергии, которые обладают специфическим функционалом, который позволяет автоматизировать процесс сбора и обработки информации, исключив человеческий фактор. До конца 2021 года можно было использовать любые приборы учета, соответствующие ранее установленным законодательством требованиям точности.

С 1 января 2022 года должны использоваться только приборы учета, соответствующие минимальным требованиям, установленным новым законодательством: обеспечивающие передачу показаний и результатов измерений, информации о количестве и иных параметрах электрической энергии, об ограничениях режима потребления и возобновлении подачи, позволяющие дистанционно устанавливать и изменять тарифные зоны, получать данные о параметрах настройки, сохранять архив данных, оповещать о возможных недостоверных данных. При этом выбор производителя и конкретных моделей остается за гарантирующим поставщиком/сетевой организацией и государством не регулируется.

В Рязани, с 1 июля 2020 года ООО «Рязанской городской муниципальной энергосбытовой компании» (ООО «РГМЭК») как гарантирующий поставщик электроэнергии приступило к установке (замене) «умных» счетчиков Рис 1. В рамках проекта планируется установить около 8,5 тыс. приборов. Согласно федерального законодательства, установка (замена) «интеллектуального» оборудования должна осуществляться за счет средств поставщика электроэнергии.



Рис. 6. Вариант размещения «умного» счетчика в квартирном электрощите

Прибор учета нового поколения позволяет решить ряд задач, начиная с дистанционного съема показаний и передачи их гарантирующему поставщику без участия потребителя. В общей сложности счётчики передают 27 параметров, в том числе выступают

и в качестве датчиков аварийной ситуации в сети, на основе которых диспетчер моментально узнает о месте повреждения в электрической схеме.

Позитивный эффект от замены оборудования замечен не вооруженным глазом, в многоквартирных домах оснащенных интеллектуальными приборами учета - увеличился полезный отпуск электроэнергии (на 3%), а также снизился уровень потерь электроэнергии (на 4%).

Таким образом, внедрение интеллектуальных систем позволит существенно повысить эффективность и надёжность работы объектов электроэнергетики:

- дистанционно передавать данные счетчика энергетикам.
- удаленно контролировать наличие или отсутствие напряжения у потребителя и фиксировать нарушения в работе сети;
- дистанционно вводить режим ограничения подачи электроэнергии и отменять его;
- устанавливать и менять тарифные зоны (например, если клиент выберет тариф «день\ночь»);
- собирать статистику потребления, и на ее основании предлагать клиентам более выгодные для них схемы расчета объема потребления;
- оповещать о возможных недостоверных данных;
- снизить число отказов, т.е. повысить готовность;
- снизить недовыработки энергии, т.е. снизить убытки, связанные с отказами;
- управлять нагрузкой генераторов с учетом их технического состояния;
- достаточно быстро возвращать капитал за счет предупреждения отказов генераторов.

Библиографический список

1. Концепция Цифровая трансформация 2030, Москва 2018.
2. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года, утверждена Распоряжением Правительства Российской Федерации № 1715-р от 13.11.2009 г. [Электронный ресурс]. URL: <http://minenergo.gov.ru/node/1026>

УДК 620.9.001.5; ГРНТИ 44.01.77

ПОЗИЦИОННО-СЛЕДЯЩАЯ СИСТЕМА С НАБЛЮДАТЕЛЕМ СОСТОЯНИЯ НА БАЗЕ БЕСКОНТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

О.А. Киселёва, С.А. Винокуров, Д.Д. Киселёва

*Воронежский государственный технический университет,
Российская Федерация, Воронеж, kis.ola@mail.ru*

Аннотация. В работе рассматривается вопрос применения наблюдателя состояния в позиционно-следающей системе с бесконтактным двигателем постоянного тока с адаптивным регулятором скорости. Приведены результаты исследования, полученные с помощью математической модели.

Ключевые слова: позиционно-следающая система, наблюдатель состояния, бесконтактный двигатель постоянного тока

POSITIONAL-TRACKING SYSTEM WITH A STATUS OBSERVER BASED ON A NON-CONTACT DC MOTOR BY

O.A. Kiselyova, S.A. Vinokurov, D.D. Kiselyova

*Voronezh State Technical University,
Russian Federation, Voronezh, kis.ola@mail.ru*

Annotation. The paper deals with the use of a state observer in a position-tracking system with a non-contact DC motor with an adaptive speed controller. The results of the study obtained with the help of a mathematical model are given.

Keywords: position-tracking system, status observer, non-contact DC motor

Применение бесконтактных двигателей постоянного тока (БДПТ) в позиционно-следящих системах (ПСС) требуют поиска оптимального управления с учетом формирования дискретного поля [1]. Переход из режима разгона в режим торможения БДПТ осуществляется разными методами, среди которых необходимо выбрать наиболее целесообразный для данного технологического процесса. На рисунке 1 приведена структурная схема математической модели позиционно-следящей системы на базе БДПТ с наблюдателем состояний и адаптацией регулятора по нагрузке.

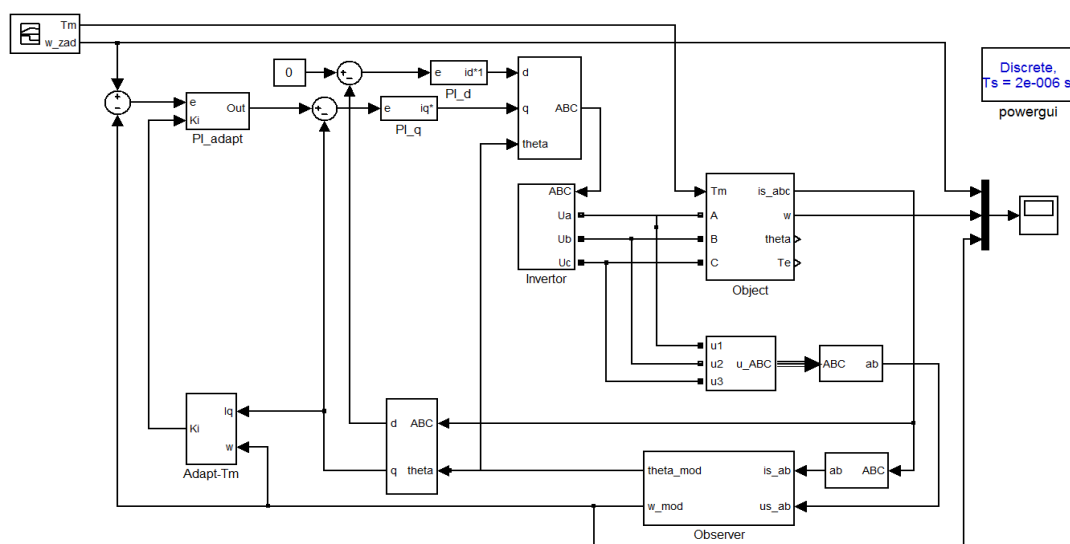


Рис.1. Структурная схема математической модели позиционно-следящей системы на базе БДПТ

Обеспечение режима торможения в позиционно-следящей системе (ПСС) задача многокритериальная, так как она должна обеспечить позиционирование каждый раз в новую выходную координату с заданными динамическими и энергетическими характеристиками. При этом необходимо обеспечить требуемый закон изменения ускорения и его первой производной. Это связано с тем, что ускорение формирует силу воздействия, а его производная рывок.

Процесс торможения должен быть управляемым, а управление в ПСС используется импульсное, поэтому возникает вопрос, связанный не только с частотой и длительностью формируемых импульсов, но и с чередованием ведущих базовых и нулевых векторов [3].

Сложность алгоритма управления торможением может привести к запаздыванию в системе, а это влияет не только на точности, но и на устойчивости всей ПСС, даже не смотря на относительно высокое быстродействие контроллеров. Проведенные исследования показали, что в БДПТ замена двух последовательных импульсов одним, с одинаковыми относительными длительностями сигналов и реальными длительностями импульсов не эквивалентны при формировании тока в в двигателе, и как следствие - электромагнитного момента [4].

Рассмотрим использование пропорционально-интегральный регулятора скорости с адаптивной структурой и переменным коэффициентом интегральной части в ПСС. Управляющим входом является величина внешнего механического момента, оцененная по формуле (1)

$$K_M = 1.5 \cdot p \cdot I_q \cdot \psi - \left(F \cdot \omega + J \frac{d\omega}{dt} \right), \quad (1)$$

где K_M — коэффициент глубины корректирующей обратной связи по величине нагрузки;

F — объединенное вязкое трение ротора и нагрузки;

p — число пар полюсов;

J — момент инерции ротора и нагрузки.

Корректирующая обратная связь используется для автоматической подстройки K_i в зависимости от расчетного значения механического момента T_m .

В замкнутой ПСС с П-регулятором величина возникающей статической ошибке пропорциональна амплитуде подключенного внешнего механического момента. Исходя из этого вес интегральной части так же должен подстраиваться пропорционально величине нагрузки и полностью отключаться при ее отсутствии. На рисунке 2 показаны переходные процессы в ПСС на базе БДПТ с наблюдателем состояний.

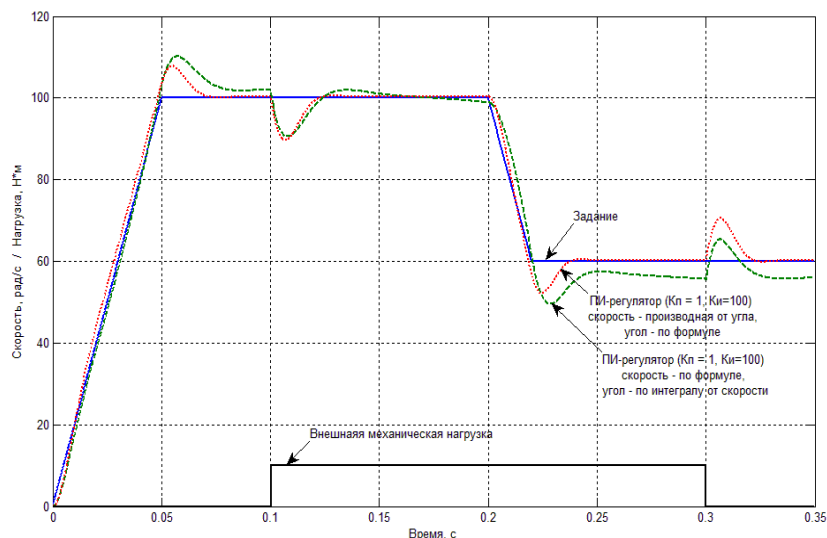


Рис. 2. Переходные процессы в ПСС на базе БДПТ с наблюдателем состояний

На рисунке 2 показаны переходные процессы при адаптивных регуляторах скорости.

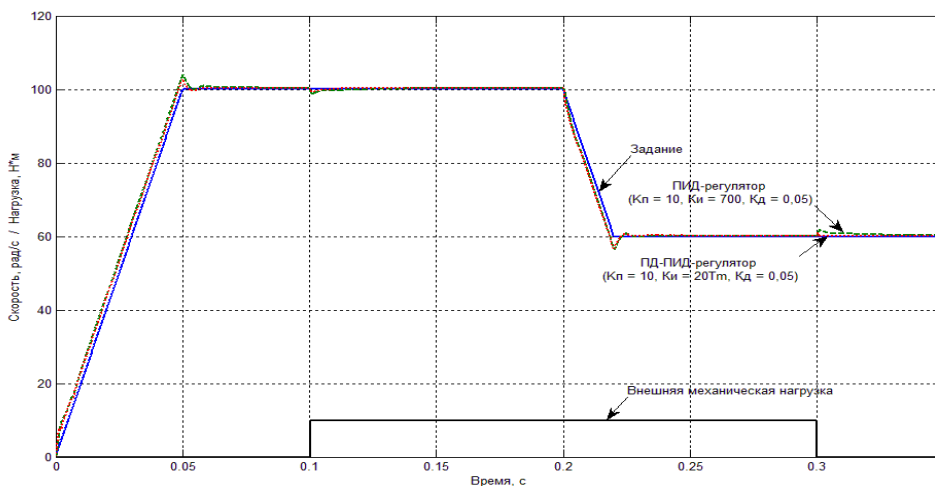


Рис.2. Переходные процессы с адаптивным ПИД-регулятором

В таблице 1 приведены показатели качества переходных процессов в ПСС на базе БДПТ с адаптивным П-ПИ-регулятором ($K_p = 10$; $K_i = 6 \cdot T_m$), в таблице 2 - с адаптивным П-ПИ-регулятором ($K_p = 10$; $K_i = 6 \cdot T_m$)

Таблица 1. Показатели качества переходного процесса в ПСС с адаптивным П-ПИ-регулятором ($K_p = 10$; $K_i = 6 \cdot T_m$)

Показатель качества переходного процесса	Вид эксперимента			
	Выход на номинальную частоту вращения	Подключение нагрузки	Изменение заданной частоты вращения	Отключение нагрузки
Динамическая ошибка регулирования, Δ	4 рад/с	3 рад/с	4 рад/с	1 рад/с
Время регулирования, $t_{рег}$	0,005 с	0,005 с	0,007 с	0,001 с
Перерегулирование	4 %	0 %	4 %	0 %
Колебательность (отношение амплитуды третьего колебания к амплитуде первого)	10 %	0 %	15 %	0 %

Таблица 2. Показатели качества переходного процесса в ПСС с адаптивным ПИ-ПИД-регулятором ($K_p = 10$, $K_i = 20 \cdot T_m$, $K_d = 0,05$)

Показатель качества переходного процесса	Вид эксперимента			
	Выход на номинальную частоту вращения	Подключение нагрузки	Изменение заданной частоты вращения	Отключение нагрузки
Динамическая ошибка регулирования, Δ	3 рад/с	1 рад/с	3,5 рад/с	1 рад/с
Время регулирования, $t_{рег}$	0,004 с	0,005 с	0,007 с	0,001 с
Перерегулирование	3 %	0 %	3,5 %	0,2 %
Колебательность (отношение амплитуды 3 колебания к амплитуде 1)	6 %	0 %	6 %	15 %

Применение пропорционально-интегрального регулятора скорости с адаптивной структурой и переменным коэффициентом интегральной части в ПСС, построенного на базе БДПТ позволяет получить качественные динамические характеристики и обеспечить требуемую точность позиционирования. Обеспечение в ПСС локально-оптимального управления позволит улучшить не только динамические, но и энергетические показатели всей системы.

Библиографический список

1. Киселёва О.А., Винокуров С.А., Киселёва Д.Д. Локально-оптимальное управление в электромеханической системе с бесконтактным двигателем постоянного тока. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(1). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=xxx> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.32.1.xxx
2. Винокуров, С.А., Киселёва, Н.И. Рубцов. Эволюция состояния наблюдателя от импульса к импульсу в электроприводе с бесконтактным двигателем постоянного тока. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2019. Т. 7. № 4 (27). С. 25-26.
3. Киселёва Д.Д., Гриненко Н.И., Винокуров С.А. Управление дискретным вращающимся полем бесконтактного двигателя постоянного тока в позиционно-следящих электромеханических системах. *Студент и наука*. 2021. № 1 (16). С. 44-47.
4. Киселёва О.А., Винокуров С.А., Попова Т.В. Дискретный эквивалент идеальному векторному управлению бесконтактным двигателем постоянного тока. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2017;1(16):16.

УДК 620; ГРНТИ 44.29.31

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПЕРАТИВНО-ДИСПЕТЧЕРСКОГО ПЕРСОНАЛА

А.А. Донских

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, alexs.masterov@inbox.ru*

Аннотация. В работе рассматриваются методика повышения эффективности оперативно-диспетчерского персонала с использованием демоверсии программного комплекса TWR-12. Приводятся достоинства и недостатки данной программы, описание общего алгоритма разработки тренировочного процесса, а также дополнительная оценка качества проводимых в данном комплексе тренировочных оперативных переключений.

Ключевые слова: бесплатная версия программного комплекса TWR-12, оперативные переключения, диспетчерский персонал.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF OPERATIONAL AND DISPATCHING PERSONNEL

A.A. Donskih

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, alexs.masterov@inbox.ru*

The summary. The paper considers a technique for improving the efficiency of operational dispatch personnel using a demo version of the TWR-12 software package. The advantages and disadvantages of this program are given, a description of the general algorithm for developing the training process, as well as an additional assessment of the quality of the training operational switching carried out in this complex.

Keywords: free version of the TWR-12 software package, operational switching, dispatching personnel.

Одной из главных проблем в электроэнергетике является проблема возникновения аварийных ситуаций при проведении оперативных переключений. Подавляющее число всех аварий, включающих в себя отказ оборудования, происходит из-за неправильных действий диспетчерского персонала.

При проведении сложных переключений, с большим количеством операций, многократно повышается вероятность совершения диспетчером ошибки, которая может стать фатальной не только для дорогостоящего оборудования, но и человеческой жизни. Истинный представитель данной профессии должен обладать не только внушительным багажом знаний, в его обязанности входит видеть все возможные варианты развития событий при различном алгоритме оперативных переключений. Данная способность приходит с опытом, а большое количество проведённых оперативных переключений станет для неё отличным подспорьем. Но прежде чем приступить к переключениям на реальных энергообъектах, необходимо во время обучения совершать комплексные тренировки в симуляторе.

Оптимальным решением для этой задачи станет комплекс программ TWR-12. Этот комплекс будет полезен не только молодым специалистам, но и действующим работникам оперативно-диспетчерского персонала, а также станет надёжным подспорьем для улучшения профессиональных навыков.

В данной статье будет рассмотрена бесплатная демоверсия. TWR-12 отвечает основным требованиями современного и интуитивно доступного тренажера по оперативным переключениям:

- Простота интерфейса программы
- Универсальность в плане создания схем, элементов, бланков оперативных переключений
- Возможность установки временного регламента для операций и тренировки в целом

- Оценка качества операций по оперативным переключениям, в 5-бальном эквиваленте
- Визуализация переключения оборудования
- Упрощение процесса аккредитации оперативно-диспетчерского персонала
- Наличие функционала, включающего в себя цепи релейной защиты и автоматики

Описание программного комплекса

Тренажер TWR-12 является набором программ для создания тренировок по оперативным переключениям. Он имеет большую базу стандартных элементов, возможность создания схемы любой сложности и класса напряжения, доступный для интуитивного восприятия дизайн. Все перечисленные ранее качества дают право называться TWR-12 современным тренажером для подготовки диспетчерского персонала.

В комплекс программ TWR-12 входят две программы: TWR-12 CAD и TWR-12 TRENING. TWR-12 CAD это графический редактор для создания схемы. TWR-12 TRENING является программой для организации тренировочного процесса на основе схемы выполненной в TWR-12 CAD, в TWR-12 TRENING прописывается порядок производства оперативных переключений, устанавливается количество баллов за операцию, происходит работа с цепями релейной защиты и автоматики.

Бланк переключения созданный в программе TWR-12 TRENING имеет определённый набор констант (оперативное состояние каждой единицы оборудования схемы до начала тренировки), а порядок выполнения тренировочных операций содержит логические элементы “Булевой алгебры”.

Разработка тренировки в TWR-12

Процесс разработки тренировки сводится к записи порядка переключений в машинный код программы TWR-12 TRAINING для типовой схемы, созданной в программе TWR-12 CAD. Каждая операция в программном бланке переключений называется правилом, в структура правила входит запись количества баллов за операцию, описание типа правила, наличие вариативности при данном этапе переключений.

Весь порядок переключений и исходное состояние каждого элемента схемы до переключений хранятся в специальном файле для каждой тренировочной схемы TWR-12 TRAINING. Этот файл называется программным бланком проведения тренировки. Изначально в этом файле хранится только исходное состояние оборудования схемы.

Все операции из обычного бланка переключений должны быть переведены в формат программного бланка проведения тренировки TWR-12 TRAINING. Также добавляется начисление или снятие баллов за выполнение или пропуск операции. При желании можно на схеме организовать вывод текстовых сообщения при старте и завершении тренировки, анимировать процесс оперативных переключений, путём добавления видеороликов при коммутации элементов.

Если при проведении оперативных переключений возникнут трудности, возможно включение функции вывода подсказок для дальнейших действий. Данная функция будет активной только в режиме обучения. При проведении контрольных тренировок она доступна не будет.

Методика повышения эффективности

Стандартный функционал демоверсии программы позволяет на уровне составления оперативного бланка будущих тренировочных переключений задать приоритет проводимой диспетчером операции. Всего есть три типа программного приоритета:

- Альтернативная операция с контролем порядка выполнения
- Обязательная
- Обязательная со строгим порядком выполнения

Оценка каждой операции задаётся в бальном эквиваленте. Количество баллов за операции можно установить в режим автоматического расчёта, т.е. количество баллов будет рассчитываться из суммарного числа проводимых операций, либо выбирать количество баллов за каждую операцию отдельно.

Так же имеется возможность установить для операции особо состояние, которое в случае пропуска данной операции приводит к незачёту всего тренировочного оперативного переключения.

Исходя из вышесказанного, можно прийти к выводу, что функционал программного комплекса TWR-12 позволяет проводить оценку проведённых тренировочных оперативных переключений, но всегда могут возникнуть спорные моменты о удовлетворительном проведении тренировочных оперативных переключений.

В частности, когда все операции выполнены в нужном порядке, но пропущено определённое проверочное действие. При таком развитии событий сложно сказать, выполнена тренировка или нет, всё зависит от последствий. Например, если отсутствует проверка наличия напряжения на элементе, который может в определённое время находиться под напряжением, халатность в таком случае может привести к трагическим последствиям для выполняющего коммутацию персонала.

В процессе работы с демоверсией программного комплекса была разработана оптимальная структура оценки тренировочного процесса, которая приведена в таблице 1.

Таблица 1. Уровни оценки тренировочных оперативных переключений для TWR-12

Уровни оценки	
Первый уровень	Пропуск любой коммутационной операции, входящей в бланк оперативных переключений, приводит к незачёту всей тренировки, за пропущенные проверочные действия снимаются баллы, режим работы в программе TWR-12 - “контрольная тренировка”, возможность вызвать подсказки отсутствует.
Второй уровень	Оценка лицом, контролирующим тренировочные переключения: анализ пропущенных проверочных операций, вынесение итогового решения о зачёте тренировки.

Благодаря данной таблице можно производить оценку тренировочных переключений в TWR-12 на более высоком уровне, по сравнению со стандартной оценкой, а это несомненно положительно скажется на эффективности работы оперативно-диспетчерского персонала.

Заключение

На данный момент все алгоритмы для автоматизированной системы диспетчерского управления создаются человеком и даже после завершения программы цифровой трансформации ни один автоматизированный объект не застрахован от аварийных ситуаций, при которых оперативные переключения будут производиться как на обычном объекте электроэнергетики.

Следовательно, задача повышения качества и эффективности обучения диспетчерского персонала стоит на первом месте. Внедрение тренажерного комплекса TWR-12 поможет снизить процент ошибок при проведении реальных оперативных переключений переключениях.

Библиографический список

1. Баль В.Б. Режимы работы электрооборудования станций и подстанций – М.: "Нестор-история", 2015. – 256с
2. Пилипенко Н.В., Сиваков И.А. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности инженерных систем и сетей. Учебное пособие. – М.: НИУ ИТМО, 2013. – 274 с.

УДК 620; ГРНТИ 44.29.31

АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ПОЖАРНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ И ОХРАНЫ НА ПРЕДПРИЯТИИ

М.П. Лисин

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, djmaxdrive@mail.ru*

Аннотация. В статье рассматриваются идея и современный подход к анализу и разработке системы пожарной безопасности на объектах с используемыми энергетическими единицами и обеспечению их сохранности.

Ключевые слова: пожарная сигнализация, безопасность труда, безопасность энергетической системы, техническое задание, расчёт количества единиц, предприятие.

ANALYSIS AND DEVELOPMENT OF AN EFFECTIVE FIRE ALARM AND SECURITY SYSTEM AT THE ENTERPRISE

M. P. Lisin

*Ryazan State Radiotechnical University named after V.F. Utkin,
Russian Federation, Ryazan, djmaxdrive@mail.ru*

Annotation. The paper discusses the idea and modern approach to the analysis and development of a fire safety system at facilities with used energy units and ensuring their safety.

Keywords: fire alarm, labor safety, energy system safety, terms of reference, calculation of the number of units, enterprise.

В наше время энергетическая система представляет собой сложный и многогранный объект для контроля и управления при различных режимах работы оборудования. Стоит отметить, что каждый энергообъект уникален по своей структуре и обладает определенными функциональными особенностями, своей, присущей только ему, спецификой. Из всего спектра задач, решаемых в энергосистемах, одними из частых являются задачи по контролю за состоянием каждой единицы, а в частности, при отсутствии человеческого фактора, обеспечению пожарной безопасности. Особенно это важно на больших заводах и предприятиях, где быстрая локализация очага возгорания играет решающую роль при предотвращении дальнейшего повреждения (разрушения) энергосистемы и оборудования.

О полном исключении человеческого фактора говорить нельзя, так как, помимо обслуживающей организации, контролирующей состояние оборудования пожарной сигнализации ежемесячно, и в соответствии с поданными заявками, необходим контроль в реальном времени хотя бы в дневное время, так как на предприятии или заводе находятся люди.

Примерно четверть всех аварийных ситуаций, включающих в себя отказ оборудования энергосистем, происходит из-за набора обстоятельств, таких как неправильная эксплуатация электромашин и станков, их устаревание, несвоевременное обслуживание и ремонт, возможно, нарушения при монтаже и вводе в эксплуатацию.

При возникновении возгорания или задымления, без скорейшего устранения их причины, условная величина энергосистемы может вызвать цепную реакцию выхода из строя соседних единиц, а иногда целого комплекса и ветки питания большой системы. Хуже всего, если при этом пострадают люди, работающие на данном объекте.

Упомянув вышесказанное о невозможности полного исключения человеческого фактора, необходима дневная организация контроля состояния и работоспособности системы пожарной безопасности в лице того же охранника, который обладает необходимыми знаниями и навыками, для современного и оперативного реагирования на создавшуюся ситуацию.

Истинный представитель данной профессии должен обладать не только внушительным багажом знаний, в его обязанности входит видеть все возможные варианты развития событий при различном стечении возникших обстоятельств. Данная способность, к сожалению, приходит с опытом, который не хотелось бы наблюдать часто. Прежде чем приступить к контролю на реальных энерго-объектах, необходимо своевременно проходить подготовку и обучение.

Для максимального контроля за пожарной безопасностью энергетической системы предлагается использовать комплексную систему с использованием адресных и аналоговых датчиков и приборов контроля за их состоянием. Именно такая комбинация сыграет решающую роль при экономическом расчёте целесообразности проекта и выполняемых работ в целом. Для примера выберем остановив на, зарекомендовавшей себя, интегрированной системе пожарной безопасности и охраны "Орион". Данная система обеспечивает:

- 1) Сбор, обработку, передачу, отображение и регистрацию извещений о состоянии шлейфов пожарной сигнализации;
- 2) Максимальная информативность о локализации очага возгорания, задымления
- 3) Управление пожарной автоматикой объекта;
- 4) Взаимодействие с инженерными системами зданий;
- 5) Модульную структуру, позволяющую оптимально оборудовать как малые, так и очень большие распределенные объекты;
- 6) Защищенный протокол обмена по каналу связи между приборами.

Актуальность темы данной статьи состоит в том, что к настоящему моменту времени лишь небольшое количество уже существующих объектов оборудованы системами безопасности, а в частности, как основополагающее, пожарной сигнализацией. Проблема состоит в монтаже оборудования, который затрудняется уже имеющимися на заводах и предприятиях энергетическими единицами, такими как станки, электромшины, электро-шкафы, кабинеты ввода силовых шин, промежуточных распределителей, рабочих мест работников, оборудованные электроприборами. Для максимальной экономии средств, количества устанавливаемого оборудования, коммутационных величин, времени монтажа и применяется комплексные методы.

Следовательно, задача обеспечения безопасности людей и энергосистем стоит на одном из первых мест. Внедрение интегрированной адресно-аналоговой системы пожарной

безопасности и охраны позволит обеспечить сохранность жизни людей, энергетических единиц и систему в целом.

Главной целью является анализ, проектирование и создание модели системы пожарной сигнализации на производственном предприятии.

Для начала производится анализ и назначение непосредственно объекта. Для комплексного подхода к задаче используется некий отработанный порядок разработки проекта пожарной сигнализации и охраны.

После предварительного осмотра фиксируются параметры защищаемого и контролируемого объекта (характер здания и помещений – высота потолков, средняя температура воздуха, вентиляция). В зависимости от полученных данных и выявленных задач (способа выявления ситуаций, передачи информации на пульт, формирования сигналов), определяют основные технические решения.

Приемно-контрольные приборы

Стандартный проект пожарной сигнализации должен содержать количество и размещение:

- приемно-контрольных устройств – ПКУ;
- извещателей адресных, аналоговых, комбинированных;
- устройств управления и индикации;
- исполнительных устройств.

К документации прикладываются схемы расположения всех элементов ОПС на плане здания и участка, схемы подключений с трассами прокладки кабелей, сводят таблицы подключений и заводят кабельный журнал. На все элементы оборудования указывают спецификации, составляют смету на монтаж всего оборудования и первоначальную ведомость работ.

Местоположение и количество звуковых оповещателей, требует учета уровня звукового давления и акустического расчета параметров системы оповещения при пожаре. Для многоэтажных зданий в проект пожарной сигнализации включают поэтажные планы с указанием размещения пожарных извещателей во всех зонах контроля и автоматических установок пожаротушения.

Количество пожарных расширителей (РОП) определяется с учетом числа пожарных и охраняемых извещателей (ИО и ИП), которые есть в здании, и расчетных возможностей конкретного РОП. Так, максимальное число ИП и ИО, которые может контролировать один РОП, обычно составляет 32, или 16 охранно-пожарных разделов. Параметры расширителя в конкретной системе программируются от ПК по интерфейсу RS-232 или RS-485. Отдельно обычно выводятся сигналы с извещателей входа в здание, периметра, тревожной сигнализации, сигнал «Пожар».

Количество расширителей также зависит от общей емкости системы и расстояний, на которых РОП способен эффективно воспринимать сигнал от извещателей и обмениваться сигналами с другими расширителями (от 25 до 400 м в зависимости от условий использования). Окончательный результат часто фиксируют после проведения испытаний на объекте.

Электроснабжение пожарной сигнализации

Системы ПС относятся к электроприемникам 1-й категории. Предусматривается наличие резервного источника, способного обеспечить работу системы в течение минимум 24 часов без поступления внешнего электроснабжения. Режим тревоги в режиме резервного питания должен функционировать в течение не менее 3 часов. Для ПС используются обычно БП-12/2 (БП-12/5), которые соответствуют всем необходимым требованиям.

Расчет нагрузки источника питания

Кабели охранной сигнализации прокладывают в отдельных коробах – они не должны находиться рядом с электропроводкой, где напряжение превышает 60 В. Минимальное расстояние между ними 40-50 см.

Системы ПС должны включать оборудование, которое соответствует санитарным нормам: не выделяет вредных веществ, не превышает допустимый уровень шума. По требованиям техники безопасности и охраны труда все элементы ПС должны быть доступны во время эксплуатации и обслуживания пожарной сигнализации, иметь ограждения токоведущих частей (если они находятся в пределах досягаемости), иметь автоматические выключатели и устройства «зануления» металлических элементов. Монтаж и обслуживание ПС имеют право осуществлять профильные организации с допуском к данному виду деятельности.

Все перечисленные выше операции можно сгруппировать для упрощения достижения поставленной цели и составить из них основные задачи:

1. Анализ состояния объекта
2. Формирование технического задания (ТЗ)
3. Выявление особенностей объекта
4. Составление первоначальной рабочей документации
5. Назначение необходимого оборудования
6. Расчёт количества оборудования в соответствии с ТЗ
7. Составление основы проектной документации
8. Монтаж, на основе правил и соблюдении норм
9. Пуско-наладка системы и выявление недочётов
10. Коррекция проектной документации.

В заключении хотелось повториться, что только грамотный комплексный подход позволит максимально эффективно подойти к поставленной задаче по обеспечению безопасности на объектах, а в частности на предприятиях.

Библиографический список

1. Рыжова В.А. Проектирование и исследование комплексных систем безопасности. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 156 с.
2. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок. Министерство труда и социальной защиты Российской Федерации. Приказ от 24 июля 2013 г. № 328н, Зарегистрировано в Минюсте России 12 декабря 2013 г. N 30593.
3. Федеральный закон "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" от 22.07.2008 N 123-ФЗ (последняя редакция)
4. Свод правил. Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты. СП 2.13130.2020 от 12.03.2020
5. "Системы противопожарной защиты. Нормы и правила проектирования" СП 485.1311500.2020 (утверждён приказом МЧС России от 31 августа 2020 г. N 628);
6. "Системы противопожарной защиты. Перечень зданий, сооружений, помещений и оборудования, подлежащих защите автоматическими установками пожаротушения и системами пожарной сигнализации. Требования пожарной безопасности" СП 486.1311500.2020 (утверждён приказом МЧС России от 20 июля 2020 г. N 539).

УДК 621.311; ГРНТИ 45.33.29

ОСОБЕННОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА И РЕКОНСТРУКЦИИ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Д.В. Трегубов

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, danila_tregubov@mail.ru*

Аннотация. В данной работе рассматриваются основные стадии строительства и реконструкции трансформаторных подстанций, аспекты выбора участка для строительства подстанции, принципы выбора современного оборудования и преимущества реконструкции трансформаторных подстанций.

Ключевые слова: трансформаторная подстанция, строительство трансформаторных подстанций, реконструкция трансформаторных подстанций, выбор современного оборудования.

FEATURES OF CONSTRUCTION AND RECONSTRUCTION OF TRANSFORMER SUBSTATIONS

D.V. Tregubov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, danila_tregubov@mail.ru*

Abstract. This paper discusses the main stages of construction and reconstruction of transformer substations, aspects of choosing a site for the construction of a substation, the principles of choosing modern equipment and the advantages of reconstruction of transformer substations.

Keywords: transformer substation, construction of transformer substations, reconstruction of transformer substations, selection of modern equipment.

Потребители электроэнергии могут быть удалены от источника электроэнергии на многие километры, что приводит к большим потерям на выходе. Для предотвращения влияния фактора расстояния на качество электроэнергии, можно увеличить сечение провода на линии, что в свою очередь снизит электрическое сопротивление и уменьшит потери. Однако, в данном случае возрастут финансовые затраты на строительство линии. Также, можно увеличить напряжение при передаче электроэнергии. В данной ситуации возникает необходимость строительства трансформаторных подстанций, которые необходимы для снижения входящего уровня напряжения до допустимых значений.

Трансформаторная подстанция – это электроустановка, предназначенная для приема, преобразования и распределения электрической энергии. В состав трансформаторных подстанций включается следующее оборудование:

- Силовые трансформаторы;
- Распределительные устройства;
- Устройства автоматического управления и защиты;
- Вспомогательные установки.

Трансформаторные подстанции подразделяются на понижающие и повышающие. Понижающие подстанции преобразуют входное напряжение в более низкое. Повышающие – в более высокое, необходимое для передачи электроэнергии.

Исходя из номинала напряжения и назначения, трансформаторные подстанции классифицируются на районные и местные. Районные подстанции передают электроэнергию от высоковольтных линий электропередачи на понижающие, которые, понизив напряжение до 6, 10 или 35 кВ, передают электроэнергию на местные подстанции, от которых осуществляется распределение энергии к потребителям [1].

Этапы строительства трансформаторных подстанций

Строительство трансформаторной подстанции выполняется в соответствии с техническим заданием – документом, предоставляемым заказчиком, в котором изложены необходимые параметры подстанции, требования к срокам исполнения проекта, участку исполнения и выбору оборудования. Учет текущих характеристик и прогнозирование будущих является значительным аспектом при проектировании подстанции. Конфигурация сети определяет следующие параметры подстанции:

- Плотность нагрузки;
- Потребность резервирования питания при неисправности генераторов;
- Возможность питания потребителей в летний сезон, при отключении отопления;
- Собственные нужды подстанции.

Участок для строительства подстанции определяется в соответствии с водным и земельным законодательством РФ, актами по охране окружающей среды и природопользованию. Также, необходимо руководствоваться схемой развития сети района и городской планировки. Местоположение строительства трансформаторной подстанции, как правило, выбирают в соответствии с близостью центра энергетических нагрузок, железнодорожных путей, автомагистралей для поставки необходимого оборудования. При выборе участка для строительства, нужно учитывать необходимую удаленность места строительства ТП от объектов инфраструктуры с учетом показателей шумности работы установки. Как правило, местами для строительства выбирают незаселенные земли, непригодные для сельского хозяйства. Участок не должен находиться на затопляемой территории, в местах оползней, проседания почвы, схождения снега, а так же других местах с наличием факторов, угрожающих безаварийному функционированию подстанции [2].

После согласования и утверждения проекта, следует подготовка к сооружению трансформаторной подстанции. Данный этап определяется поставкой необходимого оборудования, обеспечением необходимыми условиями его хранения, проверкой путей подъезда рабочего транспорта, планировкой территории месторасположения будущей трансформаторной подстанции. Последующие этапы строительства определяются в соответствии с классификацией подстанции.

Реконструкция трансформаторных подстанций

При эксплуатации трансформаторной подстанции с устаревшим оборудованием, сокращается КПД в работе данной подстанции, вследствие чего возрастают финансовые затраты для поддержания её работоспособности, а также возникает риск возникновения неисправностей.

Реконструкция трансформаторной подстанции – это процесс замены новым оборудованием физически и морально устаревшие компоненты подстанции, подвергшиеся износу. Реконструкция является оптимальным решением при использовании устаревших компонентов в условиях возрастающих объемов энергопотребления и позволяет предотвратить проблемы, связанные с функционированием подстанции, перебоями в электроснабжении потребителей и аварии, которые происходят при использовании устаревшего технического оснащения. Также, в городских условиях может быть затруднительно найти площадь для строительства новой трансформаторной подстанции, и единственным выходом является реконструкция старых подстанций [3].

Реконструкция трансформаторных подстанций включает следующие этапы:

- Проектные работы по реконструкции ТП;
- Организация и исполнение земельных и геодезических подготовительных мероприятий, связанных с подготовкой используемой площади;
- Подготовка коммуникационных сетей;

- Демонтаж устаревшего оборудования;
- Поставка и установка новых компонентов подстанции, соответствующих по своим характеристикам техническим требованиям;
- Монтаж современного оборудования;
- Пусконаладочные работы.

При реконструкции, в трансформаторных подстанциях происходит замена устаревших выключателей, изоляторов, разъединителей, ограничителей, трансформаторов тока и напряжения, и т.д. В старых подстанциях используются масляные выключатели, которые в данный момент сняты с производства, так как считаются морально и физически устаревшими. На замену им пришли вакуумные и элегазовые выключатели, которые отличаются простотой конструкции, высоким сроком эксплуатации (до 45 лет) и высокой надежностью. Элегаз (шестифтористая сера) характеризуется высокой электрической прочностью и высокими дугогасящими свойствами. Также, элегаз не воздействует на металлы и пластики, и не воспламеняется.

Измерительные трансформаторы, которые используются на подстанциях в течение 20-30 лет, не удовлетворяют необходимым характеристикам по классу точности. Современные трансформаторы, которые приходят на замену устаревшим, выполняются в герметичном корпусе и не требуют обслуживания, вследствие чего, снижается количество незапланированных ремонтов. Современные трансформаторы напряжения выпускаются с ёмкостными делителями, благодаря чему исключается вероятность возникновения феррорезонанса.

Вентильные разрядники, при реконструкции трансформаторной подстанции, заменяются на нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН), так как при длительной эксплуатации разрядников, ухудшаются их характеристики и снижается грозозащита. Главным преимуществом нелинейных ограничителей перенапряжений являются высокие показатели надежности. Уровни ограничения перенапряжений ниже приблизительно на 30-50%, чем у вентильных разрядников. Нелинейные ограничители перенапряжений отличаются высокой взрывозащищенностью, возможностью ограничивать внутренние перенапряжения, меньшими массогабаритными характеристиками. Кроме того, ограничители перенапряжений могут применяться в сетях постоянного тока.

Регистраторы срабатывания вентильных разрядников нуждаются в постоянном контроле персоналом. При перегорании плавких вставок, требуется ремонт разрядника, вследствие чего, основное оборудование будет выведено в ремонт. Данная ситуация исключается при использовании ОПН, которые не требуют постоянного обслуживания, но проведение осмотров остается необходимым.

Для установки современного оборудования, необходима разработка технических требований, соответствующих Национальным стандартам Российской Федерации, ко всем видам устанавливаемых компонентов трансформаторной подстанции.

После выполнения комплекса работ по замене устаревшего оборудования, необходимо проведение проверки соответствия актуальным нормативам санитарной и пожарной безопасности.

Реконструкция подстанции, в отличие от строительства, требует меньших финансовых расходов. Кроме этого, реконструкция обладает такими преимуществами, как:

- Более рациональное использование средств, чем при строительстве;
- Сокращение эксплуатационных затрат;
- Увеличение пропускной способности;
- Создание возможностей для технологического присоединения новых потребителей электроэнергии и повышения мощности трансформаторной подстанции.

Реконструкция подстанции создает возможность автоматизации систем релейной автоматики и защитной системы. Это способствует более качественному учету коммерческих затрат электроэнергии, контролю и диагностике исправности оборудования.

Библиографический список

1. Фролов, Ю. М. Основы электроснабжения : учебное пособие / Ю. М. Фролов, В. П. Шелякин. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 480 с;
2. В Щербаков, Е. Ф. Электроснабжение и электропотребление в строительстве : учебное пособие / Е. Ф. Щербаков, Д. С. Александров, А. Л. Дубов. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 512 сж
3. Реконструкция и техническое перевооружение распределительных электрических сетей : учебное пособие для вузов / В. Я. Хорольский, А. В. Ефанов, В. Н. Шемякин, А. М. Исупова. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 296 с.

УДК 537.533.79; ГРНТИ 47.29.39

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА МАГНИТНЫХ ЛИНЗ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕНТГЕНОВСКИХ ТРУБОК

Е.Ю. Грачев, И.А. Куланхин, Е.А. Козлов

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, i.kulanhin@yandex.ru*

Аннотация. В работе представлено программное приложение для расчета параметров магнитных линз электронно-оптической системы рентгеновских трубок. Приводится вид окна программного приложения и основные соотношения, применяемые для расчета.

Ключевые слова: рентгеновская трубка, соленоид, магнитные линзы.

DEVELOPMENT OF SOFTWARE APPLICATION FOR CALCULATION OF MAGNETIC LENSES OF ELECTRONIC-OPTICAL SYSTEM OF X-RAY TUBE

E. Y. Grachev, I. A. Kulankhin, E. A. Kozlov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, i.kulanhin@yandex.ru*

The summary. The paper presents a software application for calculating the parameters of magnetic lenses of an electron-optical system of X-ray tubes. The view of the software application window and the main ratios used for the calculation are given.

Keywords: X-ray tube, solenoid, magnetic lenses.

Одной из задач, возникающей при проектировании магнитной фокусирующей системы рентгеновской трубки, является расчет параметров соленоида, формирующий магнитное поле. Параметры соленоида определяют рабочие характеристики электронного пучка рентгеновской трубки, а именно диаметр пучка на мишени, и фокусное расстояние магнитной линзы.

Применяемые в электронно-оптической системе магнитные линзы конструктивно представляют собой соленоид, заключенный в панцирь, имеющий кольцевой зазор, где и происходит образование магнитного поля, осуществляющее фокусировку электронного пучка на мишени. На рис. 1 представлено схематичное исполнение соленоида выполненного в виде катушки индуктивности.

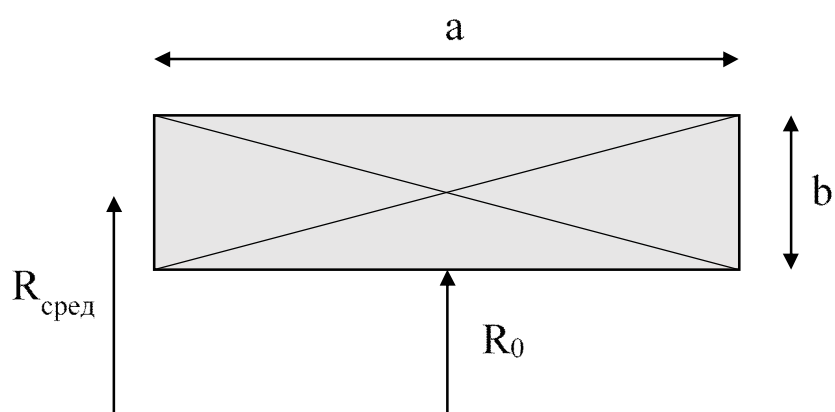


Рис. 1. Схема соленоида: a – длина намотки медного провода [мм], b – высота намотки [мм], $R_{\text{сред}}$ – средний радиус катушки [мм], R_0 – внутренний радиус сердечника.

Для упрощения решения задачи расчета и автоматизации процесса ввода входных параметров и вывода полученных результатов, а также возможности их визуализации в виде графических зависимостей, сначала была разработана программа в среде *MATLAB*. После чего добавлен пользовательский интерфейс приложения с использованием встроенного GUI модуля в *MATLAB* (Graphical User Interface – средства графического пользовательского интерфейса) [1]. Внешний вид интерфейса разработанной программы представлен на рисунке 2.

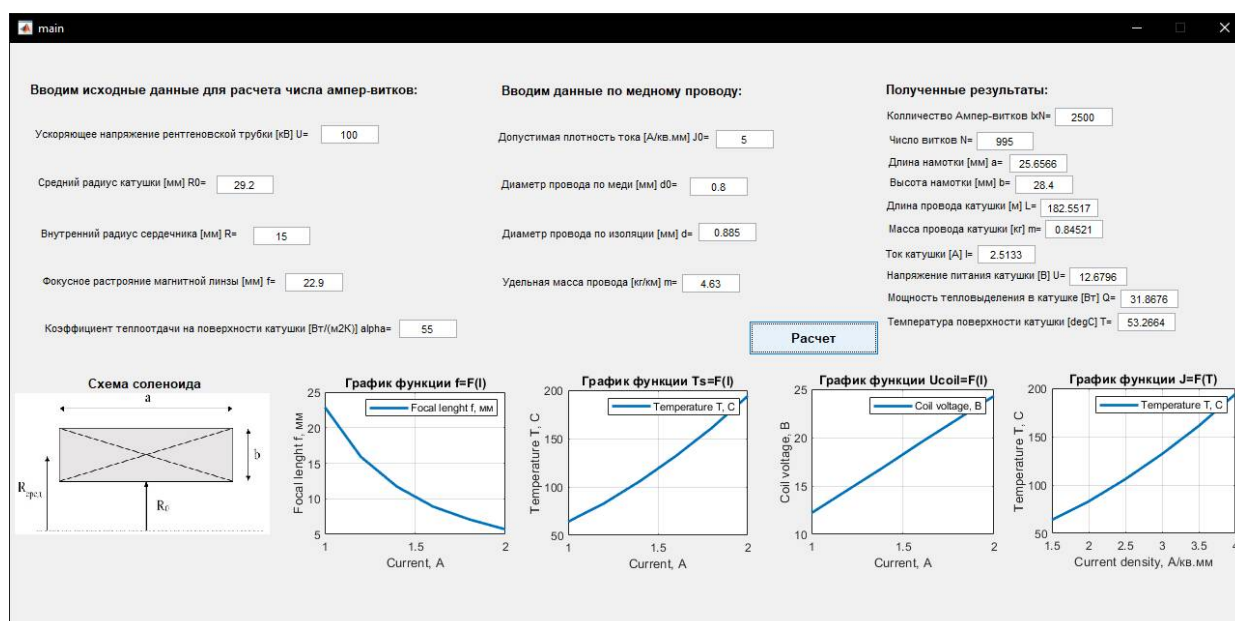


Рис. 2. Программа для расчета магнитной фокусирующей системы

Для работы в программе необходимо ввести исходные данные для расчета основных параметров соленоида. Данные для расчета числа ампер-витков: 1) ускоряющее напряжение рентгеновской трубки U_0 [кВ]; 2) средний радиус катушки $R_{\text{сред}}$ [мм]; 3) внутренний радиус сердечника R_0 [мм], 4) фокусное расстояние магнитной линзы f [мм]. Далее вводятся исходные данные по медному проводу: 1) допустимая плотность тока J_0 [А/мм²]; 2) диаметр провода по меди d_0 [мм]; 3) диаметр провода по изоляции d [мм]; 4) удельная масса провода m [кг/км]. Также для оценки температурного режима работы соленоида задается

коэффициент теплоотдачи на поверхности катушки α [Вт/м²К].

В ходе расчета программа позволяет вычислить количество витков соленоида обеспечивающее заданное фокусное расстояние магнитной линзы при заданном токе. В зависимости от выбранного диаметра провода, в совокупности с числом витков, вычисляются длина и высота намотки, а также электрические параметры необходимые для питания катушки. По рабочему току и напряжению вычисляется мощность тепловыделения и делается оценка температуры катушки.

Алгоритм расчета параметров соленоида основан на следующих соотношениях [2]:

$$NI_{\phi} = 10k \sqrt{\frac{U_0 R_{cp}}{f}}, \quad (1)$$

где N – число витков в катушке;

I_{ϕ} – ток фокусировки;

U_0 – ускоряющее напряжение рентгеновской трубки;

R_{cp} – средний радиус катушки;

f – фокусное расстояние магнитной линзы;

коэффициент пропорциональности $k = 0.6-0.75$, учитываемый в случае панцирного исполнения магнитной линзы.

Общее число витков в катушке выражаем через площади окна намотки S_{coil} и одного витка S_w соответственно:

$$N = \frac{0.84 S_{coil}}{S_w}. \quad (2)$$

Высота a и длина b окна намотки соленоида определяются исходя из заданных значений радиусов катушки и числа витков:

$$b = 2(R_{cp} - R_0), \quad (3)$$

$$S_w = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (4)$$

$$S_{coil} = 1.19 N S_w, \quad (5)$$

$$a = \frac{S_{coil}}{b} = \frac{0.15 \pi N d^2}{R_{cp} - R_0}, \quad (6)$$

где d – диаметр провода по изоляции.

Исходя из полученных значений среднего радиуса катушки и числа витков, можно вычислить общую длину и массу провода катушки. Длина L и масса M соответственно будут найдены как:

$$L = 2\pi R_{cp} N, \quad (7)$$

$$M = \frac{mL}{1000}. \quad (8)$$

Зная данные об общей длине и диаметре сечения провода по меди можно вычислить сопротивление катушки, падение напряжения, мощность источника питания и тепловыделение соответственно. По значению мощности P с учетом заданного коэффициента теплоотдачи α и площади всей боковой поверхности катушки $S_{\text{бок}}$ можно осуществить оценку температуры поверхности T_s :

$$P = I_{\phi}^2 R_{\text{coil}}, \quad (9)$$

$$T_s = T_0 + \frac{P}{\alpha S_{\text{бок}}}. \quad (10)$$

После расчета всех перечисленных соотношений производится построение четырех основных зависимостей:

$f = F(I_{\phi})$ – зависимость фокусного расстояния от тока катушки;

$T_s = F(I_{\phi})$ – зависимость температуры поверхности катушки от тока;

$U_{\text{coil}} = F(I_{\phi})$ – зависимость падения напряжения в катушке от тока фокусировки,

$J_0 = F(T_s)$ – зависимость плотности тока от температуры.

В результате выполнения работы создана программа, которая позволяет беспрепятственно производить расчет основных параметров соленоида магнитной фокусирующей системы и исследовать конфигурации параметров соленоида простым вводом и последующей обработкой полученных результатов.

Библиографический список

1. Ануфриев, И. MATLAB 7.0 / И. Ануфриев, А. Смирнов, Е. Смирнова. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2010. – 1104 с. – ISBN 978-5-94157-494-0.
2. Технология обработки материалов. Оборудование электронно-лучевых комплексов: Учебное пособие / А. В. Щербаков, В. Н. Ластовирия, Р. В. Родякина, В. В. Новокрещенов. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2019. – 183 с. – (Бакалавр. Академический курс). – ISBN 978-5-534-10970-2.

УДК 621.386; ГРНТИ 47.29.39

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ АНОДОВ ПРОСТРЕЛЬНОГО ТИПА В МИКРОФОКУСНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ТРУБКАХ

Е.Ю. Грачев, М.А. Демидов, Е. А. Козлов

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, starmax268@gmail.com*

Аннотация. В настоящее время, сфера применения микрофокусной рентгенографии набирает обороты. Микрофокусные снимки обладают высокой резкостью изображения, точно передавая мелкие детали строения объекта. Однако и по сей день основной проблемой остается малая мощность излучения и срок службы трубок. Главным ограничивающим фактором является тепловой режим работы прострельного анода.

Ключевые слова: микрофокусная рентгенография, анод прострельного типа

INVESTIGATION OF THERMAL CONDITIONS BY A BULLET-TYPE ANODE IN MICROFOCUS X-RAY TUBES

E.Y. Grachev, M. A. Demidov, E. A. Kozlov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, starmax268@gmail.com*

The summary. Currently, the scope of application of microfocus radiography is gaining momentum. Microfocus images have high image sharpness, accurately transmitting small details of the structure of the object. However, to this day, the main problem remains the low radiation power and the service life of the tubes. The main limiting factor is the thermal mode of operation of the firing anode. Keywords: microfocus radiography, bullet-type anode

Keywords: microfocus radiography, bullet-type anode

В современном мире широко используется метод проекционной рентгенографии для изучения строения веществ, качества изделий, радиационной технологии исследования быстротекущих процессов, путем получения изображения объекта исследования. Качество изображения напрямую зависит от размера и формы пучка электронов, попадающих на анод рентгеновской трубки. Для более эффективной реализации метода, диаметр фокусного пятна должен быть в диапазоне от 1 мкм до 100 мкм. Такой возможностью обладают микрофокусные рентгеновские (МФР) трубки прострельного типа.

Основными критериями при разработке МФР служит увеличение мощности рентгеновского излучения и уменьшение тепловыделения на аноде. Анод представляет собой пленочную структуру, в которой на подложку наносится материал мишени. Мишень служит приемником электронов, в которой при их торможении происходит генерация рентгеновских квантов с выделением тепла. Подложка выполняет роль выходного окна для получаемого излучения. Для наиболее эффективного выхода рентгеновских квантов в качестве материала мишени чаще всего используют вольфрам W, а материалом подложки служит бериллий Be. [1] Увеличение мощности излучения напрямую зависит от мощности подаваемого электрического пучка на мишень анода, а, следовательно, его большему нагреву. Основная задача совершенствования МФР трубок заключается в увеличении предела тепловой мощности и получаемого рентгеновского излучения.

Электроны под действием $U_{\text{ук}}$ проникают в глубь мишени. Большая часть их кинетической энергии превращается в тепловую. Траектория движения частиц хаотична, в следствии чего их распределение аппроксимируется в виде усеченной сферы (Рисунок 1). [2]

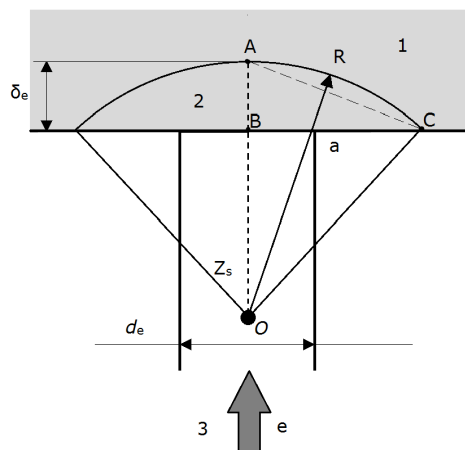


Рис. 1. Аппроксимация области взаимодействия электронов с мишенью

Центр сферы смещен на расстояние Z_s от поверхности мишени определяемое соотношением d_b/δ_e . Для определения δ_e используется модель Косслетта-Томаса при котором:

$$\delta_e = \frac{0,074 \cdot U^{1,55}}{\rho}, \quad (1)$$

где ρ – плотность материала мишени (в данном случае вольфрама W);

U — ускоряющие напряжение на аноде [3].

Сторона $BC = a$ - уширение электронного пучка на поверхности мишени:

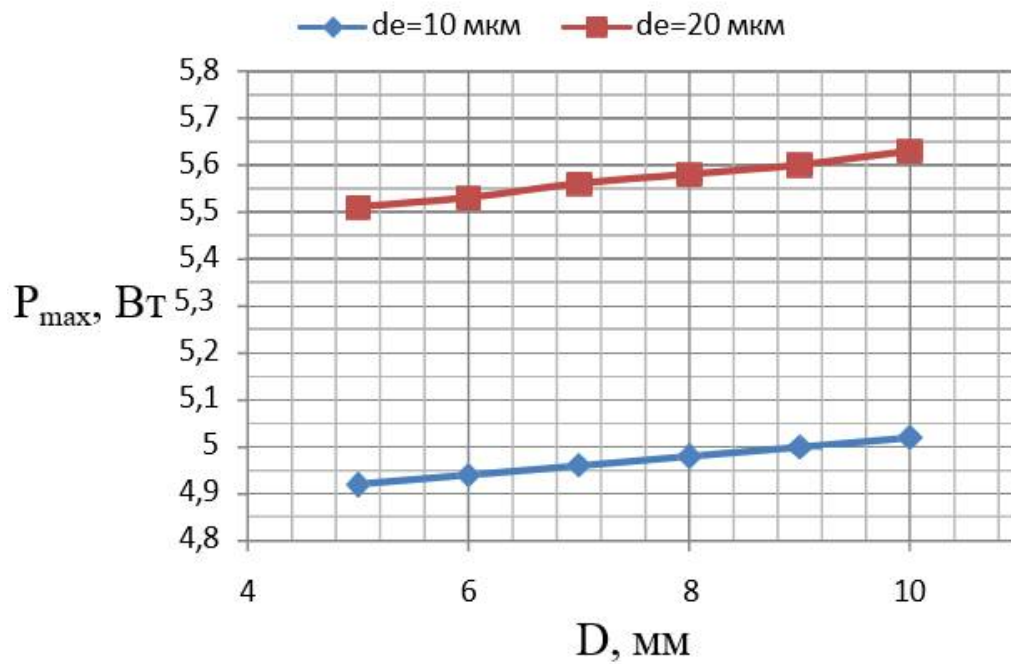
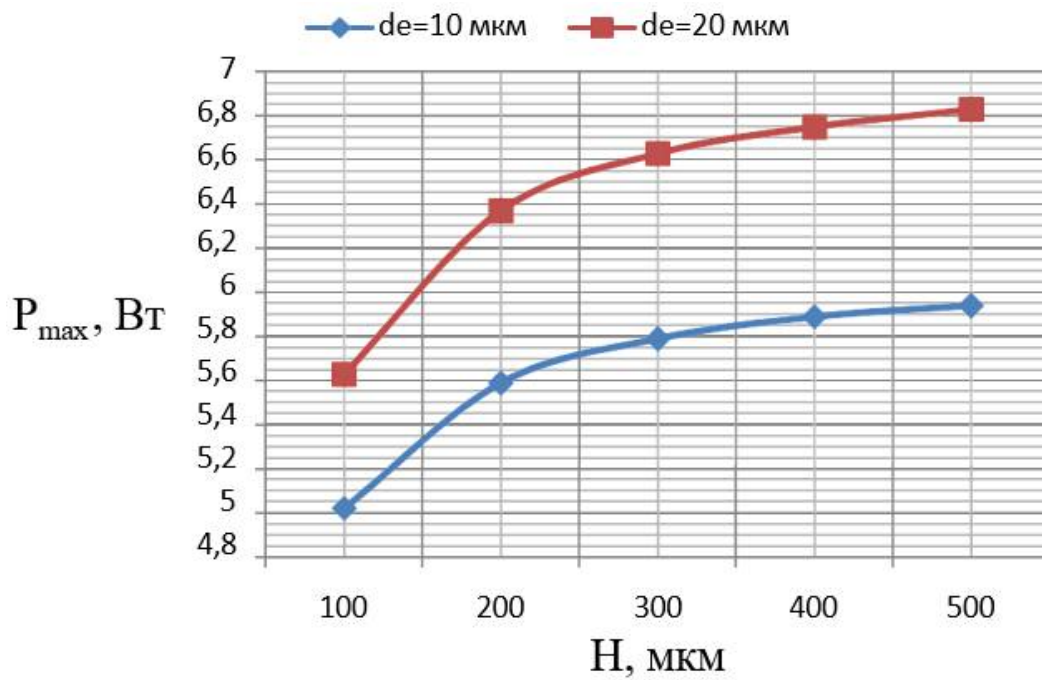
$$a = 0,5d_b + \delta_e \quad (2)$$

Путем простых алгебраических вычислений находится R сферы и смещение её центра Z_s . Толщина мишени h зависит от глубины проникновения электронов в твердое тело:[4]

$$h = 1,1 \cdot \delta_e. \quad (3)$$

Математическая модель прострельного анода имеет следующие параметры: толщина бериллиевой (Be) подложки $H=100-500$ мкм, диаметр прострельного анода $D=5-10$ мм. Исследование проводилось при заданных параметрах естественной воздушной конвекции на боковых стенках прострельного анода и бериллиевого окна, а также температуры окружающей среды $293,15$ К ($T=20^\circ\text{C}$). Требовалось определить влияния на тепловой режим работы геометрических параметров прострельного анода (График 1,2), параметров теплоотдачи с внешней средой (График 3), параметров электронного пучка (График 4) в зависимости от подводимой мощности при постоянно значении ускоряющего напряжения не более $U=120$ кВ при диаметрах фокусного пятна $d_b=10$ и $d_b=20$ мкм. Замер температуры производился на поверхности W мишени, в центре фокусного пятна, границе мишень-подложка W-Be, а также на границе Be окна.

Увеличение толщины H приводит к уменьшению плотности тепловыделения, что в свою очередь ведет к снижению температуры, следовательно, предел подводимой мощности P_{\max} увеличивается.

График 1. Зависимость $P_{\max}(D)$ в условиях естественной конвекции при $H=100$ мкмГрафик 2. Зависимость $P_{\max}(H)$ в условиях естественной конвекции при $D=10$ мм

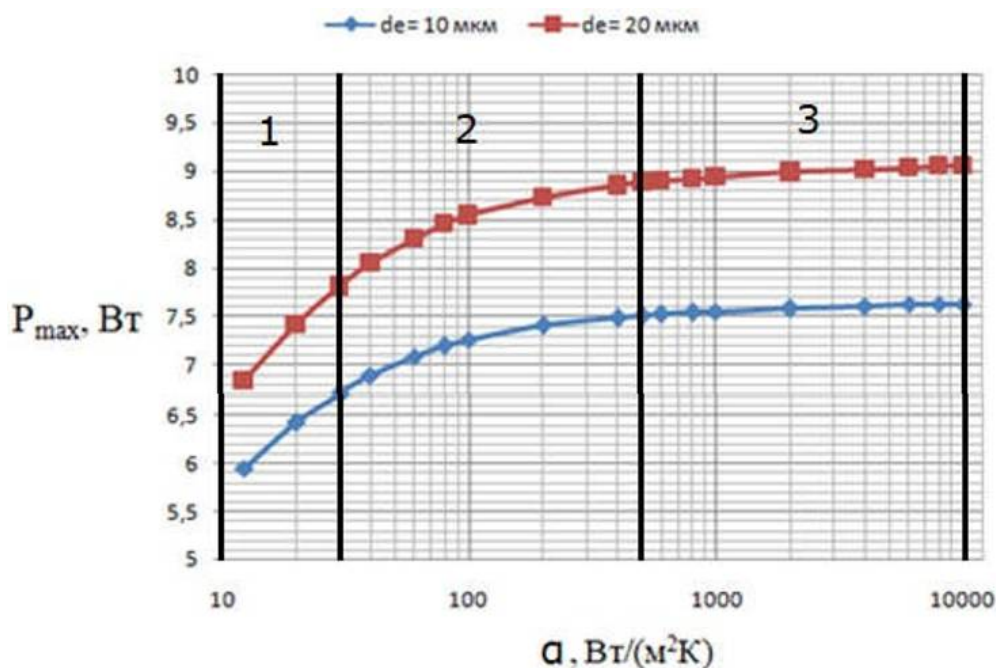


График 3. Изменения P_{\max} в зависимости от толщины подложки $H=500$ мкм и диаметра прострельного анода $D=10$ мм в условиях естественной (1) и вынужденной воздушной конвекции (2), вынужденного водного охлаждения (3)

Внешнюю среду характеризует коэф. теплоотдачи α . В области от 10 до 500 происходит рост P_{\max} , чем выше показатель теплопроводности выбранного материала, тем большую мощность можно подвести. Применение вынужденной воздушной конвекции повышает порог подводимой мощности P_{\max} .

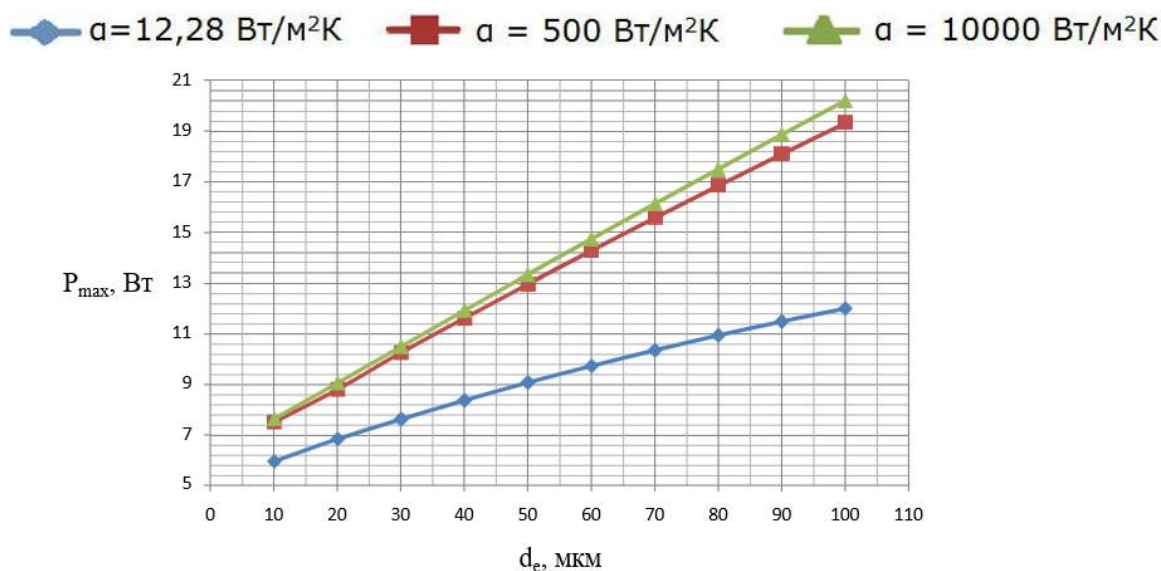


График 4. Изменения $P_{\max}(d_b)$ для различных параметров теплоотдачи

Что касается параметров электронного пучка, при малых диаметрах большую роль играет внутренняя конвекция, однако с её увеличением, растет эффективность применения вынужденного воздушного охлаждения. При максимальном диаметре пятна, разница P_{\max} между вынужденным воздушным и водяным охлаждением составляет 0,8 Вт.

Библиографический список

1. Ф.Н. Хараджа. Общий курс рентгентехники. Издание третье. ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ», Москва, 1966, с.74- 77
2. Козлов Е.А., Трубицын А.А, Фефелов А.А., Грачев Е.Ю, МОДЕЛЬ ОБЪЕМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА ВМИШЕНЯХ МИКРОФОКУСНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ТРУБОК ПРОСТРЕЛЬНОГО ТИПА, ФГБОУ ВО «РГРТУ».
3. Ф. А. Лукьянов, Э. И. Рау, Р. А. Сеннов «Глубина пробега первичных электронов, размытие электронного пучка и пространственное разрешение в электронно-зондовых исследованиях» ИЗВЕСТИЯ РАН. Серия физическая, 2009, том 73, № 4, с. 463-472
4. AamirIhsan, Sung Hwan Heo, Sung Oh Cho. Optimization of X-ray target parameters for a high-brightness microfocus X-ray tube. Nucl. Instr. andMeth. inPhys. Res. B 264 (2007) 371-377.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИЯ О IV МЕЖДУНАРОДНОМ ФОРУМЕ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» СТНО-2021»	3
МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ. РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА»	5
Секция «МИКРОВОЛНОВАЯ, ОПТИЧЕСКАЯ И КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»	5
Сычев Н.А., Панфилов А.И. Опыт разработки низковольтной ЛБВ W диапазона на замедляющей системе типа «петляющий волновод».....	5
Васильев И.В. Электростатическая природа ковалентной связи.....	12
Дюба И.С., Востриков М.В., Климаков В.В., Мишин В.Ю., Морозов Д.А., Серебряков А.Е. Разработка системы регистрации сигналов волнового твердотельного гироскопа.....	16
Кузнецов И.С., Матвеев А.А., Саблин В.М., Терентьев Д.А. Модернизация магнитной фокусирующей системы мощного многолучевого клистрона X-диапазона.....	20
Филин Ю.Ю., Морев С.П., Коломийцева Н.М., Арион О.А., Комраков П.А., Соляников А.В. Переходные режимы работы ЭОС с кольцевым катодом и низковольтным бессеточным управлением.....	25
Богачев Р.Ю., Баймагамбетова Л.Т., Горшкова Е.В., Емельянов А.С., Журавлев С.Д., Кириченко Д.И., Крачковская Т.М., Шестеркин В.И. Исследование возможности создания неразъемных соединений деталей из углеродных материалов с керамикой и молибденом.....	29
Буробин В.А., Щербаков С.В. Новые поколения аналоговой СВЧ электроники на разнородных полупроводниковых материалах.....	32
Чиркин М.В., Давыдов Г.В., Мишин В.Ю., Серебряков А.Е. Метод компенсации порога захвата в выходном сигнале кольцевого лазерного гироскопа.....	43
Базылев В.К., Жидков А.М., Коротченко В.А. Исследование работы манометрического преобразователя с фотокатодом при низком вакууме.....	49
Горлин О.А., Голова Д.С. Разработка генератора сантиметрового диапазона клистронного типа.....	53
Шальнев В.А., Горлин О.А. Применение метода контроля магнитного поля МПФС ЛБВ с использованием дискретного преобразования Фурье.....	58

Морев С. П., Филин Ю. Ю. Развитие метода Чена для решения задачи о распределении магнитного поля в ячейке МПФС с кольцевой вставкой.....	62
Веснов И.Г. Степень диссоциации двуокиси углерода и содержание атомарного кислорода в волноводных СО2 лазерах с разрядным каналом из четырех диэлектрических стенок....	67
Куцев А.Е., Звонков А.В. Бесплатформенная инерациальная навигационная система для малых беспилотных летательных аппаратов.....	70
Секция «ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА».....	75
Зинуков А.А., Логинов Д.С., Холомина Т.А., Семенов А.Р. Исследование параметров спектров НЧ шума герконовых контактов с повышенным сопротивлением.....	75
Асембаева А.Р. Исследование влияния условий синтеза на свойства DLC пленок, модифицированных наночастицами палладия.....	79
Бекмурат Ф. XPS анализ аморфных алмазоподобных углеродных пленок с наночастицами иридия.....	81
К.В. Бухенский, А.Б. Дюбуа, А.Н. Конюхов, С.И. Кучерявый, Машнин С.Н., Сафошкин А.С., Ципоркова К.А. Распространение электромагнитного излучения в графеновых структурах.....	85
Логинов Д.С. Исследование спектров НЧ шума магнитоуправляемых контактов с помощью АЦП микроконтроллера STM32.....	90
Воробьев Ю.В., Ермачихин А.В. Моделирование спектров дифференциальной сканирующей калориметрии тонких пленок материалов фазовой памяти.....	95
Корнеев А.А., Ермачихин А.В. Исследование квантового выхода солнечных элементов в широком диапазоне температур.....	99
Школин С.Е., Рыбина Н.В. Анализ модельных текстур с различным типом структуры.....	104
Баскаков Н.А., Мишустин В.Г. Определение электрофизических характеристик барьерных квантово-размерных структур.....	109
Трегулов В.В., Иванов А.И., Скопцова Г.Н. Оптические свойства поверхности полупроводниковых структур с плёнкой пористого кремния, полученной металл-стимулированным травлением.....	113
Васин А.В., Рыбин Н.Б. Исследование пористого кремния, перспективного в качестве антиотражающего покрытия ФЭП.....	117

Трусов Е.П., Ермачихин А.В., Литвинов В.Г. Изучение температурной зависимости кинетики захвата носителей заряда на глубокие энергетические уровни в полупроводниковой барьерной структуре.....	121
Чернобровкина А.С., Литвинов В.Г. Исследование и получение образцов полупроводниковых структур, содержащих тонкие слои пористого кремния.....	127
Секция «ПРОМЫШЛЕННАЯ СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ».....	133
Зайцева М.В. Применение сухих и маслонаполненных силовых трансформаторов.....	133
Цибизов А.А., Трубицын А.А. Использование водорода в качестве топлива будущего.....	135
Закалюкина П.М., Махмудов М.Н., Титова В.В., Федорова Е.Р. Интеллектуальные сети на службе электроэнергетики.....	138
Киселёва О.А., Винокуров С.А., Киселёва Д.Д. Позиционно-слеящая система с наблюдателем состояния на базе бесконтактного двигателя постоянного тока.....	140
Донских А.А. Разработка методики повышения эффективности оперативно-диспетчерского персонала.....	144
Лисин М.П. Анализ и разработка эффективной системы пожарной сигнализации и охраны на предприятии.....	147
Трегубов Д.В. Особенности строительства и реконструкции трансформаторных подстанций.....	151
Грачев Е.Ю., Куланхин И.А., Козлов Е.А. Разработка программного приложения для расчета магнитных линз электронно-оптической системы рентгеновских трубок.....	154
Грачев Е.Ю., Демидов М.А., Козлов Е. А. Исследование тепловых режимов анодов протрельного типа в микрофокусных рентгеновских трубках.....	158

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ

Научное издание

В 10 томах

Том 2

Под общей редакцией О.В. Миловзорова.

Подписано в печать 15.06.22. Формат 60x84 1/8.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л.

Тираж 100 экз. Заказ №.

Рязанский государственный радиотехнический университет,
Редакционно-издательский центр РГРТУ,
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.
Отпечатано в типографии Book Jet,
390005, г. Рязань, ул. Пушкина, д. 18