

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-2021

IV МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО- ТЕХНИЧЕСКИЙ ФОРУМ

Сборник трудов

Том 2

Рязань
Book Jet
2021

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

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, 2021; Рязань. —с.,: ил.

Сборник включает труды участников IV Международного научно-технического форума «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2021.

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

© Рязанский государственный
радиотехнический университет, 2021
© Издательство «Book Jet»,
макет, 2021

ИНФОРМАЦИЯ О IV МЕЖДУНАРОДНОМ ФОРУМЕ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» СТНО-2021

IV Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2021 состоялся 03.03.2021-05.03.2021 в г. Рязань в Рязанском государственном радиотехническом университете имени В.Ф. Уткина.

В рамках форума «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2021 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 нанoeлектроника;
- 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;
- Бухгалтерский учет, анализ и аудит;
- Управление персоналом;
- Экономическая безопасность;

«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:

Авилкина С.В., начальник управления по воспитательной работе, к.п.н., доц.;

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

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.;

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.;

Кириллов С.Н., зав. кафедрой радиоуправления и связи, д.т.н., проф.;

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

Ключко В.К., профессор кафедры автоматики 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, к.т.н., доц.;

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

Литвинов В.Г., зав. кафедрой микро- и нанoeлектроники, д.ф.-м.н., проф.;

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

Мусолин А.К., профессор кафедры автоматизации информационных и технологических процессов, д.т.н., проф.;

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 автоматики и информационных технологий в управлении, 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 621.385.7; ГРНТИ 47.29.37

ОЦЕНКА ИНФОРМАТИВНОСТИ КОМПОНЕНТ ФЛИККЕРНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НЧ-ШУМА ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ЭМИССИОННОЙ АКТИВНОСТИ МЕТАЛЛОПОРИСТЫХ КАТОДОВ ВАКУУМНЫХ СВЧ ПРИБОРОВ

М.Д. Воробьев, Д.Н. Юдаев

*Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт",
Российская Федерация, Москва, yudayevdn@mpei.ru*

Аннотация. Рассмотрено формирование параметров для диагностики металлопористых катодов вакуумных СВЧ приборов, базирующееся на выделении различных составляющих в спектральных характеристиках создаваемого ими низкочастотного шума, а также на модели возникновения флуктуаций различной длительности. Исследована корреляционная связь параметров для прогнозирования деградации катодов со степенью деградации эмиссионной активности после испытаний на длительную наработку. Показано, что максимальной эффективностью при этом обладают параметры, связанные с высокочастотной частью спектральных характеристик шума.

Ключевые слова: шум, диагностика, металлопористые катоды, деградация эмиссионной активности.

INFORMATIVITY EVALUATION OF LOW-FREQUENCY NOISE COMPONENTS FOR EMISSION ACTIVITY PREDICTION OF DISPENSER CATHODES IN VACUUM MICROWAVE DEVICES

M.D. Vorobyev, D.N. Yudaev

*National Research University "Moscow Power Engineering Institute",
Moscow, Russia, yudayevdn@mpei.ru*

Abstract. The finding of parameters for diagnostics of dispenser cathodes of vacuum microwave devices is considered. The finding of parameters is based on the selection of various components in the spectral characteristics of the low-frequency noise, and on the model of occurrence of different duration fluctuations. The correlation between parameters for predicting the degradation of emission activity after long-term operating tests is investigated. It is shown that the parameters associated with the high-frequency part of noise spectral characteristics have the maximum efficiency.

Keyword: low-frequency noise, diagnostic, dispenser cathodes, degradation of emission activity.

Металлопористые катоды (МПК) различных модификаций продолжают оставаться основным источником электронной эмиссии в мощных вакуумных СВЧ приборах, в связи с чем обеспечение их высокой и долговременной эмиссионной активности при значительных токовых нагрузках является неперенным условием при разработке приборов с высокой долговечностью. В производстве МПК и их модификаций востребованы способы контроля, позволяющие свести к минимуму использование некачественных катодно-подогревательных узлов, то есть прогнозирование стабильности эксплуатационных параметров в течение длительного времени.

Среди многочисленных известных диагностических способов для термоэлектронных катодов особое место занимают способы, основанные на определении уровня и характера низкочастотных (НЧ) флуктуаций отбираемого с катода тока. К числу их достоинств можно

отнести высокий уровень чувствительности к наличию структурных и технологических дефектов, подтверждаемый известной практикой использования в производстве полупроводниковых приборов и структур, к числу недостатков – трудности осуществления оперативной диагностики, требующие создания уникального помехоустойчивого оборудования с возможностью его адаптации к электровакуумным приборам (ЭВП) различного типа.

Основными компонентами НЧ флуктуационных шумов являются дробовая и фликкерная составляющие. Первая из них обусловлена случайным и независимым характером эмиссии электронов, спектральная характеристика имеет частотонезависимый характер. Её практическое использование ограничивается оценкой степени однородности эмитирующей поверхности, позволяющей предложить основанные на измерении вольт-шумовых и ампер-шумовых характеристик (ВШХ, АШХ) диагностические параметры [1]. Вторая (фликкерная) компонента в целом имеет спектральную характеристику, содержащую участки с зависимостью от частоты вида f^α , где $\alpha \approx 0 \dots 1,5$. Сложная структура характеристики указывает на наличие в ней составляющих, отражающих протекание на эмитирующей поверхности динамических процессов с различной длительностью. В этой связи анализ спектральной характеристики фликкерной составляющей в сочетании с определённой моделью возникновения флуктуаций мог бы являться основой для предложений дополнительных диагностических параметров, расширяющих возможности флуктуационных методов диагностики.

Модель эмитирующей поверхности

Эмитирующая поверхность и прилегающие к ней слои имеют сложную структуру, содержащую выходящие на поверхность поры, заполненные активным веществом (алюминатами) и образующимися в результате взаимодействия с материалом W губки кристаллитами BaO . Кристаллиты BaO заполняют также пространство в окрестности пор на эмитирующей поверхности. Эмиссионная активность обусловлена вакансиями кислорода, выходящими из пор на поверхность и восполняющими их убыль вследствие испарения. Места максимальной активности совпадают в порах с границей кристаллитов с металлом вблизи поверхности [2]. Таким образом, динамика процессов связана с движением вакансий кислорода, что эквивалентно движению активирующих структуру атомов Ba , поверхностная концентрация которых максимальна у границ пор на поверхности. Таким образом, с точки зрения формального механизма возникновения флуктуаций эмиссионной активности можно связать с миграцией активирующих атомов по поверхности кристаллитов в окрестности пор, вызывающей флуктуации работы выхода $e\phi$ на различных участках кристаллитов.

Очевидно, что из-за значительно меньшей концентрации активирующих атомов токи эмиссии из периферийных областей будут существенно ниже, а флуктуации $e\phi$ – выше, чем из эмиссионных центров [3]. В то же время существование на эмитирующей поверхности областей с различными $e\phi$ должно привести к их взаимодействию, то есть к возникновению контактных электрических полей. Таким образом, периферийные области могут оказывать модулирующее воздействие на эмиссионные центры, увеличивая уровень флуктуаций отбираемого с катода эмиссионного тока. При этом характер флуктуаций зависит от формы и размеров примыкающих к эмиссионным центрам отдельных периферийных областей; при больших размерах, обеспечивающих более длительное нахождение на них активирующих атомов до ухода, средняя длительность флуктуаций τ_0 будет больше. Согласно теории [4], разработанной и предложенной Макфарланом, для описания спектральной плотности флуктуаций тока эмиссии использовалось соотношение

$$S_{iz}(f) \sim \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_{\text{пер}}}\right)^2} \quad (1)$$

где $f_{\text{пер}}$ определяется величинами τ_0 и коэффициентом поверхностной диффузии активирующих атомов, а абсолютный уровень флуктуаций может быть найден по результатам измерения эмиссионного тока и чувствительности величины $e\varphi$ к изменениям поверхностной концентрации активирующих атомов.

В соответствии с описанной моделью совокупность компонент фликкерной составляющей с различными τ_0 может отражать геометрическую неоднородность структуры слабоэмитирующих периферийных областей эмитирующей поверхности. Если такую неоднородность принять в качестве основы для формирования диагностических параметров, то в дальнейшем в первую очередь следует определить содержание в измеренной спектральной характеристике составляющих вида (1) с различными τ_0 и по полученным результатам найти «образ» диагностируемого катода – число или площадь периферийных областей для каждого из выделенных размеров.

Декомпозиция спектральной характеристики

Декомпозиции спектральной характеристики на составляющие должно предшествовать её корректное измерение с надлежащим выбором как частотного диапазона, так и отбираемого тока, обеспечивающими уверенное отделение фликкерной составляющей от дробовой. В процессе проведенных экспериментов эти условия сводились к следующим: диапазон частот $10 \dots 100000$ Гц, плотность обираемого тока $0,5 \dots 1$ А/см². В качестве экспериментальных объектов использовались специально изготовленные пробники с плоскопараллельной диодной системой электродов и торцевыми термокатадами с круглой эмитирующей поверхностью на основе пропитанной алюминатами *Ba* и *Ca* вольфрам-рениевой губки, поверхность которых покрыта тонкой плёнкой *Os*. В дальнейшем проводилась обработка фликкерной составляющей с целью её сглаживания для последующего разделения на базовые спектральные составляющие вида (1), число которых составляло 3 на декаду и которые обнаруживали преимущественное содержание в обрабатываемой характеристике. В результате для каждого катода были получены диаграммы («образы»), устанавливающие для периферийных областей в форме круга с разным диаметром d занимаемые ими площади $S_n(d)$ на поверхности катода.

Эффективность использования величин $S_n(d)$ в качестве диагностических параметров

Для определения эффективности были проведены исследования связи указанных параметров со степенью деградации эмиссионной активности катодов после их испытаний на наработку. Испытания проводились в форсированном режиме при постоянном токоотборе с плотностью тока $0,5$ А/см² и повышенной температуре. Степень деградации B оценивалась по величине спада эмиссионного тока, измеренного в режиме коротких одиночных импульсов после 4000 час. работы относительно значения в начале испытаний.

Чтобы установить наличие корреляции для $S_n(d)$ как предполагаемых прогнозирующих параметров, и степени деградации эмиссионной активности B , по результатам выделения компонент фликкерной составляющей с различными d при различных отбираемых токах I построены диаграммы соответствия $S_n(d) \dots B$, аналогичные приведенным на рисунке 1. При этом использовались компоненты только с такими d , выделение которых со значимыми (отличными от нуля) результатами для всех экспериментальных образцов было возможным ($d=15, 200, 600$ нм). Наряду с $S_n(d)$ при анализе использовалось суммарное значения S_n , пропорциональное площади всех периферийных областей (sum).

Чтобы учесть или исключить влияние работы выхода $e\varphi$ и плотности тока эмиссии j , МПК в образцах на наличие корреляционных связей параметров компонентов фликкерной составляющей с B , проанализирована связь $e\varphi$ и j , измеренных перед испытаниями на нара-

ботку, с величиной B . Соответствующие диаграммы на рисуне 2 указывают на отсутствие заметной связи.

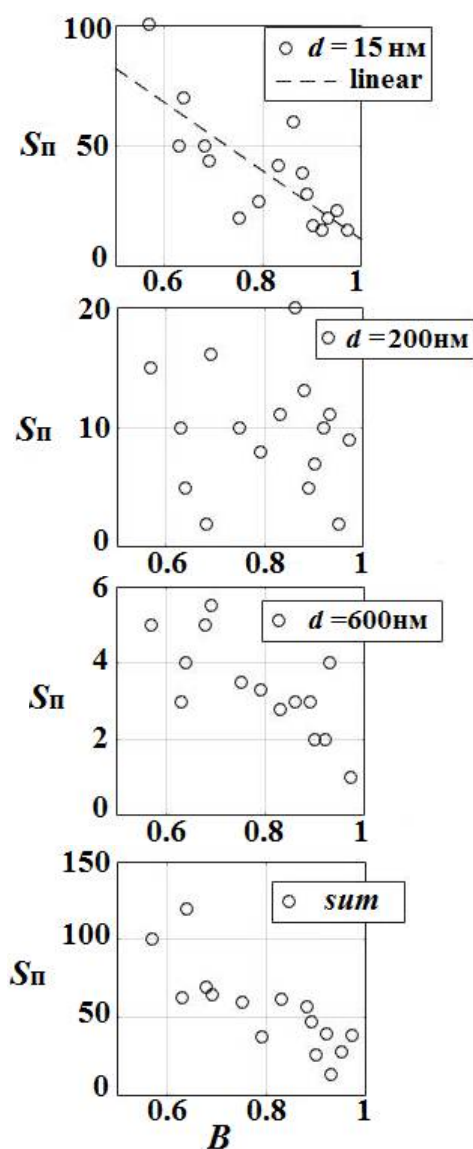


Рис. 1. Диаграммы соответствия параметра S_{Π} в относительных единицах при различных d и степени спада эмиссионной активности $B, I=5,8 \text{ мА}$

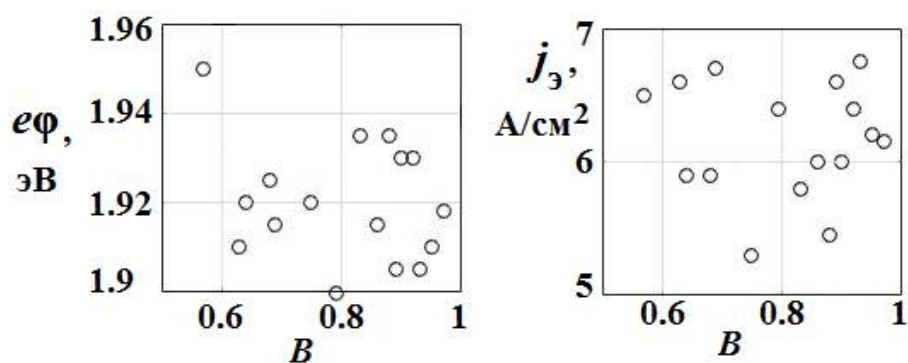


Рис. 2. Диаграммы соответствия эффективной работы выхода и плотности тока эмиссии до испытаний на наработку и степени спада эмиссионной активности после наработки

Результаты корреляционного анализа на основании диаграмм, аналогичных рисунку 1 при различных I , приведены на рисунке 3, где показано соответствие коэффициента корреляции Пирсона r прогнозирующего параметра S_n и величины B при различных d . Как видно, практическое отсутствие корреляционной связи ($r < 0,45$) отмечается только для $d = 200$ нм, в то время как при других d связь существует и выражена по-разному в зависимости от величины I .

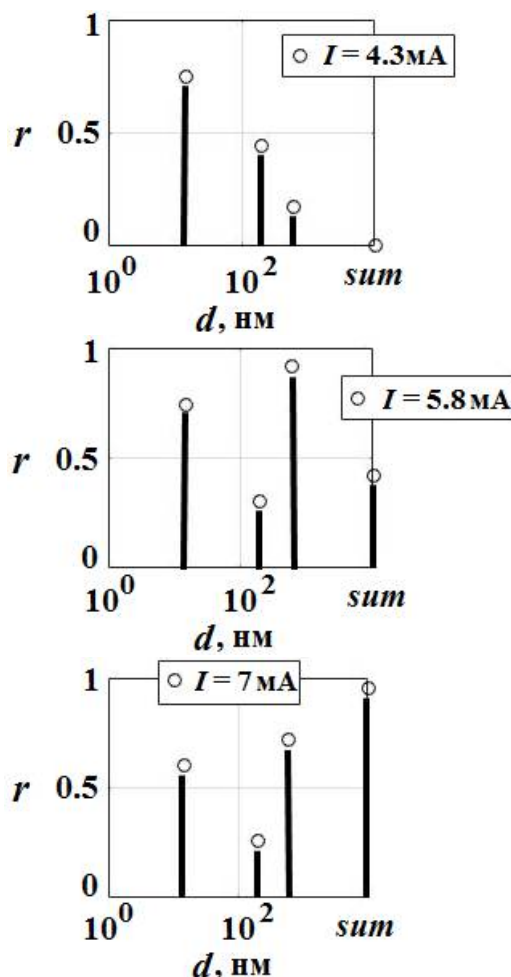


Рис. 3. Зависимости коэффициента корреляции параметра S_n со степенью деградации эмиссионной активности B после наработки от размера периферийных областей d при различных отбираемых токах.

$r(sum)$ – значение коэффициента корреляции для параметра $F_n(sum)$,
определенного суммированием $S_n(d)$ по всем d .

Результаты на рисунке 3 дают основание для следующих заключений:

- коэффициент корреляции r параметров S_n и B зависит от d , то есть различные компоненты фликкерной составляющей НЧ-шума перед наработкой по-разному связаны со степенью деградации эмиссионной активности;
- наибольшая стабильность при различных режимах измерения шумов и высокий уровень такой связи наблюдаются для минимальных значений d , что соответствует высокочастотной (ВЧ) части частотного диапазона спектральной характеристики НЧ-шума.

Последнее иллюстрируется сопоставлением сглаженных спектральных характеристик образцов с различными B на рисунках 4 и 5.

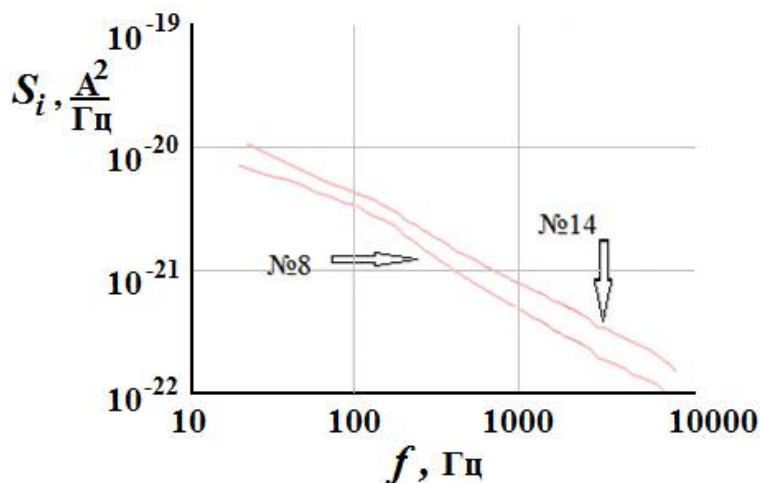


Рис. 4. Спектральные характеристики фликкерной составляющей, полученные до испытаний на наработку при $I=4,3$ мА у приборов с различной степенью деградации эмиссионной активности после наработки. №8 – $B=0,92$; №14 – $B=0,64$

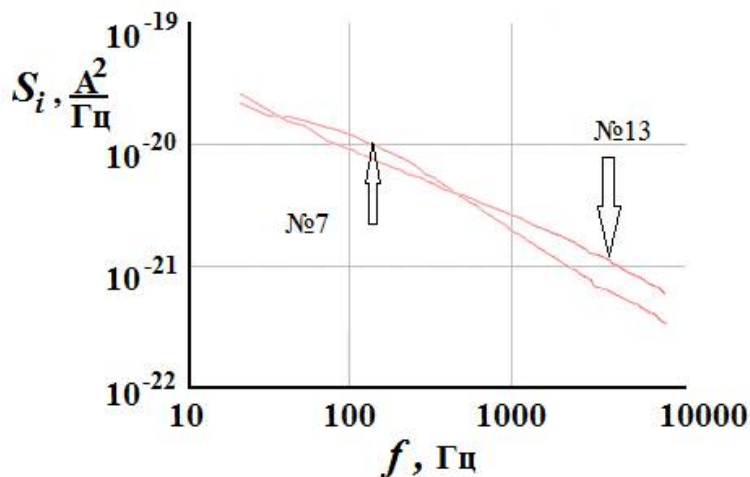


Рис. 5. Спектральные характеристики фликкерной составляющей, полученные до испытаний на наработку при $I=5,8$ мА у приборов с различной степенью деградации эмиссионной активности после наработки. №7 – $B=0,86$; №13 – $B=0,68$.

Можно предполагать, что в рамках описанных выше представлений о механизме возникновения НЧ-флуктуаций поверхностная структура периферийных областей подверженных деградации катодов является более раздробленной и состоящей из участков меньших размеров, чем у катодов с большей устойчивостью к деградации.

Судя по результатам на рисунках 4 и 5, возможно при проведении оперативной диагностики отказаться от нахождения диагностических параметров S_n , заменив их нахождение менее затратным по времени определением интегральных параметров, например, шумовых токов в полосе частот ВЧ участков спектральных характеристик.

Библиографический список

1. Шитов Е.М. Программно-аппаратный комплекс для шумовой диагностики термоэлектронных катодов электровакуумных приборов: автореферат дисс. канд. техн. наук, Рязань, 2014.
2. Сахаджи Г.В. Снижение флуктуаций электронной эмиссии металлопористого катода ламп бегущей волны. Дисс. канд. техн. наук, Саратов, 2013.
3. Терлецкий Я.П.. Статистическая физика. М.: Изд-во Высш.школа, М.: 1966, 235с.
4. Нарышкин А.К., Врачев А.С. Теория низкочастотных шумов. М.: «Энергия», 1972, 152с.

УДК 621.373.826; ГРНТИ 29.33.15

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТНОЙ ПОДСТАВКОЙ ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА

Н.А. Калинин, В.Ю. Мишин, В.В. Климаков, А.Е. Серебряков

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань*

Аннотация. Разработана система цифрового управления вибрационной частотной подставкой лазерного гироскопа, использующей для своей работы только первичные сигналы инерциального датчика. Система цифрового управления вибрационной частотной подставкой лазерного гироскопа включает в себя: двухкаскадный усилитель, биполярный регулируемый источник питания и ЦАП.

Ключевые слова: лазерный гироскоп, вибрационная частотная подставка, порог синхронизации

DEVELOPMENT OF THE DIGITAL CONTROL SYSTEM OF THE FREQUENCY STAND OF THE LASER GYROSCOPE

N.A. Kalinin, V.Yu. Mishin, V.V. Klimakov, A.E. Serebryakov

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

The summary. A digital control system for the vibration frequency bias of the laser gyroscope has been developed, which uses only the primary signals of the inertial sensor for its operation. The digital control system of the vibration frequency stand of the laser gyroscope includes: a two-stage amplifier, a bipolar variable power supply and a DAC

Keywords: laser gyroscope, mechanical dither, lock-in threshold

Введение

Гироскоп – устройство, способное реагировать на изменение углов ориентации тела, на котором оно установлено, относительно инерциальной системы отсчета. Долгое время датчики инерционного вращения были механическими гироскопами. Работа данных гироскопов основывается на эффекте удержания оси вращения тела в одном направлении инерциальной системы, иными словами, выполняется закон сохранения количества движения.

Механические гироскопы, в силу своей конструкции, страдают от присущих им ограничений, таких как высокая стоимость, так как при их изготовлении требуется достаточно высокая точность формы тела вращения и минимальное возможное трение подшипников.

В настоящее время в составе бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) используют вычислительную навигационную систему и блок чувствительных элементов, в состав которого входят блок акселерометров, блок преобразователя сигналов акселерометров и блок кольцевых лазерных гироскопов (КЛГ). Так вот, именно на КЛГ и легла задача устранения недостатков, присущим механическим гироскопам.

Лазерный гироскоп – квантовый генератор, в котором в противоположных направлениях распространяются сгенерированные волны оптического диапазона. Разность частот встречных волн пропорциональна угловой скорости вращения. Оптические пучки выводятся из оптического резонатора, проходя через смесительную призму, и формируют на ее выходе интерференционную картину. Вращение лазерного гироскопа сопровождается перемещением интерференционных полос. Для ее регистрации используется многосекционный фотодиод, на выходе которого формируются информационные (первичные) сигналы, несущие информацию об угловой скорости вращения. Сервисная электроника подсчитывает количество полос, переместившихся мимо приемных секций фотодиода за фиксированный интервал времени, и вычисляет угловую скорость.

Преимущества лазерного гироскопа (ЛГ):

- высокая точность измерения угловой скорости;

- высокая чувствительность, как следствие высокого масштабного коэффициента;
- удобство подключения к ЭВМ, так как выходной сигнал датчика имеет дискретную форму;
- отсутствие движущихся механизмов и деталей.

К недостаткам ЛГ можно отнести зависимость масштабного коэффициента от длины оптического пути ЛГ, смещение нуля выходных характеристик, однако главным недостатком является наличие зоны захвата, приводящей к нечувствительности на малых скоростях вращения ЛГ, т.е. при малой угловой скорости вращения ЛГ из-за взаимной синхронизации встречных волн исчезают их биения.

Методы борьбы с явлением захвата встречных волн

Для решения проблемы синхронизации частот встречных волн рабочую точку лазера смещают из области захвата за счет искусственно созданной разности оптических путей встречных волн, т.н. подставку [1].

Разработано множество методов для вывода лазера из зоны захвата [2- 5], однако для малогабаритных приборов наиболее востребованными являются:

- возбуждение принудительных механических колебаний;
- применение невзаимных элементов на основе магнитооптических эффектов (Фарадея или Зеемана).

На основе эффекта Зеемана разработана знакопеременная магнитооптическая подставка [6], суть которой сводится к знакопеременной периодической модуляции параметров активной среды кольцевого лазера переменным магнитным полем. Такая модуляция приводит к тому, что высокочастотный и низкочастотный конуры усиления периодически меняются местами, тем самым получая периодическое изменение знака частотной подставки. Частота модуляции обычно лежит в пределах 200-1000 Гц. Недостатком данного способа является чувствительность подставки к внешнему магнитному полю.

Альтернативный подход заключается в сообщении кольцевому лазеру механических вращательных колебаний, амплитуда которых промодулирована случайным образом. На рисунке 1 представлен четырехзеркальный кольцевой лазер с механической вибрационной частотной подставкой.

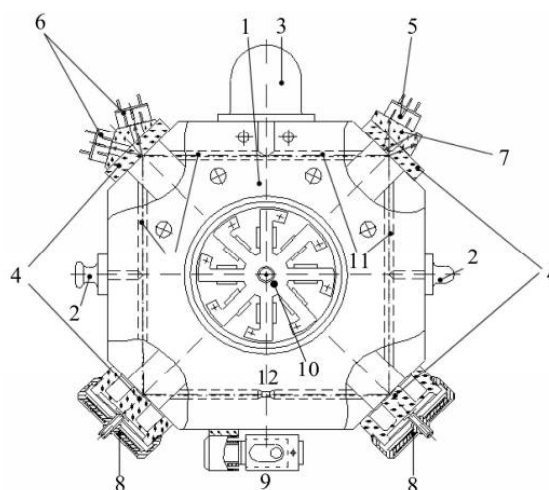


Рис. 1. Кольцевой гелий-неоновый лазер с четырехзеркальным резонатором и знакопеременной механической подставкой: 1 – ситалловый моноблок, 2 – аноды, 3 – катод, 4 – зеркала оптического резонатора, 5 – фотодиод, предназначенный для регистрации информационного сигнала, 6 – фотодиоды системы автоматического регулирования периметра, 7 – смеситель призма, 8 – пьезоэлектрические преобразователи, 9 – датчик угловой скорости, 10 – виброподвес, 11 – высверленные каналы, внутри которых разрядом постоянного тока возбуждается активная среда лазера, 12 – диафрагма для селекции поперечных мод оптического резонатора

Для создания механических колебаний используется виброподвес 10, обладающий собственной резонансной частотой f и добротностью Q . При подаче на пьезоэлементы виброподвеса 10 переменного напряжения, он сообщает кольцевому лазеру гармонические вращательные колебания на резонансной частоте с амплитудой, изменяющейся по случайному закону.

Виброподвесом 10 управляет отдельная плата сервисной электроники, генерирующая в определенные моменты времени серию возбуждающих импульсов [4,5]. В качестве сигнала обратной связи она использует сигнал, снимаемый с электромеханического датчика угловой скорости 9. Также сигнал, с датчика 9 используется для вычитания колебаний на частоте подставки из выходных отсчетов угловой скорости.

Система вибрационной частотной подставки должна обеспечивать регулирование и стабилизацию амплитуды колебаний, которая выбирается в зависимости от диапазона измеряемых угловых скоростей, и ее шумление. В случае применения кольцевого лазерного гироскопа в авиационной БИНС базовые параметры для управления колебаниями на резонансной частоте следующие: амплитуда колебаний от 2 до 3-х угловых минут, стабилизация амплитуды на уровне не хуже 10 % от заданной, шумление амплитуды по нормальному закону распределения с глубиной модуляции от 10 до 30 % [4,5].

Недостатком традиционного подхода является большой уровень шума в выходном сигнале, обусловленный методом обработки первичных сигналов, необходимость использования намоточного элемента (датчик 9, рис. 1).

Лазерный гироскоп с прецизионной регистрацией перемещений интерференционной картины

В [7, 8] была разработана система прецизионной регистрации перемещений интерференционной картины путем дискретизации и цифровой обработки информационных сигналов лазерного гироскопа (рис. 2), которая позволяет:

- выделять информацию о параметрах вибрационной частотной подставки (амплитуде и частоте);
- использовать цифровые фильтры в качестве альтернативы прямому вычитанию колебаний на частоте подставки
- на порядок увеличить частоту отсчетов угловой скорости, формируемых на выходе ЛГ.

Аналоговые квадратурные сигналы с информационного фотодиода 6 поступают на усилители 7, которые согласуют их диапазон со входным диапазоном АЦП 8, который тактируется от отдельного источника синхронизации 9. Блок ОПС включает: ПЛИС 10 и вспомогательный микроконтроллер 11. Блок ОПС осуществляет:

- накопление первичных отсчетов квадратурных сигналов;
- определение параметров первичных сигналов;
- восстановление временного ряда для отсчетов угловой скорости.

Отсчеты угловой скорости передаются в микроконтроллер по цифровому интерфейсу. Микроконтроллер, осуществляет трансляцию этих данных по интерфейсу передачи данных на ПК для последующей обработки. Параллельно с этим в постпроцессоре по отсчетам восстановленного сигнала определяются параметры вибрационной частотной подставки: амплитуда и частота.

Устройство формирования частотной подставки представляет собой двухкаскадный усилитель, первый каскад которого работает в режиме фазовращателя (ФВ), а второй каскад представляет собой усилитель, работающий в режиме с ограничениями (ОУ).

Амплитуда механических колебаний кольцевого лазера регулируется путем управления напряжением питания ОУ от биполярного регулируемого источника 15. Управление ре-

гулируемым источником питания выполняется с помощью цифро-аналогового преобразователя, который является источником опорного напряжения для регулируемого источника питания [7].

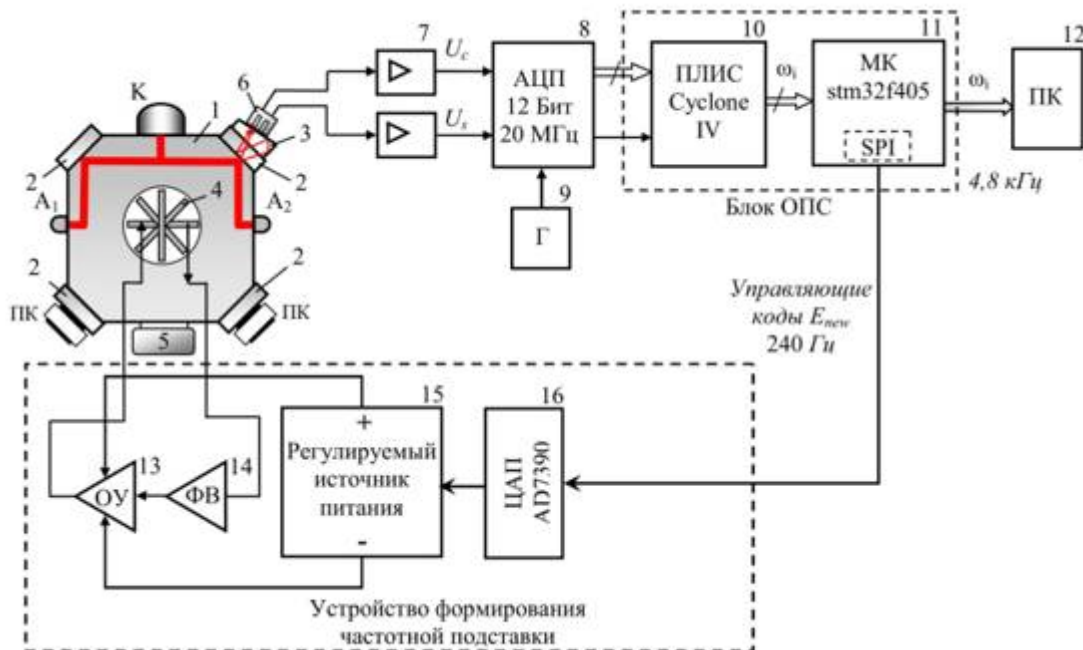


Рис. 2. Структурная схема лазерного гироскопа с прецизионной регистрацией перемещений интерференционной картины и цифровым управлением вибрационной частотной подставки [7, 8]

Таким образом, имеется задача разработки системы управления частотной подставкой лазерного гироскопа на базе нового метода обработки его информационных сигналов, обеспечивающей регулирование и стабилизацию амплитуды колебаний.

Библиографический список

1. А.М. Хромых. Электронная техника. Сер.11. Лазерная техника и оптоэлектроника, № 2 (54), 30 (1990).
2. Broslavets Y.Y., Kalmykova N.S., Fomitchev A.A., Ambartsumyan D.M., Polukeev E.A. Controlling the coupling of counterpropagating waves in a laser gyroscope with a nonplanar cavity when working with a Zeeman dither // Proceedings of 25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. - 28-30 May 2018. Saint Petersburg, Russia. p. 310-313
3. Azarova V.V., Golyaev Y.D., Savelyev I.I. Zeeman laser gyroscopes // Quantum Electronics. 2015. V. 45. № 2. P. 171-179
4. Chesnokov G.I., Polikovskiy E.F., Molchanov A.V., Kremer V.I. Some ways of improving the technical and operational characteristics of strapdown inertial navigation systems // Proceedings of 10th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. - 26-28 May 2003. Saint Petersburg, Russia. - P. 277-285
5. Молчанов А.В., Суминов В.М., Чиркин М.В. Формирование доминирующей погрешности лазерного гироскопа // Авиакосмическое приборостроение, № 9, 2004, с. 12-19.
6. Измерение характеристик лазерного гироскопа: Учеб. пособие / Под ред. А.С. Бессонов, Ю.Ю. Колбас, Т.И. Соловьева, - Москва, 2014, 31 с.
7. 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
8. Koshelev, V.I., Belokurov, V.A., Chirkin, M.V., Mishin, V.Y. FPGA-based signal processing module for digital laser gyroscope // Proceedings of 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2017. 11-15 June 2017. Bar, Montenegro. P.74-77

УДК 681.7; ГРНТИ 47.35.31

ИНТЕНСИВНОСТЬ НАКАЧКИ ТВЕРДОГО ЛАЗЕРА С ДЕЛЬТОВИДНЫМ СЕЧЕНИЕМ

Г.Д. Агаев

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

Аннотация. В работе исследуется распределение интенсивности лазерного излучения активным элементом треугольного сечения. Показано, что распределение интенсивности по сечению достаточно равномерно.

Ключевые слова: твердотельный лазер, активный элемент, алюмино-ирридиевый гранат, боковая диодная накачка.

PUMP INTENCITY OF SOLID LASER WITH DELTA CROSS SECTION

G.D. Agaev

Abstract. We study the intensity of radiation distribution of laser's active element with a triangular cross section. It is shown that the intensity distribution over the cross section is fairly uniform.

Keywords: solid-state laser, active element, aluminium-iridium garnet, side diode laser pump.

Боковая диодная накачка активного элемента (АЭ) лазера с круглым сечением имеет излучение с большой расходимостью, так как распределение интенсивности излучения накачки неравномерно распределяется по сечению: в центре АЭ интенсивность минимальная, а на периферии максимальная [1, 2]. В связи с этим А.Б. Ястребковым было предложено рассмотреть АЭ с дельтовидным сечением. Предполагается, что за счет полного внутреннего отражения и уменьшения сечения вдоль распространения излучения накачка будет более однородной.

В качестве первого приближения в настоящей работе рассматривается модель распределения интенсивности излучения по сечению активного элемента, предполагая, что свет распространяется по законам линейной оптики. Квантовые эффекты взаимодействия излучения с активным элементом не учитываются. Излучение падает на каждую грань по ее нормали (см. рис. 1). Интенсивность света спадает по закону Бугера-Ламберта-Бера.

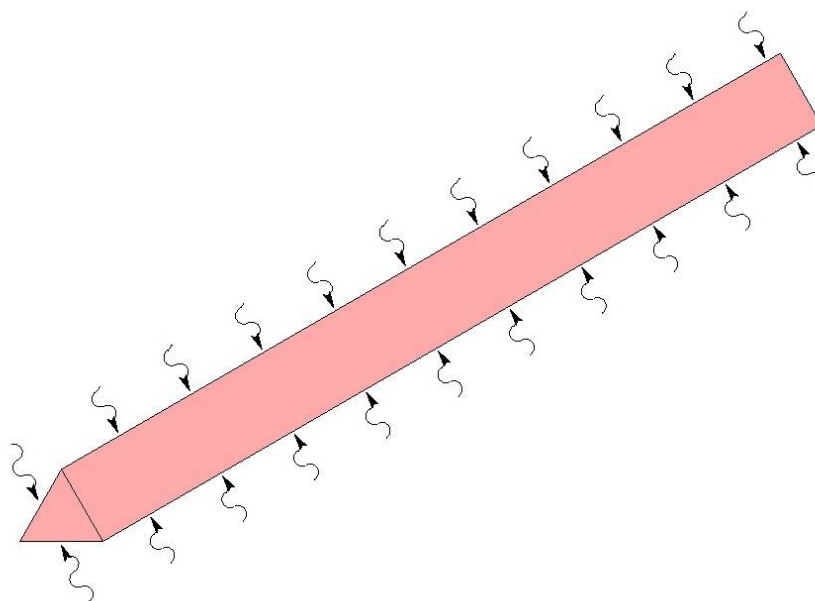


Рис. 1. Излучение падает по нормали

Функция распределения интенсивности по сечению

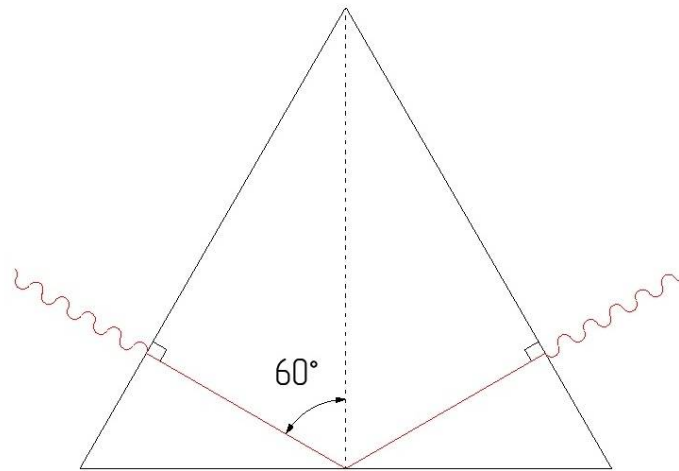


Рис. 2. Распределение излучения при нормальном падении на грань

Из рисунка 2 видно, по указанной траектории излучение проходит через точки сечения двумя путями: без отражения и через одно отражение. Достаточно рассмотреть излучение, проходящее по указанной траектории, в результате получим функции $I_1(d)$ и $I_2(d)$ соответственно. В заданную точку сечения излучение попадает через каждую из поверхностей, проходя расстояние d_1, d_2, d_3 . Очевидно, что d_1, d_2, d_3 являются функциями точки (x, y) . Общая интенсивность будет определяться, как сумма $I(x, y) = \sum_{i=1}^3 (I_1(d_i) + I_2(d_i))$.

Расстояние, проходимое излучением, падающим на первую сторону, можно разбить на две составляющие: $d_{1,12}, d_{1,23}$. Где $d_{1,12}$ – расстояние от первой до второй стороны, $d_{1,23}$ – расстояние от второй до 3 стороны вдоль луча. Если расположить два соприкасающихся треугольника (см. рис. 3), видно, что сумма составляющих равна высоте треугольного сечения, обозначим его, как H .

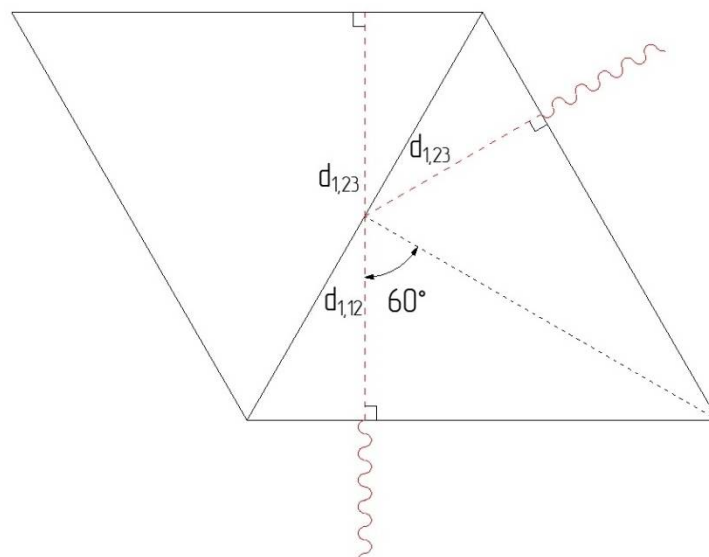


Рис. 3. Распределение излучения в соприкасающихся треугольниках

Обозначим через I_0 интенсивность падающего излучения. Для функции интенсивности $I_1(d_1)$, учтя бесконечное число отражений излучения по указанной траектории, получим геометрическую прогрессию:

$$\begin{aligned} I_1(d_1) &= A_3 I_0 (e^{-ad_1} + A_2^2 A_1 e^{-a(2d_{1,12} + 2d_{1,23} - d_1)}) \sum_{k=0}^{\infty} A_2^2 A_1^2 e^{-2a(d_{1,12} + d_{1,23})k} = \\ &= A_3 I_0 \frac{e^{-ad_1} + A_2^2 A_1 e^{ad_1} e^{-a2(d_{1,12} + d_{1,23})}}{1 - A_2^2 A_1^2 e^{-a2(d_{1,12} + d_{1,23})}}. \end{aligned}$$

Каждое внутреннее отражение будет сопровождаться поглощением, которое обозначим, как коэффициент A_2 для угла отражения, равного 60 градусам, и A_1 для угла, равного 0 градусам, а так же коэффициент отражения падающего луча обозначим, как A_3 , причем $A_3 = 1 - A_1$.

Рассмотрев путь излучения в случае $I_2(d_1)$, видим, что после двух отражений получаем аналогичную $I_1(d_1)$ ситуацию:

$$\begin{aligned} I_2(d_1) &= \\ &= A_3 I_0 \left(e^{-ad_{1,23}} A_2 e^{-ad_{1,12} + ad_1} + e^{-ad_{1,23}} A_2 e^{-ad_{1,12}} A_1 \frac{e^{-ad_1} + A_2^2 A_1 e^{ad_1} e^{-a2(d_{1,12} + d_{1,23})}}{1 - A_2^2 A_1^2 e^{-a2(d_{1,12} + d_{1,23})}} \right) = \\ &= A_3 I_0 e^{-a(d_{1,12} + d_{1,23})} A_2 \left(e^{ad_1} + A_1 \frac{e^{-ad_1} + A_2^2 A_1 e^{ad_1} e^{-a2(d_{1,12} + d_{1,23})}}{1 - A_2^2 A_1^2 e^{-a2(d_{1,12} + d_{1,23})}} \right) = \\ &= A_3 I_0 e^{-a(d_{1,12} + d_{1,23})} A_2 \frac{e^{ad_1} + A_1 e^{-ad_1}}{1 - A_2^2 A_1^2 e^{-a2(d_{1,12} + d_{1,23})}} \end{aligned}$$

Просуммировав обе функции и заменив $d_{1,12} + d_{1,23}$ высотой сечения H получим:

$$I_1(d_1) + I_2(d_1) = A_3 I_0 \frac{e^{-ad_1} + A_2 e^{-a(H-d_1)}}{1 - A_2 A_1 e^{-aH}}$$

Откуда определяем общую интенсивность в заданной точке:

$$I(x, y) = \frac{A_3 I_0}{1 - A_2 A_1 e^{-aH}} \left(e^{-ad_1} + e^{-ad_2} + e^{-ad_3} + A_2 (e^{-a(H-d_1)} + e^{-a(H-d_2)} + e^{-a(H-d_3)}) \right).$$

Выводы

Полученное аналитическое решение позволяет легко находить интенсивность в любой точке сечения. Для построения графика распределения интенсивности воспользуемся функцией $I(x, y)$ и значениями для алюмо-иттриевого граната, используемого в качестве активного элемента твердотельного лазера: $A_1 = 0.08$, $A_2 = 1$, $A_3 = 0.92$, $a = \frac{0.8}{\text{мм}}$, $I_0 = 8 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$.

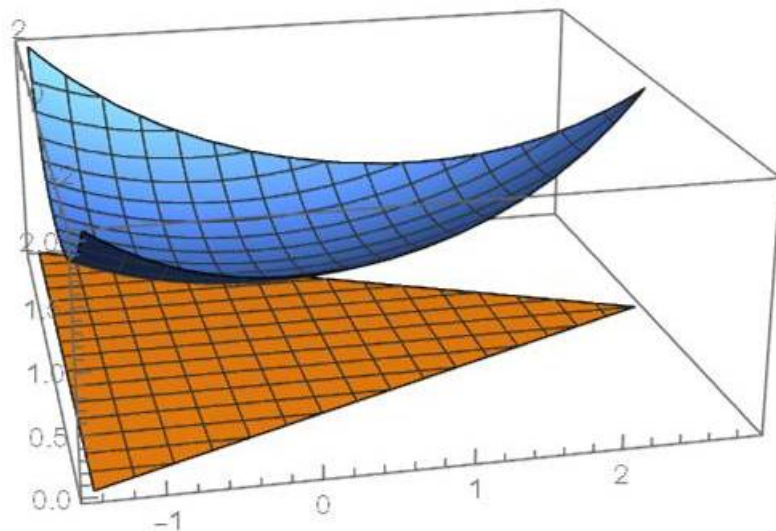


Рис. 4. Распределение интенсивности по сечению стержня из алюмо-иттриевого граната

На этом графике видно, что распределение интенсивности в данной модели достаточно равномерно.

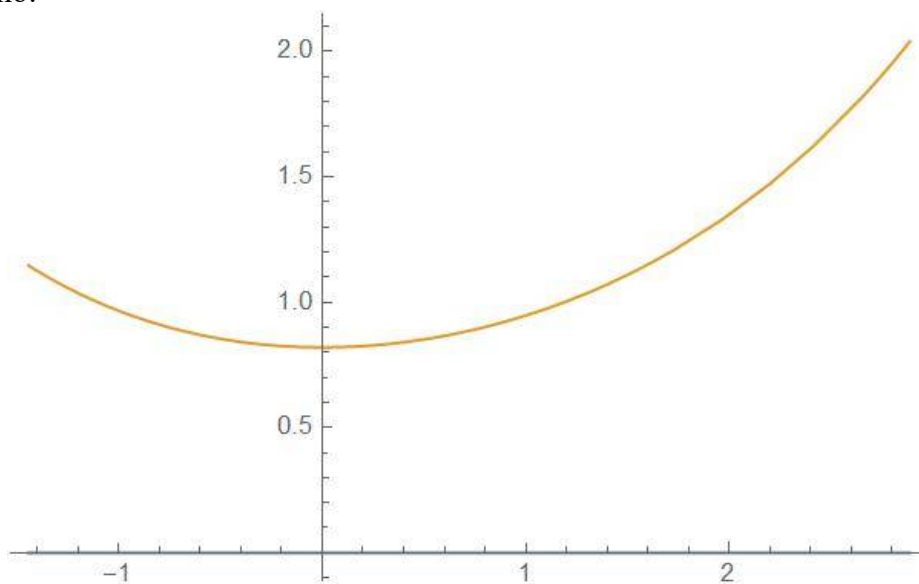


Рис. 5. Распределение интенсивности по высоте сечения стержня

На последнем графике виден разброс максимального и минимального значений интенсивности. Максимальное значение интенсивность имеет в углах сечения, как видно на рисунке 4. На практике углы активного элемента скруглены, что приведет к большему рассеиванию излучения по сечению и, соответственно, к большей равномерности распределения интенсивности.

УДК 621.396; ГРНТИ 47.47

УЛУЧШЕНИЕ МАССОГАБАРИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОЛУЧЕВОГО ПРИБОРА С РЕВЕРСНОЙ МАГНИТНОЙ ФОКУСИРУЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ

А. Н. Дармаев, С. П. Морев, Э. К. Муравьев, В. М. Саблин

АО Научно-производственное предприятие «Торий», г. Москва, npp@toriy.ru

Аннотация. Представлены результаты анализа транспортировки электронного потока в магнитном поле реверсной фокусирующей системе многолучевого прибора. Рассмотрены различные возможности модификации магнитной системы, улучшающие ее массогабаритные характеристики и структуру электронного потока.

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

IMPROVING THE MASS AND SIZE CHARACTERISTICS OF A MULTIBEAM DEVICE WITH A REVERSE MAGNETIC FOCUSING SYSTEM

A.N. Darmaev, S.P. Morev, E.K. Muraviov, V.M. Sablin

JSC "RPE "Toriy", Moscow, Russia, npp@toriy.ru

Abstract. The results of the analysis of the transport of the electron flow in the magnetic field of the reverse focusing system of the multipath device are presented. Various possibilities of modifying the magnetic system that improve its mass and size characteristics and the structure of the electron flow are considered.

Keywords: electron beam, electron-optical system (EOS), reverse magnetic focusing system (RMFS)

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, реверсные магнитные фокусирующие системы (РМФС). В случае использования многолучевых электронно-оптических систем оси симметрии парциальных электронных потоков не совпадают с осью симметрии РМФС. Это выдвигает дополнительные требования к формированию и дальнейшей транспортировке электронных потоков в магнитном поле реверсной системы.

В докладе представлены материалы математического моделирования транспортировки электронного потока в реверсных системах различной конфигурации. Показано, что за счет модификации конструкции РМФС возможно обеспечить транспортировку электронного потока той же протяженности при существенно лучших массогабаритных характеристиках РМФС.

Постановка задачи

Обычная реверсная магнитная фокусирующая система состоит из радиально намагниченных колец с чередующимся направлением намагниченности и магнитопроводов, обеспечивающих требуемую структуру распределения магнитного поля вдоль оси системы (рис.1). Поскольку многолучевая ЭОС, как правило, экранирована от магнитного поля, то в областях электронной пушки и коллектора на концах РМФС размещают мощные магнитопроводы (экраны) для подавления так называемых «обратных хвостов» распределения магнитного поля в этих областях. Это обеспечивает магнитное поле реверсной системы требуемой структуры, необходимое для транспортировки электронного пучка, однако сокращает протяжен-

ность области распределения магнитного поля по сравнению с системой, в которой экраны отсутствуют. В работе [1] показано, что «обратный хвост» распределения магнитного поля может оказывать положительное действие в однолучевой ЭОС с фокусировкой МПФС, играя роль согласующего элемента для обеспечения транспортировки электронного потока с минимальными пульсациями. Для рассматриваемой реверсной системы подобный подход может уменьшить количество и размер магнитов в системе, улучшая массогабаритные характеристики РМФС. Кроме того, получающееся увеличение количества реверсов при заданной протяженности области транспортировки магнитным полем, приводит к уменьшению полупериодов реверсных ячеек и, в соответствии с работой [2], к возможному улучшению устойчивости фокусировки электронных потоков.

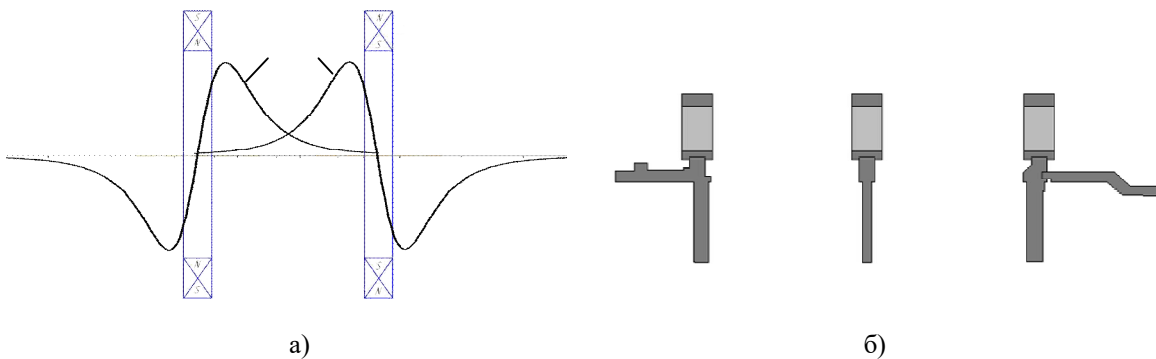


Рис. 1. Распределение магнитного поля на оси радиально намагниченных магнитов (а) и эскиз реверсной магнитной фокусирующей системы для многолучевой ЭОС (б)
Вес магнитной системы и магнитопроводов 28 кг.

Результаты расчетов и их обсуждение

В качестве примера была рассмотрена однорядная многолучевая ЭОС с расположенными по азимуту парциальными пучками. Ускоряющее напряжение ЭОС было выбрано равным $U=32000$ В, микропереванс пучка составлял величину $R_{\mu}=0,5$ $\mu\text{A}/\text{B}^{3/2}$, диаметр пролетного канала $2R_{\text{кан}}=7$ мм.

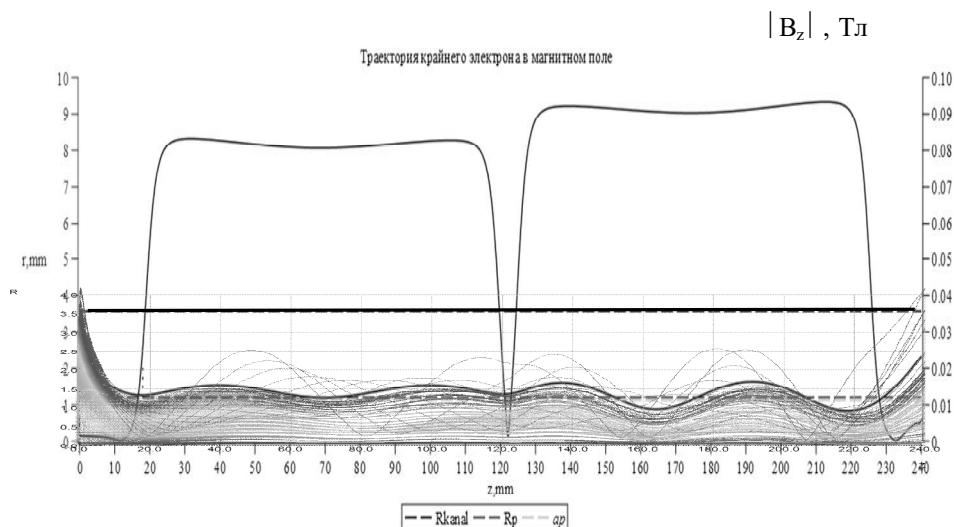


Рис. 2. Транспортировка парциального электронного потока (2,3) в магнитном поле РМФС (1)
1 – распределение магнитного поля вдоль оси пучка, 2 – граница пучка в параксиальном приближении,
3 – траектории пучка в двумерном приближении

Из анализа результатов расчетов, представленных на рисунке 2, следует, что парциальный электронный пучок транспортируется двумя ячейками РМФС (см. рис.1б) на расстояние порядка 240 мм с амплитудой пульсаций $\Delta=33\%$. Отметим, что из-за малой компрессии пучка по площади ($2R_{кц}=8$ мм), пульсации границы парциального пучка невелики. Кроме того, влияние структуры магнитного поля на транспортировку парциального потока в пролетном канале может быть проведено на основе параксиального уравнения границы пучка [3].

Для транспортировки электронного потока на расстояние 240 мм была спроектирована магнитная фокусирующая система реверсного типа, состоящая из двух магнитов с радиальной намагниченностью и магнитопроводами, обеспечивающими почти прямоугольное распределение магнитного поля в области, примыкающей к пушке и коллектору (рис. 3).

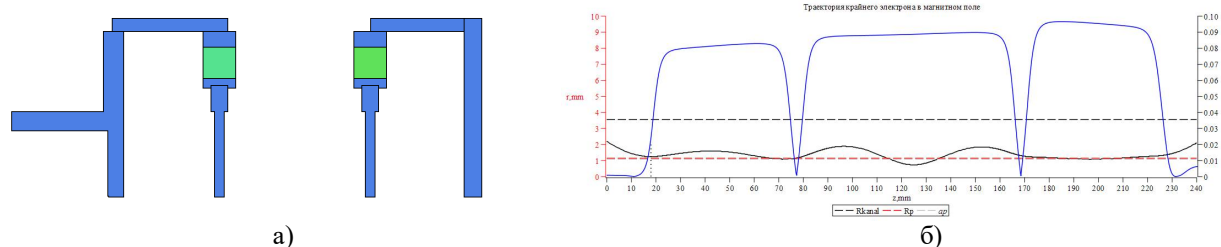


Рис. 3. Эскиз модифицированной реверсной магнитной фокусирующей системы для многолучевой ЭОС (а) и транспортировка парциального электронного потока (2) в магнитном поле (1) модифицированной РМФС (б)

Анализ результатов расчетов, представленных на рисунке 3б, показал, что в параксиальном приближении пульсации границы пучка не превышали $\Delta=50\%$. Уменьшение расстояния между магнитами позволило уменьшить внешний диаметр магнитов при сохранении амплитуды магнитного поля. Как следует из анализа рисунка 3б, из-за уменьшения протяженностей ячеек реверсной системы уменьшились пульсации границы пучка и нарастание его диаметра пучка к концу фокусирующей системы. Для дальнейшего уменьшения амплитуды пульсаций парциального пучка, в соответствии с рекомендациями работ [4], внутри каждой из ячеек размещались вставки из магнитомягкого материала для изменения структуры магнитного поля. На рисунке 4 представлены пульсации границы парциального электронного пучка по мере его продвижения вдоль оси пролетного канала.

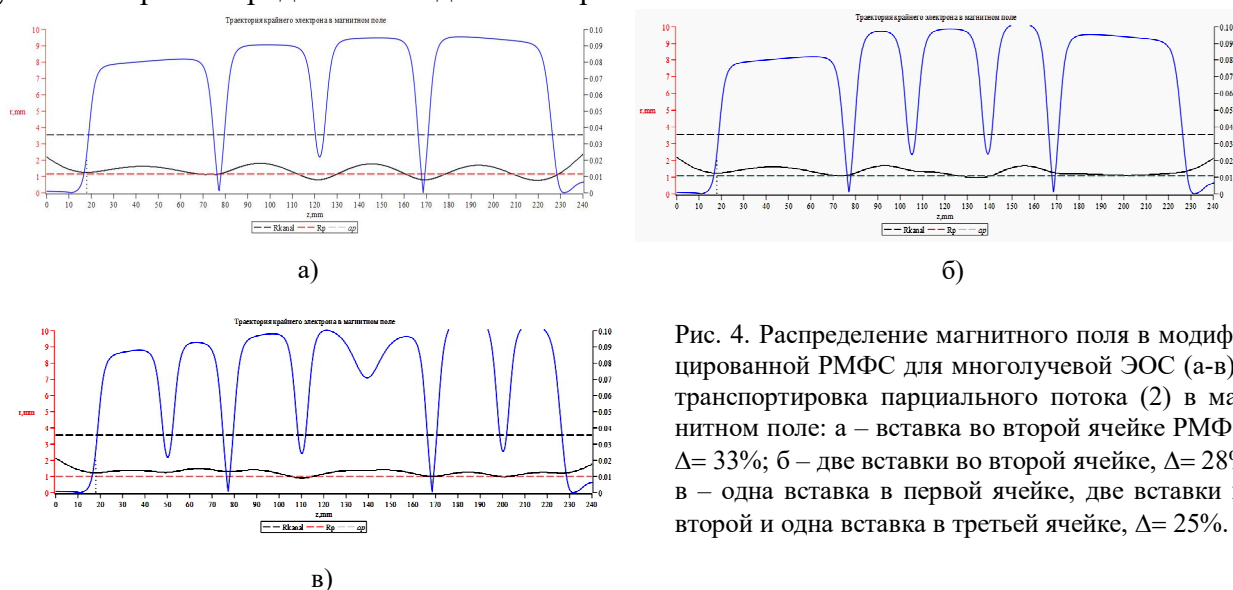


Рис. 4. Распределение магнитного поля в модифицированной РМФС для многолучевой ЭОС (а-в) и транспортировка парциального потока (2) в магнитном поле: а – вставка во второй ячейке РМФС, $\Delta=33\%$; б – две вставки во второй ячейке, $\Delta=28\%$; в – одна вставка в первой ячейке, две вставки во второй и одна вставка в третьей ячейке, $\Delta=25\%$.

Сопоставление результатов 3D-расчетов ЭОС с обычной и с модифицированной РМФС (рис. 5) показало, что найденное распределение магнитного поля в модифицированной РМФС обеспечивает транспортировку электронного пучка с пульсациями и смещениями электронного покла не хуже, чем с обычной РМФС, а вес найденной конструкции РМФС на 25% меньше, чем вес обычной РМФС.

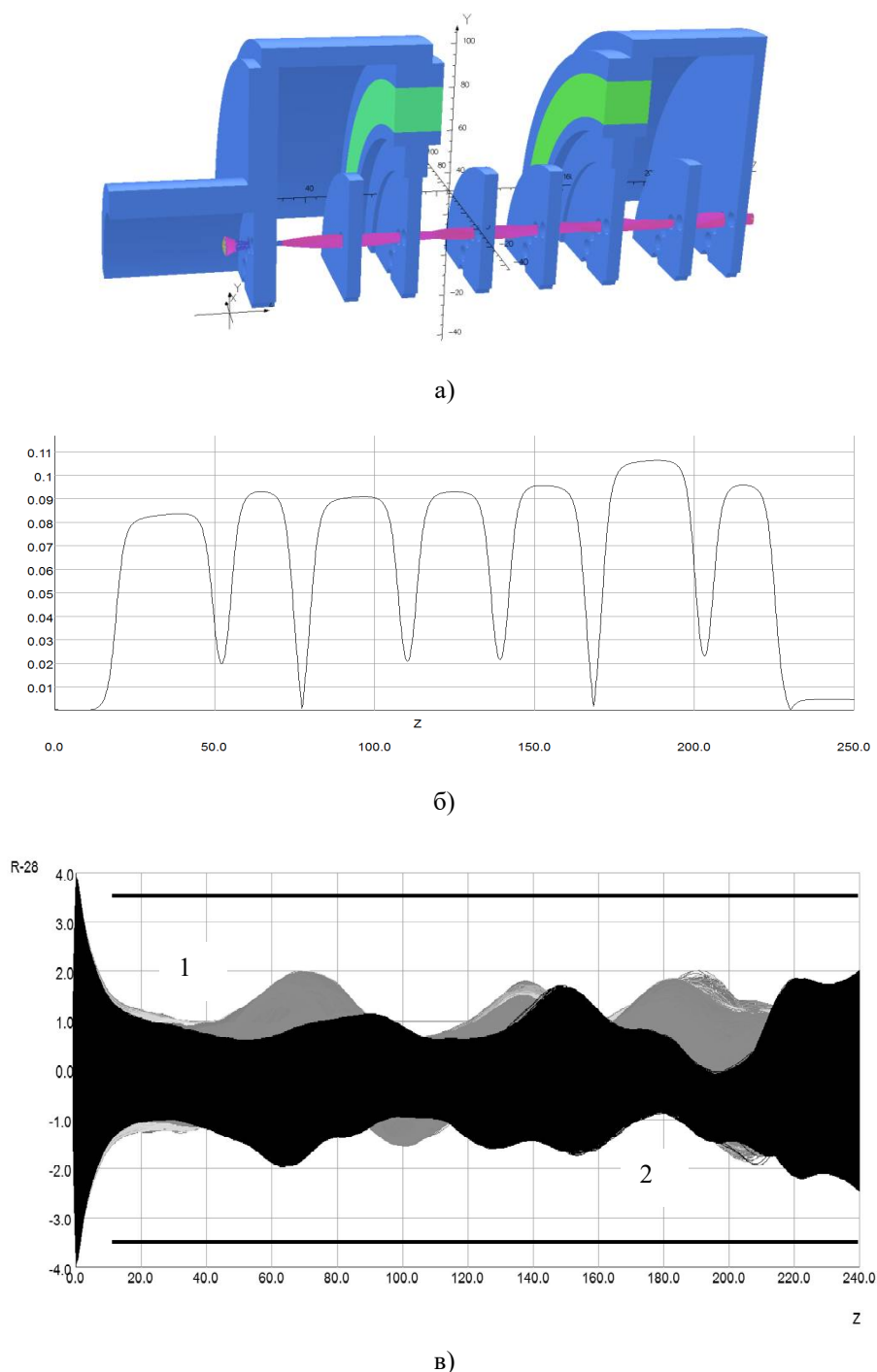


Рис. 5. Эскиз (а), распределение магнитного поля в модифицированной РМФС для многолучевой ЭОС (б) и транспортировка частичного потока (1,2) в пролетном канале (в): 1 – обычная РМФС, 2 – модифицированная РМФС

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 // СТНО-2016, РГРТУ. – 2-4 марта 2016 года. Т.2. с. 151-154
3. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. М., 1966.-456с.
4. А.Н Дармаев, 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 621.396; ГРНТИ 47.47

МНОГОЛУЧЕВАЯ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА С КРИВОЛИНЕЙНЫМИ ОСЯМИ ФОРМИРОВАНИЯ ПАРЦИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ

А. Н. Дармаев, С. П. Морев, Э. К. Муравьев, В. М. Саблин

АО Научно-производственное предприятие «Торий», г. Москва, npp@toriy.ru

Аннотация. Представлены результаты проектирования многолучевой электронно-оптической системы (ЭОС), в которой парциальные электронные пушки имеют криволинейные оси формирования электронных потоков, а двухреверсная магнитная фокусирующая система (РМФС) состоит из двух радиально намагниченных магнитов и магнитопроводов. Рассмотрены различные возможности модификации магнитной системы, улучшающие ее массогабаритные характеристики за счет введения в структуру магнитного поля высших гармонических составляющих, и обеспечивающие уменьшение пульсаций потока в каналах транспортировки.

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

MULTI-BEAM ELECTRON-OPTICAL SYSTEM WITH A CURVED AXIS FORMATION PARTIAL ELECTRON BEAMS

A.N. Darmaev, S.P. Morev, E.K. Muraviov, V.M. Sablin

JSC "RPE "Toriy", Moscow, Russia, npp@toriy.ru

Abstract. The results of designing a multibeam electron-optical system (EOS), in which partial electron guns have curved axes of electron flow formation, and a two-reverse magnetic focusing system (RMFS) consists of two radially magnetized magnets and magnetic cores, are presented. Various possibilities of modification of the magnetic system are considered, which improve its mass and size characteristics by introducing higher harmonic components into the structure of the magnetic field, and provide a reduction in flow pulsations in the transport channels.

Keywords: electron beam, multibeam electron-optical system (EOS), reverse magnetic focusing system.

Несмотря на повсеместное вытеснение электровакуумных приборов СВЧ полупроводниковыми устройствами, при разработках аппаратуры с большой выходной мощностью многолучевые электровакуумные приборы СВЧ по-прежнему имеют ключевое значение. В «прямоточных» ЭОС (в которых центры катодов и пролетных каналов парциальной ЭОС расположены на одной оси) для обеспечения требуемой величины тока в ряде случаев необходимо наращивать величину плотности тока с катодов. Это приводит к уменьшению надежности работы и срока службы прибора. В связи с этим представляет интерес разработка электронно-оптических систем (ЭОС) с криволинейной осью формирования пучка, которая

позволяет увеличить площадь эмитирующей поверхности катода и, как следствие, уменьшить величину плотности тока с катодов. Такие многолучевые ЭОС, по сравнению с «прямоточными» ЭОС, могут обеспечить более высокую плотность тока сформированного потока в пролетных каналах и использовать только один ряд электронных лучей, что может существенно облегчить проектирование электродинамической системы, например, для многолучевых приборов миллиметрового диапазона.

В работе представлены результаты проектирования многолучевой ЭОС, в которой парциальные электронные пушки имеют криволинейные оси формирования электронных потоков, и область многолучевой электронной пушки экранирована от магнитного поля реверсной фокусирующей системы. Показано, что за счет применения наклонной электростатической линзы в области формирования электронного потока можно создать простую конструкцию электронной пушки, обеспечивающую необходимые параметры пучка на входе в магнитную систему и его транспортировку в многолучевой ЭОС.

Постановка задачи

Ранее в работе [1] уже обсуждались некоторые попытки проектирования подобных ЭОС. Однако все они обладали рядом недостатков, одним из которых является сложность конструкции. В данной работе была проведена попытка упростить конфигурацию электродов, формирующих пучки с криволинейной осью.

В общем случае электронная пушка состоит из: катода (U_k), фокусирующего электрода (U_ϕ с потенциалом катода), вытягивающего электрода (U_1), отклоняющего электрода (U_2) и анода (U_a). На рисунке 1 изображена конфигурация электродов, обеспечивающая отклонение пучка на 20° . Электроды U_ϕ и U_1 обеспечивают первичное формирование электронного потока и низковольтное управление током пучка. С помощью электродов, образующих наклонную электростатическую линзу, и потенциалов U_2 и U_a обеспечивается необходимое отклонение пучка и ускорение электронного потока, который подается на вход магнитной системы и фокусируется магнитным полем для последующей транспортировки в пролетном канале.

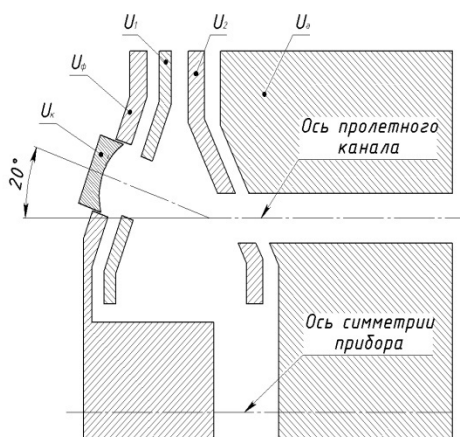


Рис. 1. Схема электродов пушки с криволинейной осью формирования пучков

Результаты расчетов и их обсуждение

В качестве примера была рассмотрена прямоточная многолучевая электронная пушка, обеспечивавшая формирование восемнадцати парциальных электронных потоков с катодов диаметром 6.0 мм и ускоряющем напряжении $U_a=24000$ В. Ток пучка парциальной электронной пушки составлял величину $I_0=1.6$ А, диаметры каналов транспортировки $2R_{\text{кан}}=6.0$ мм, а

центры катодов отстояли от оси многолучевой ЭОС в радиальном направлении на величину $R=21.5$ мм.

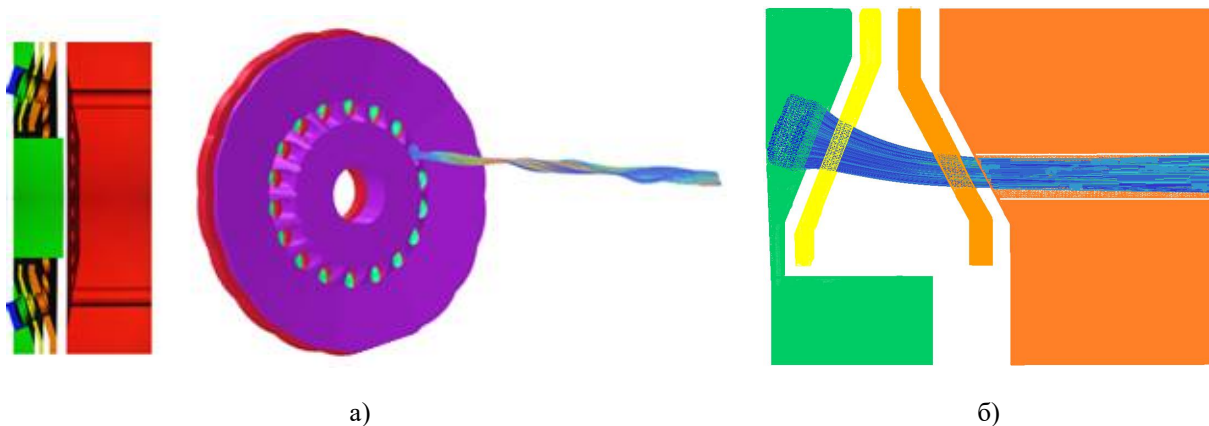


Рис. 2. Конфигурация электродов электронной пушки (а),
распределение потенциала и траектории частичного потока (б)

На рисунке 2 показаны результаты расчета траекторий электронного потока в электронной пушке с наклонной электростатической линзой ($R=26.4$ мм).

Основные параметры электронной пушки с криволинейной осью частичного потока представлены в таблице 1.

Анализ результатов расчета показал, что полученная конфигурация электродов обеспечивает отклонение пучка на 20° при требуемых параметрах электронного потока, обладает относительной простотой изготовления электродов электронной пушки.

За счет увеличения диаметра катодов и возможности их расположения на большем по сравнению с исходным радиусе без изменения количества катодов, плотность тока каналы транспортировки, которое позволяет осуществить прохождение электронных пучков с частичного катода спроектированной пушки снизилась до $3,2 \text{ А/см}^2$ по сравнению с $5,66 \text{ А/см}^2$ в исходной прямоточной пушке. Полученная конфигурация электродов пушки обеспечивает формирование частичных потоков на входе в каналы транспортировки с прохождением потоков без потерь при фокусировке реверсным магнитным полем. В качестве примера на рисунке 3 представлен расчет транспортировки частичного пучка в пролетном канале в магнитном поле со сложным гармоническим составом и соответствующая этому распределению конструкция двухреверсной магнитной фокусирующей системы.

Таблица 1. Параметры электронной пушки

Параметр	Значение
Ток частичного пучка, А	1.6
Потенциал фокусирующего электрода, В	0
Потенциал управляющего электрода, В	4500
Потенциал отклоняющего электрода, В	24000
Потенциал анода, В	30000
Диаметр катода, мм	8.0
Количество лучей	18

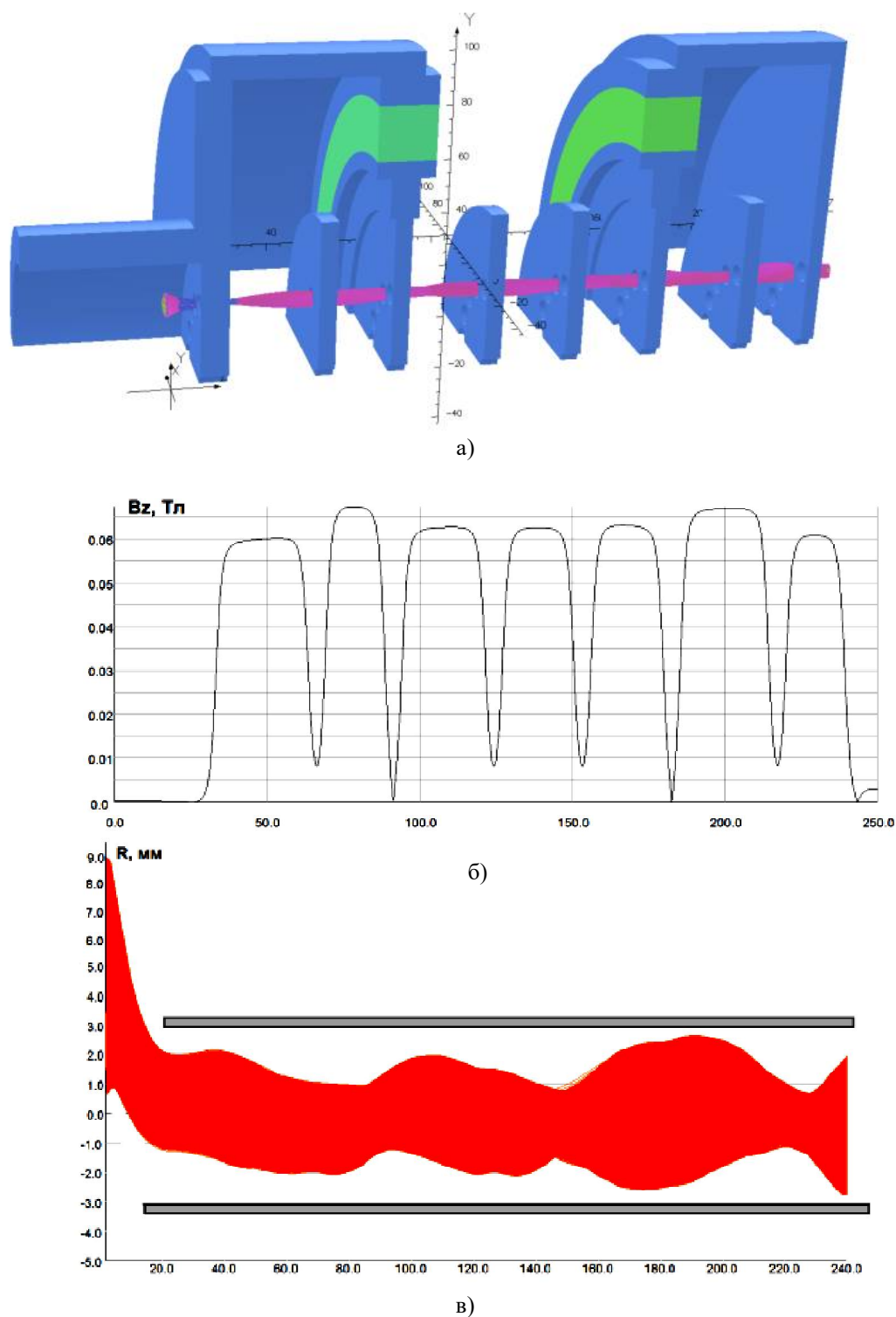


Рис. 3. Конструкция РМФС (а), распределение магнитного поля (б) и парциальный электронный поток в канале транспортировки (в)

1. Морев С.П., Саблин В.М. Формирование и транспортировка электронных потоков в многолучевой электронно-оптической системе с криволинейной осью формирования/ Материалы XIX координационного научно-технического семинара по СВЧ технике Н. Новгород 5-7 сентября 2017, С.36-38.

УДК 621.79; ГРНТИ 55.22.19

НЕРАЗЪЕМНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ УГЛЕГРАФИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ С КЕРАМИКОЙ ВК94-2 МЕТОДОМ ПАЙКИ

Н.И. Бабкова, Л.Т. Баймагамбетова, Е.В. Горшкова, Л.С. Плешкова,
Д.И. Кириченко, Д.А. Нестеров, В.И. Шестеркин

Акционерное общество «Научно производственное предприятие» Алмаз»
Российская Федерация, Саратов, Shesterkinvi@almaz-rpe.ru

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы технологии металлизации и пайки токоприемных деталей коллекторов электронов из графитов марки МПГ 7, МИГ 2 и изотропного пиролитического графита (ПГИ) и их пайки с керамикой ВК94-2.

Ключевые слова: технология металлизации углеграфита, пайка углеграфитовых материалов,

SURFACE METALLIZATION OF CARBON-GRAPHITE PARTS FOR SOLDERING

N.I. Babkova, L.T. Baimagambetova, E.A. Gorshkova, L.S. Pleshkova,
D.I. Kirichenko, D.A. Nesterov, V.I. Shesterkin

JSC «RPE «Almaz»,
Russian Federation, Saratov, Shesterkinvi@almaz-rpe.ru

Abstract. In this paper the issues of metallization technology of current-collecting electron parts of the collector made of graphite of make МПГ 7, МИГ 2 and isotropic pyrolytic graphite (PGI) and their soldering with ceramic ВК94-2 are reviewed.

Keywords: metallization technology of graphitized carbon, graphitized carbon materials soldering

Важной характеристикой углеграфитовых материалов является низкое значение коэффициента вторичной электронной эмиссии (КВЭЭ). Даже для нетекстурированной поверхности его величина не превышает 0.6, что вдвое меньше, чем для меди. Использование углеграфитовых материалов для изготовления ступеней коллекторов вакуумных СВЧ приборов, таких как ЛБВ и клистроны, позволит повысить их КПД на 3-5 % [1]. Однако использование углеграфитовых материалов для данных целей сдерживается трудностями реализации прочных соединений с металлическими и керамическими деталями методом пайки, связанными с химической инертностью углеродных материалов к большинству металлов, за исключением металлов из переходной группы. В связи с этим для получения прочных паяных соединений используют, как правило, многокомпонентные припои с добавками адгезионно-активных элементов (Ti, Zr, Nb, Ta, Mo, Ni и др) [2]. Для получения качественных паяных соединений углеграфитовых деталей с керамикой необходимо выбрать для металлизации материал, образующий прочные химические связи с поверхностью графитовой детали и способ его нанесения на поверхность детали под спай.

Целью данной работы является разработка технологии получения прочных соединений деталей из графитов марки МПГ 7, МИГ 2 и изотропного пиролитического графита (ПГИ) с керамикой ВК94-2 методом пайки золотомедным припоем ПЗлМ37,5В.

Металлизация поверхностей деталей из искусственных графитов

Исследования вопросов металлизации и пайки были проведены для трех марок искусственных графитов: МПГ 7, МИГ 2 и пиролитического графита изотропного (ПГИ) с перспективой их использования в качестве материала токоприемных деталей (ступеней) коллекторов электронов для СВЧ приборов, таких как ЛБВ и клистроны. Преимуществом данных материалов, в сравнении с традиционно используемыми для этих целей медью и сплавами МД15 и МД50, является способность выдерживать температуры более 2000°C без изменения

физико-химических и механических свойств. ПГИ обладает уникальным свойством – его прочность возрастает при увеличении температуры.

Для улучшения адгезии металлизационного покрытия поверхности под пайку углеродных деталей подвергались текстурированию двумя способами: обработкой в концентрированной серной кислоте в течение нескольких секунд (рис. 1) и термохимическому травлению пленкой никеля при температуре 1050°C в среде водорода.

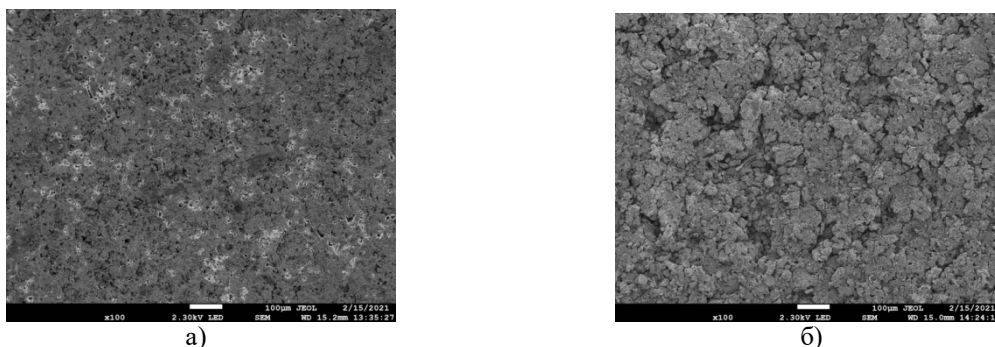


Рис. 1. Поверхность графита МПГ 7 до обработки в серной кислоте (а) и после обработки (б)

При увеличении времени травления до одной минуты наблюдалось разрыхление поверхности и разрушение краев деталей, толщина которых составляла ~ 0.3 мм, при незначительных механических нагрузках. В качестве материала металлизационного покрытия в виде тонких пленок были использованы молибден и никель. Перед металлизацией графитовые детали подвергались химической очистке в фосфатно-щелочном растворе с последующей ультразвуковой очисткой в ацетоне и сушкой на воздухе. Формирование пленки молибдена толщиной $1.8 \div 2.0$ мкм осуществлялось методом ионно-плазменного напыления. Нанесение пленки никеля толщиной $5 \div 6$ мкм осуществлялось методом гальванического осаждения.

Пайка графитовых деталей с керамикой ВК94-2

Отрабатывалась технология торцевых и цилиндрических графито-керамических спаев припоем ПЗлМ37,5В из фольги диаметром 10,5 мм. Торцевым спаем были соединены графитовые (МПГ 7, МИГ 2 и ПГИ) и керамические стержни диаметрами 10.5 мм и длиной 49 мм.

Торцы соединяемых стержней были металлизированы пленкой молибдена толщиной $1.8 \div 2.0$ мкм. Пайка осуществлялась при температуре $T=1030^\circ\text{C}$ в среде водорода. Время выдержки указанной температуры составляло 1 минуту. Скорость подъема и снижения температуры пайки $V=15 \div 20^\circ\text{C}/\text{мин}$.

Прочность торцевых спаев графитов МПГ 7 и МИГ 2 с керамикой ВК94-2 исследовалась на разрывной машине «Импульс Р5». Концы спаянных стержней размещались на металлических конусообразных опорах. Воздействие механической нагрузки осуществлялось деталью в форме конуса в точке спая. Скорость опускания нагрузки составляла 0.5 мм/мин. На трех исследуемых образцах торцевых спаев произошло разрушение графитовых стержней при усилии $0.35 \div 0.235$ кН ($36.7 \div 24.0$ кг) (рис. 2). В обоих спаях произошли изломы по графиту.



Рис 2 .Торцевой спай стержня из МПГ 7 с металлизацией пленкой из молибдена и керамики BK94-2 (а), торцевой спай стержня из МИГ 2 с металлизацией из молибдена и керамики BK94-2 (б)

Аналогичные испытания прочности торцевого спаи были проведены для металлизационного покрытия торцов стержней из МПГ 7, МИГ 2 и ПГИ пленкой никеля толщиной $5\div 6$ мкм с последующим термическим отжигом в водороде при $T=1050^{\circ}\text{C}$ в течение 5 минут. Торцы графитовых стержней перед никелированием текстурированию в серной кислоте не подвергались. Спаи разрушились по торцам графитовых стержней из МПГ 7 и МИГ 2 при нагрузке $0.16\div 0.18$ кН из-за недостаточной адгезии пленки никеля к поверхностям графитовых стержней всех указанных марок графитов (рис.3).

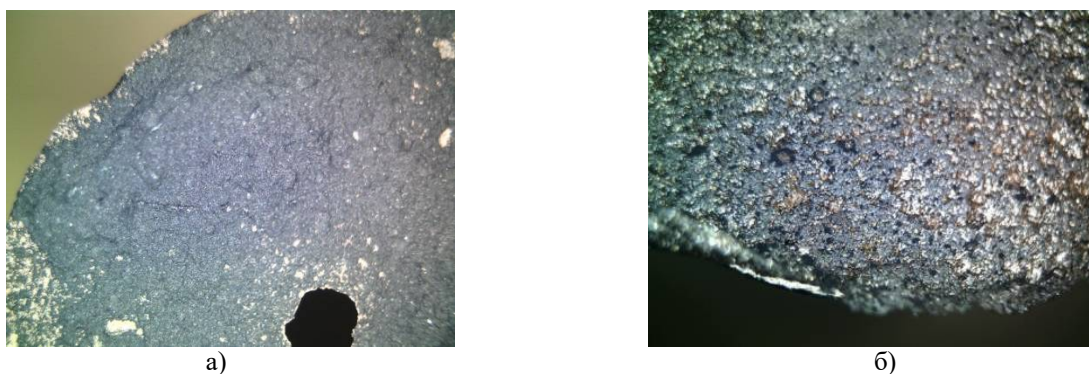


Рис. 3. Плоскость излома покрытых стержня из МПГ 7 (а), из МИГ 2(б)

На рисунке 4 представлены фотографии спаянных припоем ПЗлМ37,5В графито-керамических узлов из графита марки МПГ 7 для коллектора электронов ЛБВ.



Рис. 4. Спаянные узлы: МПГ 7 –BK94-2 с металлизацией Mo (а), и Ni (б)

Паяные графито-керамические узлы с металлизацией графита Мои Ni успешно прошли испытания на 30 термоударов в среде азота при температуре 700°C со скоростью изменения температуры 80°C/мин на установке термоциклирования. После термоударов внешний вид узлов не изменился, трещины и сколы на поверхности и кромках деталей отсутствовали.

Работы по улучшению адгезии металлизационных покрытий графитовых деталей пленкой никеля требуют проведения дальнейших исследований.

Библиографический список

1. Ramins P., Curren A.N.. Performance of textured carbon in copper electrode multisnag depressed collectors with medium power traveling wave tubes. NASA.TP – 2665. November 1986.
2. Сотникова Е.М., Радзимовская Н.М. Углеродистые 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.

УДК 621.373.826; ГРНТИ 29.33.15

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПЕРИМЕТРА ЦИФРОВОГО КОЛЬЦЕВОГО ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА

М.В. Чиркин, А.Е. Серебряков, Ю.Р. Иваненко

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

Аннотация. Описаны основные принципы регулирования периметра кольцевого резонатора, представлены результаты моделирования системы регулирования периметра цифрового лазерного гироскопа в случае синфазного перемещения сферических зеркал при подаче на пьезокорректоры напряжения прямоугольной формы в диапазоне от –1 до +1 В.

Ключевые слова: лазерный гироскоп, кольцевой лазер, пьезокорректор, система регулировки периметра кольцевого резонатора, квадратурные сигналы.

SIMULATION OF PERIMETER ADJUSTMENT SYSTEM FOR DIGITAL RING LASER GYROSCOPE

M.V. Chirkin, A.E. Serebryakov, J.R. Ivanenko

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

Abstract. The article describes the main principles of ring cavity perimeter adjustment and shows the results of simulation of cavity perimeter adjustment system for digital laser gyroscope in the event of the inphase displacement of spherical mirrors, when rectangular voltage in the range from –1 to +1 V is applied to piezoelectric transducers.

Keywords: laser gyro, ring laser, piezoelectric transducer, ring cavity perimeter adjustment system, quadrature signals.

Введение

В настоящее время в бесплатформенных инерциальных навигационных системах летательных аппаратов в качестве датчиков угловой скорости используются малогабаритные прецизионные лазерные гироскопы (ЛГ). Основой ЛГ является кольцевой гелий-неоновый лазер. Оптический резонатор этого лазера образован либо одним сферическим и двумя плоскими зеркалами (рис. 1), либо двумя сферическими и двумя плоскими зеркалами (рис. 2). Оптическая ось резонатора соответственно близка к сторонам треугольника или квадрата. Подложки зеркал и корпус резонатора изготовлены из стеклокерамики (ситалла СО-115М, СО-33М, зеродура [1]) и соединены через оптический контакт. Выбор оптической стеклокерамики определяется малостью температурного коэффициента линейного расширения ($\sim 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) в диапазоне температур от –60 до +80 °C [2].

Кольцевой лазер (КЛ) генерирует встречные пучки оптического излучения с длиной волны 632,8 нм [2]. В диапазоне температур от -60 до $+70$ °С периметр кольцевого резонатора изменяется в пределах четырех длин волн (рис. 3). В процессе эксплуатации ЛГ за счет термического расширения моноблока происходит изменение оптической длины пути резонатора, что приводит к увеличению порога захвата и изменению масштабного коэффициента [3-5]. Для решения этой проблемы используются различные принципы регулирования периметра кольцевого резонатора.

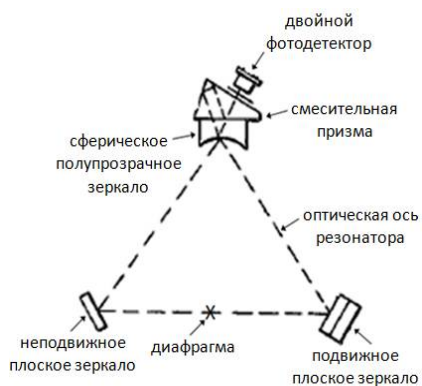


Рис. 1. Трехзеркальный резонатор КЛ

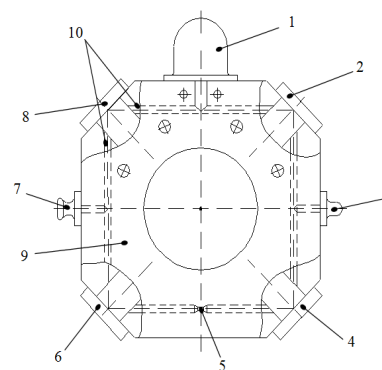


Рис. 2. Конструкция КЛ с четырехзеркальным резонатором (б): 1 – катод; 2,8 – плоские зеркала; 3,7 – анод, анод-штенгель; 4,6 – сферические зеркала; 5 – диафрагма; 9 – корпус резонатора; 10 – оптическая ось резонатора

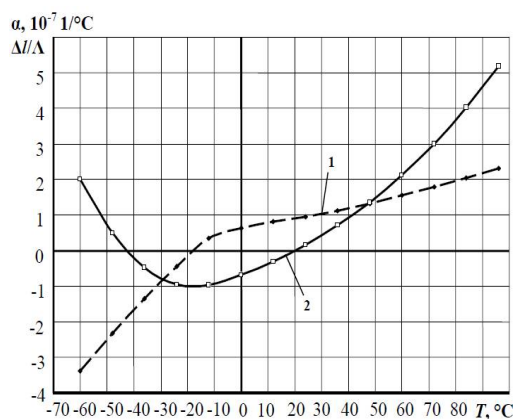


Рис. 3. Зависимость температурного коэффициента линейного расширения α силалла СО-115М (1) [6] и отношения Δ/Λ приращения длины периметра 28 см резонатора к длине волны He-Ne лазера ($\Lambda=0,6328$ мкм) (2) от температуры [7]

Основные принципы регулирования периметра кольцевого резонатора

Рассмотрим систему регулирования периметра (СРП) кольцевого резонатора ЛГ, изображенную на рисунке 4,а. В данной системе устройство начального запуска (3) заряжает емкость в цепи обратной связи интегрирующего усилителя до уровня, когда при заданной температуре обеспечивается настройка подвижного плоского зеркала на максимум кривой усиления (рис. 4,б). Далее (после настройки на максимум кривой усиления) происходит отключение цепи обратной связи интегрирующего усилителя от устройства начального запуска, и СРП становится автономной. Два мощных фотодетектора (фотоприемника) используются в данной системе для регистрации интенсивности излучения двух лазерных лучей, распространяющихся в трехзеркальном резонаторе во взаимно встречных направлениях.

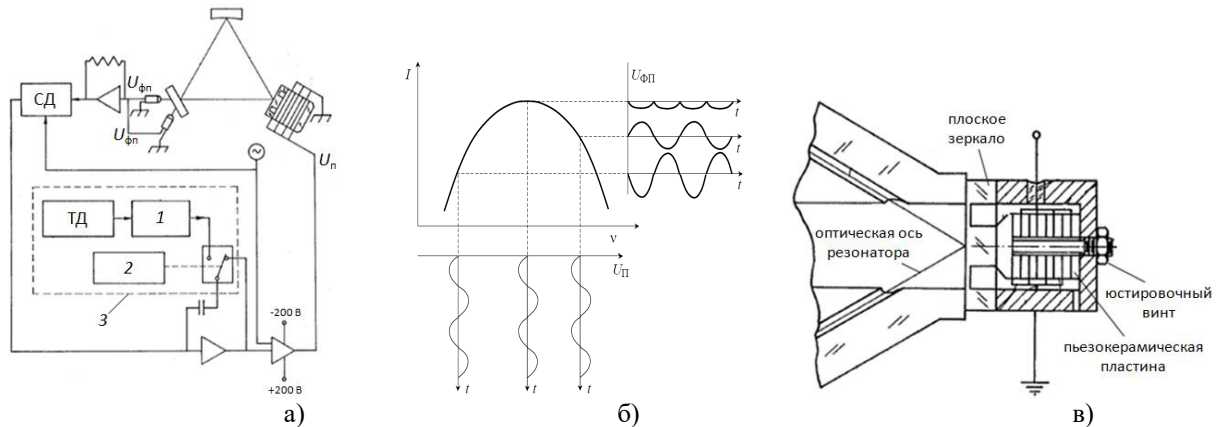


Рис. 4. Процесс регулирования периметра резонатора по сигналам мощных фотоприемников [8]:

а – функциональная схема; б – доплеровская кривая усиления активной среды;

в – устройство пьезокорректора;

1 – устройство формирования начального заряда емкости в цепи обратной связи интегрирующего усилителя;

2 – устройство управления цепью обратной связи интегрирующего усилителя;

3 – устройство начального запуска;

СД – синхронный детектор; ТД – температурный датчик;

$U_{ФП}$ – напряжение на выходе фотоприемника; $U_{П}$ – напряжение на пьезокорректоре.

На выходе высоковольтного усилителя на частоте 2 кГц формируется управляющее напряжение, которое подается на пьезокорректор. При изменении температуры окружающей среды меняется периметр резонатора, и на выходе каждого из фотоприемников возникает синусоидальный сигнал ошибки. Появление указанного выше сигнала обусловлено смещением подвижного плоского зеркала относительно максимума кривой усиления. Подвижное зеркало управляется пьезокорректором (пьезопреобразователем), который представляет собой сборку зеркала с пьезопроводом (рис. 4, в). После усиления синусоидальный сигнал ошибки поступает в синхронный детектор (СД), который используется для определения амплитуды сигнала на частоте синхронного детектирования, равной частоте опорного сигнала. В интегрирующем усилителе происходит накопление значений постоянной составляющей сигнала ошибки. Система обратной связи перемещает зеркало до тех пор, пока сигнал ошибки не примет своего минимального значения.

Развитие микропроцессорной техники привело к появлению новых методов управления оптической длиной резонатора КЛ. Принцип регулирования периметра резонатора цифровыми методами аналогичен принципу регулирования периметра резонатора аналоговыми методами. На кафедре «Электронные приборы» РГРТУ имени В.Ф. Уткина была разработана схема регулирования периметра кольцевого резонатора на основе цифровой обработки квадратурных сигналов (рис. 5) [9]. Квадратурные сигналы с выходов информационных фотодиодов КЛ, предварительно усиленные посредством широкополосных усилителей и оцифрованные с помощью двухканального АЦП ($N = 12$, $f_s = 4$ МГц), поступают в блок обработки первичных сигналов (ОПС) [10], реализованный на базе ПЛИС (2) и ее внутреннего постпроцессора (3). Блок ОПС служит для накопления первичных отсчетов квадратурных сигналов, вычисления параметров данных сигналов, а также для восстановления отсчетов угловой скорости вращения КЛ [11], последние на частоте 4,8 кГц передаются через интерфейс UART постпроцессора (3) на персональный компьютер. Отсчеты амплитуд первичных сигналов поступают с той же частотой через интерфейс SPI постпроцессора (3) на вход системы стабилизации периметра резонатора КЛ, которая включает в себя следующие элементы: управляющий МК (4), ЦАП (5), ИОН (6), регулятор напряжения (7) и источник постоянного напряжения +250 В.

В рассматриваемой схеме квадратурные сигналы аппроксимируются эллипсом, радиусы которого определяют интенсивность лазерного излучения. Отсчеты интенсивности излучения поступают в МК (4), который реализует алгоритм стабилизации периметра кольцевого резонатора. Суть данного алгоритма заключается в использовании метода пошагового восхождения по кривой усиления с частотой 50 Гц: сравниваются соседние отсчеты величины интенсивности лазерного излучения.

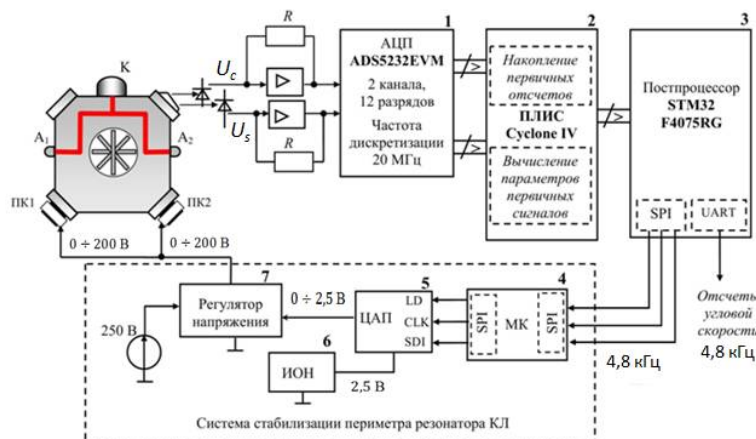


Рис. 5. Структурная схема лазерного гироскопа с прецизионной регистрацией перемещений интерференционной картины и цифровой системой стабилизации периметра резонатора КЛ [9]: АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; ИОН – источник опорного напряжения; МК – микроконтроллер; A_1 , A_2 – аноды; К – катод; ПК1, ПК2 – пьезокорректоры; U_c , U_s – выходной косинусный и синусный сигналы фотодиодов соответственно.

Моделирование системы регулирования периметра кольцевого резонатора

Рассмотрим обобщенную расчетную схему возмущенного резонатора КЛ (рис. 6). Пунктиром на данном рисунке изображен квадратный оптический контур невозмущенного резонатора (с одинаковыми длинами плеч). Схема, представленная на рисунке 6, используется для расчета оптических длин путей, проходимых встречными лучами в возмущенном резонаторе в случае, когда учитываются угловые и поступательные смещения всех четырех зеркал. Исходным условием решаемой задачи является то, что подвижные сферические зеркала настроены на максимум кривой усиления. При подаче напряжения в диапазоне от -1 до $+1$ В на каждый из двух пьезокорректоров происходит смещение сферических зеркал относительно максимума кривой усиления, что приводит к изменению периметра кольцевого резонатора. В нашем случае сферические зеркала перемещаются синфазно, плоские зеркала жестко фиксированы, а угловое смещение всех четырех зеркал не учитывается. В результате синфазного перемещения сферических зеркал изменяются длины плеч возмущенного резонатора, длина волны излучения гелий-неонового лазера и волновое число (формулы для расчета оптической длины пути представлены в работах [12-13]). Следует отметить, что мы работаем в пределах одной продольной моды, т.е. целое число длин волн, укладывающихся в периметр невозмущенного резонатора, остается постоянным для невозмущенного и возмущенного резонатора.

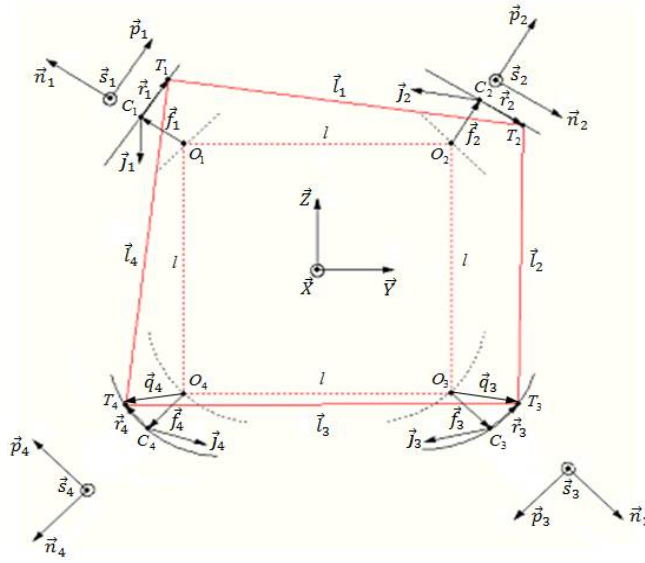


Рис. 6. Расчетная схема возмущенного резонатора КЛ [12-13]: $\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z}$ – орты основного координатного базиса; $\vec{s}_i, \vec{p}_i, \vec{n}_i$ – орты координатных базисов для задания смещений зеркал, где $i = 1 \div 4$; O_i – точки, определяющие номинальные положения центров зеркал идеально съюстированного кольцевого резонатора; C_i – точки, определяющие положения центров зеркал после разъюстировки резонатора; T_i – точки встречи лучевого контура с отражающими поверхностями зеркал после разъюстировки резонатора; $O_1O_2, O_2O_3, O_3O_4, O_4O_1$ – плечи кольцевого резонатора (каждое длиной l); T_1, T_2, T_3, T_4 – точки, формирующие линию лучевого контура после разъюстировки резонатора; $\vec{r}_i$ – векторы, задающие координаты точек T_i относительно центров зеркал C_i ; $\vec{l}_j$ – векторы, определяющие оптический путь кольцевого резонатора, где $j = 1 \div 4$; $\vec{f}_i$ – векторы поступательных смещений зеркал ($\vec{f}_1 = n_1 \cdot \vec{n}_1$; $\vec{f}_2 = n_2 \cdot \vec{n}_2$; $\vec{f}_3 = s_3 \cdot \vec{s}_3 + p_3 \cdot \vec{p}_3 + n_3 \cdot \vec{n}_3$; $\vec{f}_4 = s_4 \cdot \vec{s}_4 + p_4 \cdot \vec{p}_4 + n_4 \cdot \vec{n}_4$, где n_i, p_i, s_i – координаты, определяющие смещения зеркал), $\vec{j}_i$ – векторы угловых смещений зеркал ($\vec{j}_1 = \beta_1 \cdot \vec{s}_1 + \alpha_1 \cdot \vec{p}_1$; $\vec{j}_2 = \beta_2 \cdot \vec{s}_2 + \alpha_2 \cdot \vec{p}_2$; $\vec{j}_3 = \beta_3 \cdot \vec{s}_3 + \alpha_3 \cdot \vec{p}_3$; $\vec{j}_4 = \beta_4 \cdot \vec{s}_4 + \alpha_4 \cdot \vec{p}_4$, где α_i, β_i – коэффициенты, определяющие поворот зеркал относительно векторов $\vec{p}_i$ и $\vec{s}_i$).

Возмущения периметра кольцевого резонатора приводят к изменению порога захвата (порог синхронизации – максимальная угловая скорость, при которой частоты встречных волн еще одинаковы [2]). Необходимо подчеркнуть, что измерение угловых перемещений, являющееся основной задачей лазерной гироскопии, в области захвата невозможно. Связь встречных волн за счет обратного рассеяния приводит к существенным изменениям выходной характеристики КЛ: появляются область синхронизации (область захвата) и нелинейность (рис. 7, а). При решении задачи была получена зависимость порога захвата от величины напряжения, подаваемого на каждый из двух пьезокорректоров, в случае синфазного перемещения сферических зеркал (рис. 5, б). Найденная зависимость была аппроксимирована следующей функцией: $\omega_L(U) = -4,344U^2 + 3,521 \cdot 10^{-2}$.

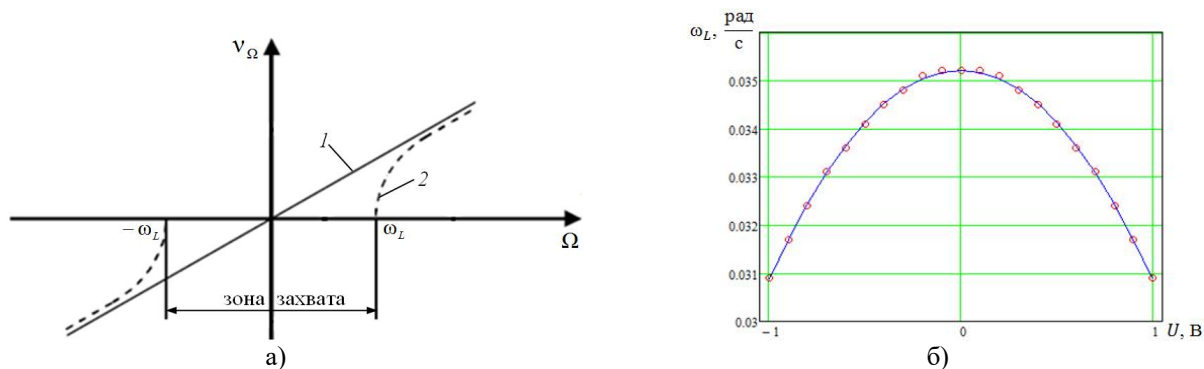


Рис. 7. Выходные характеристики КЛ (а): идеальная (1) и реальная (2) характеристики;
 ω_L – статический порог захвата; v_Ω – разность собственных частот встречных волн;
 Ω – угловая скорость вращения КЛ.

Зависимость порога захвата от величины напряжения, подаваемого на каждый из двух пьезокорректоров, в случае синфазного перемещения сферических зеркал (б)

Перемещения зеркал в кольцевом резонаторе включают в себя «медленную» и «быструю» составляющие. «Медленная» составляющая связана с поиском положений подвижных зеркал, соответствующих настройке на максимум кривой усиления активной среды. «Быстрая» составляющая представляет собой колебания зеркал, используемые для формирования сигнала, управляющего «медленным» движением. Именно колебания зеркал вызывают модуляцию амплитуд и фаз коэффициентов связи встречных волн в оптическом резонаторе, что, в конечном счете, возмущает параметры дифференциального уравнения (ДУ), описывающего изменение фазы Саньяка [14]:

$$\frac{d\psi}{dt} = K\omega_D \sin(2\pi ft) - K\omega_L(U) \sin(\psi), \quad (1)$$

где K – масштабный коэффициент ($K = 695000$);

ω_D – амплитуда угловой скорости вибрационной частотной подставки ($\omega_D = \frac{\text{град}}{\text{с}}$);

f – частота колебаний КЛ ($f = 400$ Гц).

Начальные условия для ДУ (1): $t_0 = 0$ с – начальный момент времени; $\psi_0 = 0$ рад – начальное значение фазы Саньяка. В результате решения ДУ (1) были получены квадратурные сигналы КЛ (рис. 6, а), при этом на пьезокорректоры подавалось напряжение прямоугольной формы с частотой 50 Гц (рис. 6, б).

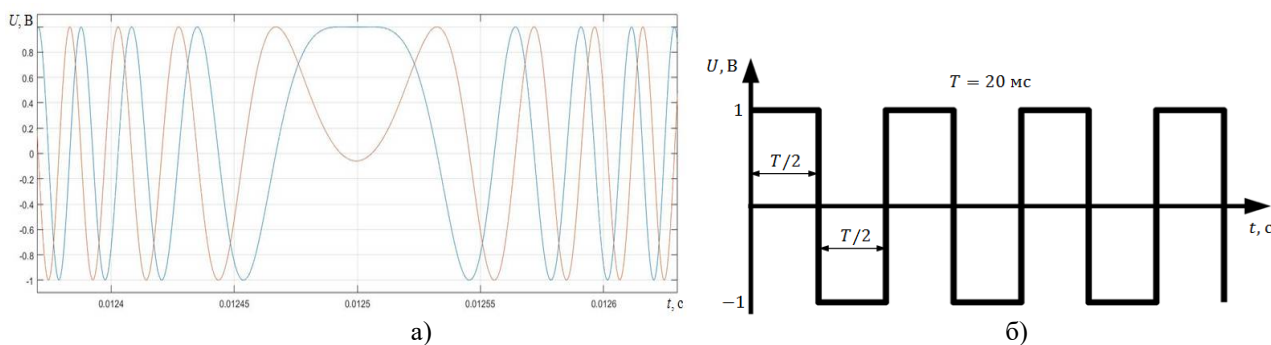


Рис. 6. Квадратурные сигналы КЛ (а). Напряжение, подаваемое на каждый из двух пьезокорректоров (б).

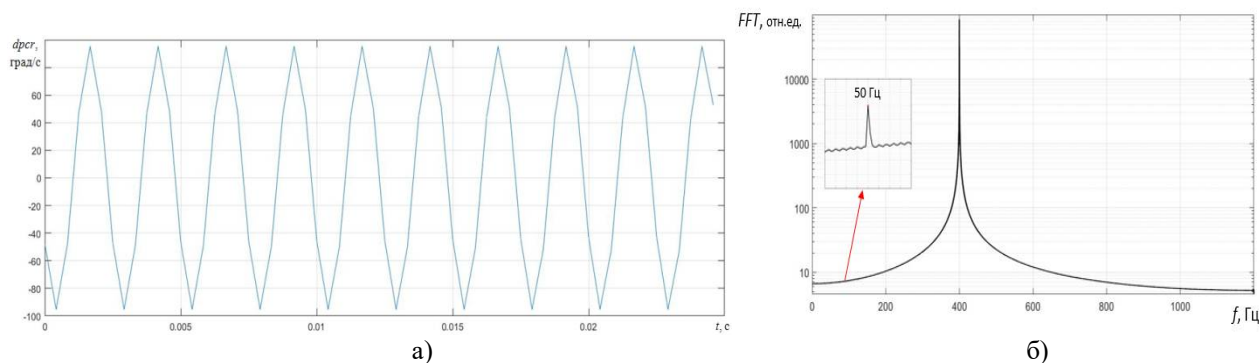


Рис. 7. Сигнал (а) и спектр (б) угловой скорости вращения ЛГ.

В связи с тем, что на пьезокорректоры подается переменное напряжение, изменяются положения сферических зеркал, следовательно, меняется периметр кольцевого резонатора. Все вышеперечисленное приводит к тому, что величина порога синхронизации изменяется во времени, что, в свою очередь, указывает на то, что система регулирования периметра кольцевого резонатора вносит искажения в выходные сигналы ЛГ.

В данной задаче рассматривался ЛГ с вибрационной частотной подставкой, частота колебаний которой равна 400 Гц. С помощью цифровой обработки квадратурных сигналов (рис. 3) был восстановлен сигнал угловой скорости вращения ЛГ (т.е. фаза Саньяка) (рис. 7, а). Для получения более сглаженных пиков синусоид, изображенных на рис. 7, а, необходимо увеличить число отсчетов.

Использование быстрого преобразования Фурье позволило получить спектр угловой скорости вращения ЛГ (рис. 7, б). Из рис. 7, б видно, что гармонические колебания сферических зеркал, происходящие на частоте 50 Гц, вносят искажения в спектр выходного сигнала ЛГ. Это связано с тем, что частота напряжения, подаваемого на пьезокорректоры, тоже равна 50 Гц. Диапазон частот от 0 до 100 Гц считается областью полезного сигнала. Колебания сферических зеркал на частоте 50 Гц вносят искажения в область полезного сигнала, что приводит к изменению выходных параметров ЛГ.

Заключение

1. Реализована методика математического моделирования системы регулирования периметра ЛГ.
2. Установлено, что гармонические колебания зеркал ЛГ вносят искажения в фазу Саньяка.
3. Выяснено, что разработанная методика позволяет оптимизировать режимы работы системы регулирования периметра ЛГ (т.е. напряжение, подаваемое на пьезокорректоры, может иметь различную форму – прямоугольную, пилообразную и т.д.).

Библиографический список

1. Самуйлов А.В., Румянцев В.В., Молев В.И., Анушкин С.И. Физико-химические свойства оптического ситалла СО-115М (Астроситалл) // Научно-технический и гуманитарный сборник МАК (РОМАК). – 2002. – С. 24-31.
2. 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.
3. Голяева Ю.Д., Запотылько Н.Р., Недзвецкая А.А., Синельщиков А.О., Тихменев Н.В. Лазерные гироскопы с увеличенным временем непрерывной работы // Датчики и системы. – 2011. – №11. – С. 49-51.
4. Виноградов А.Н., Вотинов Ю.Ю., Матвеев Е.В. Термоупругие модели многослойного пьезопривода наноперемещений в лазерном гироскопе // Труды 2-й всероссийской научной школы для молодежи «Концентрированные потоки энергии в индустрии наносистем, материалов и живых систем»: Сб. научных трудов. – М.: МИЭМ, 2009. – С. 109-119.

5. Запотьилько Н.Р., Катков А.А., Недзвецкая А.А. Пьезокорректор для компенсации тепловых вариаций длины оптического пути резонатора лазерного гироскопа // Оптический журнал. – 2011. – №10(78). – С. 10-12.
6. Бужинский И.М., Жуковец Ж.Г. Исследование теплового расширения ситаллов на лазерном дилатометре в интервале температур -60 до +80 °С // Метрология. – 1986. – №9. – С. 38-42.
7. Климаков В.В. Интенсификация теплообмена в инерциальных навигационных системах на лазерных гироскопах: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.11.14 – РГРТУ – Рязань, 2014. – С. 34-35.
8. Bo H.G. Ljung, Charles J. Williams. Pathlength controller for a ring laser gyroscope. U.S. Patent, No. 4267478, Int. Cl. H01L 41/08, May 12, 1981.
9. Кижяев О.В., Мишин В.Ю., Морозов Д.А. Система стабилизации периметра резонатора кольцевого лазера (тезисы докладов научной конференции) // Сборник трудов Международной научно-технической конференции «Современные технологии в науке и образовании». Рязань, 1-3 марта, 2017. – С. 253-257.
10. Molchanov A.V., Belokurov V.A., Chirkin M.V., Kagalenko M.B., Koshelev V.I., Mishin V.Yu., Morozov D.A. The application of advanced processing technique to the triad of precision laser gyroscopes // Proceedings of 23rd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, May 30-June 01, 2016. – P. 120-122.
11. Alekseev S.Yu., Chirkin M.V., Mishin V.Yu., Molchanov A.V., Zakharov M.A. Method of lock-in threshold measurement in manufacture and operation of ring lasers // Gyroscopy and Navigation, 2013. Vol. 4, Issue 4. – P. 223-228.
12. Ищенко Е.Ф., Решетин Е.Ф. Чувствительность к разбюстировке кольцевого оптического резонатора с фокусирующим элементом // Оптика и спектроскопия, 1979. Т. 46. Вып. 2. – С. 366-375.
13. Ищенко Е.Ф., Решетин Е.Ф. Анализ чувствительности оптических резонаторов к разбюстировке методом лучевого контура // Журнал прикладной спектроскопии, 1979. Т. XXX. Вып 3. – С. 366-375.
14. Мишин В.Ю. Методы обработки информации в лазерном гироскопе с прецизионной регистрацией перемещений интерференционной картины: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 01.04.01 – РГРТУ – Рязань, 2013. – С. 18-22.

УДК 621.385.623.2; ГРНТИ 47.29.37

КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ДИОДНОГО АВТОГЕНЕРАТОРА

В.К. Федяев, Н.М. Маранкин

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

Аннотация. С помощью численного моделирования показано, что электронный КПД диодного автогенератора обращенной цилиндрической конструкции может превышать 20 %, при этом дополнительного его увеличения в режиме с отсечкой катодного тока не происходит.
Ключевые слова: диодный автогенератор, электронный КПД, угол пролета, режим с отсечкой катодного тока.

THE EFFICIENCY OF A DIODE GENERATOR

V.K. Fedyaev, N.M. Marankin

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

Abstract. It is shown by numerical simulation that the electron efficiency of a diode generator of a reversed cylindrical construction can exceed 20 %, at the same time additional efficiency increase in the cathode current cut-off mode does not occur.
Keywords: diode generator, electron efficiency, transit angle, cathode current cut-off mode.

Продолжаются исследования, направленные на поиск наиболее простых конструкций генераторов микроволнового излучения. В качестве таковых могут применяться вакуумные диоды различной формы. В работах [1-3] приводятся результаты численного моделирования для диодного автогенератора с плоско-параллельной электродной системой. Из них следует, что электронный коэффициент полезного действия (КПД), который можно получить в таком приборе, не превышает 12 %. В других диодных конструкциях, в которых создается концен-

трация переменного электрического поля у анода, КПД может достигать более высоких значений. Так, в работе [4] было показано, что в упрощенной до диода конструкции обращенного (с внутренним анодом) коаксиального монотрона может быть получен электронный КПД 24 %, однако не представлены в явном виде зоны генерации, а также не исследован режим с отсечкой катодного тока, в котором амплитуда переменного напряжения между катодом и анодом превышает постоянную межэлектродную разность потенциалов.

Целью данной работы является более подробное исследование генератора на цилиндрическом диоде, в том числе в режиме с отсечкой катодного тока.

Исследуемая конструкция

Схема рассматриваемого диодного автогенератора приведена на рисунке 1. Здесь 1 – полый коаксиальный резонатор с внутренней стенкой радиусом r_a и внешней r_k , в котором возбуждаются СВЧ-колебания электрического поля, 2 – электронный поток, 3 – область термоэлектронной эмиссии на внешней стенке резонатора (термокатод), 4 – внутренний анод. Между катодом и анодом приложено постоянное напряжение U_0 источника питания, вместе с которым в режиме генерации будет возбуждаться переменное напряжение $U_m \sin \omega t$ (t - время, ω - круговая частота).

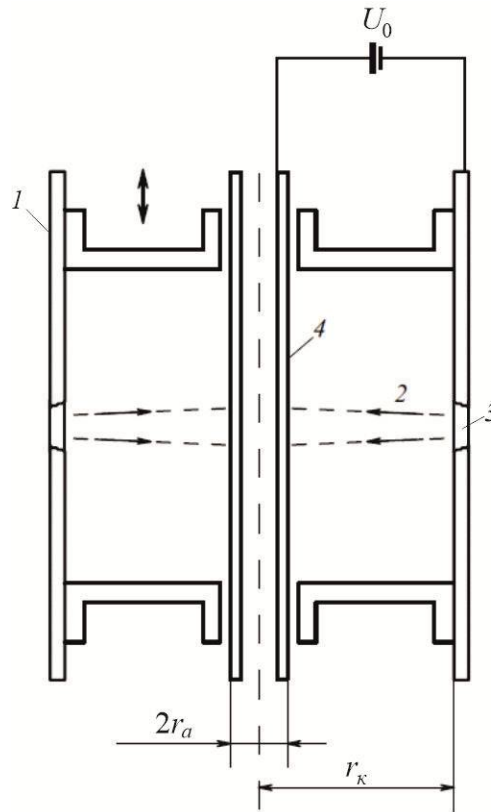


Рис. 1. Схематическое изображение конструкции автогенератора

Расчетные соотношения

Все расчеты проводятся по методике, основанной на представлении электронного потока в виде крупных частиц, которая подробно изложена в работах [1-3]. Для нахождения значений электронного КПД η_e используется следующая формула:

$$\eta_e = 1 - \frac{1}{N} \sum_n V_{a, kn}^2, \quad (1)$$

где N – количество крупных частиц, эмитированных за один период переменного напряжения, $V_{a,\kappa n}$ – нормированная скорость n -ой крупной частицы в момент достижения ею анода или катода, получаемая в ходе численного решения уравнения движения.

Уравнение движения в нормированном виде записывается следующим образом:

$$\frac{d^2 R}{d(\omega t)^2} = -\frac{1}{2\theta_d^2} \frac{(\delta-1)^2}{\ln \delta} \frac{1}{R} (1 + \xi \sin \omega t), \quad (2)$$

из которого можно получить нормированную скорость

$$V_{a,\kappa} = \frac{v_{a,\kappa}}{v_0} = \frac{R'_{a,\kappa}}{\delta-1} \theta_d. \quad (3)$$

Здесь $R = r/r_a$ – нормированная радиальная координата, $\delta = r_\kappa/r_a$; $R' = dR/d(\omega t)$; $\theta_d = \omega d/v_0$ – угол пролета, $v_0 = (2eU_0/m)^{1/2}$, e – заряд электрона, m – масса электрона, $d = r_\kappa - r_a$; $\xi = U_m/U_0$ – нормированное значение амплитуды переменного напряжения.

Уравнение (2) решается методом Рунге – Кутты при начальном значении $R = \delta$, расчет оканчивается при достижении $R = 1$. Определяются значения производной $R'_{a,\kappa}$ и из них нормированные скорости, согласно (3).

Результаты численного моделирования

Представленные ниже зависимости получены при количестве крупных частиц на одном периоде переменного напряжения $N = 100$ с шагом решения уравнений движения равным $2\pi/1000$.

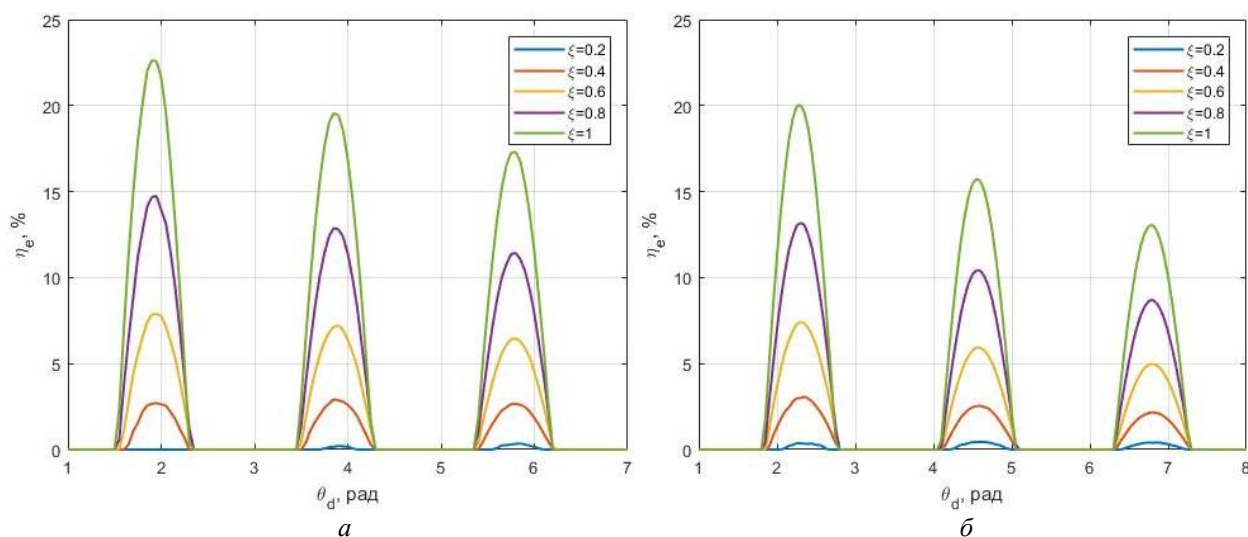


Рис. 2. Зависимости КПД от угла пролета для трех зон генерации при разных $\xi = U_m/U_0$ для отношений радиусов электродов $\delta = 30$ (а) и $\delta = 10$ (б)

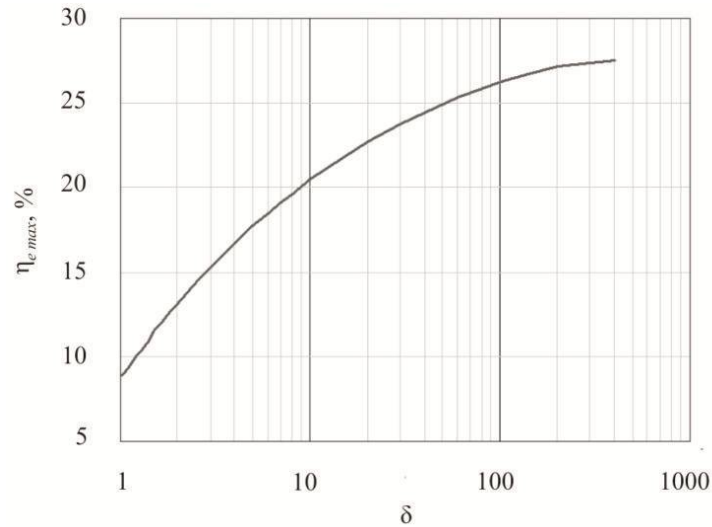


Рис. 3. Зависимость максимального значения электронного КПД коаксиального диодного автогенератора $\eta_{e \max}$ от отношения радиуса катода к радиусу анода δ

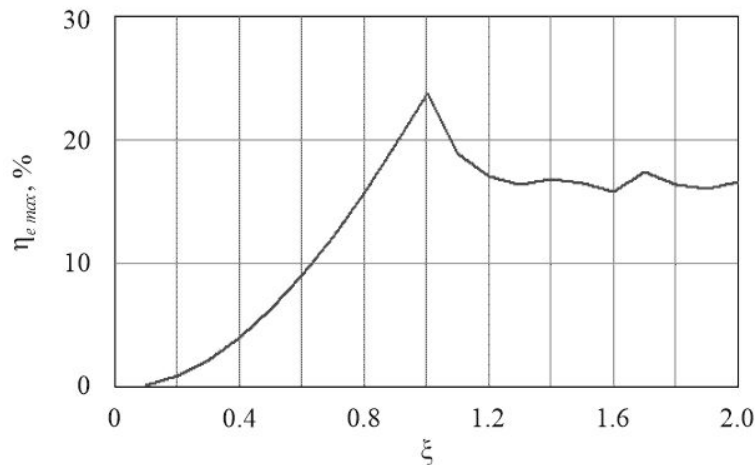


Рис. 4. Зависимость максимального значения электронного КПД $\eta_{e \max}$ от $\xi = U_m/U_0$ для отношения радиусов $\delta = 30$

Из приведенных зависимостей следует, что электронный КПД диодного автогенератора на обращенном цилиндрическом диоде может превышать 20 %, вместе с этим переход в режим с отсечкой катодного тока не дает его дальнейшего увеличения. При этом, например, для получения величины $\eta_e = 24$ % необходимо, чтобы радиус катода был равен 4 см, а радиус анода – 1 мм. В этом случае большой проблемой может быть отведение тепла от такого тонкого внутреннего анода, что делает конструкцию прибора с геометрическими параметрами такого масштаба неперспективной для применения. Однако в дальнейшем могут быть предложены иные конструкции, в которых также обеспечивается концентрация переменного электрического поля около положительного электрода, например, система с плоским катодом и анодом с клиновидными или острийными выступами.

Библиографический список

1. Федяев, В.К. Математическое моделирование диодного микроволнового автогенератора / В.К. Федяев, Н.М. Маранкин // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2020: сб. тр. III междунар. науч.-техн. форума под общ. ред. О.В. Миловзорова. Рязань: РГРТУ им. В.Ф. Уткина. 2020. Т.2. – с. 49-55.
2. V.K. Fedyayev, N.M. Marankin, "The electron efficiency of a plane construction diotron," Proc. of Int. scien. & engin. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering, pp. 43-46, 2020.
3. Федяев, В.К. Диодный автогенератор плоской конструкции / В.К. Федяев, Н.М. Маранкин // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2021. № 75. – с. 142-152.
4. Кравченко, В.Ф. Несинхронные взаимодействия / В.Ф. Кравченко, А.А. Кураев, А.К. Синицын // Успехи физических наук. 2007. Т. 177, № 5. – с. 511-534.

УДК 621.385; ГРНТИ 47.29.37

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНОЙ СИСТЕМЫ ПЯТИРЕЗОНАТОРНОГО УСИЛИТЕЛЬНОГО КЛИСТРОНА 2-СМ ДИАПАЗОНА

О.А. Горлин, В.С. Герасёв

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

Аннотация. Рассмотрена возможность создания 18-ти лучевого 5-ти резонаторного усилительного клистрона в 2-х сантиметровом диапазоне длин волн. Проведён аналитический расчёт и численное моделирование многолучевой резонансной системы. Численное моделирование процессов в резонаторах показало возможность получения в 18-ти лучевом 5-ти резонаторном усилительном клистроне коэффициент полезного действия (КПД) около 34% с выходной мощностью 590 Вт и полосой частот 50 МГц.

Ключевые слова: усилительный клистрон, Ку-диапазон, однозачерные резонаторы, коэффициент усиления, выходная мощность.

INVESTIGATION OF THE RESONANT SYSTEM OF A 5-RESONATOR AMPLIFYING KLYSTRON OF THE 2-CM RANGE

O.A. Gorlin, V.S. Gerasiov

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

The abstract. The possibility of creating an 18-beam 5-resonator amplifying klystron in the 2-centimeter wavelength range is considered. The analytical calculation and numerical simulation of the multipath resonant system are carried out. Numerical modeling of processes in resonators has shown the possibility of obtaining an efficiency of about 34% in an 18-beam 5-resonator amplifying klystron with an output power of 590 W and a frequency band of 50 MHz.

Keywords: amplifying klystron, Ku-band, single-band resonators, gain coefficient, output power.

Введение

В настоящее время одной из актуальных проблем современной вакуумной техники является разработка мощных и в тоже время компактных клистронов сантиметрового диапазона, которые нашли своё применение в различных сферах: радиолокации, телевидении, а также в бытовых устройствах [1,2]. В основном источниками сантиметрового диапазона длин волн являются лампы бегущей волны и полупроводниковые диоды. Однако, данные приборы и устройства не удовлетворяют выходной мощностью, которая составляет порядка нескольких мВт. Широкого применения достигли одно- и многолучевые усилительные клистроны. Значительного развития в области многолучевых усилительных клистронов достигли в конце 20-ого века США, Канада и Германия. Развитие устройств СВЧ диапазона в России начинается с середины 20-ого века на таких предприятиях, как НПП «Исток» и НПП «То-рий» [3,4]. При использовании однолучевой конструкции данные приборы в сантиметровом

диапазоне длин волн 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 [4].

Целью данной работы является исследование процессов взаимодействия электронов внутри резонансной системы с СВЧ полями в 18-ти лучевом пятирезонаторном клистроне и получение оптимальных размеров и электрических параметров для повышения КПД и мощности усилительного клистрона в 2-х сантиметровом диапазоне, а также расширение полосы усиливаемых частот и уменьшение массогабаритных параметров.

Выбор исходных параметров и расчет резонансной системы

Для разработки резонансной системы необходимо использовать электронно-оптическую систему (ЭОС), удовлетворяющую основным требованиям. На предприятии НПП “Исток” наработан большой опыт производства электровакуумных приборов, позволяющий воспользоваться уже готовой моделью ЭОС, которая соответствует основным требованиям резонансной системы. Восемнадцать лучевая конструкция была взята из соображения, что при использовании меньшего количества лучей возникает необходимость в создании большого значения магнитного поля для фокусировки электронного потока, что в последствии значительно увеличит массогабаритный показатель прибора. Исходным вариантом данной конструкции является 18-ти лучевой 5-ти резонаторный клистрон (рис.1 и рис.2), разработанный на предприятии НПП “Исток”.

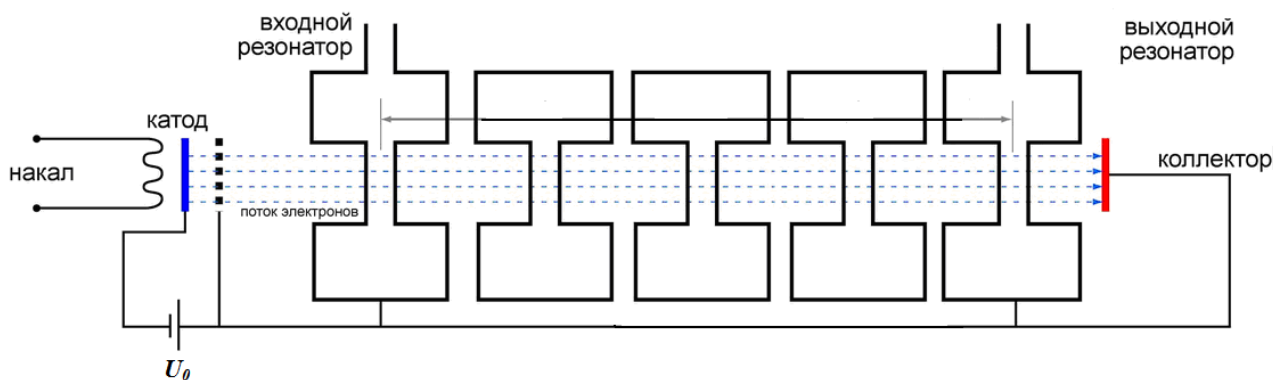


Рис. 1. Эскизное изображение 5-ти резонаторного усилительного клистрона

Сначала использовали аналитический расчет для быстрого нахождения электрических параметров и геометрических размеров, 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 5-ти резонаторного усилительного клистрона с рабочей частотой 15 ГГц. На рисунке 2 показано расположение катодных пеньков на поверхности, где был взят стандартный катод с током $I_0=0,7$ А и диаметром одного катодного пенька 0,5 мм.

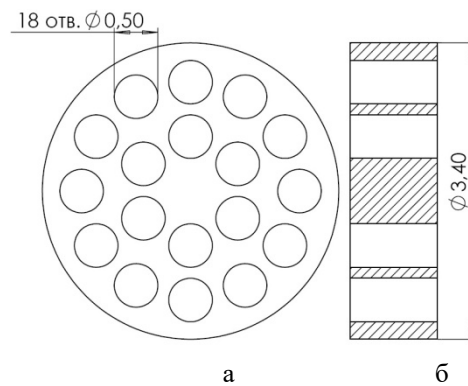


Рис. 2. Схематическое изображение катода (а) и резонансной шайбы (б)

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

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

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 $U_0 \geq 2,5$ кВ. Далее по программе разработанной в РГРТУ на кафедре электронных приборов провели уточнение ускоряющего напряжения (рис.3).

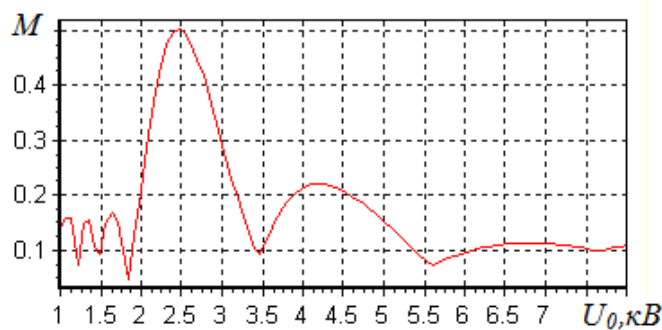


Рис. 3. Зависимость коэффициента взаимодействия от ускоряющего напряжения

Как видно из рисунка, в рассматриваемом диапазоне от 1 до 8 кВ наибольшую вероятность усиления следует ожидать при ускоряющем напряжении порядка 2.5 кВ, как и было

рассчитано по аналитическим уравнениям. Далее определим основные геометрические размеры резонаторного блока. Для этого достаточно определить размеры последнего выходного резонатора, так как он в большей степени определяет основные характеристики всего прибора, а промежуточные выберем стандартными, которые в дальнейшем будем корректировать. Микропервеанс клистрона на один луч можно определить по формуле [6]:

$$P_{\mu} = (I_k / N) \cdot 10^{-6} / (U_k)^{3/2},$$

где N - количество лучей, I_k - ток катода.

После подстановки значений, получаем микропервеанс одного луча равен $0,31 \text{ мкА/В}^{3/2}$. Зададимся размером трубы дрейфа, которая будет равна $L = 0,35 \text{ мм}$. Определим протяжённость зазора между пролётными трубами:

$$d[\text{мм}] = 0.0995 \cdot \xi_{d0} \cdot \lambda \cdot \sqrt{U_k} [\text{кВ}],$$

где λ - длина волны, а ξ_{d0} - приведённый угол пролета в зазоре, выбираемый в пределах от 1-1,5. Для наибольшего усиления выберем значение 1,3. После подстановки значений получаем значение зазора порядка $0,4 \text{ мм}$.

Для оценки геометрических размеров резонатора воспользуемся формулами для нахождения волнового сопротивления и частот резонаторов. Характеристическое сопротивление эквивалентного резонатора находится по следующей формуле:

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C_T + C_{\phi}}},$$

где L - эквивалентная индуктивность, C_T - эквивалентная торцевая ёмкость, C_{ϕ} - эквивалентная боковая ёмкость.

Эквивалентная индуктивность находится по следующей формуле:

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot h_k \cdot \ln \frac{r_p}{r_T},$$

где h_k - высота выходного резонатора, r_T - радиус трубы, $2r_p$ - длина резонатора.

Эквивалентная торцевая ёмкость находится по формуле:

$$C_T = 2,8 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{r_T^2}{d_k}.$$

Эквивалентная боковая ёмкость вычисляется по следующей формуле:

$$C_{\phi} = 3,5 \cdot 10^{-11} \cdot r_T \cdot \ln \frac{h_k}{d_k}.$$

Для зазора без сеток торцевая ёмкость близка к нулю, при этом боковая ёмкость увеличивается в 2 раза, однако в расчётах торцевую ёмкость учитывали. С помощью данных формул были посчитано характеристическое сопротивление выходного резонатора, которое получилось равным 35 Ом . Данные аналитического расчёта использовались как исходные данные для исследования выходных параметров усилительного клистрона. Исследование проводилось по двумерной программе динамических процессов в клистроны [7]. В табл.1 приведены параметры резонаторного блока, получена расстройка резонаторов, которая обеспечивает максимальное значение K_y 40 дБ в полосе частот 50 МГц .

Таблица 1. Параметры резонаторного блока

Номера резонаторов	1	2	3	4	5
Нагруженная добротность резонаторов	700	250	765	785	800
Расстройка резонаторов	0	-0,125	+0,020	+0,08	0
Частота резонатора, ГГц	15,0	14,975	15,02	15,08	15,0

На рисунке 4 приведена зависимость коэффициента усиления от частоты. Из данного графика видно, что данный прибор должен обеспечивать в рабочей полосе частот K_y не менее 40 дБ. Для получения максимальной полосы пропускания выходной резонатор был спроектирован на максимум параметра $M^2\rho$. Все характеристики рассчитаны при $P_{\text{вх}}=10$ мВт.

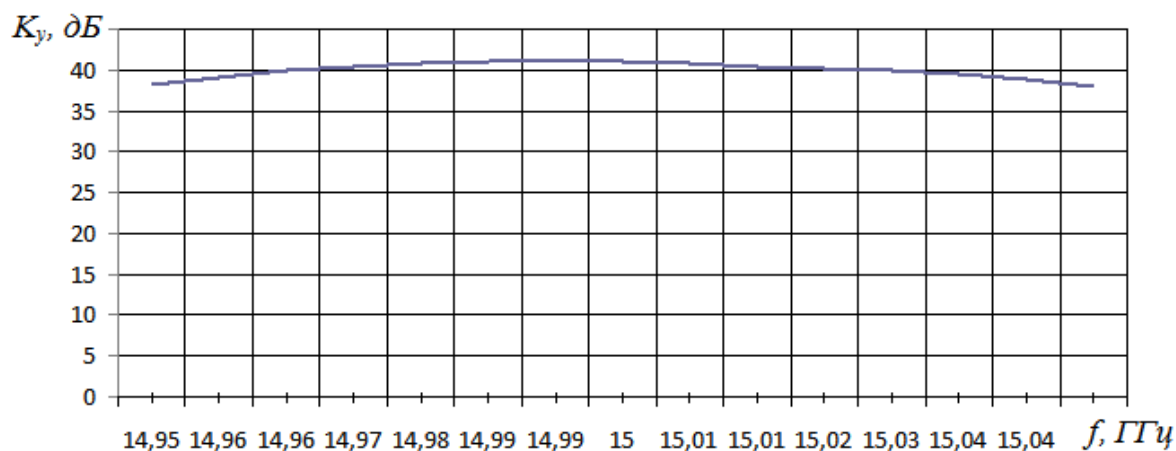


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления от частоты

На рис.5 изображена амплитудно-частотная характеристика, из которой следует, что прибор обеспечивает выходную мощность примерно 590 Вт в полосе рабочих частот 50 МГц по уровню 1,5 дБ.

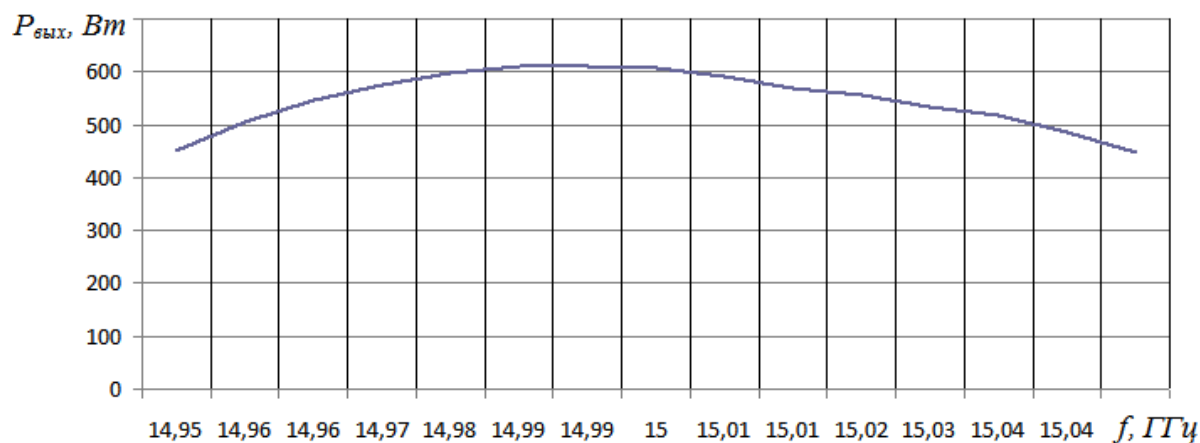


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика

На рисунке 6 приведена зависимость коэффициента полезного действия от частоты. Из данного графика видно, что данный прибор должен обеспечивать в заданной полосе КПД не хуже 35 %.

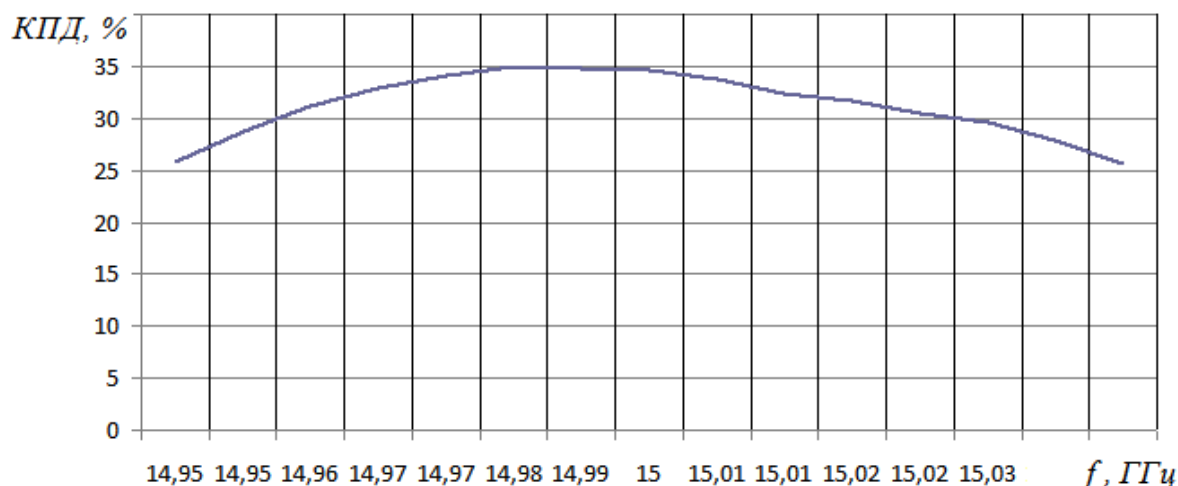


Рис. 6. Зависимость коэффициента полезного действия от частот

Заключение

Таким образом, исследована возможность создания 18-ти лучевого 5-ти резонаторного клистрона с КПД 35%, выходной мощностью 590 Вт и полосой частот 50 МГц. Численное моделирование процессов в резонаторах показало, что для улучшения полученных выходных данных необходимо использовать многоззорный выходной резонатор, в которых характеристическое сопротивление значительно выше, а коэффициент взаимодействия остается на том же уровне [8].

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. И.А. Фрейдович, А.К. Балабанов, П.И. Акимов и др. Перспективы развития многолучевых клистронов // ФГУП НПП «Торий». – 2014. <http://mwelectronics.ru/2014>
5. Ю.А. Кацман Вопросы теории многорезонаторных клистронов. М.: Связьиздат. – 1958. – 176 с.
6. Хайков А.З. Клистронные усилители. М.: Связь, 1974. – 391.
7. 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.
8. В.А. Царев, О.А. Горлин, Д.А. Нестеров Многолучевой автогенератор W-диапазона с резонатором распределенного взаимодействия // Радиотехника. – 2015. – №1. – С.1-7.

СЕКЦИЯ «ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА»

УДК 53.084.6, 53.084.872-876; ГРНТИ 29.19.31

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ПОКРЫТИЙ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫХ КОНТАКТОВ ПОСЛЕ ИХ КОММУТАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

А.В. Баскакова, Д.С. Логинов, Н.Б. Рыбин

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина.

Российская Федерация, Рязань, anna_bas97@mail.ru

Аннотация. Экспериментально изучены параметры спектров низкочастотного (НЧ) шума партии герконов с покрытием Au-Ru и без покрытия. Проанализирована связь параметров НЧ шума магнитоуправляемых контактов с площадью поверхности контактных пятен, образовавшихся после коммутационных испытаний.

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

INVESTIGATION OF THE SURFACE STRUCTURE OF COATINGS OF MAGNETICALLY CONTROLLED CONTACTS DURING THEIR SWITCHING TESTS

A.V. Baskakova, D.S. Loginov, N.B. Rybin

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

Russia, Ryazan, anna_bas97@mail.ru

Annotation. The results of measurements of the spectral noise power density of 10 samples of reed switches with and without Au-Ru coating are analyzed. The dependences of the area of spots formed during switching tests on the electrodes on various noise parameters are constructed.

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

В основе современной электроники лежит множество различных типов контактов. При разработке электронных устройств важной задачей является изучение свойств применяемых контактов. Основными требованиями, предъявляемыми к коммутационным устройствам, являются надежность работы, высокий коммутационный ресурс, простота обслуживания.

Нижние пределы чувствительности электронных приборов чаще всего определяются шумами тока и напряжения в них. Полезный сигнал может стать недоступным, если уровень шума в приборе слишком высок. С одной стороны, шумы, которые возникают в электронных твердотельных приборах, ограничивают динамический диапазон рабочих характеристик. С другой - шумы низкочастотного диапазона, обусловленные флуктуациями тока или напряжения, предоставляют информацию об особенностях внутренней структуры электронного прибора.

Диагностика приборов по спектрам НЧ шума – это инструмент, который позволяет прогнозировать ресурс работы электронных компонентов. Анализ спектров НЧ шума позволяет сделать выводы о состоянии системы и протекающих в ней процессах.

Частотные зависимости СПМ НЧ шума характеризуются наличием изменения наклона кривых в области низких частот. На частотах до 1 Гц частотная зависимость СПМ шума подчиняется закону $1/f^\beta$. Показатель β в работе определялся с помощью аппроксимации зависимости СПМ НЧ шума от частоты. Рассчитанный коэффициент β в наших экспериментах изменялся от 0,5 до 3 для разных образцов. На рисунке 1 представлен спектр НЧ шума одного из образцов исследованной партии.

Цель настоящей работы – выяснение связи особенностей структуры контактных пятен на поверхности магнитоуправляемых контактов (партии из 10 герконов МКА-14103) с пара-

метром β - коэффициентом наклона низкочастотного участка НЧ шума. Экспериментальное изучение характеристик магнитоуправляемых контактов проводилось по следующему плану:

1. измерение СПМ НЧ шума исходных образцов герконов и математическая обработка полученных результатов;
2. искусственный износ контактов путем многократной коммутации при различных режимах работы;
3. измерение СПМ НЧ шума искусственно изношенных магнитных контактов, математическая обработка результатов;
4. исследование материала контактов при помощи РЭМ микроскопии.

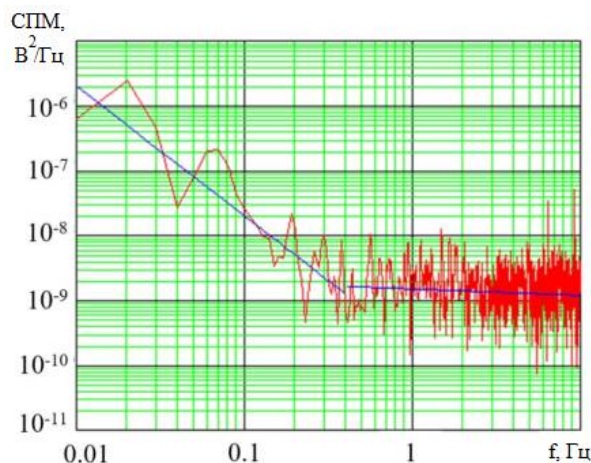


Рис. 1. Спектр низкочастотного шума магнитоуправляемых контактов (образец №7)

После коммутационных испытаний на поверхности контактов образовались контактные пятна - наросты разной величины, имеющие округлую форму с отверстием внутри. РЭМ-изображение одного из образцов представлено на рисунке 2 [1].

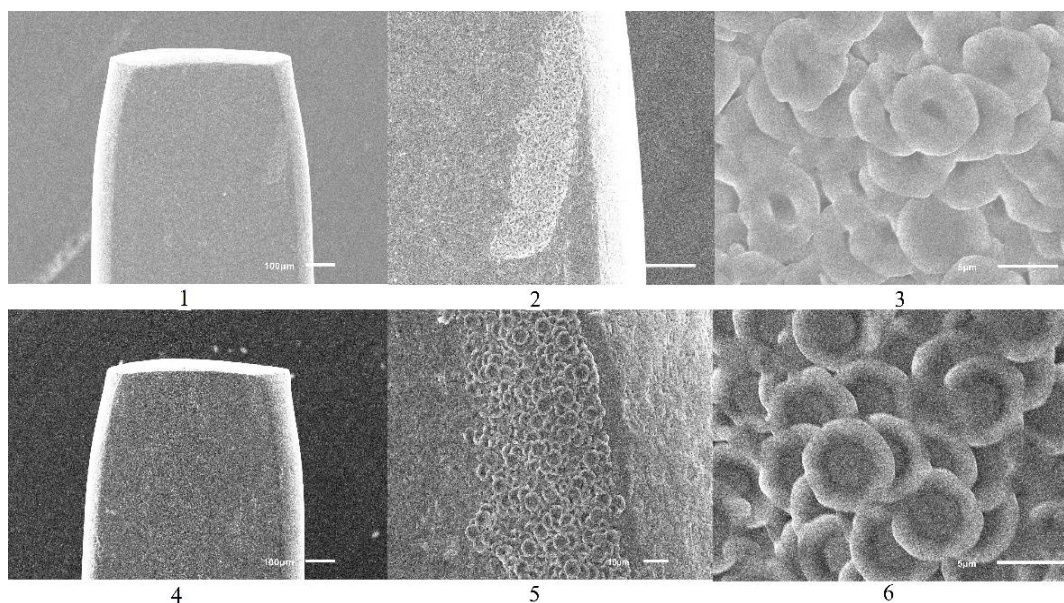


Рис. 2. РЭМ-изображения контактов образца № 1:

- 1, 4 – общие виды катода и анода соответственно,
- 2, 5 – катодные артефакты пятнен виды катода и анода соответственно,
- 3, 6 – наросты на поверхности контактов [1]

В таблицах 1 и 2 приведены параметры опытных образцов герконов до и после коммутационных испытаний соответственно [1]. Обозначения в таблицах:

СПМ – спектральная плотность мощности НЧ шума - значение, измеренное на частоте 1 Гц;

β – показатель степени при линейной аппроксимации начального участка спектра;

S_k, S_a - площади пятен контактов на катоде и аноде, соответственно, полученные и измеренные с помощью РЭМ;

d_k, d_a – средние диаметры наростов на металлических поверхностях контактов после их коммутационных испытаний.

На основе полученных данных, были построены зависимости, характеризующие связь коэффициента наклона начального участка спектров НЧ шума β с площадью пятен с диаметром наростов. Для образцов с покрытием Au-Ru (образцы 1 – 5) и без покрытия (образцы 6 – 10) построены отдельные зависимости.

Таблица 1. Параметры НЧ шума образцов до проведения коммутационных испытаний на частоте 1 Гц [1]

№	R _r , Ом	СПМ, В ² /Гц	β	Примечание
1	0,08	$5,64 \cdot 10^{-9}$	1,02	К/д (подложка)-Ni (52 вес.%) -Fe; с покрытием Au-Ru.
2	0,08	$1,78 \cdot 10^{-7}$	0,65	К/д (подложка)-Ni (52 вес.%) -Fe; с покрытием Au-Ru.
3	0,08	$7,93 \cdot 10^{-9}$	0,31	К/д (подложка)-Ni (52 вес.%) -Fe; с покрытием Au-Ru.
4	0,08	$3,21 \cdot 10^{-8}$	1,21	К/д (подложка)-Ni (52 вес.%) -Fe; с покрытием Au-Ru.
5	0,08	$1,97 \cdot 10^{-8}$	1,23	К/д (подложка)-Ni (52 вес.%) -Fe; с покрытием Au-Ru.
6	0,11	$3,27 \cdot 10^{-8}$	0,54	К/д (подложка)- Ni (52 вес.%) -Fe.
7	0,11	$2,93 \cdot 10^{-9}$	2,02	К/д (подложка)- Ni (52 вес.%) -Fe.
8	0,16	$5,64 \cdot 10^{-9}$	1,83	К/д (подложка)- Ni (52 вес.%) -Fe.
9	0,12	$6,52 \cdot 10^{-9}$	1,04	К/д (подложка)- Ni (52 вес.%) -Fe.
10	0,15	$1,28 \cdot 10^{-8}$	1,58	К/д (подложка)- Ni (52 вес.%) -Fe.

Таблица 2. Параметры НЧ шума образцов после проведения коммутационных испытаний на частоте 1 Гц [1]

[illegible]

На рисунках 3 и 4 представлены зависимости, характеризующие связь площади пятна на аноде с коэффициентом β . Зависимости, связывающие площади пятна на катоде с коэффициентом β имеют аналогичный характер. На поле рисунков представлены рассчитанные в среде MS Excel аналитические уравнения и коэффициент достоверности аппроксимации R^2 .

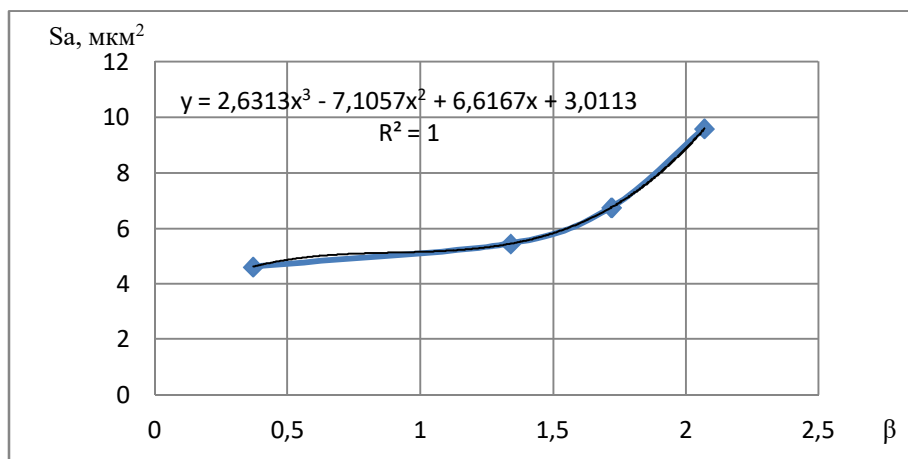


Рис. 3. Зависимость, характеризующая связь коэффициента β с площадью контактного пятна на катоде для герконов с покрытием Au-Ru после коммутационных испытаний

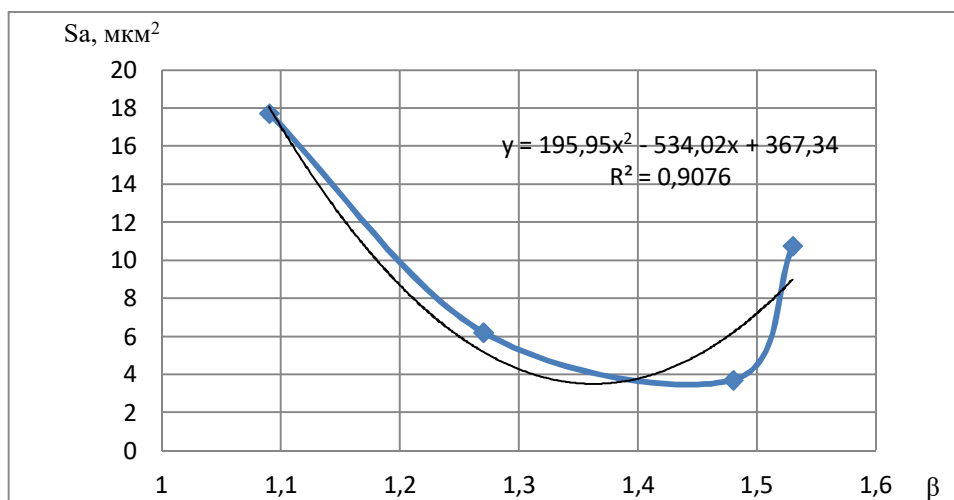


Рис. 4. Зависимость, характеризующая связь коэффициента β с площадью контактного пятна на катоде для герконов без покрытия после коммутационных испытаний

Анализ данных, приведенных на рисунках 3 и 4, свидетельствует о том, что разброс площади пятен на аноде для герконов без покрытия шире, чем для герконов с покрытием Au-Ru. Проведение коммутационных испытаний в целом сохраняет общую тенденцию зависимостей. На основе этих данных можно предположить, что герконы с покрытием Au-Ru имеют более высокую надежность и стабильные рабочие характеристики.

Согласно работе [5], чем большие механические напряжения имеют проводящие пленки, тем большее значение коэффициента β для них характерно. Сравним зависимости, характеризующая связь средних диаметров наростов на электродах с коэффициентом β для герконов с покрытием Au-Ru и без покрытия (рисунок 5). Для образцов герконов с покрытием Au-Ru характерен больший разброс значений коэффициента β , что объясняется большим

разбросом внутренних механических напряжений внутри пленки. Однако разброс средних диаметров наростов почти не различается для образцов с покрытием Au-Ru и без покрытия.

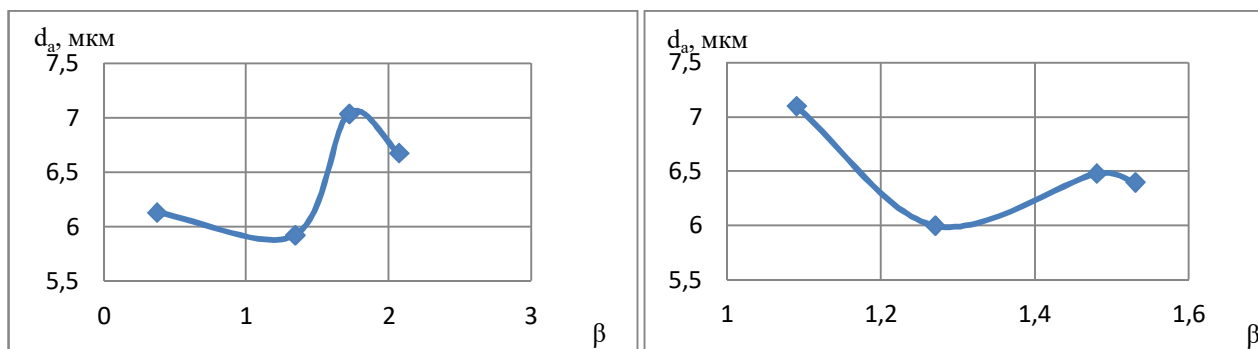


Рис. 5. Зависимость, характеризующая связь средних диаметров наростов на электродах с коэффициентом β после коммутационных испытаний: слева – для герконов с покрытием Au-Ru, справа – для герконов без покрытия

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 [2 – 4].

Работа выполнена с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина (РГРТУ)

Библиографический список

1. Логинов Д.С., Литвинов В.Г., Холомина Т.А., Рыбин Н.Б. Техническая реализация метода испытания надежности магнитоуправляемых контактов
2. Жигальский Г.П. Шумы вида $1/f$ и нелинейные эффекты в тонких металлических плёнках // УФН. 1997. Т. 167. № 6. С. 623-647.
3. Жигальский Г. П. Неравновесный $1/f$ -шум в проводящих пленках и контактах// УФН. 2003. Т. 173, № 5. С. 465–490.
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. 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

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА А-С<PD_x> ПЛЕНОК, СИНТЕЗИРОВАННЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ НА ПОДЛОЖКЕ

Ә.Р. Әсембаева^{1,2}, Р.Р. Немкаева¹, Н.Р. Гусейнов¹, Ш.Н. Нагмадин³, А.П. Рязгузов^{1,2,3}

¹ННЛОТ КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Республика Казахстан

²Satbayev University, Алматы, Республика Казахстан

³КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Республика Казахстан

E-mail: Aliya.aseмбаeva@mail.ru

Аннотация. Пленки а-С<Pd_x> были получены методом магнетронного ионно-плазменного со-распыления комбинированной мишени и с отрицательным напряжением смещения на подложке ($U_{bias} = -60V$). Изучена локальная структура алмазоподобных углеродных а-С<Pd_x> пленок методом рамановской спектроскопии (RS). Было выявлено, что напряжение смещения существенно влияет на процесс роста и формирование углеродной матрицы. Использование U_{bias} приводит к уменьшению интенсивности основного рамановского G пика в спектрах а-С пленок, что говорит о существенном изменении локальной структуры.

Ключевые слова: алмазоподобные углеродные пленки, магнетронное ионно-плазменное распыление, модифицирование, наночастицы палладия, напряжение смещения.

STRUCTURE AND PROPERTIES OF a-C<Pd_x> FILMS SYNTHESIZED BY THE ION-PLASMA METHOD USING NEGATIVE BIAS VOLTAGE ON THE SUBSTRATE

A.R. Assembayeva^{1,2}, R.R. Nemkayeva¹, N.R. Guseinov¹, Sh.N. Nagmadin³, A.R. Ryaguzov^{1,2,3}

¹NNLOT Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan

²Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan

³KazNU named after al-Farabi, Almaty, Republic of Kazakhstan

E-mail: Aliya.aseмбаeva@mail.ru

Abstract. The a-C<Pd_x> films were obtained by magnetron ion-plasma co-sputtering of a combined target and with a negative bias voltage on the substrate ($U_{bias} = -60V$). The local structure of diamond-like carbon a-C<Pd_x> films is studied by Raman spectroscopy (RS) method. It was found that bias voltage significantly affects the growth process and the formation of the carbon matrix. The use of U_{bias} leads to a decrease in the intensity of the main Raman G peak in the spectra of a-C films, which indicates a significant change in the local structure.

Key words: diamond-like carbon films, magnetron ion-plasma sputtering, modification, palladium nanoparticles, bias voltage

В настоящее время углеродные наноструктурированные материалы все чаще используются в различных областях науки, промышленности, в создании новых приборов и устройств и являются важнейшими составляющими в развитии современной науки [1]. Особое место среди углеродных наноматериалов занимают тонкие алмазоподобные (DLC) пленки, которые отличаются уникальными физико-механическими и трибологическими свойствами [2]. Широкое применение алмазоподобных углеродных пленок в различных сферах обуславливается такими характеристиками как, высокая механическая прочность, высокая твердость, низкий коэффициент трения, высокое удельное сопротивление, химическая инертность и т.д. [3]. В различных технических устройствах, где требуется эффективность, долговечность и надежность деталей и рабочих инструментов, DLC пленки могут служить в качестве антикоррозионных, упрочняющих и защитных покрытий [4].

Проведение структурно примесной модификации пленок алмазоподобного углерода, могут привести к появлению новых свойств и расширить область их применения [5]. Особый интерес вызывают элементы которые не образуют химическую связь с углеродом [6]. В нашей работе в качестве модифицирующего элемента был выбран металл платиновой группы – палладий.

Синтез алмазоподобных углеродных пленок с наночастицами палладия осуществлялся методом магнетронного ионно-плазменного со-распыления с использованием

отрицательного напряжения смещения (-60В) на подложке, при мощности ионно-плазменного разряда $15,75\text{Вт}$. Распыление комбинированной мишени из графита (99,999%) и палладиевых проволок (99,9%) проводилось в атмосфере аргона (99,999%), давление которого составляло $0,7\text{Па}$. В качестве подложек использовались кремниевые (100) и кварцевые пластины. Температура подложек при синтезе не $^{\circ}\text{C}$. Концентрация палладия в составе пленок изучалась методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) на растровом электронном микроскопе Quanta 200i 3D (FEI Company, USA). Концентрация палладия в полученных алмазоподобных а-С пленках менялась от 0.36 до 3.31 ат.% (таблица 1). Толщина пленок определялась на свежем сколе кремниевой пластины [7] на установке растрового электронного микроскопа Quanta 200i 3D (FEI Company, USA), и в зависимости от концентрации менялась в интервале от 55 до 85 нм.

Таблица 1. Значения концентрации палладия в DLC а-С пленках

№ образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X_{Pd} , ат.%	0.36	0.51	0.58	0.61	0.75	1.23	1.53	2.09	2.4	3.31

Локальная структура полученных пленок исследовалась методом рамановской спектроскопии. Рамановский спектр от чистых а-С пленок характеризуется одним широким пиком на частоте 1550 см^{-1} , плечом в низкочастотной области и дополнительным пиком в области частоты 3000 см^{-1} [8].

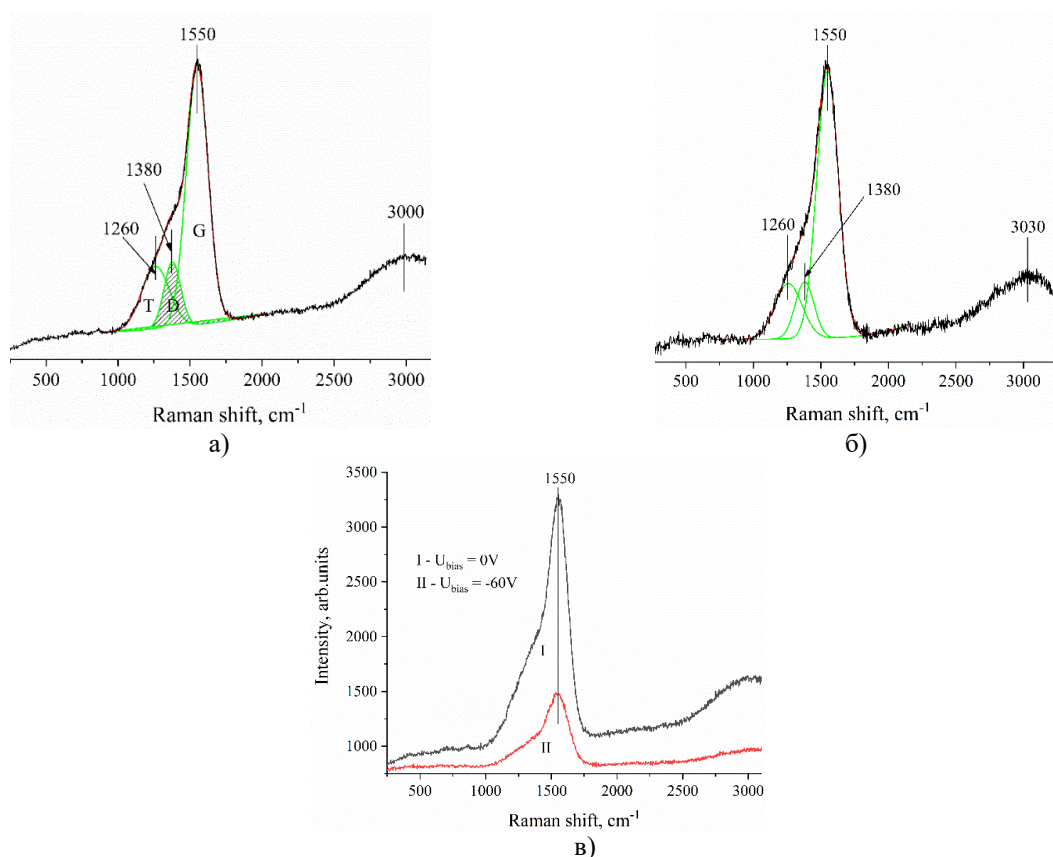


Рис. 1. Рамановские спектры а-С пленок, синтезированных без и с напряжением смещения на подложке

а) разложение по нормальному распределению а-С пленки;

б) пленки, синтезированной с $U_{\text{bias}} = -60\text{В}$;

в) сравнение а-С пленок, синтезированных при разных значениях U_{bias} ;

Как видно из рисунка 1 (а), при разложении по нормальному распределению рамановский спектр чистых а-С пленок раскладывается на три пика: основной G пик на частоте 1550 см^{-1} , который характеризует поступательные колебания sp^2 связанных атомов углерода, пик D в области частот $\sim 1380\text{ см}^{-1}$, характеризующий дыхательную моду C-C атомов, и третий пик T в области $\sim 1260\text{ см}^{-1}$, который характеризует образование тетрагональных sp^3 связей. Кроме этого, рамановские спектры синтезированных пленок имеют наклон, характерный для фотолуминесценции (ФЛ). Разложение G пика, показанное на рисунках 1(а) и 1(б) показывает, что существенных изменений в структуре пленок не происходит, незначительное отличие наблюдается в положении второго порядка в области 3000 см^{-1} . Это говорит о небольших изменениях в углах и длинах C-C связей.

На рисунке 1 (с) представлено сравнение двух рамановских спектров а-С пленок, синтезированных на кварцевой подложке без напряжения смещения: кривая I, и с напряжением смещения -60В кривая II. Как видно из рисунка 1(с), наблюдаем существенное отличие в интенсивности G пика, но смещения пика или изменения формы нет, также есть изменение наклона кривой, можем видеть, что наклон кривой в пленках, синтезированных с использованием напряжения смещения, гораздо меньше, чем в а-С пленках, полученных без использования напряжения смещения. Т.е. при напряжении смещения люминесценция уменьшается.

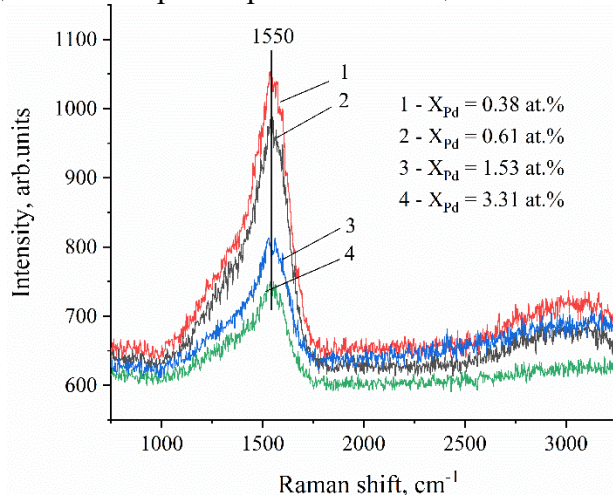


Рис. 2. Рамановские спектры DLC a-C<Pd> пленок с разными концентрациями палладия, синтезированных на кварцевой подложке при $U_{bias} = -60\text{В}$

Проведено исследование влияния наночастиц палладия на локальную структуру а-С пленок, синтезированных при $U_{bias} = -60\text{В}$. На рисунке 2 приведены рамановские спектры а-С<Pd> для четырех различных концентраций палладия на кварцевых пластинах. Из рисунка 2 видно, что увеличение концентрации палладия в а-С пленке приводит к уменьшению интенсивности G пика. Кроме этого видно, что внедрение палладия в виде наночастиц в аморфную углеродную матрицу не изменяет положение G пика. Постоянство положения G пика говорит о существовании определенной структурной молекулярной единицы sp^2 - sp^3 связей, которая участвует в формировании матрицы пленки. Уменьшение интенсивности указывает на уменьшение ее количества в углеродной матрице, и это уменьшение связано с появлением и увеличением концентрации палладия.

Кроме этого, было проведено исследование оптических свойств а-С<Pd>пленок, синтезированных при постоянном значении напряжения смещения $U_{bias} = -60\text{В}$.

Ширину запрещенной зоны (E_g) определяли из спектров пропускания и отражения, полученных на спектрофотометре UV3600 (Shimadzu, Japan). Расчет запрещенной зоны проводился по квадратичному закону Тауца [9] $\alpha h\nu \sim (h\nu - E_g)^2$ в диапазоне $\alpha \sim 10^5\text{ см}^{-1}$. Добавление палладия и увеличение его концентрации, согласно исследованиям локальной структуры методом рамановской спектроскопией, приводит к увеличению концентрации структурных

элементов из sp^2 узлов и увеличению плотности электронных состояний в запрещенной зоне в а-С пленках. Зависимость E_g от концентрации палладия приведена на рисунке 3. Как видно из рисунка 3, в диапазоне исследуемой концентрации Pd от 0.36 ат.% до 3.31 ат.% ширина запрещенной зоны плавно меняется от 1.4 эВ до 0.5 эВ. В более ранней работе [7] было приведено изменение ширины запрещенной зоны а-С<Pd_x> пленок, синтезированных без использования напряжения смещения, и было показано, что при концентрации $X_{Pd}=2$ ат.% $E_g = 0.1$ эВ. Из рисунка 3 видно, что при $X_{Pd}=2$ ат.% $E_g \sim 0.7$ эВ, что в семь раз больше, чем E_g в а-С<Pd_x> пленках, синтезированных без напряжения смещения.

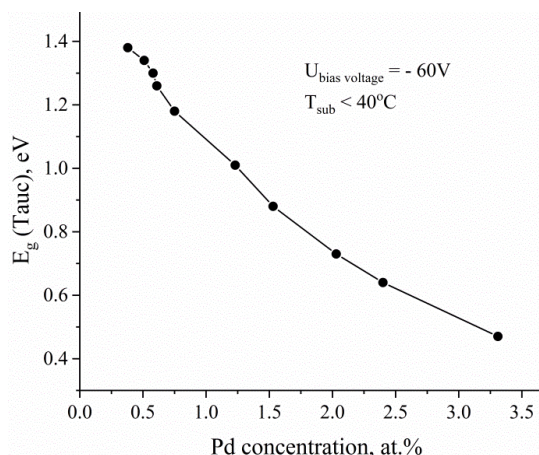


Рис. 3. Зависимость ширины запрещенной зоны от концентрации палладия в пленках, синтезированных при напряжении смещения -60В

Таким образом, можно заключить о существенном влиянии напряжения смещения и концентрации наночастиц палладия на процесс формирования а-С<Pd> пленок, их атомную структуру и, соответственно, на распределение электронной плотности в зонах.

Библиографический список

1. Ткачев, А.Г. Углеродный наноматериал "Таунит" – структура, свойства, производство и применения / А.Г. Ткачев // Перспективные материалы. – 2007. – № 3. – С. 5 – 9.
2. Modabberasl, A., Kameli P., Ranjbar, M., Salamati, H., Ashiri, R. Fabrication of DLC thin films with improved diamond-like carbon character by the application of external magnetic field // Carbon. – 2015. – V.94. – P.485-493.
3. Qi, J., Luo, J.B., Wen, S.Z., Wang, J., Li, W.Z. Mechanical and tribological properties of non-hydrogenated DLC films synthesized by IBA. // Surf. Coat. Technol. – 2000. – 128. – P. 324–328
4. J. Qi, J.B. Luo, K.L. Wang, S.Z. Wen, Mechanical and tribological properties of diamond-like carbon films deposited by electron cyclotron resonance microwave plasma chemical vapor deposition. // Tribol. Lett. 14. – 2003. – P. 105–109.
5. Fujime, S. Electron diffraction at low temperature. IV. Amorphous films of iron and chromium prepared by low temperature condensation. Japan. // J.Appl.Phys. –1966. –V.5, № 11. –P. 1029-1035.
6. Sarsembinov, S.S., Prihodko, O.Y., Ryaguzov, A.P., Maksimova, S.Y. Electronic properties of diamond-like carbon films modified by silver nanoclusters. // Physica status solidi. – V. 7. - Issue (3-4). – P. 805-807.
7. Ryaguzov, A.P., Nemkayeva, R.R., Guseinov, N.R., Assembayeva, A.R., Zaitsev, S.I. Percolation conductivity in amorphous carbon films modified with palladium nanoparticles // Journal of Non-Crystalline Solids. –2020. –№532. – P.119876.
8. Ferrari, A.C., Robertson, J. Raman spectroscopy of amorphous, nanostructured, diamond-like carbon, and nanodiamond // Philos.Trans.R.Soc. – 2004. –A362. –P.2477-2481.
9. Taue, J. Optical properties of semiconductors in the visible and ultra-violet ranges // Prog. Semicond. – 1965. – №9. –P.89-99.

УДК 53.084.6, 53.084.872-876; ГРНТИ 29.19.31

УСТРОЙСТВО ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИСПЫТАНИЙ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫХ КОНТАКТОВ

Д.С.Логинов, Т.А.Холомина, В.Г.Литвинов, А.А.Зинуков

Рязанский государственный радиотехнический университет,

Россия, Рязань, skoobel@gmail.com

Аннотация. На базе 32 битного высокопроизводительного микроконтроллера STM32 разработано автоматизированное устройство для многократной коммутации (искусственного износа) магнитоуправляемых контактов. Устройство позволяет автоматически при заранее заданных параметрах коммутируемой цепи выполнять многократную коммутацию магнитоуправляемых контактов для последующих исследований спектров низкочастотного (НЧ) шума, состава и морфологии поверхности контактов с целью прогнозирования надежности приборов.

AUTOMATED TESTING DEVICE MAGNETICALLY ACTUATED CONTACTS

D.S. Loginov, T.A. Kholomina, V.G. Litvinov, A.A. Zinukov

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

Russia, Ryazan, skoobel@gmail.com

The summary. Based on a 32-bit high-performance STM32 microcontroller, an automated device for multiple switching (artificial wear) of magnetically controlled contacts has been developed. The device allows for automatic multiple switching of magnetically controlled contacts for subsequent investigation of low-frequency (LF) noise spectra, contact surface composition and morphology in order to predict the reliability of devices at predetermined parameters of the switched circuit.

Введение

Надежность приборов и стабильность параметров играют важнейшую роль в производстве изделий электронной техники. В современных электронных устройствах часто встречаются различные разъемные соединения, контакты, коммутационные узлы и магнитоуправляемые контакты. К разработке и конструированию устройств предъявляются серьезные требования обеспечения повторяемости параметров выпускаемой продукции. В частности, такие требования предъявляются к коммутирующим элементам, таким как магнитоуправляемые контакты (герконы), которые должны обеспечивать многократную коммутацию (до 10^9 раз). У герконовых контактов (реле) есть ряд параметров, таких как сила срабатывания, сопротивление контактов, сила отталкивания, напряжение пробоя и другие, которые меняются в той или иной степени от партии к партии из-за различных факторов. Для получения идентичных по параметрам герконовых контактов необходимы исследования, которые помогут понять причины расхождения параметров герконов, изготовленных в одинаковых условиях [1].

Цель настоящей работы – схемотехническая и приборная реализация устройства, разработанного для автоматизированной многократной коммутации магнитоуправляемых контактов с последующим исследованием их параметров и прогнозированием надежности.

Элементная база устройства

Устройство спроектировано на базе микроконтроллера STM32F103C8T6 [2], который обеспечивает обмен данными с персональным компьютером (ПК) и управляющим программным обеспечением (ПО). Микроконтроллер задает режимы коммутации: частоту срабатывания контактов, коммутируемые герконом ток и напряжение, а также управляет световой и звуковой индикацией. В функции микроконтроллера входят анализ реальных парамет-

ров коммутируемой цепи, таких как ток, напряжение и пересчет коммутируемой мощности. Основные параметры микроконтроллера приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры микроконтроллера STM32F103C8T6

Серия	STM32 F1
Ядро	Arm cortex-m3
Ширина шины данных	32-бит
Тактовая частота	72 МГц
Количество входов/выходов	37
Объем памяти программ	64 кбайт (64k x 8)
Тип памяти программ	Flash
Объем RAM	20k x 8
Наличие АЦП/ЦАП	АЦП 10x12b
Встроенные интерфейсы	CAN, I ² C, IRDA, LIN, SPI, UART, USB
Встроенная периферия	dma, pwm, pdr, por, pvd, pwm, tempsensor, wdt
Напряжение питания	2...3.6 В
Рабочая температура	-40...+85 °C
Корпус	lqfp-48 (7 x 7)

Обмен данными между микроконтроллером и ПК осуществляется с помощью преобразователя USB-UART FT232RL-REEL [3], благодаря которому реализована возможность коммутации устройства с другими по интерфейсу RS232. Блок - схема преобразователя приведена на рисунке 1.

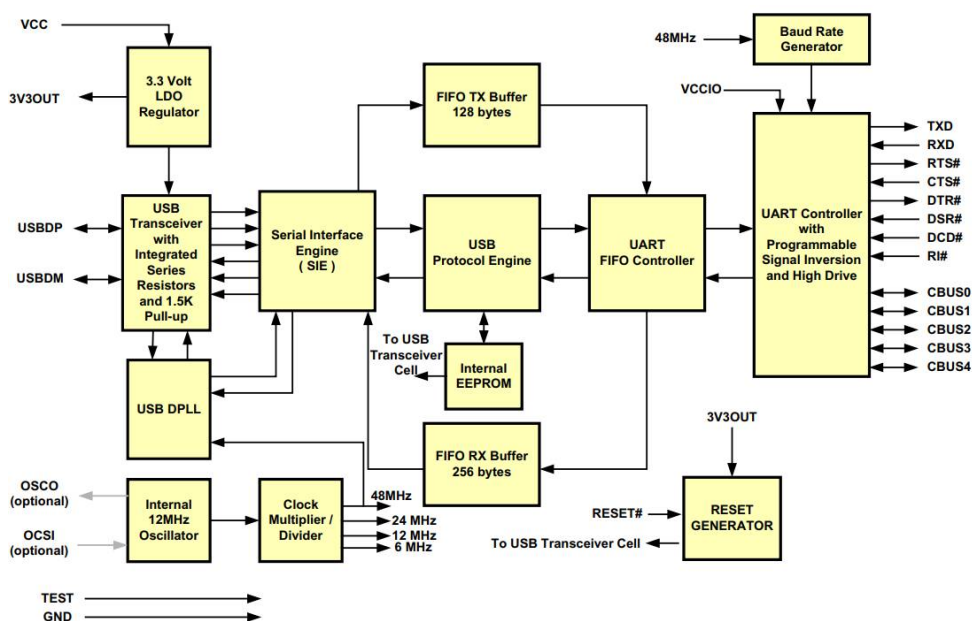


Рис. 1. Блок - схема преобразователя USB-UART FT232RL-REEL

В используемом микроконтроллере имеется встроенный интерфейс USB, примененный для вывода отладочной информации в ПК. Для обеспечения необходимых режимов работы коммутируемых цепей применены двухканальные цифровые потенциометры AD8402ARZ1 [4] фирмы Analog Devices. Цифровые потенциометры управляются по интерфейсу SPI и обеспечивают возможность реализации сопротивления до 1 кОм, что удовлетворяет параметрам коммутируемых цепей. На рисунке 2 приведена функциональная диаграмма цифрового потенциометра AD8402ARZ1.

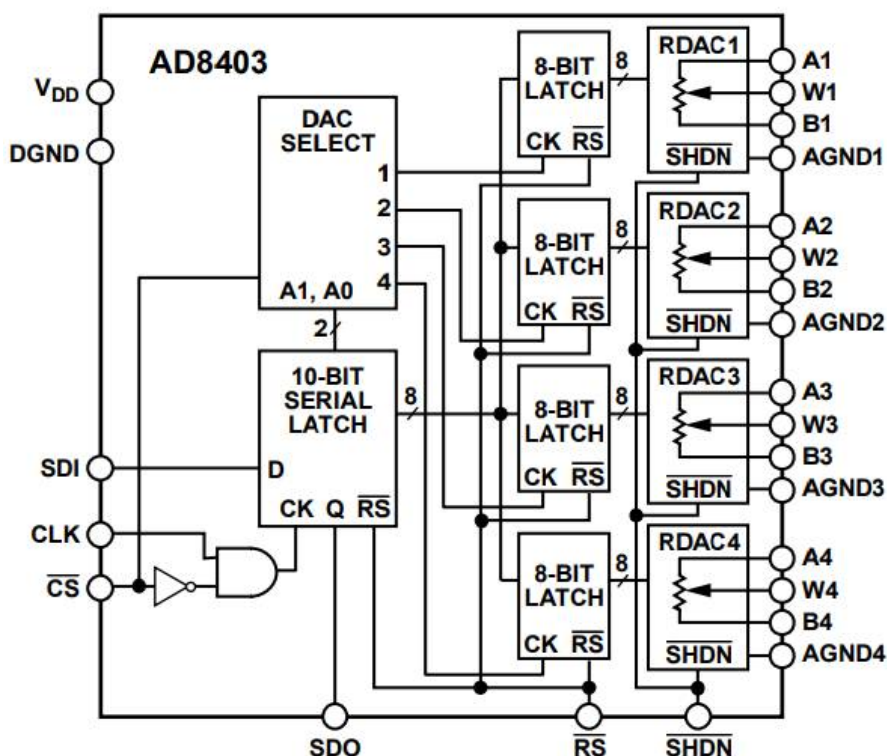


Рис. 2. Функциональная диаграмма цифрового потенциометра AD8402ARZ1

Применение цифровых потенциометров в схемах подстройки является целесообразным, поскольку, например, цифровые потенциометры AD8402ARZ1 имеют линейную зависимость сопротивления от загруженного числа в регистр (0-255). Зависимость сопротивления цифрового потенциометра от числа в регистре приведена на рисунке 3.

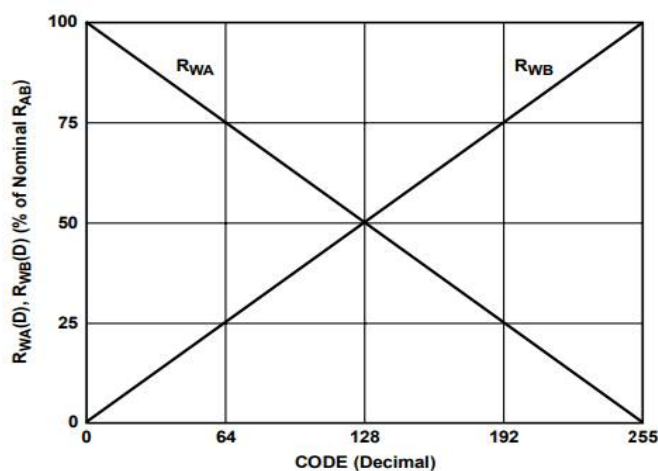


Рис. 3. Зависимость сопротивления цифрового потенциометра AD8402ARZ1 от загруженного в регистр числа

Для контроля тока в коммутируемых цепях использованы токовые датчики на эффекте Холла ACS712ELCTR-05B-T [5] от фирмы Allegro Microsystems, преимуществами которых являются их размер (SOIC-8), диапазон измеряемых токов ($\pm 5\text{A}$), однополярное напряжение питания (+5 В). Перечисленные преимущества позволяют применять данные токовые

датчики в схемах с микропроцессорным управлением без использования дополнительных источников питания и стабилизаторов. Широкий диапазон измеряемых токов позволяет проектировать схемы с большим запасом по току и при необходимости увеличивать его. Погрешность датчиков по току при комнатной температуре не более 1,5%, что является неплохим критерием для применения в лабораторном оборудовании. Время отклика датчика на изменение тока не более 5 мкс, что позволяет быстро реагировать на резкое увеличение и уменьшение тока в измеряемой цепи. Функциональная диаграмма токового датчика приведена на рисунке 4.

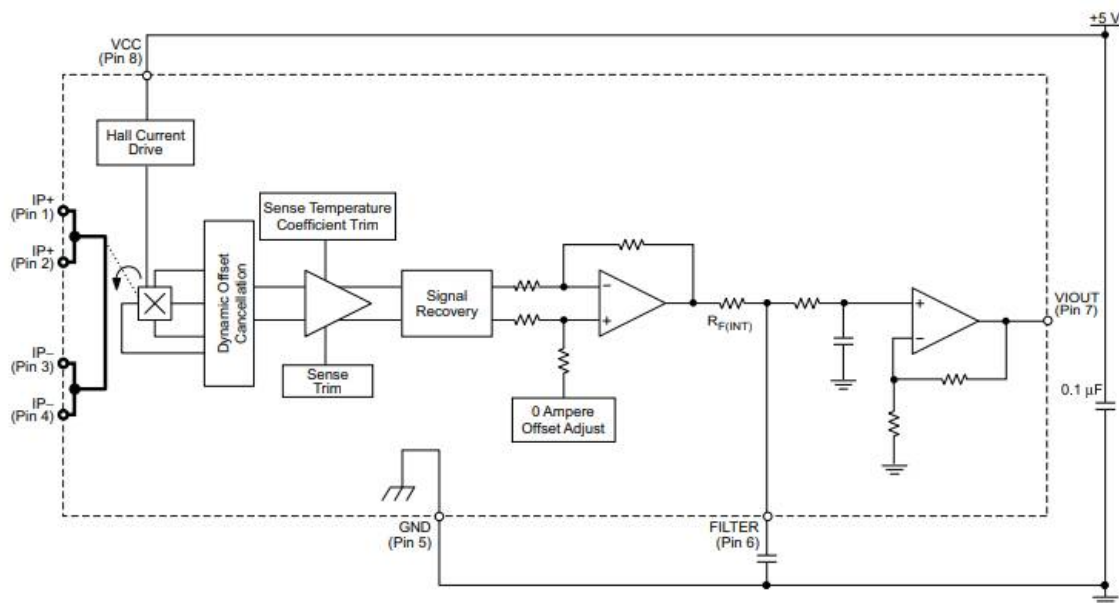


Рис. 4. Функциональная диаграмма токового датчика ACS712ELCTR-05B-T

Для обеспечения работы светодиодных индикаторов и органов управления устройством (кнопок) применены логические буферы 74ABT245D [6] от фирмы NXP Semiconductor. Использование логических буферов обеспечивает снижение нагрузки на микроконтроллер и защиту портов ввода/вывода. Функциональная диаграмма логического буфера 74ABT245D приведена на рисунке 5.

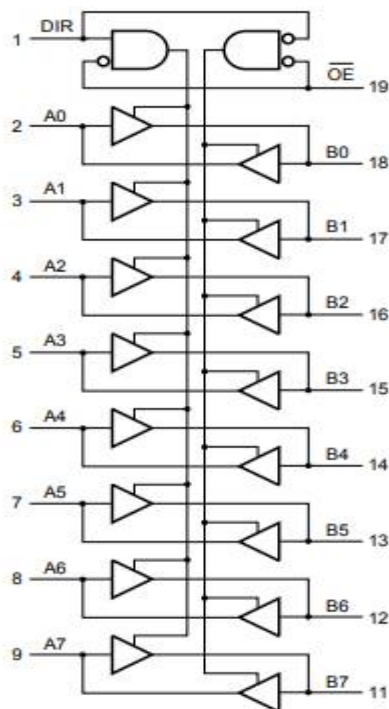


Рис. 5 Функциональная диаграмма логического буфера 74ABT245D

Питание устройства осуществляется от однополярного напряжения 24 В. Для обеспечения защиты и реализации номинальных напряжений, составляющих устройства, использованы DC-DC преобразователи фирмы AIMTEC с выходными напряжениями 5 и 12 В.

Принцип работы устройства

При включении проходит инициализация микроконтроллера и при готовности устройства к работе загорается индикатор «ГОТОВНОСТЬ». Следующим этапом является установка геркона в зажимы, затем осуществляется настройка режимов работы устройства при помощи управляющих кнопок. При подключении к ПК устройство переходит в режим настройки и ожидает данные от терминальной программы по протоколу RS-232. Далее, когда задан режим износа (количество переключений, ток, напряжение), запускается цикл многократной коммутации (износа) при помощи отправки команды с ПК или кнопки на устройстве. Во время заданного цикла износа геркона, на устройстве светится индикатор «ИЗНОС». По окончании заданного цикла включается световой индикатор «ЗАВЕРШЕНО» и звучит периодический сигнал бипера. Существенными преимуществами разработанного устройства являются возможность измерения сопротивления прибора после каждого акта коммутации, а также получения результатов в режиме реального времени. После заданного экспериментального цикла износа геркон готов к дальнейшим исследованиям – изучению спектров НЧ шума и характеристик прибора, которые используются для прогнозирования надежности [7].

Выводы

Разработано устройство, при помощи которого можно проводить эксперименты по многократной коммутации (искусственному износу) магнитоуправляемых контактов с последующим исследованием их параметров и характеристик. Устройство реализовано на базе 32 битного высокопроизводительного микроконтроллера STM32, что позволяет

организовать управление коммутируемой цепью, обратную связь для обеспечения защитных функций, прием данных от датчиков и обработку полученной информации, а также обмен данными с ПК. Устройство обеспечивает напряжение в коммутируемой цепи от 0,1 до 10 В, ток - от 0,01 до 3 А, частоту коммутации от 1 Гц до 100 кГц, длительность процесса коммутации от 5 с до 48 ч.

Устройство позволяет автоматически при заранее заданных параметрах цепи выполнять многократную коммутацию магнитоуправляемых контактов для последующих исследований спектров НЧ шума, состава и морфологии поверхности контактов с целью прогнозирования надежности приборов [8].

Библиографический список

1. Куликов Е.И. Методы измерения случайных процессов. М.: Радио и связь. – 1986. – 272 с.
2. Описание (datasheet) электронного компонента «STM32F103C8T6» производства "ST Microelectronics" [электронный ресурс]. – 2021. URL: https://www.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32-mainstream-mcus/stm32f1-series/stm32f103/stm32f103c8.html (дата обращения: 01.02.2021).
3. Описание (datasheet) электронного компонента «FT232RL-REEL» производства "FTDI" [электронный ресурс]. – 2021. URL: https://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf (дата обращения: 02.02.2021).
4. Описание (datasheet) электронного компонента «AD8402ARZ1» производства "Analog Devices" [электронный ресурс]. – 2021. URL: <https://www.analog.com/ru/products/ad8402.html#product-overview> (дата обращения: 03.02.2021).
5. Описание (datasheet) электронного компонента «ACS712ELCTR-05B-T» производства "Allegro Microsystems" [электронный ресурс]. – 2021. URL: <https://www.allegromicro.com/en/products/sense/current-sensor-ics/zero-to-fifty-amp-integrated-conductor-sensor-ics/acs712> (дата обращения: 04.02.2021).
6. Описание (datasheet) электронного компонента «74ABT245D» производства "NXP Semiconductor" [электронный ресурс]. – 2021. URL: <https://www.nexperia.com/products/analog-logic-ics/asynchronous-interface-logic/transceivers/74ABT245D.html> (дата обращения: 05.02.2021).
7. 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.
8. 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 621.382: ГРНТИ 29.03.77

КВАНТОМЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КОНТАКТА МЕТАЛЛ-ПОЛУПРОВОДНИК

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 рассмотрен контакт металла с кристаллическим и неупорядоченным полупроводником, произведен расчет коэффициента прозрачности барьера для каждой структуры и определен преобладающий механизм понижения эффективной высоты барьера.

Ключевые слова: контакт металл-полупроводник, кристаллический полупроводник, неупорядоченный полупроводник, туннелирование, эффект Шоттки.

QUANTUM MECHANICAL CALCULATION OF A METAL-SEMICONDUCTOR CONTACT

N.A. Baskakov, V.G. Mishustin

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

Abstract. The article deals with the contact of a metal with a crystalline and disordered semiconductor is considered, the transparency coefficient of the barrier for each structure is calculated, and the prevailing mechanism for lowering the effective barrier height is determined.

Keywords: metal-semiconductor contact, crystalline semiconductor, disordered semiconductor, tunneling, Schottky effect.

Контакт металл-полупроводник характерен для каждого электронного устройства. Различают два случая: омический контакт, который формируют при создании металлических выводов, и выпрямляющий контакт – барьер Шоттки. На основе барьера Шоттки создаются активные полупроводниковые структуры с униполярной проводимостью [1].

В случае неупорядоченных полупроводников особенности их электронного строения обуславливают отличия контактных явлений от кристаллических полупроводников. Это следует учитывать как при теоретических исследованиях, так и при разработке приборных структур.

При комнатных температурах основной механизм переноса носителей заряда – надбарьерная эмиссия. Плотность тока через контакт зависит от высоты барьера, которая меняется в зависимости от приложенного напряжения. Эффект Шоттки, либо туннелирование носителей заряда сквозь барьер могут понижать эффективную высоту барьера в зависимости от электрофизических свойств контактирующих материалов [2].

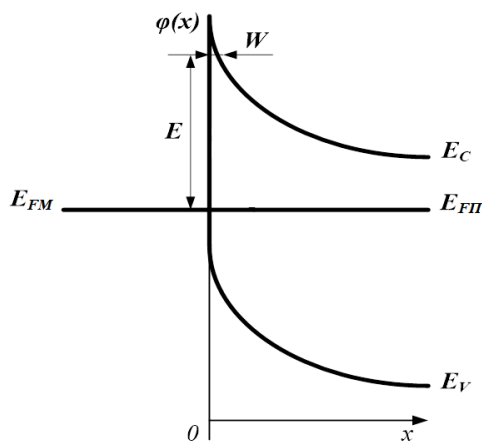


Рис. 1. Зонная диаграмма контакта металл-полупроводник

Для определения преобладающего механизма понижения эффективной высоты барьера был проведен квантово-механический расчет коэффициента прозрачности барьера (D) в зависимости от структуры полупроводника – кристаллического или неупорядоченного. Барьер считается прозрачным для носителей заряда, когда коэффициент прозрачности принимает значение, равное 0.5. Коэффициент прозрачности рассчитывается по следующей формуле:

$$D = D_0 \exp \left[- (2/\hbar) \int_0^{W'} \sqrt{2m(\phi(x) - E)} dx \right], \quad (1)$$

где W' – эффективная ширина барьера для частиц, обладающих энергией E относительно уровня Ферми со стороны металла E_{FM} , $\phi(x)$ – профиль электростатического потенциала в ОПЗ барьера (рис. 1). Для кристаллического полупроводника профиль барьера рассчитывается по формуле (2), для неупорядоченного – по формуле (3):

$$\phi(x) = \frac{eN_d}{\varepsilon\varepsilon_0} (W - x)^2; \quad (2)$$

$$\phi(x) = - \frac{2}{\beta e} \ln \left| \cos \left(\frac{W-x}{\sqrt{2}L_S} \right) \right|. \quad (3)$$

Здесь W – ширина ОПЗ барьера, N_d – концентрация легирующей примеси в кристаллическом полупроводнике, β – параметр распределения плотности состояний, а L_S – характеристическая длина экранирования в неупорядоченном полупроводнике, которая определяется плотностью состояний g_{F0} вблизи уровня Ферми [3]:

$$L_S = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{e^2 g_{F0}}}. \quad (4)$$

Расчет проводился на примере типичных представителей соответствующих типов полупроводников: кристаллического кремния (с-Si) и аморфного гидрогенизированного кремния (а-Si:H). В ходе расчета использовались следующие допущения и исходные значения:

высота барьера Шоттки при 300 К принимается равной $e\phi_0 = 0.77$ эВ (контакт Ag–с-Si); эффективная плотность состояний в зоне проводимости для с-Si при 300 К равна $N_C = 2.8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$;

для сравнительного анализа равновесная концентрация электронов в кристаллическом полупроводнике подбиралась таким образом, чтобы толщина ОПЗ барьера при нулевом смещении в с-Si и а-Si:H совпадали: $n_0 = 5.3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$;

плотность состояний вблизи уровня Ферми для а-Si:H: $g_{F0} = 10^{16} \text{ см}^{-3} \text{ эВ}^{-1}$; параметр экспоненциальной аппроксимации распределения плотности состояний: $\beta = 2.7 \text{ эВ}^{-1}$.

Результаты расчета коэффициента прозрачности барьера на контакте металл-полупроводник в зависимости от величины обратного смещения для с-Si и а-Si:H представлены на рисунке 2.

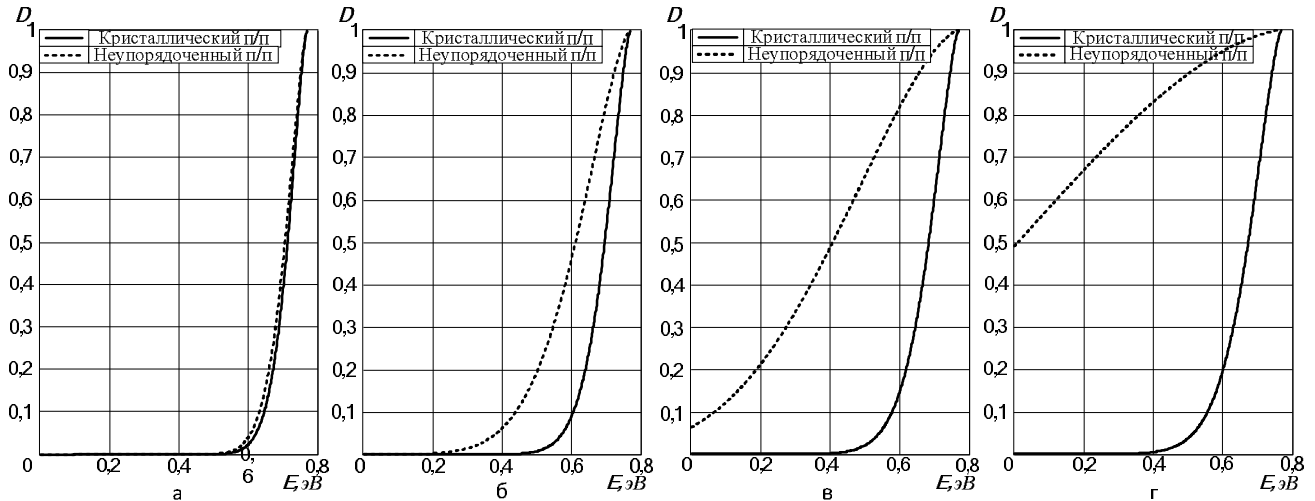


Рис. 2. Зависимость коэффициента прозрачности от энергии частицы для кристаллического и неупорядоченного полупроводника при различных величинах обратного смещения:
а – $V = 0 \text{ В}$; б – $V = -1 \text{ В}$; в – $V = -2 \text{ В}$; г – $V = -3 \text{ В}$

Для неупорядоченного полупроводника коэффициент прозрачности барьера значительно чувствительнее к величине обратного напряжения, чем для кристаллического. Это можно объяснить тем, что из-за высокой плотности состояний профиль электростатического потенциала барьера «сужается», так что барьер становится туннельно-прозрачным для носителей заряда даже при небольших обратных смещениях.

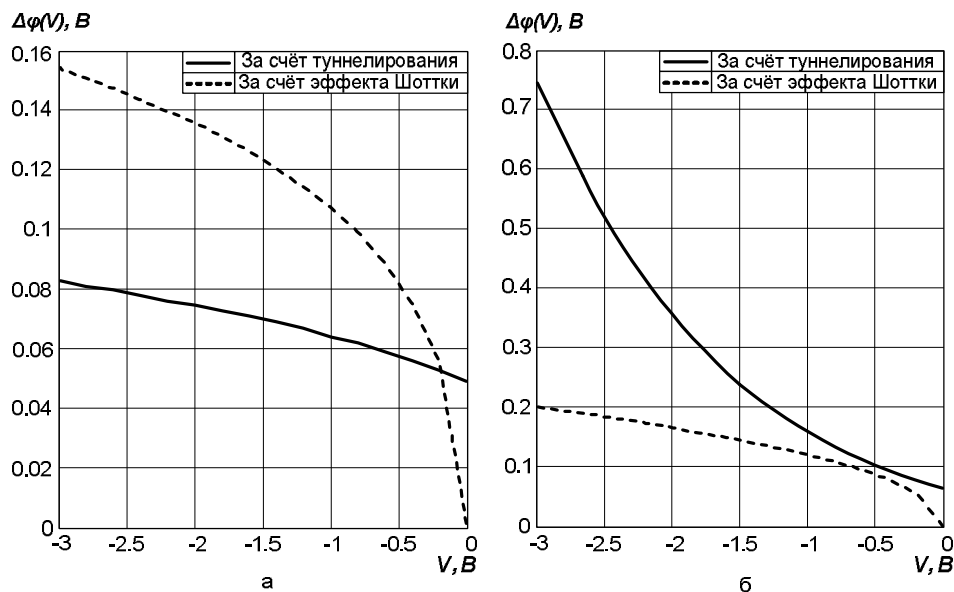


Рис. 3. Зависимость понижения эффективной высоты барьера от величины обратного напряжения за счет эффекта Шоттки и за счет туннелирования:
а – кристаллический п/п; б – неупорядоченный п/п

На рисунке 3 представлены расчетные зависимости понижения эффективной высоты барьера ($\Delta\phi$) от величины обратного напряжения (V) в зависимости от механизма понижения барьера – эффекта Шоттки или туннелирования носителей – для кристаллического и неупорядоченного полупроводника.

Анализ результатов показывает, что для кристаллического полупроводника с

умеренным уровнем легирования определяющим эффектом при понижении высоты барьера является эффект Шоттки. Для неупорядоченного полупроводника преобладающим механизмом уменьшения высоты барьера является туннелирование носителей. Эффект Шоттки в неупорядоченном полупроводнике также имеет место, но он «маскируется» туннельным эффектом.

Предлагаемый подход позволяет прогнозировать свойства контакта металл-полупроводник в зависимости от характеристик контактирующих материалов. Это необходимо для оценки эффективной высоты потенциального барьера в зависимости от величины приложенного напряжения и может быть использовано при моделировании параметров барьерных и омических контактов металл – полупроводник [4].

Работа выполнена с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина (РГРТУ).

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003).

Библиографический список

1. С. Зи Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. Кн. 1. Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
2. Вихров С.П., Вишняков Н.В., Мишустин В.Г. и др. Токоперенос через барьер на контакте металл - некристаллический полупроводник: особенности расчета прямых и обратных ВАХ // Вестник РГРТУ. Вып. 22. Рязань, РГРТУ. 2007. С. 86 – 88.
3. Мишустин В.Г. Исследование влияния локализованных состояний на распределение пространственного заряда в барьерных структурах на основе неупорядоченных полупроводников / Дисс. канд. физ.-мат. наук: Рязань, 2008. 185 с.
4. Н.А. Баскаков, В.Г. Мишустин Моделирование параметров барьерной наноструктуры // Сб. тр. XXV Всерос. науч.-техн. конф. НИТ-2020; Рязань, 2020. С. 59 – 60.

УДК 538.97; 539.23; 539.216.1 ГРНТИ 29.19.22; 29.19.16

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НА СТРУКТУРУ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АМОРФНЫХ АЛМАЗОПОДОБНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК С НАНОЧАСТИЦАМИ ИРИДИЯ

Ф. Бекмурат^{1,2}, Р. Немкаева^{1,2}, Н. Гусейнов¹, М. Маркизат², Т.Д. Раисова¹, А.П. Рягузов^{1,2}

¹Национальная нанотехнологическая лаборатория открытого типа

²КазНУ им аль-Фараби, Алматы, Казахстан, zh.farizal@mail.ru

Аннотация. Аморфные алмазоподобные углеродные пленки с наночастицами иридия (a-C <Ir>) были синтезированы методом ионно-плазменного со-распыления комбинированной мишени. Модифицированные пленки были получены при разных значениях мощности разряда на постоянном токе (DC). Изучение фазового контраста поверхности пленок методом атомно силовой микроскопии (AFM) показало существование наночастиц иридия в аморфной углеродной пленке. Ir не образует химической связи с углеродом, что подтверждено исследованиями локальной структуры методом рамановской спектроскопии. Проведено изучение оптических свойств и выявлено, что наблюдается корреляция в изменении ширины запрещенной зоны от условий синтеза.

Ключевые слова: наночастицы иридия, алмазоподобная углеродная пленка, рамановская спектроскопия, энергодисперсионный анализ, структура DLC, магнетронное со-распыление, AFM, DC разряд.

STUDY OF THE INFLUENCE OF SYNTHESIS CONDITIONS ON THE STRUCTURE AND OPTICAL PROPERTIES OF AMORPHOUS DIAMOND-LIKE CARBON FILMS WITH IRIIDIUM NANOPARTICLES

F. Bekmurat^{1,2}, R. Nemkaeva^{1,2}, N. Guseinov¹, M. Markizat², T.D. Raisova¹, A.P. Ryaguzov^{1,2}

¹National nanotechnology laboratory of open type

²KazNU named after al-Farabi, Almaty, Kazakhstan, zh.farizal@mail.ru

Abstract. Amorphous diamond-like carbon films with iridium nanoparticles (a-C <Ir>) were synthesized by the method of ion-plasma co-sputtering of a combined target. The modified films were obtained at different values of the direct current (DC) discharge power. The study of the phase contrast of the film surface by atomic force microscopy (AFM) showed the existence of iridium nanoparticles in an amorphous carbon film. Ir does not form a chemical bond with carbon, which is confirmed by studies of the local structure using Raman spectroscopy. The study of the optical properties was carried out and it was found that there is a correlation in the change in the band gap from the synthesis conditions.

Keywords. Iridium nanoparticles, diamond-like carbon film, Raman spectroscopy, energy dispersive analysis, DLC structure, magnetron co-sputtering, AFM, DC discharge.

1. Введение

Не секрет, что алмазоподобные углеродные пленки обладают уникальными физико-химическими свойствами, таким как, химическая инертность, низкий коэффициент трения, оптическая прозрачность. Также DLC пленки имеют высокую твердость (до 100 ГПа), низкий износ, высокое удельное сопротивление, коррозионную стойкость, большой коэффициент теплопроводности. DLC пленки содержат значительное количество sp³ гибридных атомов углерода. Все выше перечисленное дает право использовать DLC пленки в качестве твердых покрытий механических деталей, медицинских инструментов и в электронной технике.

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, применяемых в агрессивных средах.

Одни из первых DLC покрытия были получены путем импульсного лазерного распыления графита в вакуумной камере и осаждением ионов углерода с достаточно большой

энергией на подложку [1]. В настоящее время используются три основных метода получения DLC пленок, такие как: ВЧ-магнетронное распыление, распыление ионным пучком, метод химического парофазного осаждения (CVD) [2]. Схематическое изображение установок для получения тонких DLC пленок показано на рисунке 1.

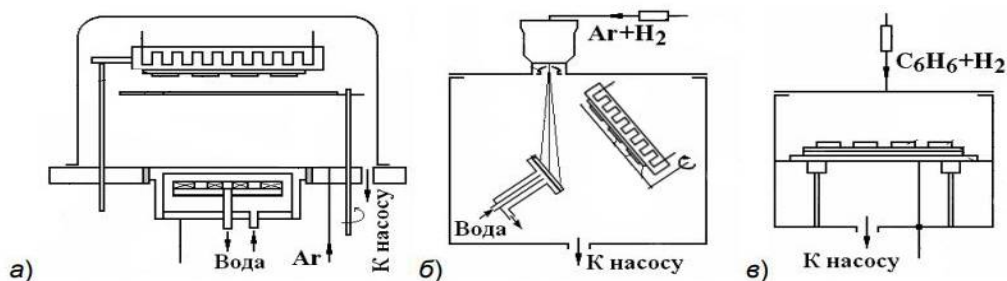


Рис. 1. Схемы установок для получения DLC:
а) ВЧ-магнетронное распыление, б) распыление ионным пучком, в) CVD [2]

В данной работе был использован метод магнетронного со-распыления комбинированной мишени на постоянном токе. Использование данного метода позволяет проводить структурно-примесную модификацию углеродных пленок. Кроме, этого в данном методе возможно строго контролировать термодинамические и кинетические параметры синтеза. Синтез пленок осуществлялся в атмосфере аргон (99,999%) и температуре подложки менее 50°C.

2. Методика эксперимента

Метод синтеза тонких аморфных алмазоподобных углеродных пленок с наночастицами иридия описывался ранее в работах [3,4]. а-C<Ir> пленки были получены на кварцевых и кремниевых пластинах. Предварительно подложки прошли трехэтапную очистку. Для удаления слоя оксида кремния на кремниевых (100) подложках использовали раствор (1:6) плавиковой кислоты.

Концентрация наночастиц иридия в а-C<Ir> пленках определялась на кремниевой подложке энергодисперсионным микроанализом (EDS) на приборе EDAX. Концентрация иридия варьировалась от $X_{Ir} \sim 0,00 \text{ ат\%}$ до 1,6 ат%.

Морфология поверхности DLC пленок изучалась на атомном силовом микроскопе (Spectrum, NT-MDT, Russia), в режиме полуконтактного взаимодействия зонда с поверхностью пленки. При исследовании фазового контраста поверхности были использованы зонды NSG0,1 с радиусом закругления $\leq 10 \text{ нм}$. Данные результатов AFM снимков для трех различных концентраций X_{Ir} показаны на рисунке 2. Из приведенных снимков видно изменение общего фона, что связано с изменением частоты взаимодействия зонда с поверхностью пленки. Помимо этого, увеличение концентрации иридия в углеродной пленке приводит к появлению темных круглых точек. Размер и их количество зависит от концентрации иридия. Таким образом, согласно принципу взаимодействия зонда с поверхностью пленки, можно утверждать о проявлении иридия в виде наночастиц. Они имеют сферическую форму и размер в пределах 10-100 нм в зависимости от концентрации иридия.

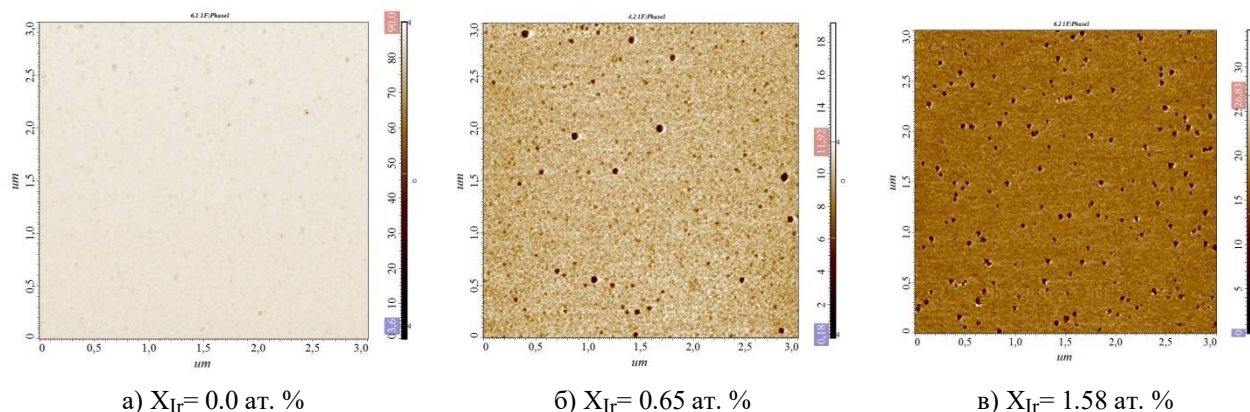


Рис. 2. Фазовый контраст а-С <Ir> пленок метода AFM

Локальную структуру DLCa-C<Ir> пленок исследовали рамановской спектроскопией (RS) на установке NTegraSpectra (NT-MDT, Russia) с использованием двух лазеров на длине волны 473 нм и 633 нм. Мощность лазерного излучения составляла $\sim 0,5$ мВт на площади с радиусом 2 мкм. Во избежание проявления фотоструктурных изменений в пленках при исследовании методом рамановского рассеяния проводили при движении образца со скоростью 10 мкм/с. Исследование спектров пропускания для определения ширины запрещенной зоны проводили на спектрофотометре Lambda-35.

3. Результаты и обсуждение

Типичный спектр рамановского рассеяния, снятый на кварцевой подложке, указан на рисунке 3. Как известно [5,6], рамановские спектры углеродных структур характеризуются двумя основными полосами излучения, которые относятся к интервалам частот $1500\text{--}1600\text{ см}^{-1}$ и $1340\text{--}1420\text{ см}^{-1}$, и обозначаются G и D пиками соответственно. Спектры RS а-С пленок характеризуются основным G пиком и плечом в низкочастотной области. Из рисунка 3 видно что, положение G пика располагается на частоте 1550 см^{-1} , которая в свою очередь соответствует алмазоподобной структуре [5] и процентное содержание sp^3 гибридизированных связей может составлять порядка 60-70 %. Кроме этого наблюдается широкий пик в высокочастотной области 3000 см^{-1} , который относят ко второму порядку излучения и ответственен за углы и длину C-C связи.

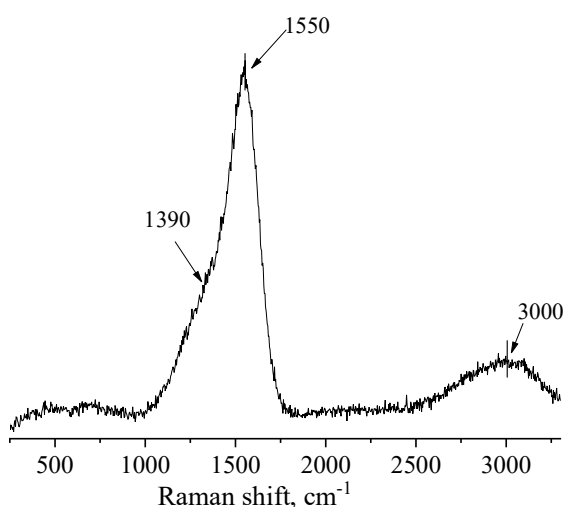


Рис. 3. RS а-С<Ir> пленки, синтезированной на кварцевой подложке

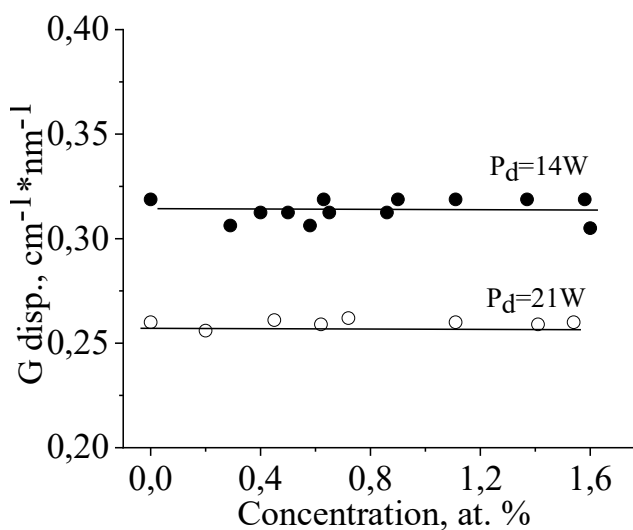


Рис.4 Дисперсия G пика от концентрации Ir в а-С пленках

Для выяснения, на сколько сильно меняется структура а-С пленки с концентрацией Ir, провели расчет дисперсии G пика [7] по основным частотам возбуждения 473 нм и 633 нм.

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

Из рисунка 4 видно, что дисперсия G пика в а-С<Ir> пленках, приготовленных на кварцевой подложке при значении мощности DC разряда 14W существенно не меняется, и ее значение $\sim 0,32 \text{ см}^{-1} \cdot \text{нм}^{-1}$. Такое значение дисперсии G пика соответствует алмазоподобным пленкам с процентным содержанием sp^3 гибридизированными связями в области от 60-70 % [5]. Как видно из рисунка 4 при мощности DC разряда 21W синтеза а-С пленок с наночастицами иридия дисперсия G пика меньше на $\sim 0,5 \text{ см}^{-1} \cdot \text{нм}^{-1}$. Т.е. а-С<Ir> пленки, синтезированные при 21W, можно отнести к графитоподобным пленкам.

Оптические спектры пропускания и отражения исследовались в диапазоне от 190 нм до 1100 нм на кварцевых подложках. На рисунке 5 показано изменение спектров пропускания T в зависимости от вводимой концентрации иридия. Из спектров видно, что коэффициент пропускания на длине волны 200нм при мощности разряда 14W изменяется от 10 до 40%. С увеличением мощности разряда на данной длине волны при 21W спектр пропускания изменяется от 5 до 15%. Таким образом, увеличение мощности DC разряда и увеличение концентрации иридия приводят к уменьшению коэффициента пропускания. Такое изменение коэффициента пропускания должно существенно повлиять на изменение ширины запрещенной зоны.

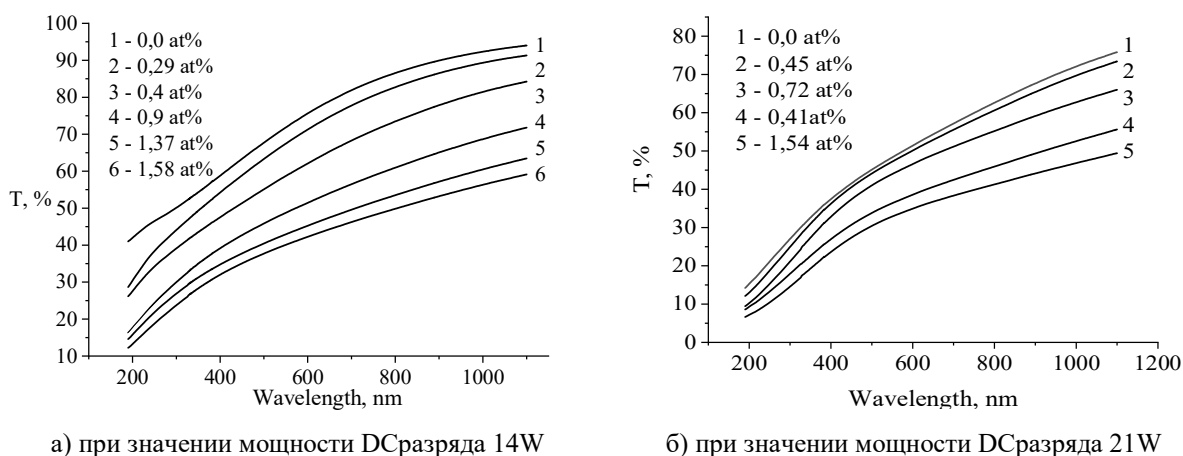


Рис. 5. Спектр пропускания а-С<Ir> пленок

По данным спектров пропускания рассчитывался коэффициент поглощения α , который был равен порядка 10^5 см^{-1} . В аморфных пленках $\alpha \sim (h\nu - E_g)^2$ и из графика зависимости $\sqrt{\alpha h\nu}(h\nu)$ определяем ширину запрещенной зоны [8]. На рисунке 6 показано нелинейное изменение E_g от 1,97 eV до 0,8 eV с увеличением концентрации иридия, полученное при мощности DC разряда 14W и 21W. Из рисунка видно, что увеличение мощности ионно-плазменного разряда от 14 W до 21 W приводит к существенному изменению оптической ширины запрещенной зоны. При этом стоит отметить, что при концентрации более 1,4 ат.% значение E_g при 14 W и 21W DC разряда стремится к 0,7eV. Принято считать [1,6], что значения ширины запрещенной зоны менее 1eV соответствуют графитоподобным структурам. Таким образом, изменение ширины запрещенной зоны связано с изменением распределения

плотности π электронов sp^2 узлов и влиянием плотности электронов наночастиц иридия на плотность разрешенных состояний внутри запрещенной зоны матрицы.

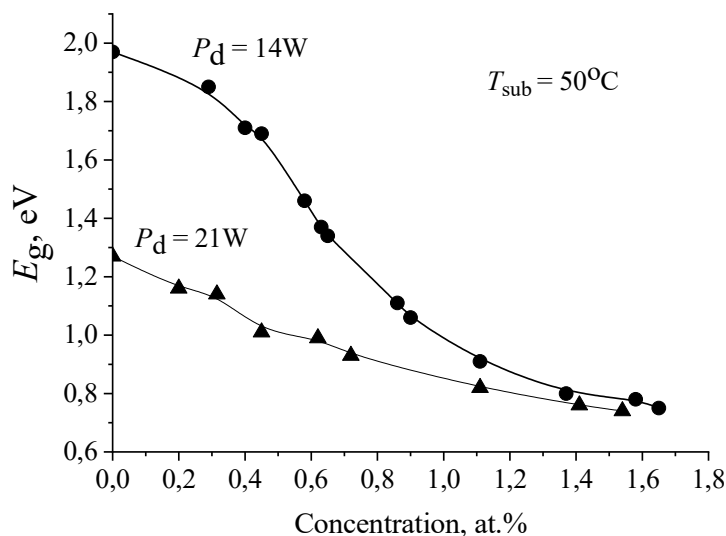


Рис. 6. Зависимость оптической ширины запрещенной зоны от концентрации Ir

Заключение

Методом рамановской спектроскопией изучено влияние концентрации наночастиц иридия на формирование структуры пленки. По изменению дисперсии G пика показано, что увеличение концентрации иридия приводит к увеличению sp^2 гибридинизированных связей.

Кроме этого показано, что увеличение мощности ионно-плазменного разряда от 14 Вт до 21 Вт приводит к уменьшению оптической ширины запрещенной зоны, что в свою очередь, определяет увеличение плотности π электронов sp^2 гибридинизированных связей.

Из проведенных исследований по рамановской спектроскопии и изучения оптических свойств можно заключить, что применяя структурно-примесную модификацию, можно существенно управлять электронными свойствами аморфных алмазоподобных углеродных пленок.

Библиографический список

1. Robertson. Diamond-like amorphous carbon // Materials Science and Engineering: R:Reports.2002-05-24. Т. 37, вып. 4. С. 129–281.doi:10.1016/S0927796X(02)00005-0.
2. В.В. Борисов, С.А. Налимов, С.А. Багдасарян Алмазоподобные углеродные пленки: Получение и автоэмиссионные характеристики//Приволжский научный вестник С.36-43
3. Бекмурат Ф., Немкаева Р., Гусейнов Н., Рягузов А.П. Влияние наночастиц иридия на структуру аморфных алмазоподобных углеродных пленок// СТНО 2019, том 2, 69 стр
4. 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.
5. A.C. Ferrari, J. Robertson Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon // Physical Review B. -2000 -V.61, Issues 20. -P.14095-14107.
6. A.C. Ferrari, J. Robertson Resonant Raman spectroscopy of disordered, amorphous, and diamondlike carbon // Physical review B, 2001 - V 64, 075414
7. Мотт Н.Ф., Дэвис Э.А. Электронные процессы в некристаллических веществах. –М.: Мир, 1982.-662с.
8. J.Tauc, R.Grigorovici, A.Vanc, *Phys. Stat. Sol.***15**, 627 (1966) doi.org/10.1002/pssb.19660150224

УДК 53.084.6, 53.084.872-876; ГРНТИ 29.19.31

АЛГОРИТМ РАБОТЫ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫХ КОНТАКТОВ

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

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

Аннотация. Описан алгоритм работы автоматизированного устройства для испытаний магнитоуправляемых контактов (герконов) с помощью 32 битного микроконтроллера STM32F103C8T6. Созданное устройство по разработанной программе позволяет проводить многократную коммутацию геркона с дальнейшим исследованием электрофизических свойств, морфологии поверхности и надежности.

Ключевые слова: магнитоуправляемый контакт, геркон, устройство управления испытаниями

ALGORITHM OF OPERATION OF THE DEVICE FOR TESTING OF MAGNETICALLY CONTROLLED CONTACTS

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

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

The summary. An algorithm for automated device operation is described for testing of magnetically controlled contacts (reed switches) using 32 bit STM32F103C8T6 microcontroller. The created device according to the developed program allows to carry out repeated switching of a reed contact with further investigation of electro-physical properties, surface morphology and reliability.

Keywords: magnetically controlled contacts, reed switches, test controlling system.

Введение

Компоненты современной электроники содержат коммутационные, выводные, рабочие, прижимные и другие контакты. Задача исследования параметров различного рода контактов является одной из важнейших в приборостроении. Основным требованием к коммутационным контактам является надежность – способность к многократному переключению.

Магнитоуправляемый контакт (геркон) - электромеханическое коммутационное устройство, изменяющее состояние подключённой электрической цепи при воздействии магнитного поля от постоянного магнита или электромагнита [1]. Герконы обладают преимуществами перед классическими реле, поскольку имеют гораздо меньшие размеры и вносимые искажения сигнала, а также высокое быстродействие.

Исследования показали, что параметры герконов, изготовленных в единых технологических режимах, не одинаковы. В одной партии герконов могут отличаться такие параметры, как магнитодвижущая сила срабатывания или отпускания, пробивное напряжение или время срабатывания (отпускания) и другие. Для прогнозирования стабильной работы устройства в течение предусмотренного периода времени необходимо предварительно провести их испытания путем многократной коммутации с последующим исследованием электрофизических параметров и структуры поверхности с целью прогнозирования выхода годной продукции.

Настоящая работа посвящена описанию разработанного алгоритма функционирования устройства для автоматизированной многократной коммутации магнитоуправляемых контактов.

Описание работы схемы

Разработанное устройство для испытаний магнитоуправляемых контактов предусматривает возможность изучения их параметров путем экспериментальных многократных переключений – коммутации. Устройство спроектировано на базе микроконтроллера STM32F103C8T6, который обеспечивает обмен данными с персональным компьютером и управляющим программным обеспечением. Основные технические характеристики данного микроконтроллера приведены в таблице 1 [2].

Таблица 1. Технические характеристики платы STM32F103C8T6 [2]

Микроконтроллер	STM32F103C8T6 Ядро ARM Cortex M3
Число разрядов	32 бита
Максимальная частота	72МГц
Объем памяти программ (FLASH)	64/128 Кбайт
Объем памяти данных (RAM)	20 Кбайт
Выходы	37
UART	3
SPI	2
I2C	2
CAN	1
USB	1
АЦП	2 АЦП, 10 каналов, время преобразования 1 мкс
Напряжение питания платы	2 - 3,6В
Ток потребления	До 50 мА
Размеры платы	53 × 22,5 мм

Для обеспечения работы портов ввода - вывода светодиодных индикаторов и органов управления была использована программа для первоначальной настройки и генерации кода среды программирования – STM32CubeIDE. Управляющая программа создана на высокоуровневом языке C++ с использованием библиотеки HAL компании ST Microelectronics.

Для управления светодиодами, подключенными к портам микроконтроллера, использована команда HAL:

```
void HAL_GPIO_WritePin (GPIO_TypeDef * GPIOx, uint16_t GPIO_Pin, GPIO_PinState PinState),
```

где *GPIO_TypeDef * GPIOx* – литера порта;

uint16_t GPIO_Pin – выбор конкретного вывода порта микроконтроллера;

GPIO_PinState PinState – состояние порта.

Полная информация об используемых функциях приведена в [3].

Запуск цикла многократного износа проводится с использованием кнопки на устройстве, которая реализует аппаратные прерывания. Для обработки прерываний в библиотеке HAL формируется файл обработчика прерываний с постфиксом *_it*, который содержит в себе все тела обработчиков. Функция, отвечающая за прерывания от внешнего вывода, к которому подключена кнопка, имеет следующий вид:

```
void HAL_GPIO_EXTI_Callback (uint16_t GPIO_Pin),
```

где *uint16_t GPIO_Pin* – номер внешнего вывода.

Для реализации обмена информацией между персональным компьютером и микроконтроллером, который обеспечивается применением USB, можно использовать два способа. Первый - это применение преобразователя USB-UART FT232RL-REEL.

Передача данных с микроконтроллера на персональный компьютер осуществляется при помощи следующей функции:

*HAL_StatusTypeDef HAL_UART_Transmit_IT (UART_HandleTypeDef * huart, uint8_t * pData, uint16_t Size),*

Где UART_HandleTypeDef * huart – указатель на управляющую структуру модуля UART;
uint8_t * pData – указатель на буфер с данными;
uint16_t Size – количество байт данных.

Аналогичная функция используется для приема данных с компьютера:

*HAL_StatusTypeDef HAL_UART_Receive_IT (UART_HandleTypeDef * huart, uint8_t * pData, uint16_t Size).*

Постфикс IT означает, что функция использует прерывания.

Второй способ - это использование аппаратного USB. Для передачи данных с микроконтроллера на персональный компьютер используется следующая функция:

uint8_t CDC_Transmit_FS(uint8_t Buf, uint16_t Len),*

где uint8_t* Buf – указатель на массив данных;
uint16_t Len – указатель на длину строки, где длина строки – это количество символов, которые она содержит.

Аналогичная функция используется для приема данных с компьютера:

uint8_t CDC_Receive_FS(uint8_t Buf, uint32_t Len).*

Для обеспечения режимов работы коммутируемых цепей установлены цифровые потенциометры, конфигурация которых реализуется с помощью интерфейса SPI. Передача данных на цифровой потенциометр осуществляется при помощи следующей функции:

*HAL_StatusTypeDef HAL_SPI_Transmit (SPI_HandleTypeDef * hspi, uint8_t * pData, uint16_t Size, uint32_t Timeout),*

где SPI_HandleTypeDef * hspi – указатель на управляющую структуру модуля SPI;
uint8_t * pData – указатель на буфер с данными;
uint16_t Size – количество байт данных;
uint32_t Timeout – продолжительность тайм-аута.

Алгоритм работы устройства

На первом этапе проводится подключение микроконтроллера к персональному компьютеру с целью дополнительного управления и считывания данных. Для включения и дальнейшего функционирования на микроконтроллер подается питающее напряжение номиналом 3,3В. После включения микроконтроллера исследуемый геркон помещается в специальные зажимы для испытаний магнитоуправляемых контактов. Следующим этапом задается режим работы, в который входят параметры эксперимента - заданные количество переключений, величина тока и напряжения. Далее происходит включение цикла многократной коммутации геркона при помощи компьютера, или отдельной кнопки на микроконтроллере. По завершению цикла сигнал светодиода свидетельствует об окончании работы, и проводятся экспериментальные исследования параметров, спектров низкочастотного шума и морфологии поверхности магнитоуправляемых контактов.

Заключение

Разработано автоматизированное устройство на основе 32 битного микроконтроллера STM32F103C8T6, позволяющее проводить многократную коммутацию магнитоуправляемого контакта по разработанной программе с дальнейшим исследованием электрофизических свойств, морфологии поверхности и надежности. Предложен и реализован алгоритм работы устройства для испытаний магнитоуправляемых контактов. Управляющая программа создана на высокоуровневом языке C++ с использованием библиотеки HAL компании ST Microelectronics.

Библиографический список

1. Геркон [электронный ресурс]. – 2021. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Геркон> (дата обращения 06.02.2021).
2. Datasheet STM32F103C8T6 [электронный ресурс]. - 2021. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf> (дата обращения 06.02.2021).
3. Description of STM32F1 HAL and low-layer drivers [электронный ресурс]. -2021. URL: https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00154093-description-of-stm32f1-hal-and-lowlayer-drivers-stmicroelectronics.pdf (дата обращения 06.02.2021).

УДК 621.382: ГРНТИ 29.03.77

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ТОКОПРОХОЖДЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ POR-SI/P-SI С ТОЛСТЫМИ ПЛЕНКАМИ POR-SI

А.С. Чернобровкина, В.Г. Литвинов, В.В. Трегулов, А.В. Ермачихин

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, a.chernobrovkina1109@stud.rsu.edu.ru, vglit@yandex.ru,
v.tregulov@365.rsu.edu.ru, al.erm@mail.ru*

Аннотация. Пористый кремний остается привлекательным материалом для фотовольтаических применений [1]. Пленки por-Si можно использовать для создания активных слоев фотозлектрических преобразователей, а также формировать покрытие с высоким коэффициентом поглощения излучения в солнечном элементе. Модификация электрофизических и оптических свойств тонких пленок por-Si возможна путем управления микрокристаллической структурой, концентрацией и размерами пор, заполнением пор наночастицами. Все это делает актуальным изучение влияния технологических режимов получения полупроводниковых гетероструктур на основе por-Si на их электрофизические свойства.

Ключевые слова: пористый кремний (ПК), гетероструктура, полупроводниковая структура, микрокристаллическая структура, высокий коэффициент поглощения.

STUDY OF CURRENT TRANSPORT MECHANISMS IN POR-SI/ P-SI SEMICONDUCTOR STRUCTURES WITH THICK POR-SI LAYER

A.S. Chernobrovkina, V.G. Litvinov, V.V. Tregulov, A.V. Ermachikhin

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkina,
Russian Federation, Ryazan, a.chernobrovkina1109@stud.rsu.edu.ru, vglit@yandex.ru,
v.tregulov@365.rsu.edu.ru, al.erm@mail.ru*

Annotation. Porous Silicon is attractive material for photovoltaic applications. The thin porous silicon films can be used to create active layers photovoltaic cells, also form coatings with high coefficient of light reflection in solar cells. Modifictation of electrophysical and optical properties thin films por-Si is possible control over microcrystalline structure, concentration and pore sizes, nanoparticles pore filling. All this makes it relevant to explore technological regimes of obtaining a semiconductor heterostructures on the basis of porous silicon of then electrophysical properties.

Keywords: porous silicon (por-Si), semiconductor structure, semiconductor heterostructures, microcrystalline structure, low coefficient of light reflection.

Технология изготовления экспериментальных образцов

Методом измерения температурной зависимости ВАХ исследованы процессы токопрохождения в полупроводниковых структурах por-Si/p-Si, с пленками por-Si, изготовленных при различных условиях.

Для изготовления образцов использовались кремниевые монокристаллические пластины p-типа с удельным сопротивлением 1 Ом/см и ориентацией поверхности (100). Перед ростом пленки por-Si пластины подвергались текстурирующему травлению в водном растворе KOH. Пленка por-Si формировалась методом анодного электрохимического травления в гальваностатическом режиме. Использовался электролит HF:C₂H₅OH с соотношением компонентов 1:1. Травление происходило при плотности тока 20 мА/см², в течение 1 часа. Было изготовлено 2 образца. При изготовлении образца №1 в ходе роста пленки por-Si поверхность кремниевой пластины освещалась галогенной лампой мощностью 100 Вт. Образец №2 изготавливался без освещения кремниевой пластины. Толщина пленки por-Si образца №1 составила 26 мкм, образца №2 – 22 мкм (по результатам измерения SEM). Для проведения электрических измерений на противоположных поверхностях образца (к пленке por-Si и кремниевой пластины) формировались омические контакты. Площадь контакта к пленке por-Si образцов №1 и №2 была одинаковой.

Результаты исследования электрофизических характеристик образцов

При измерении ВАХ для обоих образцов прямому смещению соответствует подача отрицательного потенциала на контакт к por-Si. Оба образца обладали выпрямляющими свойствами.

Прямые ветви ВАХ образцов №1 и №2, измеренные при 300 К, показаны на рисунке 1 в двойном логарифмическом масштабе.

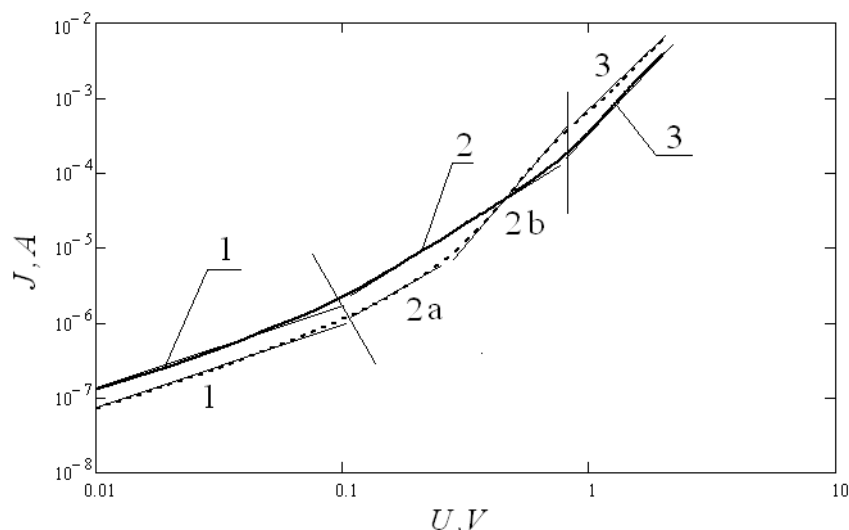


Рис. 1. Прямые ветви ВАХ образца №1 (сплошная кривая) и №2 (пунктирная кривая), измеренные при 300 К, цифрами показаны номера отдельных участков.

На прямых ветвях ВАХ можно выделить линейные участки с различным наклоном. Образец №1 содержит 3 линейных участка (1, 2, 3). На ВАХ образца №2 можно выделить

четыре участка (1, 2a, 2b, 3). Для описания указанных участков можно применить степенную зависимость, характерную для механизма ТОПЗ:

$$I \propto U^m, \quad (1)$$

где I – ток, протекающий через образец;

U – приложенное внешнее напряжение;

m – показатель степени, характеризующий наклон соответствующего участка ВАХ [1].

На участке 1 прямых ветвей ВАХ для обоих образцов $m=1,25 \pm 0,3$ ($1 < m < 2$). В рамках модели ТОПЗ это означает, что концентрация инжектированных носителей заряда становится сравнимой с концентрацией термически генерированных носителей [1].

Одновременно участок 1 прямых ветвей ВАХ может быть описан известным выражением для барьерной структуры:

$$I \propto \exp\left(\frac{qU}{nkT}\right), \quad (2)$$

где q – элементарный заряд;

n – показатель неидеальности;

k – постоянная Больцмана;

T – абсолютная температура [2].

Для обоих образцов величина n близка к 2, что свидетельствует о преобладании рекомбинации носителей заряда в ОПЗ гетероперехода p-or-Si/p-Si при прямом смещении.

На участке 2 для образца №1 и участке 2a для образца №2 $m=2$. В рамках модели ТОПЗ это соответствует ловушечному квадратичному закону и объясняется процессом перезарядки моноэнергетического ловушечного центра. Для образца №2 протяженность участка с $m=2$ меньше, чем для образца №1, следовательно, распределение ловушек в исследуемых образцах имеет различный характер.

На участке 3 для образца №1, а также на участках 2b и 3 образца №2 $m > 2$. В рамках модели ТОПЗ это может быть объяснено влиянием на процессы токопрохождения ловушек с экспоненциальным распределением по энергии активации [1].

Обратные ветви ВАХ образцов №1 и №2, измеренные при 300 К, показаны на рисунке 2 в двойном логарифмическом масштабе. Для обоих образцов кривые на рисунке 2 характерны для так называемого мягкого пробоя. На рисунке 3 обратные ветви ВАХ представлены в виде зависимости $\ln(I/U) = f(U)^{1/2}$. Для образца №1 при $U > 1$ В указанная зависимость имеет вид прямой. Это свидетельствует о проявлении эффекта Пула-Френкеля в образце №1 при обратном смещении при $U > 1$ В. В образце №2 эффект Пула-Френкеля не проявляется.

Для образцов №1 и №2 в диапазоне напряжений прямого смещения $U = 0,5 - 2$ В наблюдается слабая зависимость $d\ln(I)/dU = f(T)$, что свидетельствует о механизме туннелирования носителей заряда в пленке p-or-Si в указанном диапазоне значений прямого смещения (рис. 4). Для определенности, на рисунке 4 представлена зависимость для образца №1, для образца №2 ситуация практически идентична. Туннелирование носителей заряда может происходить внутри пленки p-or-Si между энергетическими уровнями ловушек на поверхности кремниевых кристаллитов через барьеры SiO_x [3]. В области обратного смещения туннелирование в образцах №1 и №2 проявляется при $U = 4 - 5$ В.

На рисунке 5 представлены температурные зависимости тока для образца №1 в координатах Аррениуса при различных напряжениях прямого смещения. С увеличением U от 0 до 0,1 В происходит снижение энергии активации с 0,14 эВ до 0,07 эВ. При дальнейшем увеличении U до 1 и 2 В возникает истощение примеси. Аналогичная ситуация наблюдается при прямом смещении в образце №2. При обратном смещении область истощения примеси наблюдается в области низких температур при напряжениях смещения 1 – 5 В (рис. 6). На ри-

сунке 6 представлены температурные зависимости тока при обратном смещении для образца №1, для образца №2 характер зависимости аналогичный.

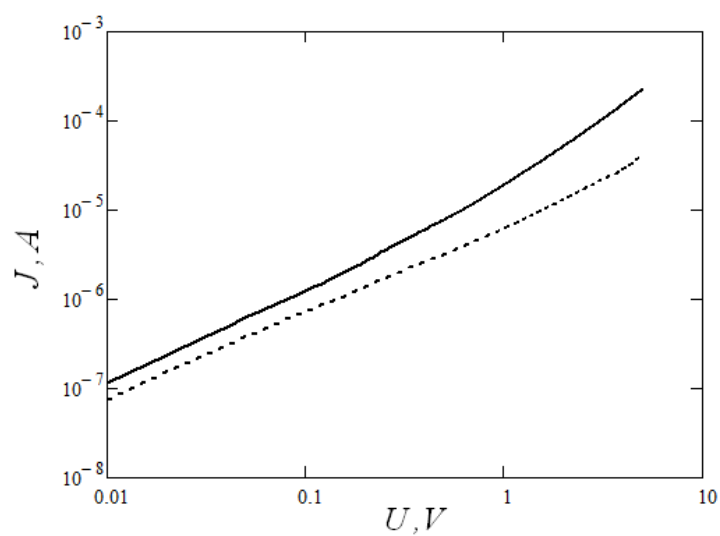


Рис. 2. Обратные ветви ВАХ образца №1 (сплошная кривая) и №2 (пунктирная кривая), измеренные при 300 К

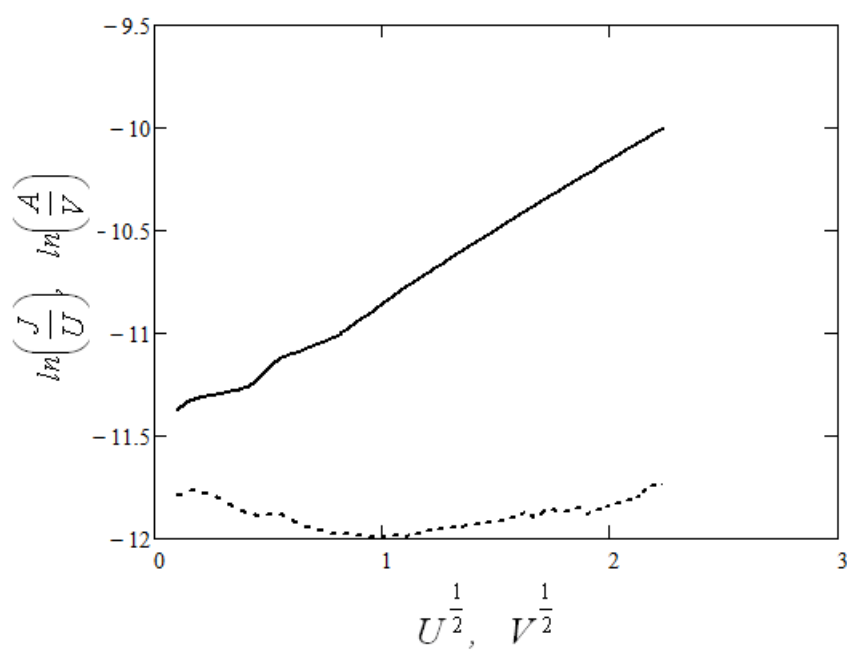


Рис. 3. Обратные ветви ВАХ образца №1 (сплошная кривая) и №2 (пунктирная кривая), измеренные при 300 К, представленные в координатах зависимости Пула-Френкеля

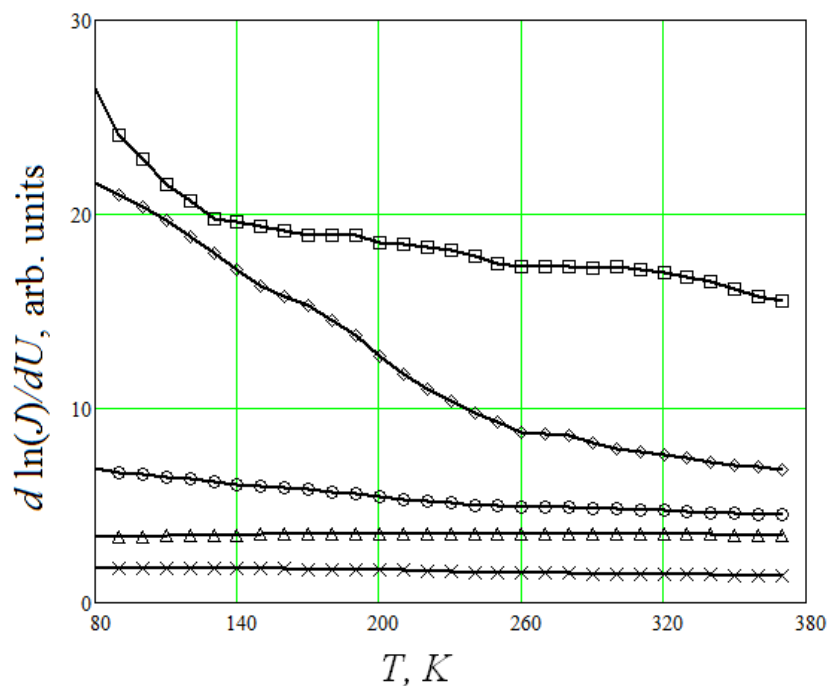


Рис. 4. Зависимость $d \ln(J)/dU=f(T)$ для образцов №1 и №2 при различных напряжениях прямого смещения: $\square$ – 0,1В; $\diamond$ – 0,3 В; $\circ$ – 0,5 В; Δ – 1,0 В; $\times$ – 2,0 В.

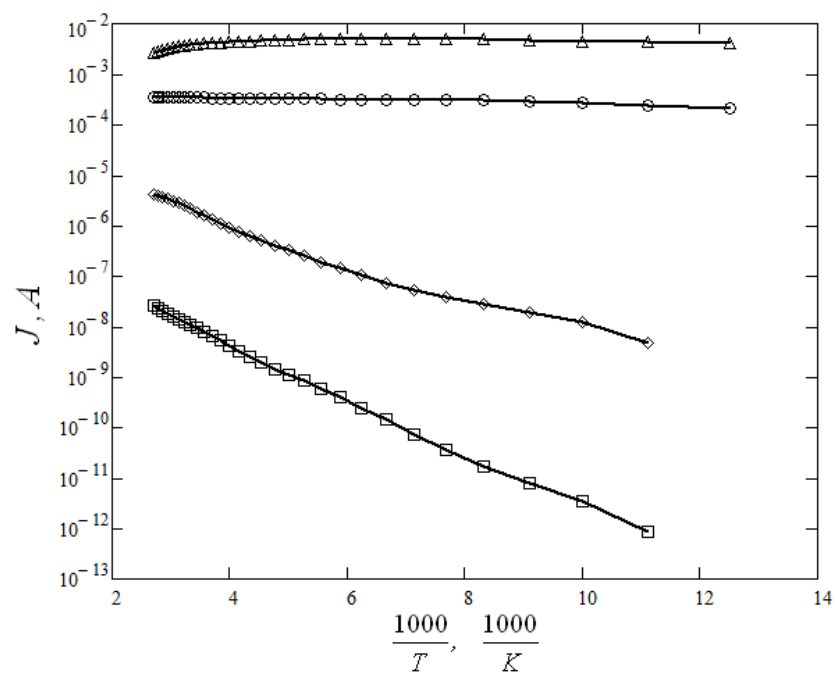


Рис. 5. Температурные зависимости тока для образца №1 в координатах Аррениуса при различных напряжениях прямого смещения: $\square$ – 0В; $\diamond$ – 0,1 В; $\circ$ – 1,0 В; Δ – 2,0 В

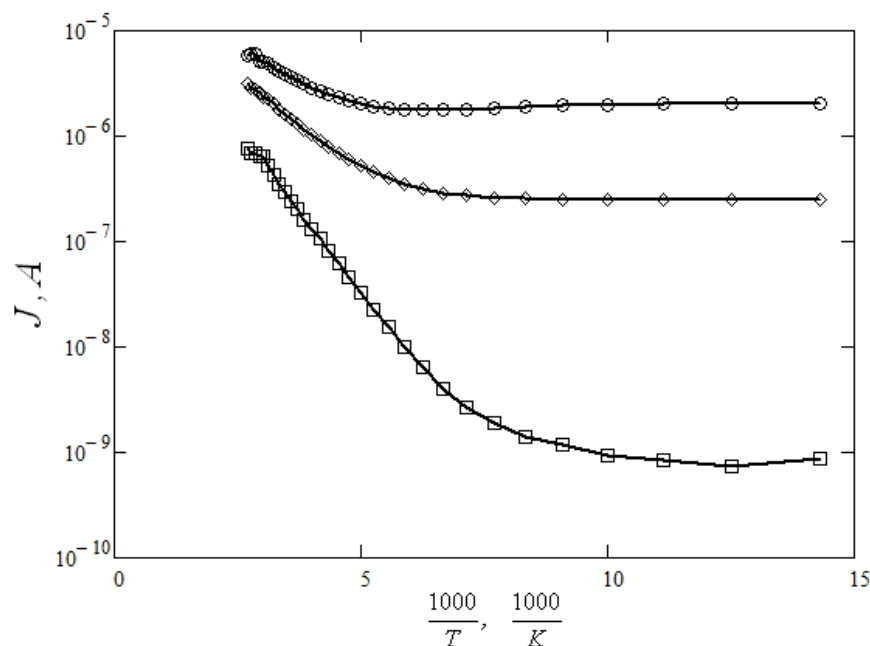


Рис. 6. Температурные зависимости тока для образца №1 в координатах Аррениуса при различных напряжениях прямого смещения: $\square$ – 1 В; $\diamond$ – 3 В; $\circ$ – 5 В.

Выводы

В данной работе проводились исследования полупроводниковой структуры por-Si/p-Si с толстыми пленками por-Si с использованием метода растровой электронной микроскопии, а также измерений вольт-амперной характеристики и построением температурной зависимости в координатах Пула-Френкеля. Была разработана и внедрена технология формирования полупроводниковой структуры на основе метода анодного электрохимического травления. Были исследованы структурные и электрофизические характеристики экспериментальных образцов. На механизмы токопрохождения существенное влияние оказывают генерационно-рекомбинационные процессы как основных, так и неосновных носителей. Также имеет место механизм туннелирования носителей заряда внутри оксидной пленки с участием ловушечных центров. Явление обеднения в приповерхностном слое, наблюдающееся для всех структур, может быть использовано в реализации высокочувствительных оптических датчиков, работающих в фотодиодном режиме в областях видимого и ближнего ИК-диапазона спектра.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003).

Библиографический список

1. Murray A. Lampert, Peter Mark. Current injection in solids. Academic Press. New York and London. 1970. 354 p.
2. S.M. Sze, Physics of Semiconductor Devices. New York: Wiley-Interscience, 1981.
3. Evtukh A., Kaganovich É.B., Manoilov E.G., Semenenko Mykola. A mechanism of charge transport in electroluminescent structures consisting of porous silicon and single-crystal silicon. // Semiconductors. 2006. 40(2). P.175-179.

УДК 621.315.592; ГРНТИ 29.19.31

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ МЕТОДОМ РАСТРОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

¹А.В. Васин, ¹Н.Б. Рыбин, ²В.В. Трегулов

¹Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, lexasuper6201@gmail.com, nikolay.rybin@yandex.ru

²Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина,
Российская Федерация, Рязань, trww@yandex.ru

Аннотация. В данной статье описано исследование поверхностной структуры пористого кремния с помощью методики растровой электронной микроскопии. Рассмотрено несколько образцов пористого кремния, полученных при различных условиях травления. Проведён анализ технологии создания плёнок пористого кремния, отмечены положительные и отрицательные технологические особенности для конкретных образцов.

Ключевые слова: пористый кремний, растровый электронный микроскоп, исследование структуры поверхности.

STUDY OF THE STRUCTURE OF POROUS SILICON BY SCANNING ELECTRONIC MICROSCOPY

¹A.V. Vasin, ¹N.B. Rybin, ²V.V. Tregulov

¹Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russian Federation, Ryazan, lexasuper6201@gmail.com, nikolay.rybin@yandex.ru

²Ryazan State University named after S.A. Esenin,
Russian Federation, Ryazan, trww@yandex.ru

Annotation. This article describes the study of the surface structure of porous silicon using the method of scanning electron microscopy. Several samples of porous silicon obtained under different etching conditions are considered. The analysis of the technology for creating porous silicon films is carried out, positive and negative technological features for specific samples are noted.

Key words: porous silicon, scanning electron microscope, research of the surface structure.

В настоящее время полупроводниковая отрасль электроники имеет повышенную потребность в новых малоизученных наноразмерных материалах с перспективными свойствами. Одним из них является пористый кремний (por-Si, ПК), впервые полученный А. Улиром в 1950-х годах в ходе экспериментов электрохимической обработки кремниевых монокристаллических пластин в растворах электролитов [2]. Обнаруженное в 1990 году Л. Кэнхемом свойство нового материала, а именно эффективная фотолюминесценция при комнатной температуре (красно-оранжевая область) при облучении лазером, дало научному сообществу повод для дальнейших исследований ПК.

На данный момент структуры на основе ПК позволяют создать светоизлучающие элементы, фотоэлектрические преобразователи для солнечной энергетики, химические датчики и другие полупроводниковые приборы. Предполагается, что светодиоды из пористого кремния будут значительно дешевле, чем производимые сейчас на базе полупроводниковых соединений [2]. В первых экспериментах с фотолюминесценцией ПК было обнаружено, что его образцы с пористостью более 50% эффективно люминесцируют. Эффективность фотолюминесценции может достигать десятков процентов. Длиной волны излучения можно управлять, изменяя условия травления. Оказалось, что можно получить красный, зеленый и синий цвета, необходимые для изготовления цветных дисплеев [1].

Так же, при определенных условиях в присутствии окислителя, пористый кремний имеет тенденцию воспламеняться и детонировать под механическими, электрическими и тепловыми воздействиями [1]. Энергия детонации микропористого кремния примерно в четыре раза больше энергии детонации тротила (TNT). Было предложено использовать детонацию ПК для развертывания подушек безопасности в автомобилях, а так же в кластерных реактивных двигателях микроспутников [1]. Помимо этого, ПК планируется применять в качестве толстых диэлектрических плёнок, изолирующей основы для структур «кремний на изоляторе», буферных слоёв эпитаксиально-наращиваемых структур, световодов и т.д. [1].

Главной проблемой, препятствующей широкому применению структур на основе ПК, является нестабильность его люминесцентных и электрофизических характеристик [3]. Данная особенность тесно связана с характером морфологии поверхности и внутренней структуры пленок ПК. В связи с указанным обстоятельством актуальна задача исследования влияния факторов технологического процесса изготовления на особенности структуры и морфологии пленок ПК.

Эксперимент

Для проведения исследования были взяты несколько образцов ПК, изготовленных с помощью метода анодного электрохимического травления (в гальваностатическом режиме) в растворе электролита $\text{HF}:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}:\text{KMnO}_4$ с соотношением компонентов 0,5:0,5:1,0. Плёнки ПК всех образцов были изготовлены без освещения поверхности кремниевой пластины. Конкретные технологические режимы для отдельных образцов указаны в таблице 1.

Таблица 1. Технологические режимы получения ПК

№ образца	Концентрация водного раствора KMnO_4 , 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

В качестве подложек использовались кремниевые монокристаллические пластины р-типа с удельным сопротивлением 1 Ом/см и ориентацией поверхности (100). Подложки имеют текстурированный рельеф в результате травления в водном растворе KOH при температуре 90 °С.

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.

Результаты и обсуждения

В результате исследований с помощью РЭМ были получены изображения поверхностей образцов ПК, приведенные на рисунках 1-6.

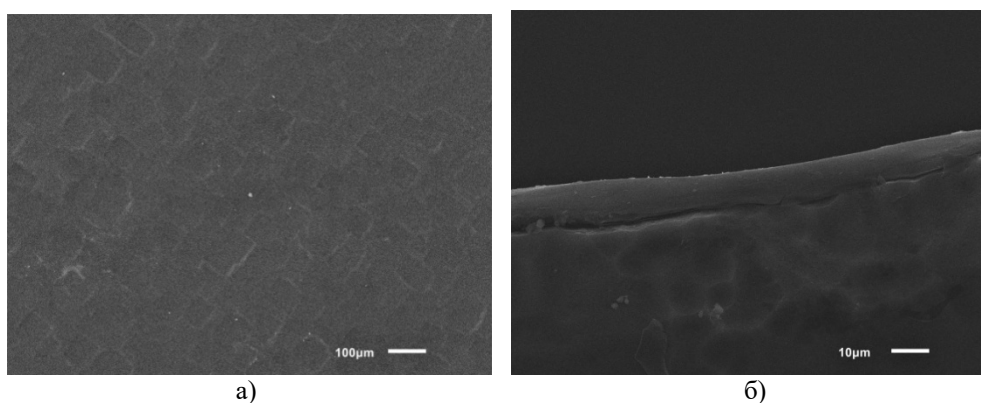
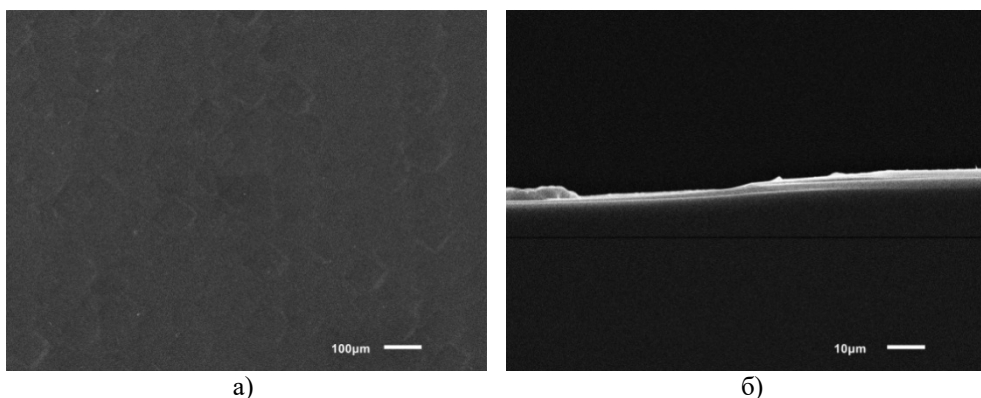
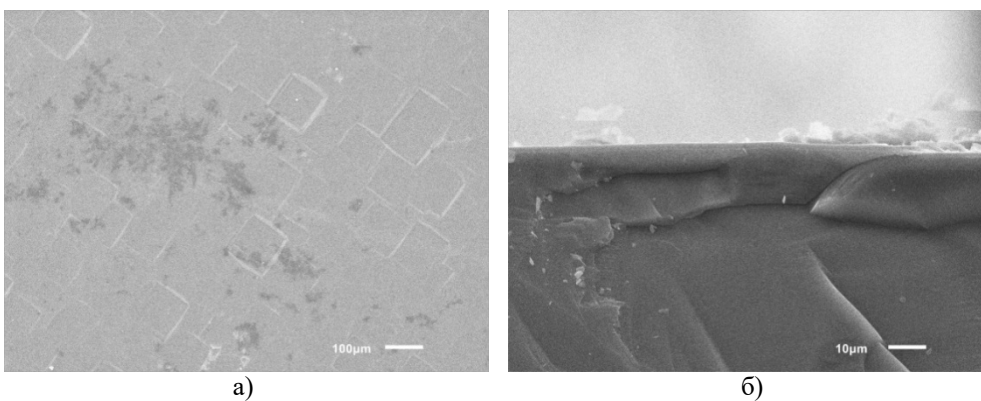


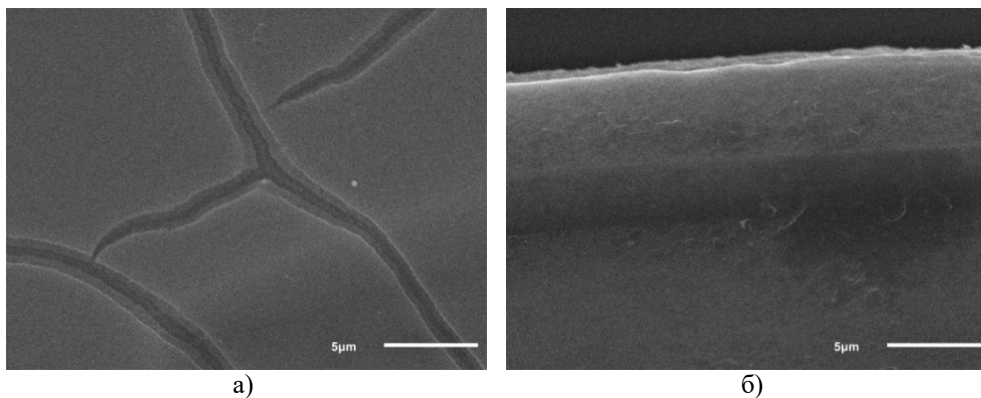
Рис. 1. Изображения поверхности (а) и среза (б) образца № 1



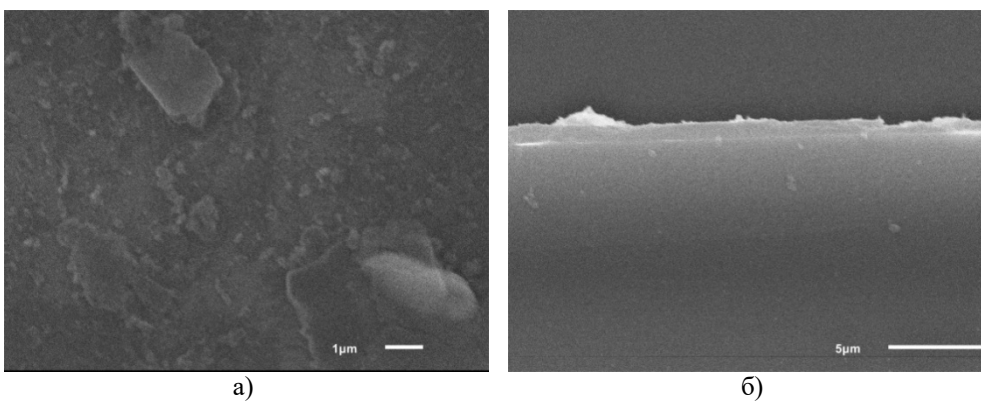
а)
Рис. 2. Изображения поверхности (а) и среза (б) образца № 2



а)
Рис. 3. Изображения поверхности (а) и среза (б) образца № 3



а)
Рис. 4. Изображения поверхности (а) и среза (б) образца № 4



а)
Рис. 5. Изображения поверхности (а) и среза (б) образца № 5

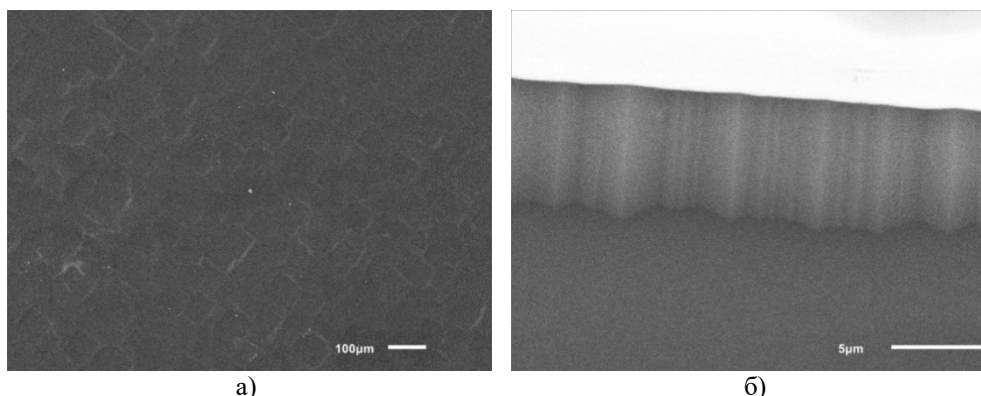


Рис. 6. Изображения поверхности (а) и среза (б) образца № 6

На основе полученных сканов поверхностей образцов ПК были сделаны основные заключения. Так, на примере образцов № 1 и № 2, увеличение времени травления и плотности тока приводит к появлению дефектов в виде наростов на поверхности плёнки без увеличения толщины плёнки. Однако, в отличие от образца № 1, образец № 2 имеет в нескольких местах отслаивание плёнки от подложки.

В то же время, сравнивая образец № 1 с № 3, в технологии которого увеличена плотность тока и концентрация раствора, мы видим ровную сплошную плёнку без явных дефектов, хотя и с трещинами на краях среза. Стоит так же отметить, что плёнка ПК в образце № 3 имеет наибольшую толщину среди всех образцов.

При резком уменьшении концентрации раствора электролита, как в случае сравнения образцов № 3 и № 4, можно наблюдать значительную деградацию поверхности ПК, выражающуюся в растрескивании плёнки. То же самое, но с другим видом дефектов (наросты и канавки) происходит и при сравнении с образцом № 5, для которого применён менее концентрированный раствор. Увеличение же концентрации раствора вдвое больше применяемой для № 4, позволило получить на подложке образца № 6 ровную сплошную плёнку без каких-либо наблюдаемых дефектов, хотя толщина её и меньше, чем у образца № 3.

Работа выполнена с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина (РГРТУ).

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003).

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.

УДК 621.382; ГРНТИ 47.09.29

ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ В ПРОЦЕССЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА

Е.П. Трусов^{1,*}, Ю.В. Воробьев¹, А.В. Ермачихин¹, А.О. Якубов²

¹Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Россия, г. Рязань, *eptrusov@yandex.ru

²Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
Россия, г. Москва, г. Зеленоград

Аннотация. В работе рассматриваются изменение удельного сопротивления халькогенидного материала $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ с течением времени, зависимость энергии активации $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ проводимости от температуры

Ключевые слова: GST, удельная электропроводность, энергия активации проводимости.

EVOLUTION OF PARAMETERS OF THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE RESISTIVITY OF $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ DURING ISOTHERMAL ANNEALING

E.P. Trusov^{1,*}, Yu.V. Vorobyov¹, A.V. Ermachikhin¹, A.O. Yakubov²

¹Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, *eptrusov@yandex.ru

²National research university of Electronic Technology,
Russia, Moscow, Zelenograd

The summary. The paper considers the change in the resistivity of the chalcogenide material $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ over time, the dependence of the activation energy of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ conductivity on temperature

Keywords: GST, electrical conductivity, activation energy of conductivity.

Введение

Аморфные халькогениды широко изучались за последние полвека из-за их применения в перезаписываемых оптических хранилищах данных и в энергонезависимых устройствах памяти с фазовым переходом. Тем не менее, природа проводимости в этих материалах все еще обсуждается.

Так, температурная зависимость удельной электропроводности GST имеет активационный характер. Качественно его можно охарактеризовать известным уравнением Аррениса:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_A}{k_B T}\right), \quad (1)$$

где E_A – энергия активации проводимости, σ_0 – предэкспоненциальный множитель, k_B – постоянная Больцмана.

Процесс дрейфа сопротивления заключается в постепенном уменьшении величины σ со временем. Исследования дрейфа сопротивления производятся во время выдержки экспериментального образца при повышенной температуре, и, зачастую, ограничиваются определением непосредственно временных зависимостей сопротивления приборной структуры на основе GST [1, 2], которое обратно пропорционально σ . Уравнение (1), однако, указывает на то, что само значение проводимости при заданной температуре контролируется двумя параметрами: E_A и σ_0 . Таким образом, для более детального изучения процесса дрейфа сопротивления GST требуется проследить изменение сразу двух параметров с течением времени.

Вид выражения (1) показывает, что для определения E_A и σ_0 необходима температурная зависимость электропроводности:

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - \frac{E_A}{k_B T} \quad (2)$$

то есть зависимость $\ln \sigma = f(1/k_B T)$ должна являться прямой линией. Параметры уравнения прямой, таким образом, позволяют найти искомые величины.

Таким образом, для определения E_A и σ_0 требуется проведение измерений температурных зависимостей. Для того чтобы соотнести полученные значения величин с процессом дрейфа при постоянной температуре, выдержка материала должна происходить при тех же изотермических условиях. Очевидный способ разрешения данного противоречия состоит в разделении процессов изотермического отжига материала и собственно измерения искомых параметров, как было предложено, например, в [3]. Для исследования временных зависимостей эксперимент производился поэтапно; каждый этап содержал фазу отжига и фазу измерения. Процесс дрейфа, таким образом, исследовался *ex situ*. Недостатком такого подхода является низкое временное разрешение. Разновидность данного подхода, предложенная в [4], обеспечивает повышение разрешения по времени за счет совмещения обеих фаз в едином цикле. Однако использование широкого температурного диапазона для определения E_A и σ_0 накладывает ограничения на исследование начальной стадии процесса, характеризующейся наиболее интенсивным изменением свойств материала, и требующей высокого временного разрешения.

В настоящей работе предлагается проведение измерений E_A и σ_0 при циклическом изменении температуры материала вблизи базового уровня. Схематически температурный профиль представлен на рисунке 1. Сущность предлагаемого подхода заключается в следующем. Температурный профиль представляет собой сумму постоянной и циклической компонент. Постоянный уровень T_B задает температуру отжига, в то время как циклический треугольный профиль амплитудой ΔT используется для определения искомых величин согласно (2).

Временное разрешение метода определяется соотношением амплитуды изменения температуры и скорости ее изменения:

$$\Delta t = \frac{2\Delta T}{\beta}, \quad (3)$$

где множитель 2 показывает, что лишь одна из фаз цикла используется для измерения искомых величин. Это является следствием особенностей динамических температурных изменений. Фаза нагрева при используемом оборудовании обеспечивает лучшее соответствие температуры образца температуре нагревателя. Это обусловлено тем, что тогда как нагрев происходит активно, за счет Джоулева тепла, выделяющегося в нагревательном элементе, охлаждение идет пассивно, путем диссипации энергии в окружающую среду. В этой связи, для фазы охлаждения свойственно существенное и неконтролируемое отставание температуры образца от заданного временного профиля.

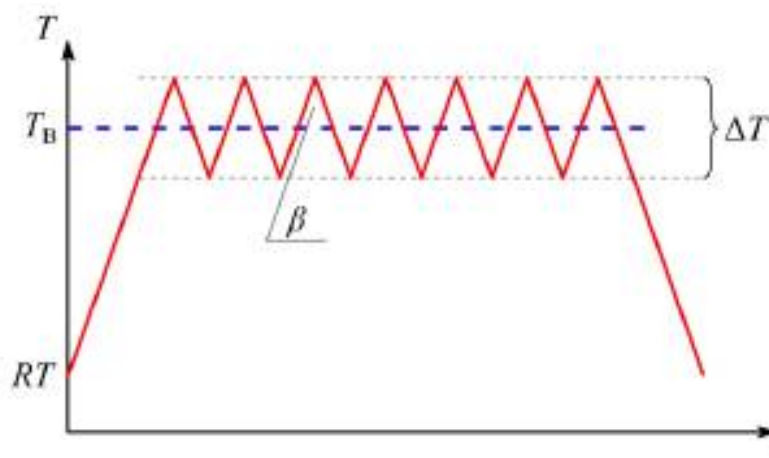


Рис. 1. Температурный профиль, обеспечивающий измерение параметров уравнения Аррениуса для электропроводности с разрешением по времени

Предложенная методика позволяет производить измерения параметров уравнения Аррениуса, соответствующих базовому уровню температуры. Таким образом, обеспечивается возможность исследования динамики изменения данных величин в процессе дрейфа величины сопротивления GST в условиях, близких изотермическим.

Математическая обработка экспериментальных данных

В ходе измерительного эксперимента записываются временные зависимости температуры образца и тока через структуру (рисунок 2).

Математическая обработка экспериментальных данных для определения временных зависимостей искомых величин проводится следующим образом. Полученные данные разделяются на циклы нагрева и охлаждения; циклы охлаждения, как указывалось выше, отбрасываются. Каждому вектору температур ставится в соответствие вектор токов. Это позволяет для каждого цикла построить температурную зависимость тока в координатах Аррениуса (рисунок 3).

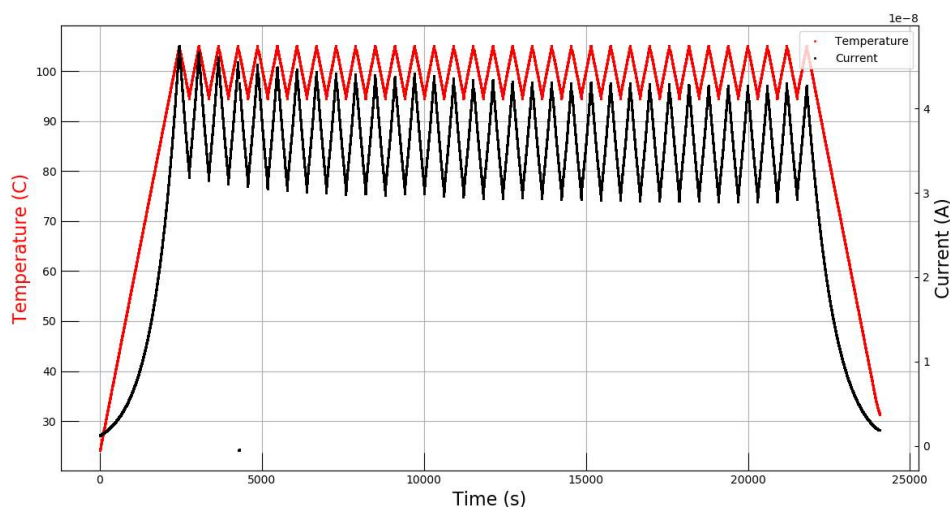


Рис. 2. Зависимость температуры и тока через образец от времени

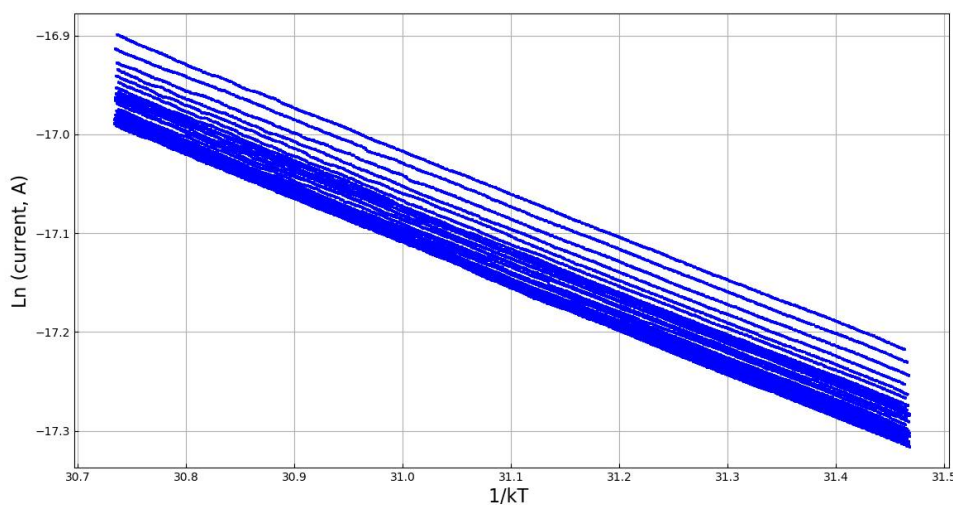


Рис. 3. Изменение температурной зависимости тока во время проведения эксперимента

Аппроксимация полученных зависимостей прямыми позволяет вычислить значения энергии активации проводимости и предэкспоненциального множителя, соответствующих каждому циклу.

Результаты исследований

Измерения показывают, что отжиг экспериментальных структур сопровождается значительным изменением удельного сопротивления.

В качестве примера на рисунке 4 показано изменение удельного сопротивления материала во время выдержки при температуре 100°C. Видно, что изменение сопротивления превышает 50%, что демонстрирует существенность процесса дрейфа сопротивления в GST.

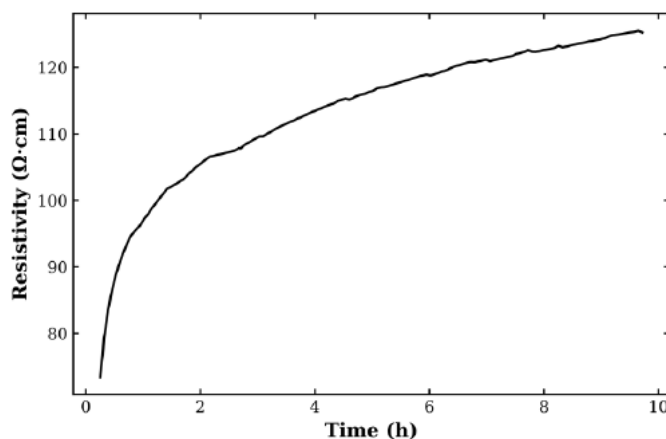


Рис. 1. Динамика дрейфа удельного сопротивления GST во время отжига при температуре 100°C

Результаты определения динамики изменения энергии активации и предэкспоненциального множителя в процессе отжига при температуре 100°C приведены на рисунке 5.

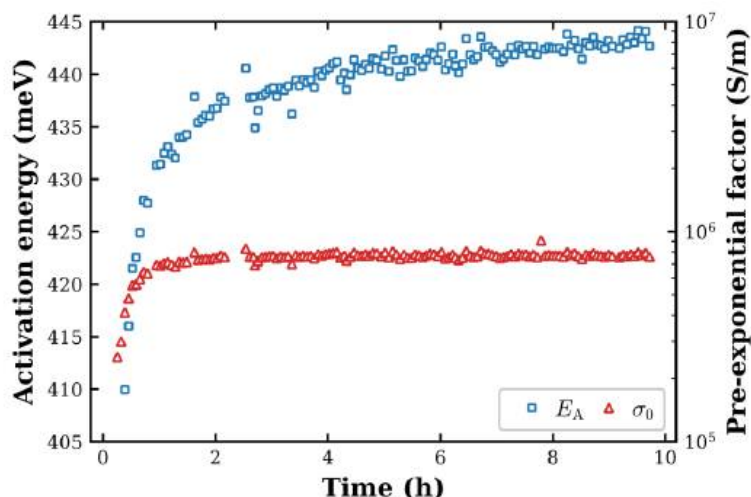


Рис. 2. Изменение энергии активации и предэкспоненциального множителя во время выдержки GST при температуре 100°C

Ход временной зависимости параметров уравнения Аррениуса в целом повторяет динамику изменения удельного сопротивления материала (рисунок 4). Тенденция изменения параметров существенно различна. Величина предэкспоненциального множителя приходит в состояние насыщения уже после 2 часов отжига, в то время как энергия активации продолжает меняться на протяжении всего эксперимента. Авторы [3] в своей работе высказали предположение о постоянстве значения в процессе дрейфа, заключив, что движущей силой этого процесса выступает изменение энергии активации. В работе [4] также сообщается о неизменности величины для GST, однако для других материалов фазовой памяти (AgInSb₂Te и GeTe) показано изменение обоих параметров уравнения Аррениуса. Результаты, представленные на рисунке 5, свидетельствуют о том, что и для GST характерно изменение предэкспоненциального множителя в процессе термического отжига. Расхождение полученных в работе результатов с результатами [4] можно объяснить различием в разрешающей способности по времени используемых методик. Выше было указано, что сверху диапазон используемых температур ограничивается 110°C из соображений исключения влияния процесса кристаллизации аморфного материала на результаты измерений.

На рисунке 6 показана динамика изменения энергии активации проводимости во время выдержки при различных температурах. Результаты показывают, что с ростом температуры энергия активации проводимости GST повышается.

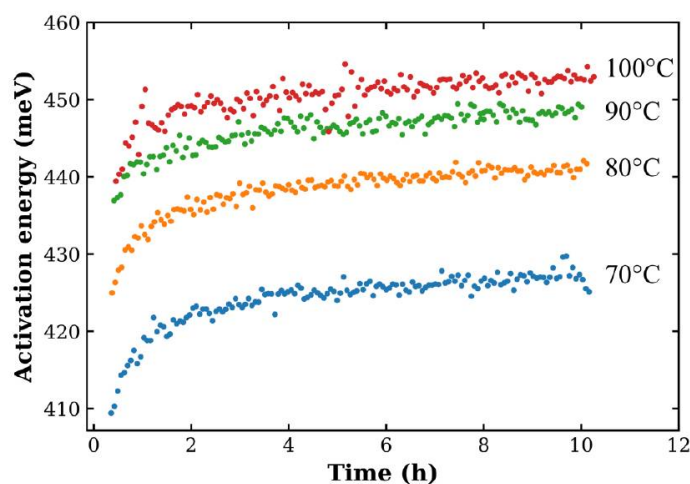


Рис. 6. Энергии активации проводимости GST при изотермическом отжиге

Таким образом, энергия активации является температурно зависимой величиной. Разница в исследуемом диапазоне температур составляет менее 30 мэВ, тем не менее, ее наличие указывает на то, что процесс проводимости GST имеет характер, несколько отличный от уравнения Аррениуса (1). Наибольшее относительное изменение величины энергии активации наблюдается для температуры 70°C (в процессе отжига возрастает на 15 мэВ; для 100°C изменение составляет около 8 мэВ). Этот результат коррелирует с результатами определения температурной зависимости показателя дрейфа (рисунок 7).

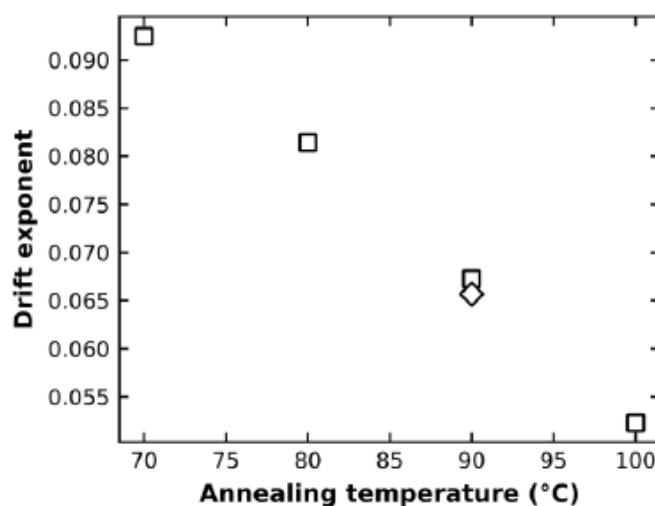


Рис. 7. Зависимость показателя дрейфа сопротивления от температуры отжига. Символом ромба отмечен результат повторного измерения при температуре 90°C

Снижение величины показателя с ростом температуры может быть связано с изменением зонной структуры материала, происходящей при нагревании. Явление дрейфа сопротивления определяется, как показано выше, ростом величины энергии активации проводимости (рисунок 6). Активационный характер проводимости определяется, в первом приближении, увеличением концентрации свободных носителей заряда:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{k_B T}\right), \quad (4)$$

где в качестве величины активационного барьера выбрано расстояние между уровнем Ферми и валентной зоной в силу дырочного характера проводимости в GST [5].

Дрейф сопротивления в GST объясняется увеличением ширины запрещенной зоны материала в процессе отжига, что продемонстрировано экспериментально в [6]. Данное объяснение остается справедливым и в условиях неизменности относительного положения уровня Ферми в запрещенной зоне материала, обусловленного его фиксацией вблизи середины зоны в аморфных халькогенидных полупроводниках вследствие большого количества дефектных состояний [7]. Вместе с этим, повышение температуры ведет к уменьшению ширины запрещенной зоны полупроводниковых материалов, что в условиях неизменности относительного положения уровня Ферми должно приводить к снижению величины энергии активации. Экспериментально же наблюдается ее рост (рисунок 6).

Выводы

В работе исследовалось явление дрейфа сопротивления в $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ при изотермическом отжиге. Дрейф сопротивления проявляется как постепенное повышение удельного со-

противления материала, при этом наблюдалось увеличение энергии активации проводимости и предэкспоненциального множителя. Изменение последнего достаточно быстро насыщается, тогда как энергия активации продолжает меняться на протяжении всего эксперимента. Также наблюдалась обратно пропорциональная зависимость показателя дрейфа сопротивления в $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ от температуры изотермического отжига материала, что указывает на проявление существенной температурной зависимости ширины запрещенной зоны материала.

Работы выполняются при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ (МК-1155.2021.1.3) с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии РГРТУ, а также ЦКП «Диагностика и модификация микроструктур и нанообъектов» и «Микросистемная техника и электронная компонентная база» МИЭТ.

Библиографический список

1. Braga S., Cabrini A., Torelli G. Dependence of resistance drift on the amorphous cap size in phase change memory arrays // Appl. Phys. Lett. 2009. Vol. 94, № 9. P. 1–3.
2. Pirovano A. et al. Low-field amorphous state resistance and threshold voltage drift in chalcogenide materials // IEEE Trans. Electron Devices. 2004. Vol. 51, № 5. P. 714–719.
3. Ielmini D. et al. Kinetic of resistance drift in PCM by structural relaxation of the amorphous chalcogenide phase // Epcos. 2010. Vol. 0, № May 2015. P. 7–8.
4. Wimmer M. et al. Role of activation energy in resistance drift of amorphous phase change materials // Front. Phys. 2014. Vol. 2, № December. P. 1–12.
5. Nardone M. et al. Electrical conduction in chalcogenide glasses of phase change memory // J. Appl. Phys. 2012. Vol. 112, № 7. P. 071101.
6. Fantini P. et al. Band gap widening with time induced by structural relaxation in amorphous $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ films // Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 100, № 1. P. 013505.
7. Kastner M., Adler D., Fritzsche H. Valence-Alternation Model for Localized Gap States in Lone-Pair Semiconductors // Phys. Rev. Lett. 1976. Vol. 37, № 22. P. 1504–1507.

УДК 621.382: ГРНТИ 29.03.35

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ МЕТОДОМ СПЕКТРОСКОПИИ АДМИТТАНСА

Ю.Н. Денисова

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, yulechka.denisova.1998@list.ru*

Аннотация. В статье рассмотрена методика спектроскопии адмиттансной для полупроводниковых структур. Описана экспериментальная установка и представлены результаты исследований.

Ключевые слова: нанoeлектроника, полупроводники, спектроскопия, адмиттанс.

STUDY OF SEMICONDUCTORS BY ADMITTANCE SPECTROSCOPY

J.N. Denisova

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkina,
Russian Federation, Ryazan, yulechka.denisova.1998@list.ru*

Annotation. The article considers the admittance spectroscopy technique for semiconductor structures. The experimental setup is described and the results of the research are presented.

Keywords: nanoelectronics, semiconductors, spectroscopy, admittance.

Благодаря стремительному развитию нанотехнологии в электронике наблюдается микроминиатюризация электронных приборов и структур, используются наноструктуры с пониженной размерностью, содержащие квантовые ямы, квантовые нити и квантовые точки.

Вследствие этого достаточно остро встает вопрос о диагностике нанообъектов, размеры которых измеряются единицами или десятками атомных слоев.

На данный момент существует множество различных методов исследования полупроводников. Одним из современных методов является метод спектроскопии адмиттанса (спектроскопии полной проводимости). Рассматриваемый метод носит неразрушающий характер и является количественной методикой. Адмиттансная спектроскопия является наиболее эффективным методом, с помощью которой можно исследовать зарядовое состояние образца, пространственное распределение подвижных и неподвижных зарядов, а также энергетическую структуру локализованных уровней.

Теоретические основы

Адмиттанс – комплексная величина, характеризующая способность электрической цепи или прибора проводить ток под воздействием приложенного переменного напряжения заданной частоты f , т.е. величина, обратная импедансу (комплексному сопротивлению).

Для измерений адмиттанса используются RLC-метры (сопротивление – индуктивность – емкость) или измерители иммитанса. Иммитанс – общее название для адмиттанса и импеданса. Уравновешивание измерительной схемы в приборе осуществляется одновременно по емкостной и активной составляющим адмиттанса Y :

$$Y = \frac{1}{Z} = G + jB; \quad G = \frac{1}{R}; \quad B = 2\pi fC, \quad (1)$$

где G – активная часть адмиттанса – проводимость;

B – емкостная часть;

R – сопротивление;

C – емкость, –

Z – импеданс, величина, обратная адмиттансу.

Адмиттанс полупроводникового прибора как активного элемента определяется его электронным спектром и поэтому зависит от температуры, приложенного к структуре напряжения и частоты измерительного сигнала. В связи с этим существует ряд экспериментальных методов анализа свойств полупроводников, базирующихся на измерении адмиттанса исследуемой структуры в зависимости от одного из вышеперечисленных параметров.

Все адмиттансные методы с точки зрения кинетики процесса могут быть условно разделены на квазистатические, динамические и нестационарные. В квазистатических (метод вольт-фарадных характеристик) полагается отсутствие зависимости результатов измерения от частоты. Анализ вольт-амперных характеристик позволяет получать информацию об электрофизических свойствах контактирующих материалов. По форме характеристики можно судить о высоте потенциального барьера, идеальности контакта, преобладающих механизмах токопереноса и т.д. Температурные зависимости ВАХ позволяют рассчитывать энергию активации проводимости и положение уровня Ферми. В динамических (температурные или частотные спектры емкости и проводимости) измерения производят на определенной частоте, и отклик системы является функцией частоты тестового сигнала. В нестационарных режимах (изотермическая релаксация и емкостная спектроскопия переходных процессов или DLTS) исследуется процесс возвращения системы к равновесию после резкого скачка приложенного к структуре смещения.

С использованием надлежащей математической обработки и моделирования методика спектроскопии адмиттанса позволяет с высокой точностью определять все основные пара-

метры наногетероструктур: разрыв энергетических зон, энергетические уровни квантования электронов и дырок в яме, их волновые функции, концентрацию носителей заряда в подзонах квантования, профиль дна зоны проводимости и валентной зоны.

Описание измерительной установки

Для экспериментального исследования спектроскопии адмиттанса полупроводниковых материалов и структур используется измерительно-аналитический комплекс на основе прецизионный измерителя LCR Agilent E4980, который позволяет проводить измерения емкости, индуктивности, сопротивления, тока и напряжения. Управление комплексом реализовано с помощью виртуального прибора (ВП), разработанного в среде инженерно-графического проектирования "LabView" (рисунок 1). С помощью ВП осуществляется выбор напряжения и частоты измерительного сигнала, мониторинг тока через образец и считывание первичных и вторичных данных.

Комплекс является полностью автоматизированным, и после задания всех параметров он выдает результаты измерений в виде данных в текстовом редакторе. Далее по полученным данным строятся ВАХ, ВФХ, например, в среде графического редактора Microsoft Office Excel или других приложениях.

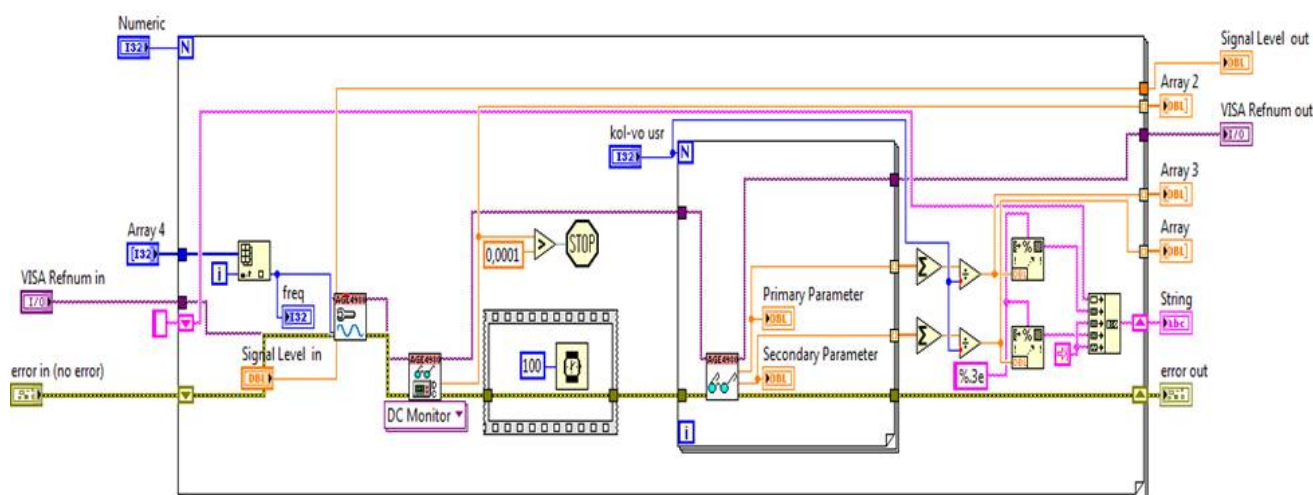


Рис. 1. Блок-диаграмма ВП, осуществляющего выбор необходимых параметров для измерения

Экспериментальные данные

Были проведены эксперименты по исследованию пяти образцов многослойных полупроводниковых структур, которые различались по типу проводимости и удельному сопротивлению кремниевой подложки, по температуре и времени нанесения (а соответственно, и толщине) пленок пленок α -Si:H. Использовались три типа подложек: ЭКДБ, ЭКЭС и КЭФ. ЭКДБ - эпитаксиальный кремний, легированный бором с дырочным типом проводимости. ЭКЭС - эпитаксиальный кремний, легированный сурьмой с электронным типом проводимости. КЭФ - кремний, легированный бором с электронным типом проводимости. Также поверхность подложки одного из образцов была подвергнута плазмохимической обработке.

По полученным экспериментальным данным были построены ВФХ и ВАХ для каждого из образцов. На основании полученных результатов были построены зонные диаграммы исследуемых структур. На рисунке 2 показана зонная диаграмма НТ-структуры с подложкой ЭКДБ, построенная по результатам анализа измерений адмиттанса.

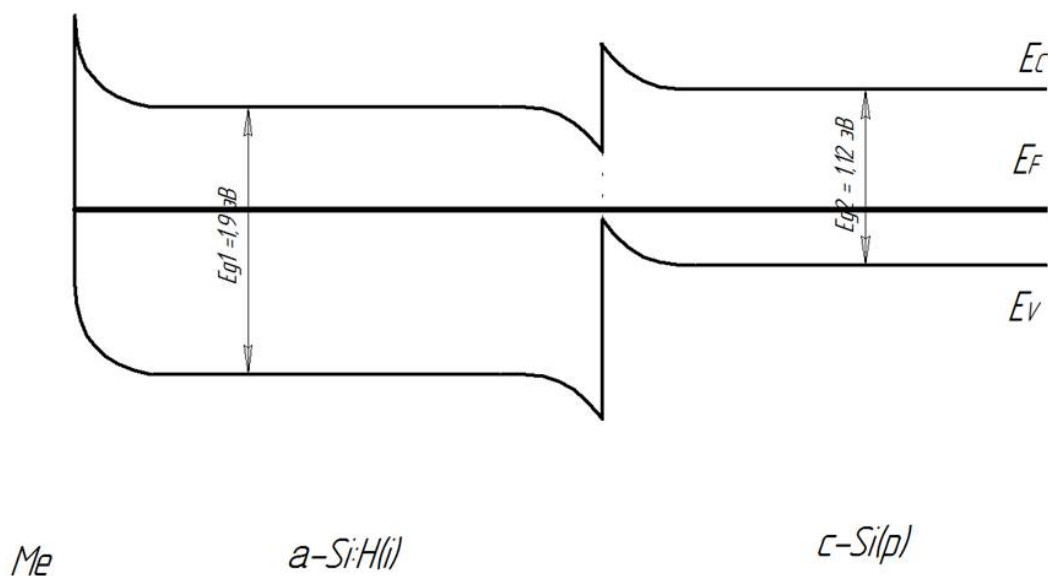


Рис. 2. Схематичное изображение зонной диаграммы экспериментального образца с HIT-структурой и подложкой ЭКДБ

Заключение

Спектроскопия адмиттанса является эффективным методом диагностики сложных полупроводниковых структур, в том числе и квантоворазмерных структур. К основным достоинствам этого метода следует отнести следующее: метод не требует серьезных временных затрат, носит неразрушающий характер, дает возможность получать пространственное распределение концентрации свободных носителей заряда, аппаратное обеспечение является сравнительно доступным и может быть в значительной степени автоматизировано. Сложность же метода спектроскопии адмиттанса заключается в интерпретации полученных экспериментальных данных.

Работа выполнена с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина (РГРТУ).

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003).

Библиографический список

1. Зубков В.И. Диагностика полупроводниковых наногетероструктур методами спектроскопии адмиттанса. (СПб.: ООО «Техномедиа» / Изд-во «Элмор», 2007), 220 с.
2. Зубков В.И. Диагностика гетероструктур с квантовыми ямами $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ методом вольтфарадных характеристик: разрывы зон, уровни квантования, волновые функции // ФТП, 2007. Т. 41, вып.3, С. 331.
3. Zubkov V.I., Kapteyn C.M.A., Solomonov A.V., Bimberg D. Voltage-capacitance and admittance investigations of electron states in self-organized InAs/GaAs quantum dots // J. of Physics: Condens. Matter, 2005, v. 17. P. 2435.

УДК 621.315.592; ГРНТИ 29.19.31

ШУМОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОПЕРЕХОДА КРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ/АМОРФНЫЙ КРЕМНИЙ В ТЕМНОТЕ И ПРИ ОСВЕЩЕНИИ

А.В. Ермачихин, Ю.В. Воробьев, Е.П. Трусов, В.Г. Литвинов

*Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина,
Россия, Рязань, al.erm@mail.ru*

Аннотация. В работе рассмотрено влияние мощности светового потока (лазер) на шумовые характеристики солнечных элементов на основе гетероперехода кристаллический/аморфный кремний (HIT).

Ключевые слова: солнечные элементы, вольт-амперные характеристики, низкочастотная шумовая спектроскопия, HIT.

NOISE CHARACTERISTICS OF SOLAR ELEMENTS BASED ON CRYSTALLINE/AMORPHOUS SILICON HETEROJUNCTION IN DARK AND UNDER ILLUMINATION

A.V. Ermachikhin, Yu. V. Vorobyov, E.P. Trusov, V.G. Litvinov

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

Abstract. In this paper the influence of the power of the light flux (laser) on the noise characteristics of solar cells based on the crystalline/amorphous silicon heterojunction (HIT) is considered.

Keywords: solar cells, current-voltage characteristics, low-frequency noise spectroscopy, HIT.

Солнечные элементы (СЭ) на основе гетеропереходов (heterojunction with intrinsic thin layer) [1] имеют хорошие характеристики преобразования энергии [2]. Обычно солнечные панели состоят из нескольких СЭ, подключенных последовательно и/или параллельно. Каждый такой элемент имеет небольшой разброс по характеристикам, что при больших числах дает некое усредненное значение. Так же каждый СЭ вносит флуктуации в общее значение тока и напряжения солнечной панели, создавая шумовую составляющую.

Солнечные элементы были исследованы на специально разработанном измерительном комплексе на базе криостата замкнутого цикла Janis CCS-400/204N, управляемого температурным контроллером LakeShore 335, электрометра Keithley 6517B, малошумящего усилителя для низкочастотной (НЧ) шумовой спектроскопии [3], лазера с длиной волны 805 нм.

Измеренные значения вольт-амперных характеристик (ВАХ) фрагмента СЭ приведены на рисунке 1.

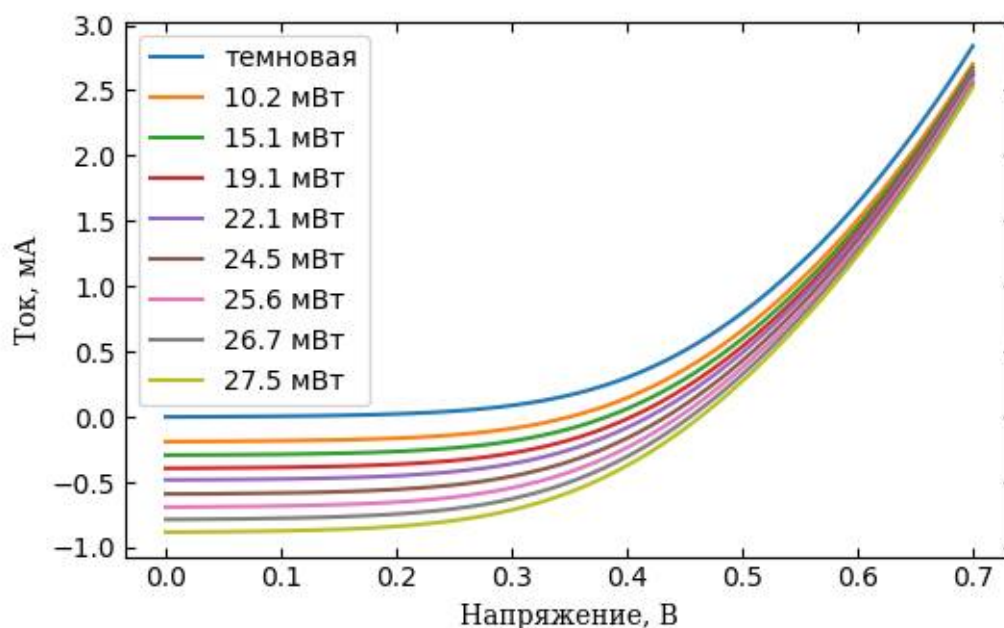


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики СЭ в темноте и при освещении лазером с разной мощностью

Значения мощности, показанные во вкладке на рисунке 1, выбраны таким образом, так как зависимость мощности лазера от подаваемого тока нелинейная (рис. 2).

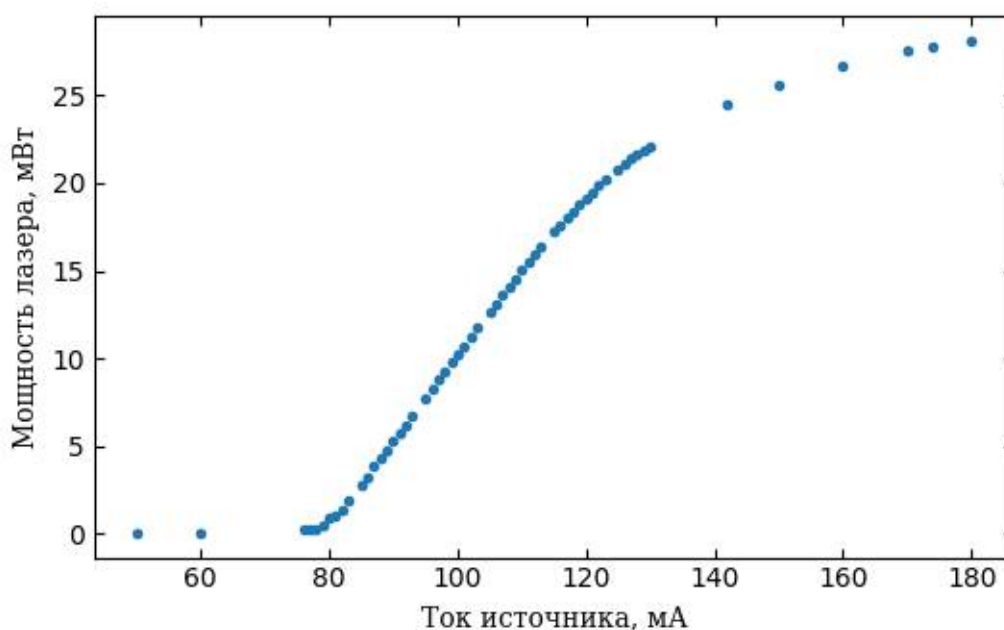


Рис. 2. Зависимость мощности лазера от подаваемого тока с источника

Полуэмпирические модели были сформулированы для корреляции текущего шума с флуктуациями подвижности [4, 5], с флуктуациями количества свободных носителей заряда (НЗ) в области пространственного заряда [6] или с поверхностью [7] полупроводника. Однако Хсу [8] и Ван дер Зил [9] впервые связали НЧ шум типа $1/f$ в системе металл-оксид-полупроводник и в рп-переходах с флуктуацией заселенности дефектного состояния. Флуктуации в солнечных элементах с р-п переходом сильно зависят от геометрии диода [4], процессов фотогенерации и напряжения смещения [6]. При наличии дефектных состояний меха-

низ захвата и рекомбинации носителей заряда вызывает флуктуации тока, которые могут быть основным источником шума [10].

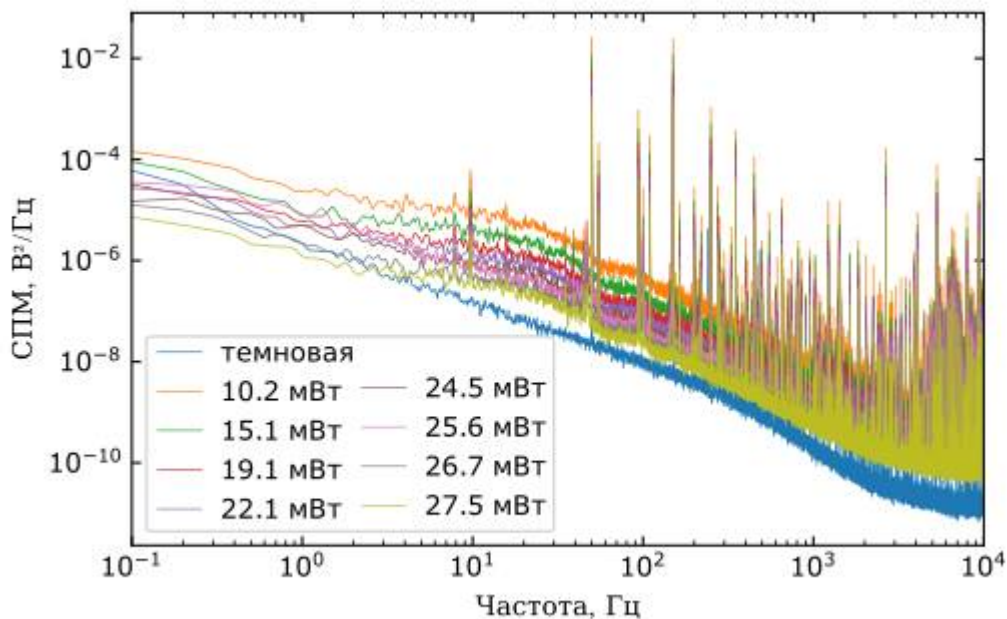


Рис. 3. СПМ НЧ шума СЭ в темноте и при освещении

На рисунке 3 приведены спектральные плотности мощности (СПМ) НЧ шума в темноте и при освещении лазером с разной мощностью излучения. СПМ НЧ шума при освещении явно выше шумовой составляющей в темноте. В темноте и при освещении значение шума зависит от объемных коэффициентов скорости эмиссии и захвата в единицу времени для ловушек электронов и дырок [11]. При освещении эти коэффициенты захвата и скорости эмиссии изменяются, а также изменяется плотность заполненных ловушек [12]. Как следствие, процесс фотогенерации носителей увеличивает заполнение ловушек до тех пор, пока не наступит насыщение, что означает, что все ловушки были активированы с точки зрения шума. В этой ситуации вклад фотоиндуцированного шума является доминирующим, в результате он больше, чем темный фоновый шум. Согласно [13], четкие различия между темновым и фотоиндуцированным шумом были интерпретированы в терминах теории Шокли-Рид-Холла. В частности, для объяснения механизмов флуктуаций тока рассматривалась комбинация процессов, связанных с захватом/удалением НЗ и явлений рекомбинации НЗ. Из рисунка 3 так же видно, что с увеличением мощности лазера шум СЭ снижается, но всё равно остается выше, чем был при темноте. Более наглядно снижение шума показано на рисунке 4. Видно, что на всех выбранных частотах СПМ шума постепенно снижается при увеличении мощности лазера. Эти зависимости близки к прямым линиям, что говорит о линейном влиянии освещения на процессы возникновения шума.

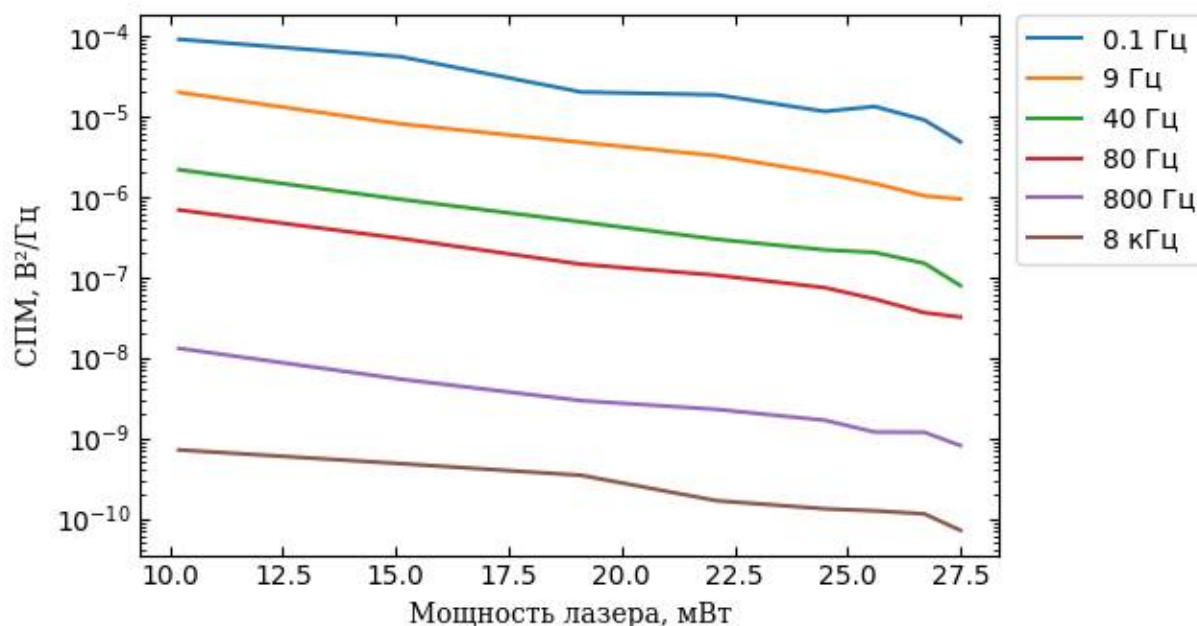


Рис. 4. Зависимость значений СПМ НЧ шума при фиксированных частотах СЭ от мощности лазера

Величины частот, показанных на рисунке 4, выбраны так из-за невозможности избавиться от сетевой составляющей в 50 Гц и их гармоник. Наглядно влияние электрической сети видно на рисунке 5, темновая СПМ (нижняя кривая) имеет всего один пик на частоте 50 Гц. СПМ при освещении имеет второй резкий пик на частоте, близкой к 55 Гц, еще появляется «куполообразная» составляющая примерно от 40 до 55 Гц. Такое поведение шумовой характеристики свойственно только образцу при освещении. На приведенных фрагментах СПМ шума значения темнового измерения практически ложатся на прямую линию. Если убрать выброс, связанный с помехой сети, и вычесть прямую наклона, то СКО будет равно $3,56 \cdot 10^{-9}$. Если проделать такие же манипуляции с СПМ при освещении, то СКО равно $2,66 \cdot 10^{-6}$. Таким образом, освещение лазером не только увеличивает значение СПМ шума, но и вносит серьезные изменения в сам вид этих кривых.

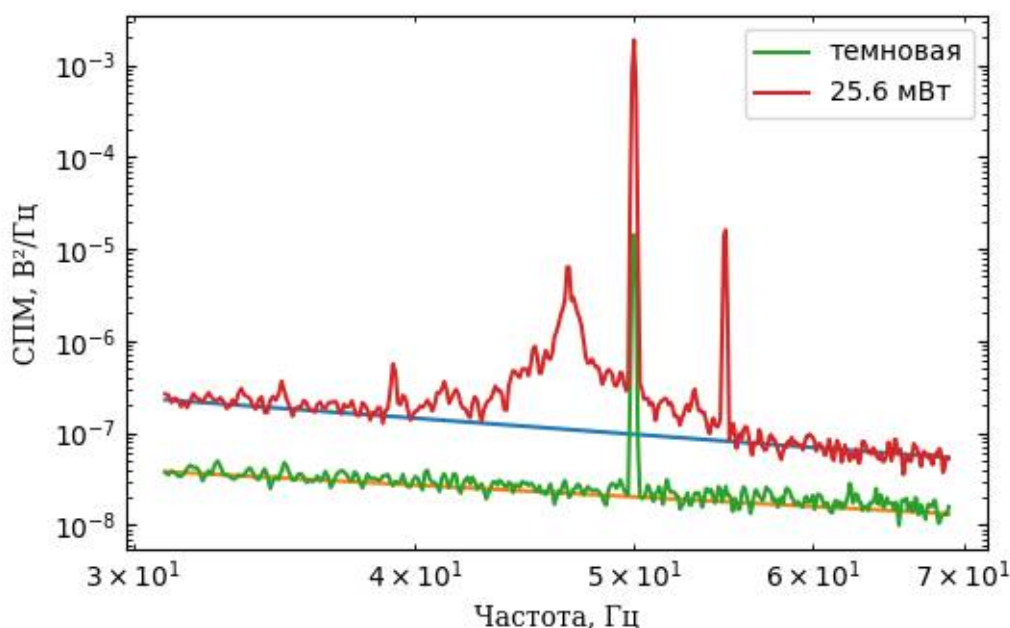


Рис. 5. Фрагмент СПМ НЧ шума

Авторы выражают благодарность заместителю генерального директора по научной работе НТЦ "Тонкопленочные технологии в энергетике", доктору технических наук, профессору Е.И. Терукову за предоставленные образцы солнечных элементов НТ структур. Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-286.2021.1.2 на оборудовании Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования (РЦЗМкп) при Рязанском государственном радиотехническом университете им. В.Ф. Уткина в НОЦ неупорядоченных и наноструктурированных материалов и устройств на их основе (ННМУ).

Библиографический список

1. M. Tanaka, M. Taguchi, T. Matsuyama, T. Sawada, S. Tsuda, S. Nakano, H. Hanafusa, Y. Kuwano. Jpn. J. Appl. Phys., 31, 3518 (1992).
2. M.A. Green, Y. Hishikawa, E.D. Dunlop, D.H. Levi, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, A.W.Y. Ho-Baillie. Prog. Photovolt. Res. Appl., 27 (1), 3 (2019).
3. А.В. Ермачихин, В.Г. Литвинов, Е.П. Трусков, С.А. Кострюков. Радиотехника, 84 (11), 55 (2020).
4. Kleinpenning, T. G. M. $1/f$ noise in p-n junction diodes. J. Vac. Sci. Technol. A 3, 176–182 (1985).
5. Schiebel, R. A. A model for $1/f$ noise in diffusion current based on surface recombination velocity fluctuations and insulator trapping. IEEE Trans. Electron Devices 41, 768–778 (1994).
6. Macku, R. & Koktavy, P. Analysis of fluctuation processes in forward-biased solar cells using noise spectroscopy. Phys. Status Solidi A 207, 2387–2394 (2010).
7. Anderson, W. W. & Hoffman, H. J. Surface-tunneling-induced $1/f$ noise in $Hg_{1-x}Cd_xTe$ photodiodes. J. Vac. Sci. Technol. A 1, 1730 (1983).
8. Hsu, S. T., Fitzgerald, D. J. & Grove, A. S. Surface-state related $1/f$ noise in p-n junctions and MOS transistors. Appl. Phys. Lett. 12, 287 (1968).
9. van der Ziel, A. Noise in solid-state devices and lasers. Proc. IEEE 58, 1178–1206 (1970).
10. Palenskis, V. & Maknys, K. Nature of low-frequency noise in homogeneous semiconductors. Sci. Rep. 5, 18305 (2015).
11. Shockley, W. & Read, W. Statistics of the recombinations of holes and electrons. Phys. Rev. 87, 835–842 (1952).
12. Yau, L. D. & Sah, C. T. Measurement of trapped-minority-carrier thermal emission rates from Au, Ag and Co traps in silicon. Appl. Phys. Lett. 21, 157 (1972).
13. Landi, G. et al. A noise model for the evaluation of defect states in solar cells. Sci. Rep. 6, 29685 (2016).

УДК 621.3.049.77; ГРНТИ 47.09.29

АНАЛИЗ ТЕКСТУР МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ НА ОСНОВЕ ИХ ПАРАМЕТРОВ

С.Е. Школин, Н.В. Рыбина

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

Аннотация. В данной работе были рассмотрены методы текстурного анализа и параметры текстур для их классификации.

Ключевые слова: текстура, методы анализа, параметры, классификация.

ANALYSIS OF MICRO - AND NANOELECTRONICS TEXTURES BASED ON THEIR PARAMETERS

S.E. Shkolin, N.V. Rybina

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin, Ryazan,
Russian Federation, serega-shkolin@yandex.ru*

Abstract. In this paper, the methods of texture analysis and the parameters of textures for their classification were considered.

Keywords: texture, analysis methods, parameters, classification.

В микро- и нанoeлектронике поверхность твердотельных материалов играет важную роль. В настоящее время разработаны различные методы наноструктурирования поверхности для тех или иных применений. Соответственно, возникает задача классификации рельефа поверхности. Особый интерес представляет автоматические алгоритмы классификации на основе методов машинного обучения. Целью данной работы был анализ существующих методов исследования особенностей рельефа поверхности и подбор характеристик, по которым можно классифицировать рельеф поверхности материалов микро- и нанoeлектроники.

Текстурный анализ дает возможность для создания новых технических средств с целью получения информации, которая будет отражать количество зарегистрированных и накопленных данных на изучаемом объекте. Процесс текстурного анализа заключается в работе с входной информацией, по которой определяются некоторые параметры и признаки изображения, далее по полученным данным устанавливается к, какому классу относится изучаемая текстура. Поскольку текстура является каким-то участком изображения с набором однородных статических характеристик, то ее нужно описывать заданным количеством признаков. Данные признаки необходимы для разделения изображения на разные участки. За счет правильного подбора параметров возможно добиться более лучшей информативности, так как отдельный класс будет описываться другим параметром. Основной задачей при работе с текстурами является подбор методов для выполнения их анализа.

Методы математической обработки данных о рельефе поверхности материалов и оценки информационно-корреляционные характеристики

1. Автокорреляционная функция (АКФ)

Если сигнал представлен в виде пространственной функции $F(r)$ высоты профиля, то АКФ рассчитывается в зависимости от вектора r_0 , который пробегает верхнюю полуплоскость декартовой системы координат:

$$K(r_0) = \frac{\int F(r)F(r-r_0)dr}{\int F^2(r)dr} . \quad (1)$$

Автокорреляционная функция способствует точному определению размеров текстур и позволяет определить скрытый порядок в структуре изучаемой поверхности, но наиболее информативна только для линейных сигналов.

2. Метод средней взаимной информации (СВИ)

С помощью данного метода можно определять степень корреляций в структуре материала по построению двумерного распределения средней взаимной информации по ненаправленному вектору между точками, характеризующими структуру материалов.

Взаимная информация определяется как количество информации, которое становится известным о значении случайной функции в точке A , когда становится известным ее значение в точке B [1]. Для пары известного и предсказуемого значения рассчитывается по следующей формуле.

$$I_{AB}(z_1, z_2) = \log_2 \left[\frac{P_{AB}(z_1, z_2)}{P_A(z_1) \cdot P_B(z_2)} \right], \quad (2)$$

где $I_{AB}(z_1, z_2)$ – взаимная информация;

D – область определения;

Z – область случайной функции;

P_X – плотность распределения вероятностей в точке X (как функция на Z);

P_{XY} – совместная плотность распределения в точках X и Y (как функция на Z_2).

3. Метод 2D DFA

Позволяет определить корреляционный вектор, показывающий периодичность в структуре, и скейлинговый показатель, отражающий тип структуры. 2D DFA достаточно точно определяет период гармонических составляющих по перегибам на зависимости флуктуационной функции от масштаба [2].

Параметры классификации текстуры поверхности

1. Шероховатость

Это сумма показателей, обозначающих количество данных, которые определяют неровности поверхности. Оценка участка поверхности осуществляется по неровностям профиля, методом сечения поверхности геометрической плоскостью [3].

Среднее арифметическое отклонение профиля

$$R_a = \frac{1}{l} \int_l^1 |y(x)| dx, \quad (3)$$

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|, \quad (4)$$

где R_a – это среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины, n – число выбранных точек профиля на базовой длине.

Высота неровностей профиля по десяти точкам

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}|}{5}, \quad (5)$$

где R_z – это сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины, y_{pi} – высота i -го наибольшего выступа профиля, y_{vi} – глубина i -й наибольшей впадины профиля.

Среднее квадратическое отклонение профиля

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y^2(x) dx}, \quad (6)$$

где R_q – это среднее квадратическое значение отклонений профиля в пределах базовой длины

Среднее значение параметра шероховатости поверхности

$$\bar{P} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n R_j, \quad (7)$$

где $\bar{P}$ – это среднее значений параметра шероховатости, определенных на всех длинах оценки;

k – число единичных длин оценки;

R_j – значение параметра, определённое на одной базовой длине;

n – число базовых длин на единичной длине оценки.

2. Диаметр Мартина

Это длина линии, проходящей через какой-либо участок на изображении текстуры в заданном направлении, которая делит площадь изображения на две равные части. Данный параметр лучше всего применять на текстуре с изображением зёрен[4].

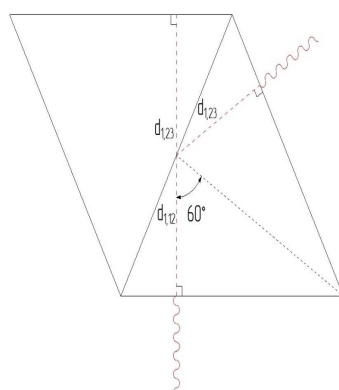


Рис.1. Определение диаметра Мартина для заданного угла

3. Кривизна

Параметр кривизны поверхности текстуры рассчитывается аппроксимацией квадратичным полиномом и определением его главных осей. Положительные знаки радиусов кривизны соответствуют вогнутой (чашеподобной) поверхности, отрицательные выпуклой (куполоподобной), смешанные знаки обозначают седловидную поверхность[4].

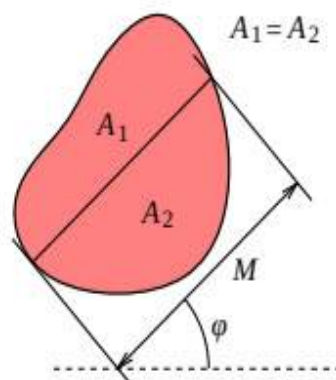


Рис. 2. Извлечения профилей для определения кривизны

4. Кластеризация К-средних и К-серединных

Эти параметры разработаны, чтобы найти количество кластеров K с похожими друг на друга спектрами внутри кластера и максимально различными между кластерами. Алгоритмы, лежащие в основе работы этих двух методов основаны на кластеризации методами машинного обучения K-средних и K-срединных соответственно. Размерность каждого спектра (графика, извлекаемого из объёмных данных вдоль оси z) соответствует числу точек в графике. Расстояние между парой точек определяется как квадратный корень из суммы квадратов разностей координат в каждой спектральной точке-измерении (L^2 -норма). Оба алгоритма определяют количество кластеров с одинаковыми спектрами внутри кластера и различными между собой кластерами [4].

5. Линия Хафа

Метод позволяет указать параметры семейства кривых и обеспечивает поиск на изображении множества кривых заданного семейства. Метод Хафа применяется для поиска линий и окружностей.

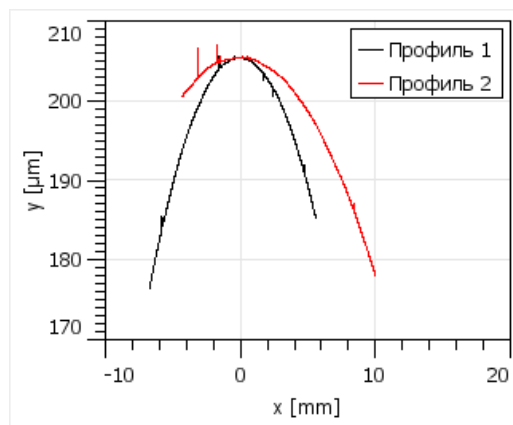


Рис. 3. Задание прямой на плоскости параметрами θ и ρ

Каждой точке (ρ, θ) пространства (ρ, θ) можно поставить в соответствие счетчик, соответствующий количеству точек (x, y) , лежащих на прямой:

$$x \cos \theta + y \sin \theta = \rho . \quad (8)$$

Таким образом, нужно выбрать на изображении ”жирные пятна” и получить соответствующие параметры прямой.

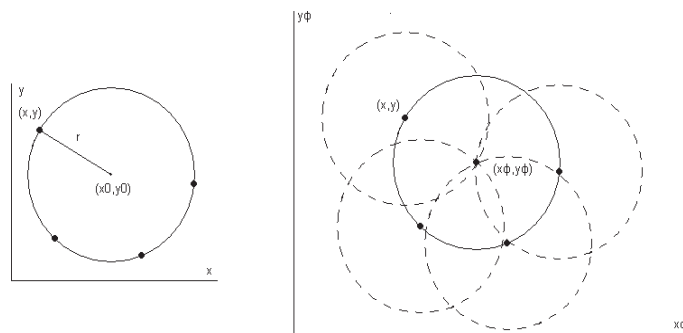


Рис.4. Определение окружности методом Хафа

Точки окружности можно представить формулой:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2, \quad (9)$$

где (a, b) – координаты центра окружности, а R – ее радиус.

Алгоритм поиска окружностей заданного радиуса на изображении сводится к “рисованию” в фазовом пространстве окружностей с центрами во всех непустых точках изображения и дальнейшему поиску локальных максимумов пространства Хафа [5].

Работа выполнена с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования (РЦЗМкп) при Рязанском государственном радио-техническом университете им В.Ф. Уткина.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003).

Библиографический список

1. Вихров С.П., Авачева Т.Г., Бодягин Н.В., Гришанкина Н.В., Авачев А.П. Установление степени упорядочения структуры материалов на основе расчета информационно-корреляционных характеристик // Физика и техника полупроводников, т. 46, вып. 4, 2012 г. С. 433-438.
2. 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.
3. Среднее арифметическое отклонение профиля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: gk-drawing.ru/plotting/quality-04.php. – Дата доступа: 19.02.2021
4. PetrKlapetek, DavidNeřcas, ChristopherAnderson, Руководство пользователя Gwyddion 247 с.
5. Кудрина М.А., Использование преобразования Хафа для обнаружения прямых линий и окружностей на изображении// Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т.16 № 4(2), 2014г. С.476-478.

УДК 621.315.592; ГРНТИ 47.33.33

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ a-Si:H

М.Ф. Мантя, В.В. Гудзев, В.Г. Литвинов, В.Г. Мишустин

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, mantya97@mail.ru*

Аннотация. В работе рассматриваются исследования электрофизических свойств барьерных структур на основе a-Si:H. Приводятся ВАХ, ВФХ, и DLTS методы, алгоритм обработки данных модифицированного времяпролетного метода.

Ключевые слова: ВАХ, ВФХ, DLTS, времяпролетный метод.

COMPLEX RESEARCH OF ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF BARRIER STRUCTURES BASED ON a-Si:H

M.F. Mantya, V.V. Gudzev, V.G. Litvinov, V.G. Mishustin

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russian Federation, Ryazan, mantya97@mail.ru*

Abstract. This work examines the study of the electrical properties of barrier structures based on a-Si:H. VCC, CVC, and DLTS methods, data processing algorithm of the modified time-of-flight method are presented.

Keywords: VCC, CVC, DLTS, time-of-flight method.

В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований барьерных структур на основе a-Si:H, полученных при различных режимах технологического процесса. Это позволяет сформулировать рекомендации по коррекции режима получения полу-

проводниковых структур с заданными параметрами для применения в конкретных элементах и устройствах на их основе.

Основным методом, используемым в работе при исследовании глубоких уровней в щели подвижности a-Si:H, являлся метод релаксационной спектроскопии глубоких уровней. Объект исследований методом DLTS должен обладать свойствами, присущими барьерным структурам. Изучение электрических свойств исследуемых структур осуществлялось методами вольт-амперных (ВАХ) и вольт-фарадных (ВФХ) характеристик.

Надбарьерная эмиссия, туннельная (полевая и термополевая) эмиссия, а также генерационно-рекомбинационные токи являются основными механизмами токопереноса через барьер на контакте металл – кристаллический полупроводник. Для неупорядоченных полупроводников могут проявляться дополнительные механизмы, обусловленные непрерывным спектром плотности электронных состояний в щели подвижности. Это туннельные токи, токи, ограниченные пространственным зарядом (ТОПЗ) и прыжковый механизм переноса по локализованным состояниям вблизи уровня Ферми.

Анализ экспериментальных ВАХ показал, что в области комнатных температур и выше наиболее вероятным механизмом является надбарьерная эмиссия. Кроме того, на ВАХ может оказывать влияние туннелирование носителей через тонкий приконтактный слой, возникающий из-за высокой плотности состояний в щели подвижности неупорядоченного полупроводника.

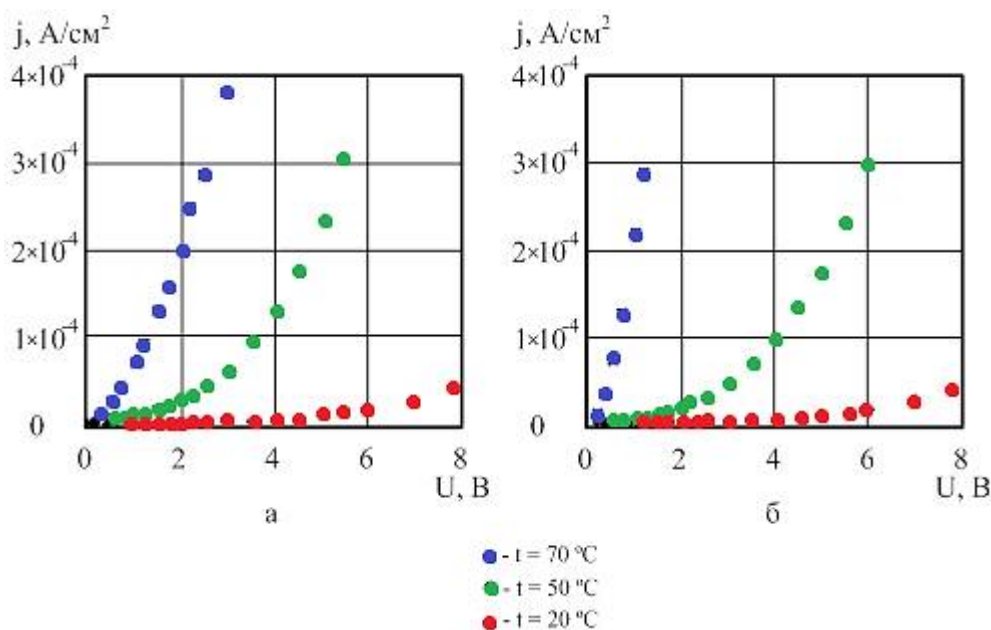


Рис. 1. ВАХ структур Al/a-Si:H/TCO/Al:

а – ВАХ, полученная при отрицательном потенциале на верхнем электроде;
б – ВАХ, полученная при положительном потенциале на верхнем электроде

На рисунке 1 представлены характерные ВАХ системы Al/a-Si:H/TCO/Al с сэндвич-конфигурацией электродов при температурах 20, 50 и 70 °C. ВАХ имеет экспоненциальный характер, что свойственно барьерным структурам. По результатам измерений с использованием математической модели ВАХ, высота барьера Al/a-Si:H составила 0,6 – 0,7 В в зависимости от образцов.

Измерение ВЧ и НЧ зависимости емкости исследуемой структуры от величины приложенного напряжения производилось с помощью RLC-метра Е7-20. При исследовании высокоомных структур (1 кОм – 1 МОм) измерялась полная проводимость структуры, которая с помощью аппаратно-программных средств пересчитывалась в электрическую емкость. Измерение емкости производилось в частотном диапазоне от 25 Гц до 1 МГц.

В рассматриваемой системе были проведены измерения ВЧ ВФХ (частота тест-сигнала – 1 МГц) и НЧ ВФХ (частота тест-сигнала – 25 Гц). Вольтаической зависимости ВЧ емкости не наблюдалось. На высоких частотах система Al/a-Si:H/TCO/Al ведет себя как обычный плоский конденсатор, где в качестве диэлектрика выступает пленка a-Si:H.

При уменьшении частоты тест-сигнала (приблизительно до 100 Гц) начинает проявляться зависимость емкости экспериментальной структуры от приложенного напряжения, причем, чем ниже частота тест-сигнала, тем ярче выражена эта зависимость. На рисунке 2 приведены результаты измерений. НЧ ВФХ имеют характерный для таких систем вид. По результатам измерений НЧ ВФХ и с использованием модели расчета, предложенной в работе [1], высота барьера Al/a-Si:H составила 0,8 – 0,9 В.

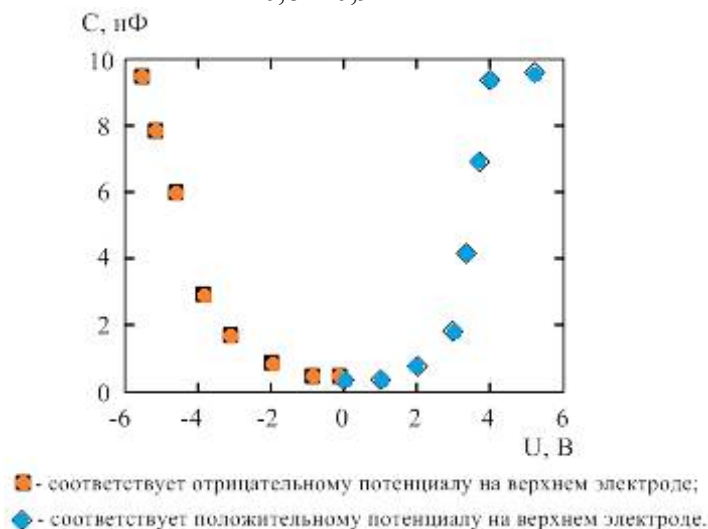


Рис. 2. НЧ ВФХ структуры Al/a-Si:H/TCO/Al (площадь верхнего электрода $9 \times 10^{-2} \text{ см}^2$)

Такой вид НЧ ВФХ определяется наличием двух встречно включенных барьеров, возникающих на контакте металлических электродов с полупроводником, низкой подвижностью носителей в a-Si:H и частотной зависимостью процессов ионизации локализованных состояний в щели подвижности.

Следовательно, исходя из характерного вида и асимметрии ВАХ и ВФХ, структуру Al/a-Si:H/TCO/Al следует рассматривать как систему встречно включенных барьеров. На рисунке 3 представлена энергетическая зонная диаграмма барьерной структуры Al/a-Si:H/TCO/Al в состоянии равновесия (рис. 3, а) и при приложении внешнего смещения (рис. 3, б).

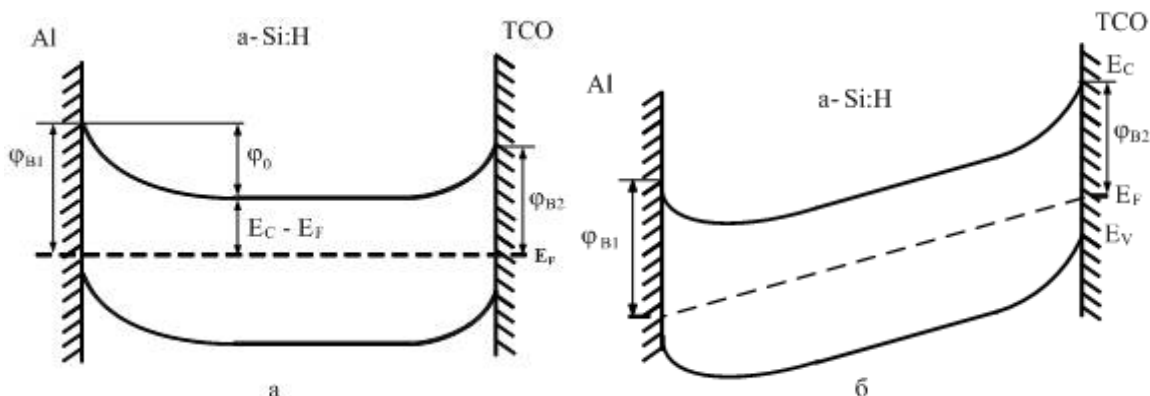


Рис. 3. Зонные диаграммы барьерных структур Al/a-Si:H/TCO/Al:

а – в состоянии равновесия;

б – при внешнем смещении (ϕ_{B1} , ϕ_{B2} – высоты контактного барьера тыльной и фронтальной стороны экспериментальной структуры, соответственно)

Такая модель позволяет понять физику процессов, протекающих в барьерных структурах Al/a-Si:H/TCO/Al, и объяснить закономерности, полученные по результатам экспериментальных исследований.

Метод DLTS является одним из наиболее информативных методов диагностики дефектов с глубокими энергетическими уровнями (ГУ) – глубоких центров. Он позволяет получить информацию для исследования электрофизических характеристик энергетических состояний в неупорядоченных полупроводниках. Его преимущество перед методом, основанным на исследовании эффекта поля, состоит в том, что поверхностные состояния оказывают значительно меньшее влияние. Эффект этих поверхностных состояний может быть определен и тогда можно узнать плотность локализованных состояний [2].

Основная проблема применения метода DLTS к барьерным некристаллическим структурам заключается в некорректности применения существующего математического аппарата, разработанного для кристаллических полупроводников, и, соответственно, интерпретации экспериментальных результатов. Ситуация усложняется еще больше, если исследовать методом DLTS квантово-размерные барьерные структуры на основе неупорядоченных полупроводников. В неупорядоченных полупроводниках становится некорректным понятие зон Бриллюэна, поверхности Ферми, представление о едином тензоре эффективных масс, через компоненты которого можно выразить равновесные и кинетические характеристики веществ [2].

Концентрация свободных электронов n может быть найдена из соотношения, учитывающего плотность состояний в щели подвижности $g(E)$ [3], однако в общем случае вид функции $g(E)$ неизвестен, поэтому на практике n рассчитать точно трудно. Концентрация свободных электронов может быть найдена из измерений проводимости исследуемого образца. В a-Si:H проводимость обусловлена в основном электронами, так как подвижность дырок примерно на два порядка величины меньше, чем у электрона. Таким образом, $n = \gamma / \mu_n$, где γ – удельная проводимость, μ_n – подвижность электронов, $\mu_n = 1..10 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ [3].

Удельная проводимость в неупорядоченных полупроводниках определяется соотношением

$$\gamma = \gamma_0 \exp\left(-\frac{E_C - E_F + W}{kT}\right), \quad (1)$$

где W – энергия активации прыжка в случае проводимости по локализованным состояниям, $W=0$, если проводимость связана с распространенными состояниями [3].

Последний случай обычно наблюдается при комнатной температуре и выше. В результате получим:

$$e_n = \frac{c_n \gamma_0}{\mu_n} \exp\left(-\frac{E_C - E_T + W}{kT}\right). \quad (2)$$

Разность $E_C - E_T$ определяет энергию активации ГУ ΔE_t . Предполагая, что предэкспоненциальный коэффициент гораздо слабее зависит от температуры, чем экспоненциальный множитель, можно построить зависимость $\ln(e_n)$ от T^{-1} и по углу наклона определить величину $(\Delta E_t + W)$, а W можно найти из измерений температурной зависимости проводимости образца.

Описание результатов исследования методом DLTS неупорядоченных полупроводников является более трудной задачей по сравнению с кристаллическими полупроводниками, поскольку их зонная энергетическая структура носит более сложный характер, что связано с квазинепрерывным распределением по энергии разрешенных для электрона состояний [4].

Барьеры в неупорядоченных полупроводниках отличаются от барьеров в кристаллических структурах, прежде всего тем, что плотность объемного заряда в ОПЗ определяется не столько ионизированными примесями, как у кристаллических полупроводников, сколько ионизацией локализованных состояний в щели подвижности [4].

Для определения концентрации и энергии активации ГУ в щели подвижности были проведены исследования барьерных структур Al/a-Si:H/TCO/Al методом токовой DLTS. Исследуемые структуры отличаются различными технологическими режимами изготовления. Измерения проводились в диапазоне температур 280 – 400 К при скорости нагрева образца 1 К/мин и амплитуде опустошающего импульса 3 В [5].

На рисунке 4 представлены типичные спектры DLTS-измерений при различных постоянных временах релаксации τ . В диапазоне температур 320 – 350 °С наблюдается размытый пик сигнала DLTS, при более высоких температурах происходит монотонный рост величины сигнала из-за возрастания токов утечек (рис. 4).

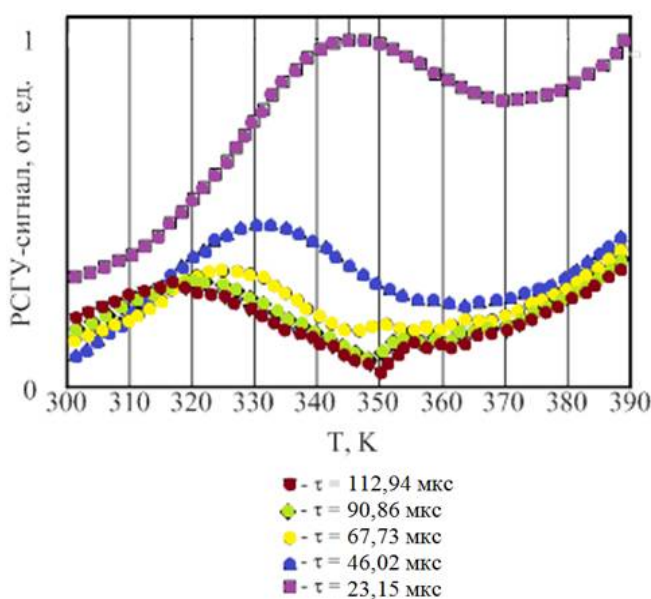


Рис. 4. DLTS-спектр для структур Al/a-Si:H/TCO/Al

Уширение пика DLTS-сигнала можно объяснить наличием непрерывного по энергии спектра локализованных состояний в щели подвижности a-Si:H. В этом случае максимум DLTS-сигнала соответствует не конкретному глубокому уровню, как в кристаллическом полупроводнике, а пику плотности состояний в щели подвижности.

Значение энергии активации определяется по наклону прямой Аррениуса (рис. 5).

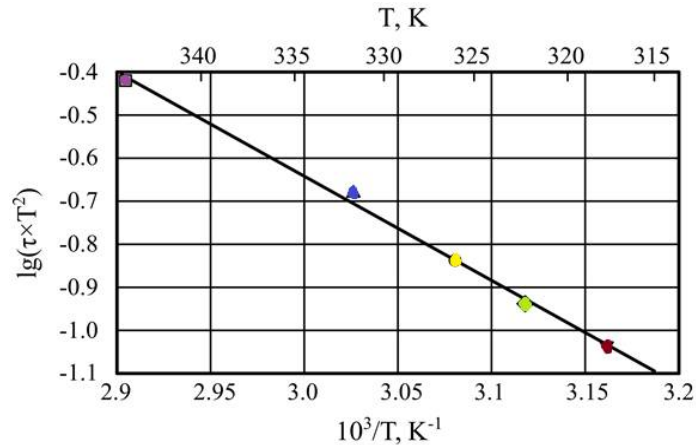


Рис. 5. Зависимость Аррениуса для DLTS-спектров

Анализ экспериментальных результатов показал наличие пика плотности состояний (глубокого уровня) с энергией активации 0,49 эВ. Данный глубокий уровень возникает за счет локализованных состояний a-Si:H и поверхностных состояний на границе раздела Al/a-Si:H. Концентрации глубоких уровней, рассчитанные из амплитуды пиков DLTS-спектра, различались в зависимости от температуры подложки при осаждении a-Si:H.

Далее в статье рассматривается алгоритм обработки данных модифицированного времяпролетного метода (МВПМ). Данный метод разработан специально для исследования полупроводниковых материалов с высоким омическим сопротивлением, таких как a-Si:H и родственные ему материалы.

Для расчетов параметров полупроводниковых структур принимаются допущения, что локализованные состояния, лежащие вблизи уровня Ферми, являются электрически- и фото-активными и могут выступать в роли донорных (при энергии выше уровня Ферми E_F , т.е. в интервале между E_F и уровнем валентной зоны E_v) или акцепторных (при энергии меньше E_F , т.е. в интервале между E_F и уровнем зоны проводимости E_c) состояний [5]. Здесь используется концепция модели Коэна-Фришче-Овшинского [6], где распределение плотности состояний обуславливается перекрытием хвостов валентной зоны и зоны проводимости. С учетом этого, можно принять, что темновая проводимость обеспечивается электронами с концентрацией:

$$n_0 = N_d^+ - N_a^-, \quad (3)$$

где n_0 – концентрация электронов в нейтральной области a-Si:H, N_d^+ и N_a^- – концентрация ионизированных доноро- и акцептороподобных состояний. Величины N_d^+ и N_a^- определяются по (4) и (5) в зависимости от координаты:

$$N_d^+(x) = \int_{E_c}^{E_v} g_d(E)[1 - f_n(E, x)]dE, \quad (4)$$

$$N_a^-(x) = \int_{E_c}^{E_v} g_a(E)f_n(E, x)dE. \quad (5)$$

Здесь $g_d(E)$ и $g_a(E)$ – плотность локализованных донороподобных и акцептороподобных состояний соответственно, $f_n(E, x)$ – функция Ферми для электронов.

Ввиду размытости края зон подвижности энергия в расчетах отсчитывается от состояния вакуума $E_0 = 0$.

При расчетах используется обобщенная модель распределения плотности состояний, локализованных в щели подвижности. Плотность состояний такова, что квазиуровень Ферми

в ОПЗ не может значительно изменять свое положение, поэтому в расчетах можно использовать экспоненциальную аппроксимацию плотности состояний в зависимости от энергии вида:

$$g(E) = g_{F0} \exp(\beta(E - E_{F0})), \quad (6)$$

где g_{F0} – плотность состояний на уровне Ферми, E_{F0} – глубина залегания уровня Ферми в объеме a-Si:H, β – наклон аппроксимирующей прямой в полулогарифмических координатах; $[\beta] = \text{эВ}^{-1}$.

Используется приближение полного обеднения. С учетом допущений выше при $E > E_F$ $f_n = 1$ и при $E < E_F$ $f_n = 0$.

МВПМ основывается на модифицированной методике Гехта, которая заключается в измерении коэффициента собирания заряда, генерированного коротким импульсом света. Модификация заключается в том, что внешнее поле прикладывается навстречу внутреннему полю ОПЗ таким образом, что коэффициент собирания равен нулю. Величина внутреннего электрического поля рассчитывается через амплитуду напряжения внешнего компенсирующего поля и толщину структуры. Координата, в которой определяется поле, рассчитывается через толщину структуры и коэффициент поглощения света.

На основе данного физико-математического аппарата разработан алгоритм, необходимый для измерения напряженности электрических полей в барьерных структурах на основе неупорядоченных полупроводников. Он реализует модифицированный времяпролетный метод исследования материалов с низкой подвижностью носителей заряда. Первой операцией данного алгоритма является решение одномерного уравнения Пуассона для контакта металл – аморфный гидрогенизированный кремний (Me/a-Si:H). В нем учитывается определяющая роль плотности состояний в щели подвижности a-Si:H на процесс формирования барьера. Из решения одномерного уравнения Пуассона получены аналитические выражения для распределения электростатического потенциала $\phi(x)$, внутреннего электрического поля $F(x)$ и ширины ОПЗ на контакте Me/a-Si:H в зависимости от электрофизических параметров контактирующих полупроводника и металла.

Следующим этапом алгоритма учитывается эффект экранирования электрического поля в a-Si:H ионизированными «глубокими» состояниями, локализованными в щели поверхности. Длина экранирования является величиной переменной, зависящей от координаты (потенциала) в ОПЗ. Еще она зависит от температуры, параметров распределения ионизированных состояний, локализованных в щели подвижности, и от концентрации электронов проводимости.

Алгоритмом находится распределение состояний, локализованных в щели подвижности и рассчитывается по экспериментально измеренному профилю внутреннего поля $F_i(x)$ в ОПЗ. Определяется значение характеристической длины экранирования L_s в зависимости от координаты в ОПЗ, по которой рассчитывается плотность состояний $g(E)$ и их энергетическое положение относительно уровня Ферми.

МВПМ обладает повышенной точностью по сравнению с традиционным времяпролетным методом, поскольку на измеряемые величины не влияют параметры контакта и особенности переноса носителей, учитывается также потеря части фотогенерированного заряда в процессе их дрейфа.

Данное комплексное исследование электрофизических свойств барьерных структур на основе a-Si:H позволяет сформулировать рекомендации по коррекции режима получения полупроводниковых структур с заданными параметрами для применения в конкретных элементах и устройствах на их основе.

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. Вишняков Н.В., Гудзев В.В., Литвинов В.Г., Мишустин В.Г. Исследование глубоких уровней в барьерных структурах на основе аморфного гидрогенизированного кремния // В сборнике: Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2016. Сборник трудов международной научно-технической и научно-методической конференции: в 4 томах. Рязанский государственный радиотехнический университет; Под общей редакцией О.В. Миловзорова. 2016. С. 259 – 263.
2. Литвинов В.Г., Гудзев В.В., Милованова О.А., Рыбин Н.Б. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней и ее применение для исследования полупроводниковых структур микро- и наноэлектроники // Датчики и системы. 2009. № 9. С. 71 – 78.
2. Литвинов В.Г., Гудзев В.В., Милованова О.А., Рыбин Н.Б. Релаксационная спектроскопия полупроводниковых микро- и наноструктур // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2009. № 30. С. 62 – 70.
4. Вихров С.П., Вишняков Н.В., Гудзев В.В., Литвинов В.Г., Мишустин В.Г. Исследование локализованных состояний в барьерных структурах элементов электроники на основе аморфного гидрированного кремния // Радиотехника. 2017. № 5. С. 186 – 192.
5. Вихров С.П., Вишняков Н.В., Мишустин В.Г. и др. Электрически активные состояния в неупорядоченных полупроводниках // Тезисы докладов IV Международной конференции по физико-техническим проблемам электротехнических материалов и компонентов. Москва, Институт электротехники МЭИ (ТУ). 2001. С. 93 – 94.
6. Меден А., Шо М. Физика и применение аморфных полупроводников: Пер. с англ. - М.: Мир, 1991. – 670 с.

УДК 621.382: ГРНТИ 29.03.77

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ В РЕЖИМЕ CELIV ИЗМЕРЕНИЯ

Д.Р. Назимов, В.Г. Мишустин

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, nazimovdmity98@gmail.com*

Аннотация. В статье рассмотрен метод CELIV для определения подвижности носителей заряда в полупроводниковых материалах, а также проведено моделирование измерений данным методом с помощью программы gpvдn. Рассмотрены назначение и возможности программы gpvдn, интерфейс программы, приведены смоделированные эпюры напряжений и токов.

Ключевые слова: метод CELIV, полупроводники, подвижность носителей заряда, программа моделирования.

SIMULATION OF TRANSIENT PROCESSES IN SEMICONDUCTORS IN THE CELIV MEASUREMENT MODE

D.R. Nazimov, V.G. Mishustin

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, nazimovdmity98@gmail.com*

The summary. The article considers the CELIV method for determining the mobility of charge carriers in semiconductor materials, and also simulates measurements by this method using the gpvдn program. The purpose and capabilities of the gpvдn program, the program interface, and the simulated voltage and current diagrams are considered.

Keywords: CELIV method, semiconductors, mobility of charge carriers, simulation program.

В соответствии с тенденцией к миниатюризации современных электронных устройств, все чаще электронные компоненты выполняются на основе тонкопленочных структур.

тур. В большинстве случаев толщина пленки составляет менее 100 нм. В качестве примера таких устройств можно назвать солнечные элементы, тонкопленочные полевые транзисторы, органические светодиоды и т.д.

Транспорт носителей заряда – крайне важный физический процесс, определяющий параметры электронных устройств. Подвижность носителей заряда является одной из основных характеристик, определяющей кинетические свойства полупроводниковых материалов. Известно достаточно большое количество методов определения подвижности носителей заряда, однако большинство из них малоприспособно для исследования тонких пленок. Причем подвижность в тонкопленочных структурах может существенно отличаться от подвижности в слоях с большей толщиной. Альтернативой для традиционных измерительных методов является метод CELIV (ChargeExtractionbyLinearlyIncreasingVoltage), который применим для исследования тонкопленочных полупроводниковых структур даже при существенной разнице в подвижности электронов и дырок [1].

Суть метода CELIV состоит в исследовании зависимости плотности тока от времени через тонкопленочную структуру при воздействии последовательными импульсами напряжения заданной формы и амплитуды [2 – 4]. По этой зависимости можно оценить подвижность носителей заряда в полупроводниковой структуре.

Для исследования полупроводников методом CELIV используются тонкопленочные образцы с омическим контактом. Для создания таких контактов требуется применить материалы с высокой степенью чистоты и очень четко соблюдать требования технологии производства [1]. Жесткие требования к пробоподготовке несколько затрудняют использование данного метода на практике.

Однако, существует возможность часть рутинных операций по подбору экспериментальной структуры, ее конфигурации, а также режимов измерения провести в виртуальной среде с помощью математического моделирования [5]. Это позволяет существенно сократить трудозатраты на подготовку эксперимента и получать предсказуемые результаты натурных измерений.

Примером такой среды для моделирования тонкопленочных полупроводниковых структур является программа *grvdm* [6]. Она предназначена для моделирования тонкопленочных солнечных элементов на основе неупорядоченных и органических полупроводников, а также солнечных элементов на основе перовскитов. Кроме того, данная программа позволяет моделировать полупроводниковые структуры для OFET и OLED-дисплеев.

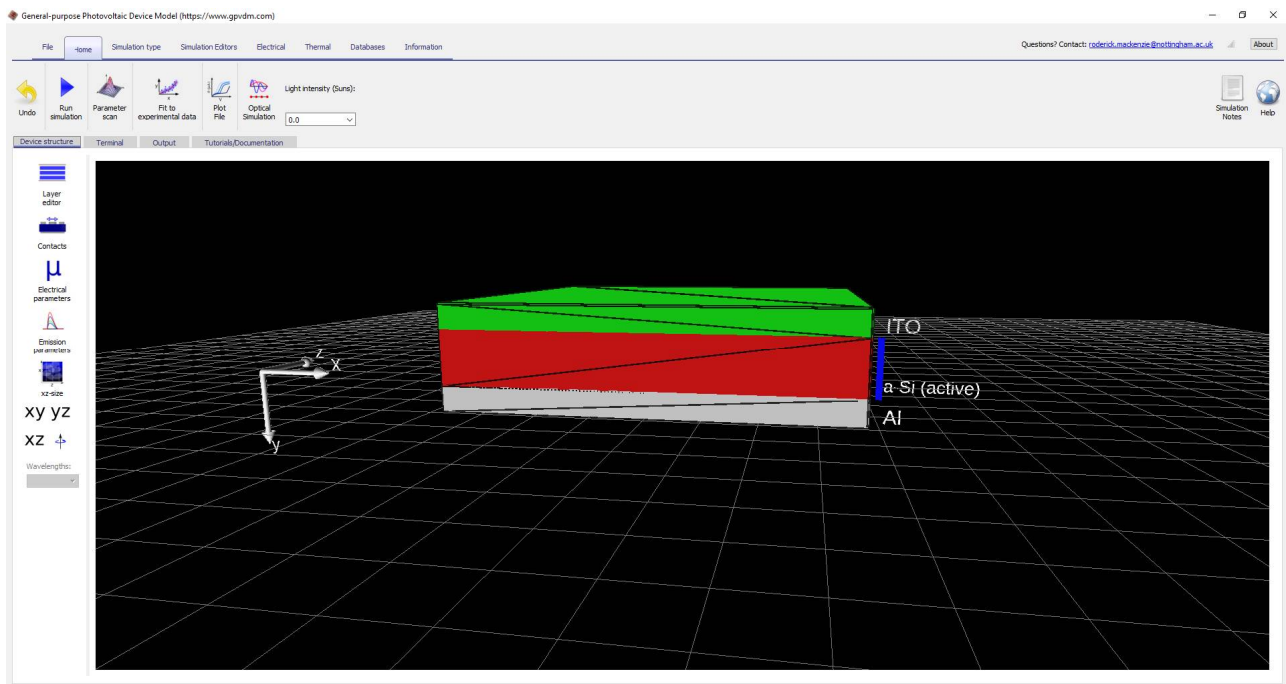


Рис. 1. Окно программы gpvdm для моделирования органических/перовскитовых солнечных элементов, OFET и OLED-дисплеев

В программе gpvdm можно сформировать конфигурацию полупроводниковой структуры (рисунок 1), а также выбрать полупроводниковые материалы и задать их параметры: подвижность носителей заряда, плотность и распределение энергетических состояний, уровень легирования, скорость рекомбинации и пр. (рисунок 2). Это позволяет промоделировать характеристики тонкопленочных полупроводниковых структур и оценить их зависимость от конструкции и параметров используемых материалов. Эти данные вводятся в программу с помощью специализированного графического интерфейса.

Кроме того, в программе gpvdm можно промоделировать результаты CELIV исследования тонкопленочных структур. Для этого после ввода параметров исследуемой структуры следует смоделировать линейно-изменяющийся импульс напряжения (рисунок 3), который будет приложен к структуре. По окончании симуляции переходного процесса получаем зависимость переходного тока от времени (рисунок 4).

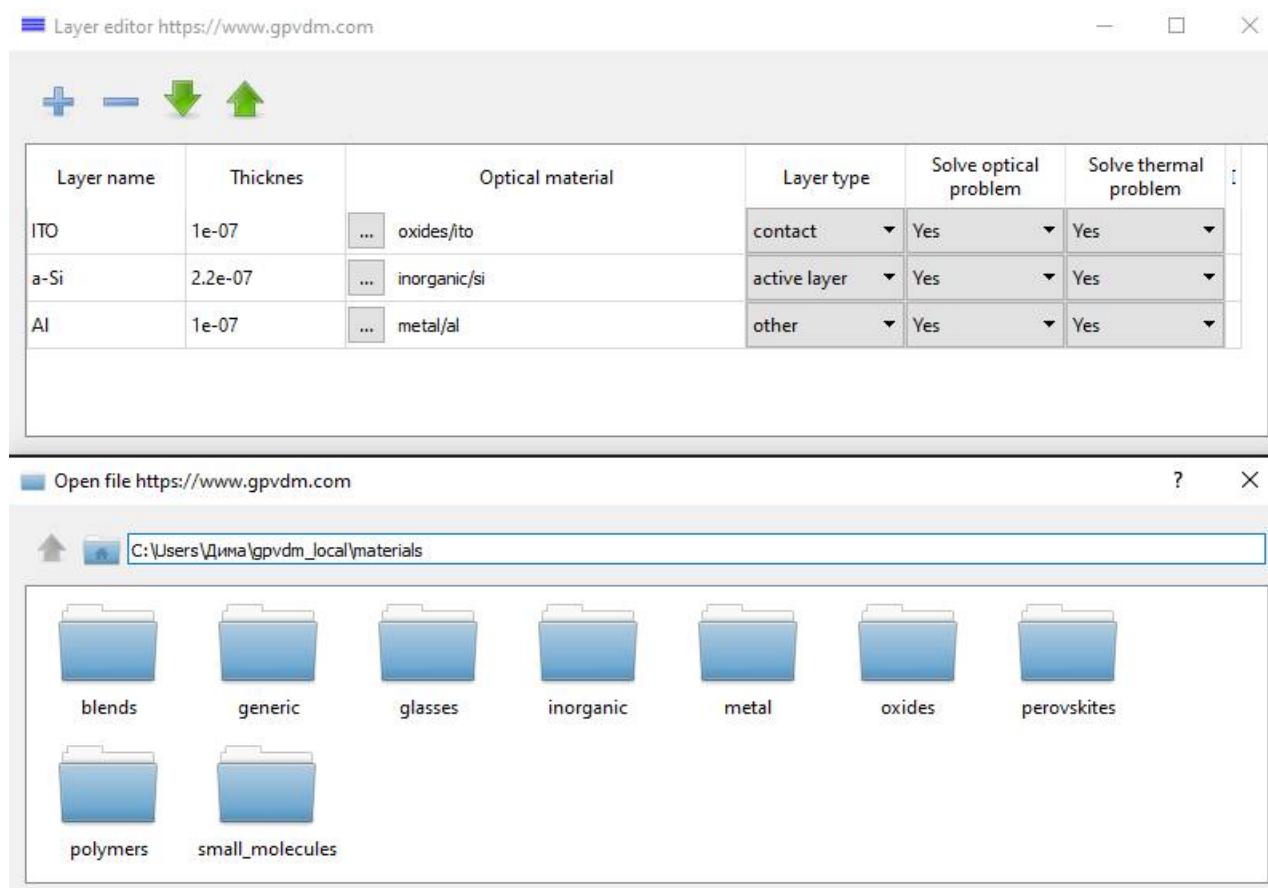


Рис. 2. Окно программы gpvdm: выбор материала слоев, их толщины и порядка расположения в тонкопленочной структуре

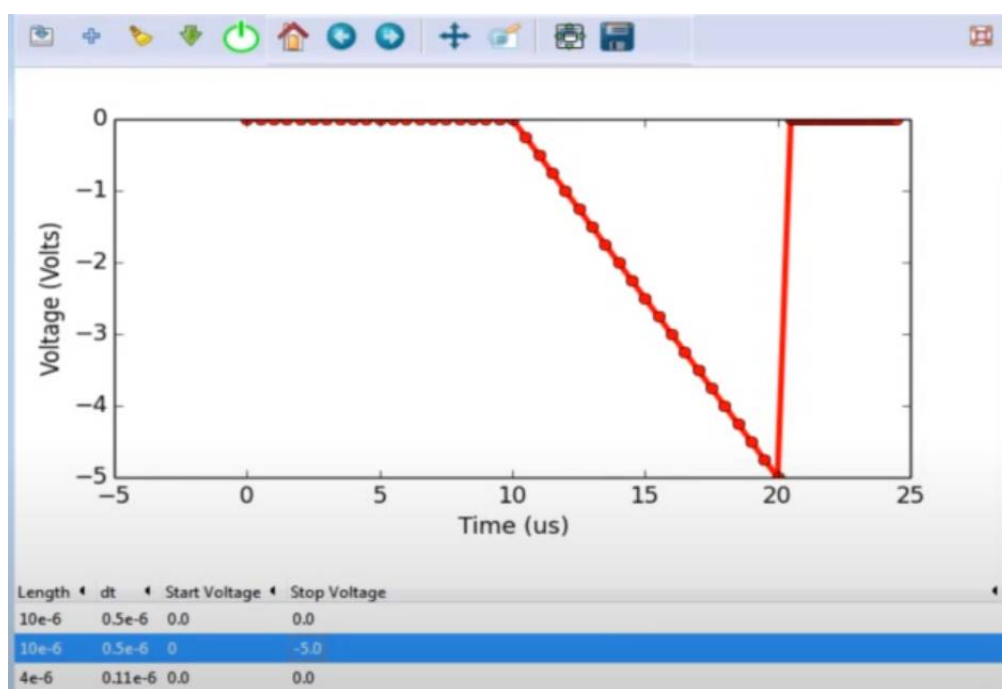


Рис. 3. Окно программы gpvdm: моделирование линейно-изменяющегося импульса напряжения

Результаты моделирования переходных процессов в тонкопленочных полупроводниковых структурах в программе gpvdm могут быть использованы как для подготовки и оптими-

зации натурального CELIV эксперимента, так и для анализа переходных процессов, полученных экспериментально. В первом случае это позволяет подобрать оптимальную конструкцию тонкопленочной структуры для CELIV исследований, во втором – оценить подвижность носителей заряда в исследуемой структуре по экспериментально полученной зависимости тока от времени.

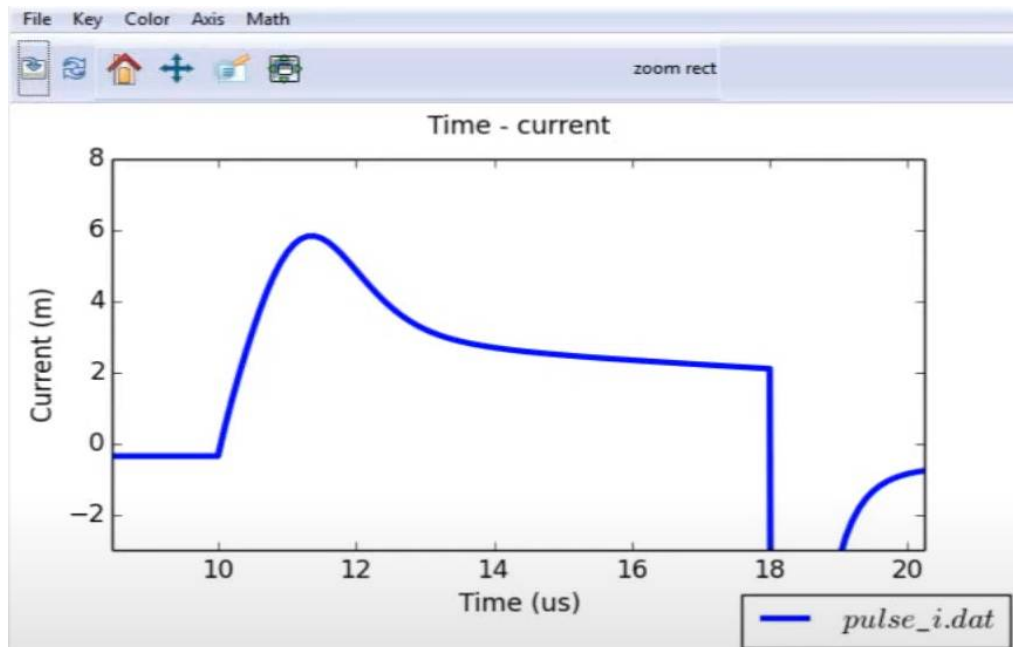


Рис. 4. Окно программы gpvdm: модельная зависимость переходного тока от времени

Таким образом, применение средств математического моделирования совместно с реальными CELIV измерениями тонкопленочных полупроводниковых структур позволяют вывести на качественно новый уровень эффективность данной методики и предложить более эффективный инструмент для исследователей и разработчиков новых полупроводниковых материалов и структур.

Работа выполнена с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина (РГРТУ)

Библиографический список

1. В.Г. Мишустин, Д.Р. Назимов Метод CELIV: перспективы и особенности применения для исследования неупорядоченных полупроводников // Сб. тр. III между-нар. науч.-техн. форума СТНО-2020 Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2020. Т. 2. С. 109 – 112.
2. Никитенко В.Р. и др. Теория аномальной диффузии носителей заряда в неупорядоченных органических материалах для условий эксперимента CELIV – Москва: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2015
3. J. Vazgela, K. Genevicius, G. Juška i-CELIV technique for investigation of charge carriers transport properties. Vilnius, Lithuania: Department of Solid State Electronics, 2016.
4. Hanfland, M. A. Fisher, W. Brütting, U. Würfel and R. C.I. MacKenzie "The physical meaning of charge extraction by linearly increasing voltage transients from organic solar cells" – Appl. Phys. Lett. 103, 063904 (2013).
5. M.T. Neukom, N.A. Reinke, B. Ruhstaller "Charge extraction with linearly increasing voltage: A numerical model for parameter extraction" – Solar Energy, 85, 1250 (2011).
6. GPVDM: Simulate organic/Perovskite Solar Cells, OFETs, and OLEDs. [электронный ресурс]. – URL: <http://www.gpvdm.com/example.html#transient> (дата обращения: 20.02.2021).

УДК 53.082.53; ГРНТИ 29.31.29

РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ GE-SB-TE

Е.С. Трофимов, А.Ю. Судакова, Н.М. Толкач, Н.В. Вишняков

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

Аннотация. В данной работе рассмотрено фазовое переключение в структурах на основе состава $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST) и описан макет для исследования структур данной системы материалов.

Ключевые слова: тонкопленочная структура, фазовый переход, GST, отражательная способность, пропускательная способность, комплексный показатель преломления, рамановская спектроскопия, атомно-силовая микроскопия.

DEVELOPMENT OF A MEASURING STAND FOR STUDYING THE OPTICAL CHARACTERISTICS OF THIN-FILM STRUCTURES BASED ON THE GE-SB-TE SYSTEM

E.S. Trofimov, A.Yu. Sudakova, N.M. Tolkach, N.V. Vishnyakov

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

The summary. In this paper phase switching in structures based on $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST) composition is considered and a layout for investigating structures of this material system is described.

Keywords: thin-film structure, phase transition, GST, reflectivity, transmissivity, complex refractive index, Raman spectroscopy, atomic force microscopy.

Длина волны 1550 нм с наименьшим затуханием сигнала 0,22 дБ/км в настоящее время является устоявшимся стандартом для телекоммуникационных оптических систем для организации связи на большие расстояния [1]. Перспективным в этом отношении является использования тонкопленочных устройств на основе халькогенидного соединения $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST225, GST) в системах управления и коммутации оптического сигнала. Важной особенностью этих материалов являются обратимые, быстрые и низкоэнергетические фазовые переходы из аморфного в кристаллическое состояние, возбуждаемые электрическим или оптическим импульсным воздействием. В диапазоне от 1500 до 1600 нм пленки GST имеют малый коэффициент экстинкции в аморфном состоянии и в несколько раз больший в кристаллическом [2]. При этом почти в 2 раза изменяется показатель преломления, что позволяет изменять как отражающие, так и пропускающие свойства пленок. Это позволяет использовать тонкопленочную структуру на основе GST225 как проводник и зеркало одновременно, а чередующиеся структуры на их основе, как управляемый фотонный кристалл с разрешенными и запрещенными энергетическими состояниями для электромагнитных оптических волн. Ощутимая разница в коэффициенте преломления пленок GST при длине волны 1550 нм может быть использована для управления несущим информацию сигналом (информационным сигналом). В настоящий момент способность GST обратимо менять свое фазовое состояние используется в интегральных устройствах, ИК-приемниках, оптических дисках [3, 4] и т.п.

Фазовое состояние материала можно контролировать импульсами накачки (излучения, которое хорошо поглощается материалом) с разными длительностью и интенсивностью (в первом случае короткий высокоэнергичный импульс, приводящий к аморфизации, во втором случае более длительный низкоэнергетичный импульс, приводящий к кристаллизации материала). Пропускательная и отражательная способности зависят от фазового состояния материала пленки GST. В результате пленка либо пропускает зондирующий сигнал, либо отражает его. Однако это не всегда выполняется точно. При пропускании сигнал также частично отражается и поглощается, а при отражении пропускается и поглощается. Возникающие

паразитные волны частично отраженные, прошедшие и поглощенные необходимо максимально уменьшить. Это возможно сделать следующими способами:

- 1) использованием материалов системы GST различного состава, находящихся на линии квазибинарного разреза $\text{GeTe-Sb}_2\text{Te}_3$;
- 2) изменение состава материалов системы GST примесными добавками;
- 3) оптическое управление дополнительными промежуточными состояниями материала системы GST, обусловленными частично кристаллическими и аморфными наноразмерными фракциями (самый актуальный способ т.к. позволяет выполнять тонкую подстройку оптических параметров);
- 4) применение дополнительных чередующихся слоев с разными показателями преломления и многослойных структур, перераспределяющих поле электромагнитной волны необходимым образом в зависимости от фазового состояния GST слоя.

Успешное использование одного из предложенных способов необходимо экспериментально контролировать, для чего разработан макет измерительного стенда, структурно-оптическая схема которого представлена на рисунке 1.

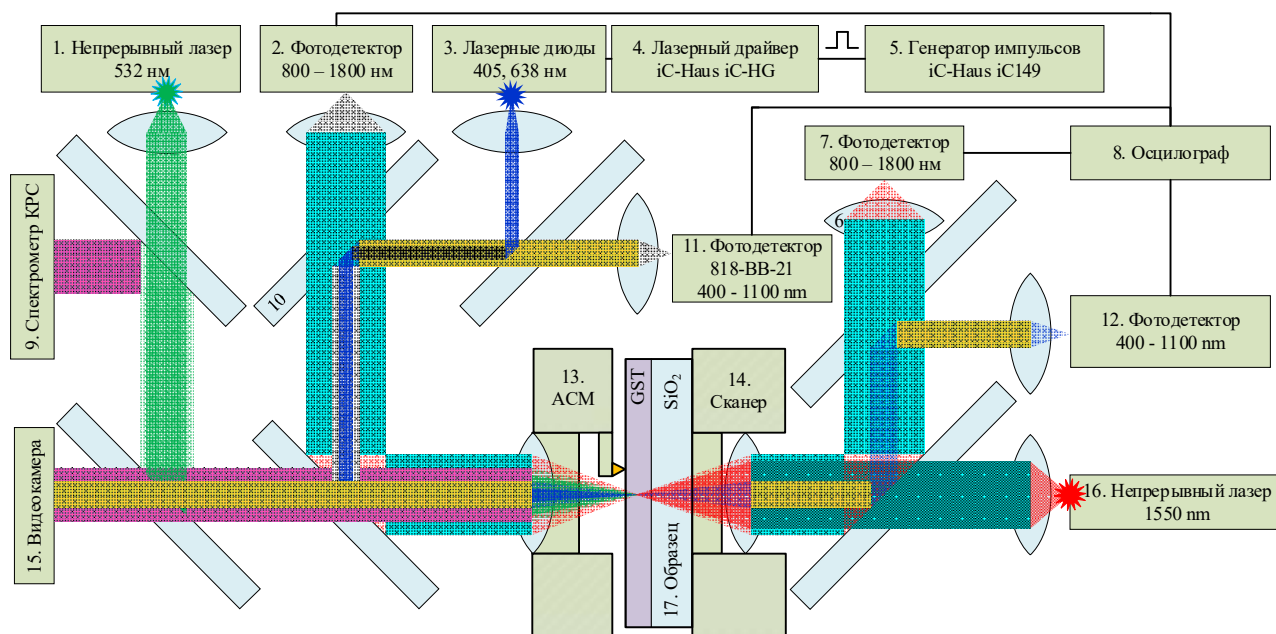


Рис. 1. Схема измерительного макета [5]

Макет состоит из следующих компонентов: 1 - непрерывный лазер с длиной волны 532 нм, 2 - фотодетектор NewPort 818-BB-21, 3 - импульсные лазерные диоды с длиной волны 405 нм (BDR-209, 900 мВт) и 638 нм (USHIO HL63613MG, 700 мВт), 4 - лазерный драйвер iC-Haus iC-HG, 5 - генератор наносекундных импульсов iC-Haus iC149, 6 - оптические линзы, 7 - фотодетектор на диапазон 800 – 1800 нм, 8 - осциллограф, 9 - спектрометр комбинационного рассеяния света (КРС), 10 - дихроичные зеркала, 11 и 12 - фотодетектор на диапазон длин волн 400 – 1100 нм, 13 - атомно-силовой микроскоп, 14 - сканер (система позиционирования образца), 15 - видеокамера, 16 - непрерывный лазер с длиной волны 1550 нм, 17 - образец с пленкой GST. Макет также содержит юстировочные держатели, предназначенные для регулировки оптических путей распространения излучений лазеров 1, 3, 16. Внешний вид (фотография) разработанного макета представлена на рисунке 2.

Измерительный стенд позволяет проводить исследование локальных областей тонкопленочных структур. Мощные импульсные лазерные диоды 3 на 405 нм и 638 нм предназна-

чены для переключения фазового состояния локальных областей GST пленки. Для управления импульсными лазерными диодами используется лазерный драйвер 4, способный выполнять переключение с частотой до 200 МГц при амплитуде подаваемого на лазерный диод тока до 1.5А. Для генерации импульсов используется импульсный генератор 5, способный формировать TTL и LVDS импульсы с длительностью от 1 до 64 нс. С помощью фотодетекторов 11, 12 и 2, 7 на диапазоны длин волн 400 – 1100 нм и 800 – 1800 нм, соответственно, осуществляется контроль интенсивности оптического излучения в соответствующих диапазонах. Фотодетекторы включают в свой состав схемы драйверов управления и лавинные фотодиоды. Фотодетекторы 2 и 11 используются для регулировки длительности и интенсивности импульсов лазерного излучения управляющего лазера с длиной волны 405 нм (638 нм). С помощью непрерывного лазера 1 с длиной волны 532 нм и спектрометра комбинационного рассеяния света (КРС) 9 выполняется контроль фазового состояния в локальных участках пленки GST. С помощью видеокамеры 15 выполняется оптическая микроскопия исследуемой области. Атомно-силовой микроскоп 13 предназначен для исследования морфологии поверхности до и после локальных лазерных воздействий. Непрерывной лазер 16 с длиной волны 1550 нм, лазерные диоды 3 с длиной волны 405 нм и 638 нм также предназначены для проведения исследования оптических характеристик пропускания и отражения в локальной области пленки GST до и после лазерного воздействия с помощью фотодетекторов 2, 7, 11, 12.

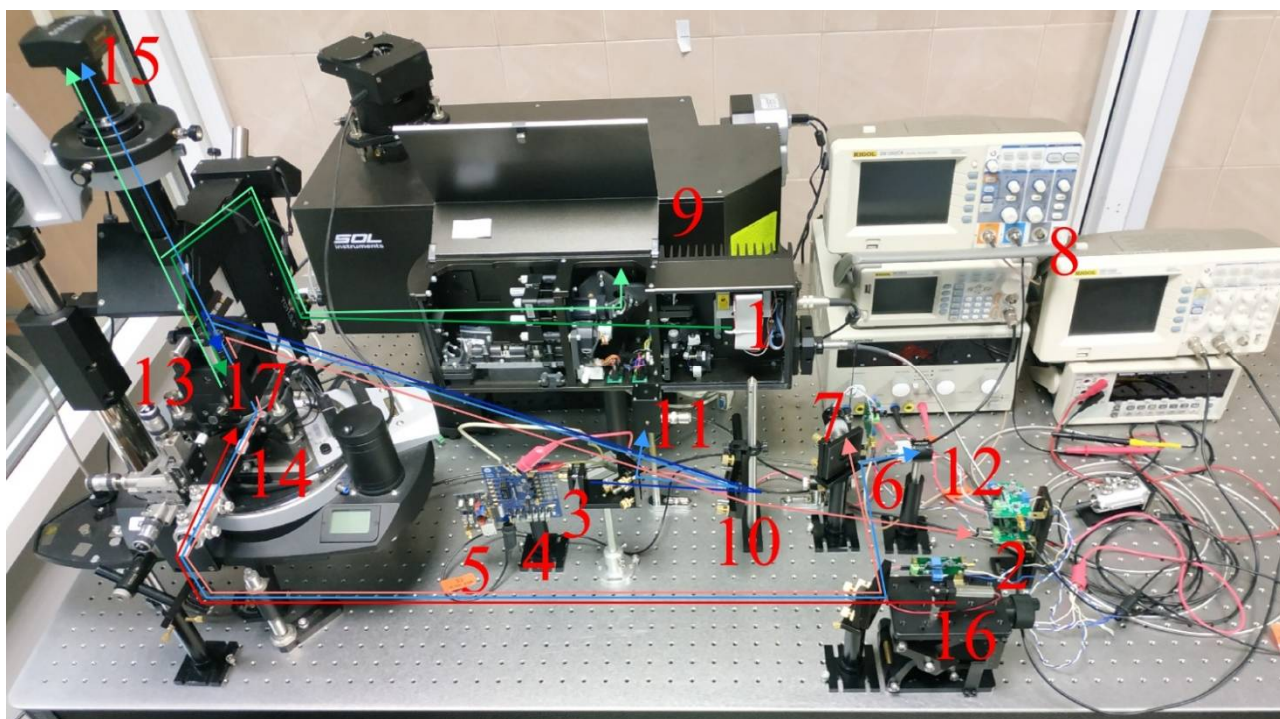


Рис. 2. Внешний вид макета измерительного стенда

Оптическая схема макета, используемая для методов спектрометрии КРС и оптической микроскопии, имеет конфигурацию с падением оптических лучей под прямым углом, что удобно для реализации фотометрии и лазерной модификации в локальных участках пленки GST. Определение комплексного показателя преломления материала GST осуществлялось по результатам фотометрии, полученным с фотодетекторов 2, 7, 11, 12 для прошедшего через образец 17 или отраженного от него излучения.

Таким образом, разработанный и собранный макет измерительного стенда позволяет проводить контроль пропускательной и отражательной способности слоев GST на длине волны 1550 нм в составе многослойной (чередующейся) тонкопленочной структуры [6] при их фазовой модификации оптическим импульсом. Это позволяет проводить экспериментальную проверку теоретических моделей многослойных структур оптических устройств на пленках GST.

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

Библиографический список

1. Dutton H. J. R. Understanding Optical Communications. IBM Redbooks. 1998. Pp. 32-33. URL: <http://www.freeinfosociety.com/media/pdf/5475.pdf> (дата обращения 18.02.20212. Wang X., Kuwahara M., Awazu K., Fons P., Tominaga J., Ohki Y. Proposal of a Grating-Based Optical Reflection Switch using Phase Change Materials // OPTICS EXPRESS. Aug 2009. Vol. 17. No. 19. Pp. 16947-16956. DOI: 10.1364/OE.17.016947
3. Yamada N., Ohno E., Nishiuchi K., Akahira N., Takao M. Rapid-phase transitions of GeTe-Sb₂Te₃ pseudobinary amorphous thin films for an optical disk memory // J. Appl. Phys. 1991. Vol. 69. № 5. Pp. 2849–2856. DOI: 10.1063/1.348620.
4. Loke D., Lee T. H., Wang W. J., Shi L. P., Zhao R., Yeo Y. C., Chong T. C. and Elliott S. R. Breaking the speed limit of phase-change memory // Science. 2012. vol. 336(6088). Pp. 1556–1569. DOI: 10.1126/science.1221561
5. Вишняков Н.В., Вихров С.П., Толкач Н.М. Комплексная локальная диагностика тонкопленочной GST структуры с фазовыми переходами // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 11 (18). С. 80 - 87. DOI: 10.18127/j00338486-201911(18)-11
6. Tolkach N.M., Vishnyakov N. V., Lazarenko P.I., Sherchenkov A.A., Sudakova A.U., Nazimov D.R. Optical switching in multilayer structures based on Ge₂Sb₂Te₅ // J. Phys. Conf. Ser. IOP Publishing. 2020. Vol. 1695. P. 12075. DOI: 10.1088/1742-6596/1695/1/012075

УДК 537.533.35; ГРНТИ 29.29.49

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНОК А-SI:H, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Е.Н. Люфт, Н.В. Рыбина

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

Аннотация. В работе проведено исследование информационно-корреляционных характеристик поверхностей пленок а-Si:H, полученных при различных режимах изготовления.

Ключевые слова: средняя взаимная информация (СВИ), двумерный флуктуационный анализ с исключенным трендом (2D DFA)

INVESTIGATION OF THE INFORMATION-CORRELATION CHARACTERISTICS OF A-SI:H FILMS' SURFACES OBTAINED UNDER DIFFERENT MANUFACTURING MODES

E.N. Luft, N.V. Rybina

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

Abstract: In this paper, the information-correlation characteristics of the a-Si:H films surfaces obtained under different manufacturing modes were investigated.

Keywords: average mutual information, two-dimensional fluctuation analysis with excluded trend (2D DFA)

Аморфный гидрогенизированный кремний a-Si:H является одним из важных материалов в нанoeлектронике из-за возможности использования его в низкотемпературных процессах осаждения, а также его высокопроизводительности и относительно небольшой стоимости. Поэтому одной из самых актуальных задач на сегодня стоит исследование механизмов образования пленок неупорядоченных полупроводников [1].

На данный момент существует большое количество методов оценки особенностей структуры неупорядоченных материалов. Так, например, стала активно развиваться теория самоорганизации относительно неупорядоченных полупроводников. Такой подход позволял оценивать такие характеристики, как средняя взаимная информация (СВИ) и информационная емкость поверхности [2]. Метод средней взаимной информации (СВИ) позволяет выявлять корреляции в материале по построению двумерного распределения СВИ по ненаправленному вектору между точками, характеризующими значение высот рельефа поверхности [1]. В дальнейшем был разработан метод 2D DFA (2D Detrended fluctuation analysis) для исследования корреляционных свойств поверхности по ее изображению. Важным свойством данного метода является наличие четкой шкалы значений скейлингового показателя, которую можно использовать для классификации поверхности. Указанные методы продемонстрировали способность изучения корреляций в структуре неупорядоченных материалов [2].

Целью работы было исследование информационно-корреляционных характеристик поверхности пленок a-Si:H, полученных при различных режимах изготовления.

Экспериментальные образцы

В данной работе использовались изображения поверхности пленок a-Si:H (рис. 1), взятые из [3].

От длины волны и плотности энергий лазерного импульса сильно зависит размер и плотность полученных наноструктур. Как видно, на изображениях (рис.1) присутствуют шарообразные структуры размером в несколько десятков нанометров. При дальнейшем увеличении параметров длины волны и интенсивности излучения происходит рост наноструктур (табл. 1).

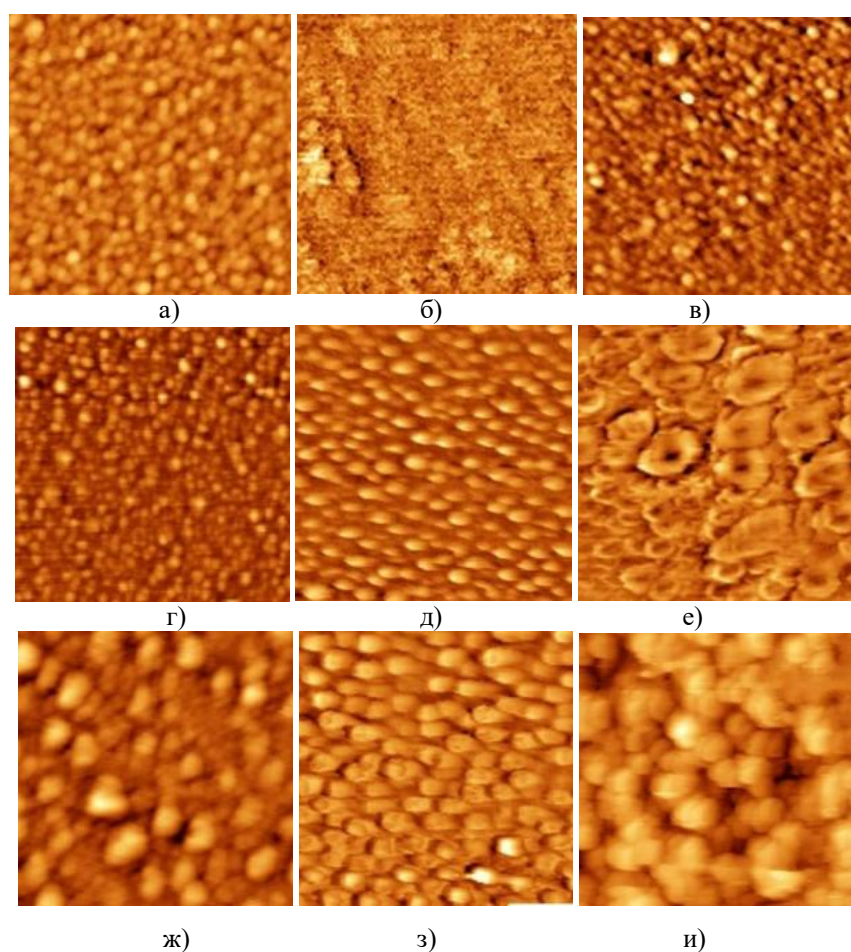


Рис. 1. Снимки АСМ пленок a-Si:H [3]

Таблица 1. Режимы получения образцов [3]

Образец	Длина волны лазера, нм	Плотность энергии лазерных импульсов, мДж/см ²
а	515	3,18
б	640	8,28
в	1030	55
г	515	6,35
д	640	11,46
е	1030	105
ж	515	8,26
з	640	12,74
и	1030	155

Результаты исследования методом СВИ

При помощи программного пакета Chaos, использующегося для обработки изображений были получены средние и максимальные (МВИ) значения взаимной информации. Типовое распределение взаимной информации для пленки a-Si:H показано на рисунке 2.

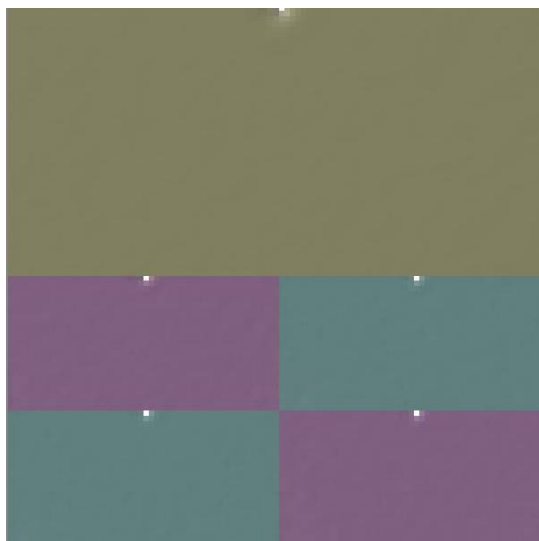


Рис. 2. Пример полученного результата в программе Chaos

Из распределений взаимной информации для каждого образца рассчитывались значения СВИ и максимальной взаимной информации. Далее представлена таблица результатов, полученных методом СВИ, для всех 9 ранее представленных образцов (Табл. 2).

Таблица 2. Результаты вычислений методом СВИ

Образец	МВИ, отн. ед.	СВИ, отн. ед.
а	0.589	0.009
б	0.555	0.006
в	0.591	0.008
г	0.535	0.007
д	0.586	0.009
е	0.578	0.011
ж	0.582	0.022
з	0.564	0.012
и	0.639	0.033

Результаты исследования методом 2D DFA

Для вычислений по методу 2D DFA был использованный программный пакет Matlab. На рис. 3 представлен типовой график зависимости флуктуационной функции от масштаба, полученный методом 2D DFA.

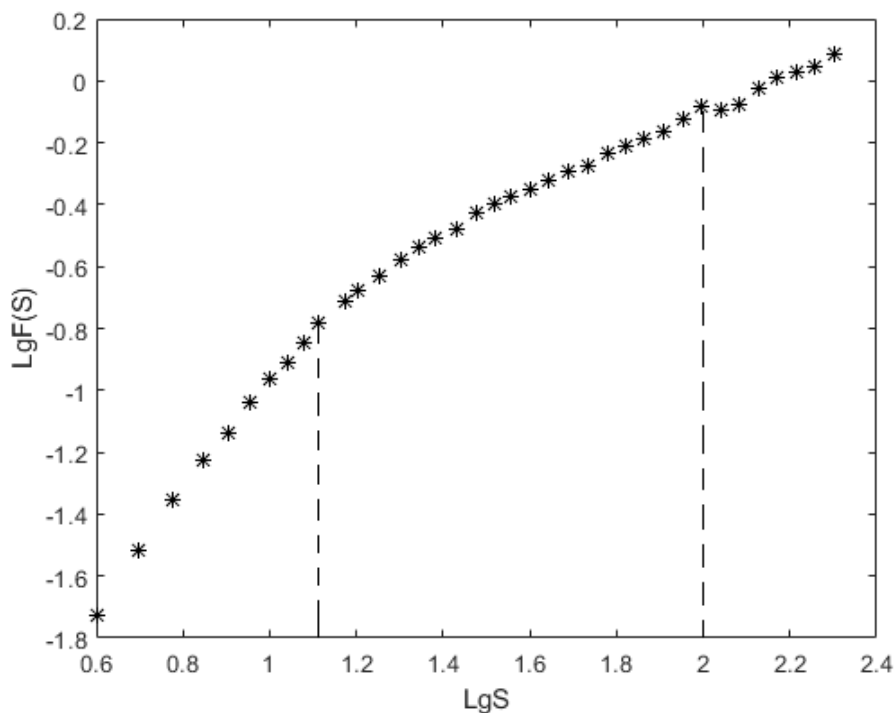


Рис. 3. Пример полученного результата с помощью метода 2D DFA

При помощи данного графика можно получить значения периодов гармонических составляющих в исследованных образцах по перегибам зависимости флуктуационной функции. Например, в 1 образце присутствуют 2 перегиба, расположенных в точках 1.1 и 2 на абсциссе координат.

При помощи формулы $x = \frac{10^b}{a}$, где b – это $\lg S$ в точке перегиба, a – размер изображения (например, в данном случае $a=100$ мкм), были рассчитаны значения корреляционных векторов x (таблица 3).

Таблица 3. Результаты вычислений методом 2D DFA

Номер изображения	b	x, нм
1	1.1, 2	63, 500
2	1.2, 1.9, 2.1	79, 397, 629
3	1.2, 1.5, 1.58, 1.8, 2.1	79, 158, 375, 629
4	1.3, 1.7, 1.9, 2	100, 251, 397, 500
5	1.1, 1.3, 1.9, 2.1	126, 200, 794, 1259
6	1.1, 1.7, 1.78, 1.85, 2, 2.2	63, 251, 301, 354, 500, 629
7	1.2, 1.5, 1.65, 1.7, 2.1	79, 158, 223, 251, 629
8	1.2, 1.5, 1.65	158, 316, 447, 1259
9	1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9	158, 199, 251, 315, 397

Из полученных результатов видно, что в целом для исследованных образцов наблюдается тенденция увеличения значений СВИ и DFA в зависимости от роста плотности импульса лазерного излучения. Также на изображениях присутствуют схожие значения корреляционных векторов, что говорит о наличии схожих корреляций.

Библиографический список:

1. А.В. Алпатов, С.П. Вихров, Н. В. Гришанкина. Выявление корреляций поверхностного интерфейса пленок a-Si:H методом двумерного флуктуационного анализа // Физика и техника полупроводников, т. 47, вып. 3, 2013 г.
2. 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, т. 50, вып. 1, 2016 г. С. 23-29.
3. Хенкин М. В. Электрические, фотоэлектрические и оптические свойства двухфазных пленок гидрогенизированного кремния // 2015 г. С. 101-103.

СЕКЦИЯ «ПРОМЫШЛЕННАЯ СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ»

УДК 574.24:537, ГРНТИ 68.85.15

В.Г. Ляпин, А.Э. Гафиев

*Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева,
Российская Федерация, Москва, Lei130@ngs.ru*

Аннотация. Источники вторичного электропитания являются неотъемлемой частью любой электротехнологической установки. За последние десятилетия номенклатура и функциональные возможности вторичных источников электропитания значительно расширились и существенно изменились. Это вызвано, прежде всего, непрерывным стремлением уменьшить массогабаритные характеристики источника питания, повысить их КПД, использовать современные экономичные импульсные методы регулирования, интегральные микросхемы и т.д.

Ключевые слова: средства электропитания, силовая электроника, источник вторичного электропитания.

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A SECONDARY POWER SUPPLY SOURCE FOR MOBILE ELECTRICAL INSTALLATIONS: PROBLEMS AND PROSPECTS

V.G. Lyapin, A.E. Gafiev

*Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
Russian Federation, Moscow, Lei130@ngs.ru*

The summary. Secondary power sources are an integral part of any electrical engineering installation. Over the past decades, the range and functionality of secondary power supplies has expanded significantly and changed significantly. For mobile electrotechnological installations, this is due to the continuous desire to reduce the weight and size characteristics of the power source, increase their efficiency, use modern economical pulse control methods, integrated circuits, etc.

Keywords: power supply facilities, power electronics, secondary power supply source, mobile electrotechnological installations

1. Краткие замечания

Из-за большого разнообразия видов электротехнологий в научно-технической и патентной литературе встречаются всевозможные мобильные электротехнологические установки (МЭТУ), конфигурации которых зависят от множества факторов: географии применения подобной электротехнологии; почвенно-климатических условий; условий окружающей среды (рельефа, наличия источников электропитания и пр.); производительности основных систем установки и МЭТУ в целом; требований и ограничений, определяемых экологичностью, безопасностью и др. В общем случае МЭТУ представляет собой комплекс устройств и приборов (в электротехнической терминологии комплекс систем, схем и элементов), предназначенных для преобразования энергии электромагнитного поля в обрабатываемой среде с целью получения электротехнологического эффекта κ_m . В учебно-методической и научно-технической литературе МЭТУ представляется в виде трехуровневой иерархической системы (рис. 1, 2)[1-6]: источников первичного электропитания или электрических генераторов (ЭГ), источников вторичного электропитания или электропреобразователей (ЭП) и электродной техники или электродных систем (ЭС) с нагрузкой в виде почвенных и воздушных сред и растительных объектов (РО). Основное назначение системы электропитания (СЭП) МЭТУ состоит в преобразовании входных напряжений и токов, необходимых для работы различных устройств, систем и вспомогательного оборудования. Функциональные устройства СЭП различаются назначением, условиями эксплуатации, видом входной электрической энергии (ЭЭ), способом преобразования ЭЭ, методом регулирования, выходными характеристиками, числом каналов, элементной базой. СЭП является частью электрооборудования и

электроники МЭТУ и классифицируются по области применения, назначению и виду объекта установки. В зависимости от объекта установки различают СЭП подвижной и стационарной аппаратуры.

Развитие СЭП, обеспечивающих ЭЭ ЭС, ОЭМ и БСДУ МЭТУ подчиняются общей тенденции развития ИЭЭ - формирование базы маломощных и мощных (обслуживающих электротехнологические процессы в ЭС и электродную технику) ЭП [2, 4, 5, 7]. Задача синтеза структуры СЭП МЭТУ содержит: выбор принципов построения; распределение функций преобразования ЭЭ и управления электропитанием по уровням иерархии СЭП; определение эффективных взаимосвязей между всеми составляющими структуры СЭП; выбор технических средств, предназначенных для решения основной задачи и осуществления связи в СЭП. При разработке структуры СЭП МЭТУ предварительно определяются ее назначение, критерии эффективности, перечень решаемых ею задач, возможные звенья, предполагаемые технические средства и их характеристики. С точки зрения качества используемой СЭП электрооборудование и электронику МЭТУ можно разделить на две группы с соответствующей организацией: аппаратура, участвующая в обработке и формировании сигналов управления и диагностики - каналы 1, 2 и 3 на рис. 2 (требования к качеству напряжения составляют $\pm 1-2\%$ по допустимой нестабильности, $\pm 0,1-0,2\%$ по переменной составляющей; для выполнения этих требований целесообразно использовать децентрализованные или комбинированные СЭП); аппаратура, не участвующая в обработке и формировании сигналов управления и диагностики, соответственно, не требующая высокого качества СЭП (для такой аппаратуры целесообразно использовать источники импульсного действия).

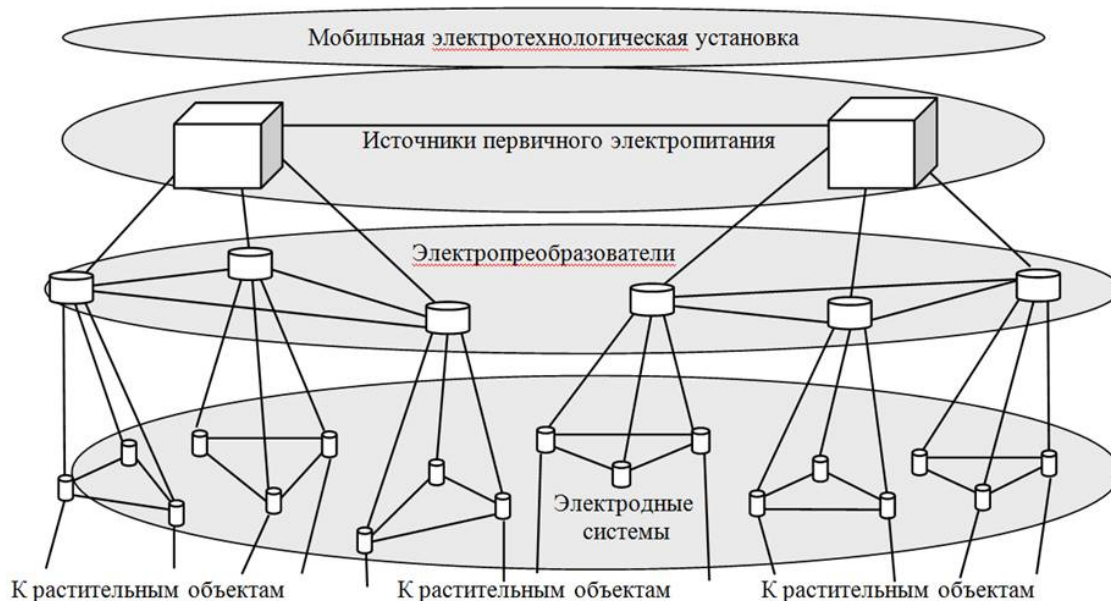


Рис. 1. Иерархическое представление электрической сети МЭТУ

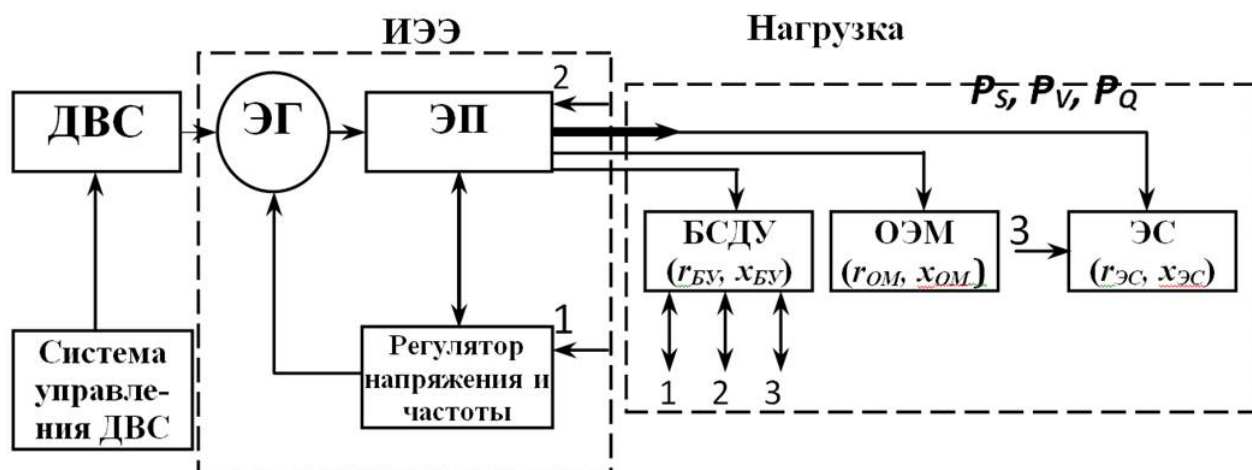


Рис. 2. Структурная схема МЭТУ: ДВС - двигатель внутреннего сгорания; ИЭЭ - источник ЭЭ; ЭГ - электрический генератор; ЭП - электропреобразователь; БСДУ - блок сигнализации, диагностики и управления; ОЭМ - отбор электрической мощности; ЭС - электродная система

В составе аппаратуры СЭП электродной техники МЭТУ является согласующим звеном между нагрузкой (РО, почвенными и воздушными средами) и ЭГ, обеспечивая ряд номиналов напряжений и мощностей, компенсируя отклонение выходных параметров СЭП под действием влияющих факторов. Требования к показателям СЭП МЭТУ вытекают из требований к данной аппаратуре в целом. В процессе проектирования МЭТУ система электропитания (ЭГ) не поддается изменениям, варьируются параметры СЭП и всей нагрузки. В МЭТУ СЭП различного функционального назначения имеют отличия по принципу построения, элементной базе, конструкции и технологии входящих в них функциональных устройств. При оптимизации СЭП МЭТУ выбор параметров, элементной базы, тепловых режимов проводится по основному критерию – комплексному показателю качества, а решение задачи оптимизации СЭП включает: составление исходных данных, их анализ и принятие решения; расчет экономических показателей на ранних стадиях проектирования и сравнение с установленными на них ограничениями; расчет показателя качества для выбранного решения и сравнение его с аналогичными показателями для других решений.

В МЭТУ каждый потребитель ЭЭ (БСДУ, ОЭМ, ЭС) имеет собственные характеристики, особенности работы, предъявляет к СЭП специфические требования, поэтому необходимо регулировать напряжения, подаваемые на ЭС, системы электрооборудования и электроники с целью оптимизации эксплуатационных характеристик с помощью адаптивных импульсных ИЭЭ. Построение электрооборудования электроники МЭТУ состоит в теоретическом обосновании необходимых для получения рациональных характеристик электрооборудования закономерностей изменения подаваемых напряжений, разработке и исследовании адаптивных импульсных ЭП параметров ЭЭ, реализующих полученные закономерности, и базируется на следующих принципах: напряжение ЭГ рассматривается как исходное значение для преобразования в большую или меньшую величину практически без потерь ЭЭ; на основе анализа специфики работы каждого потребителя вырабатываются требования к величине и закономерностям изменения в зависимости от режима эксплуатации подаваемого напряжения и потребляемой ЭЭ; на базе выявленных требований разрабатываются адаптивные СЭП на основе управляемых по параметрам объекта регулирования импульсных адаптивных ИЭЭ, преобразующих напряжение ЭГ в необходимое для каждого потребителя или их комбинации.

Анализ состояния и направлений развития СЭП МЭТУ

В МЭТУ [1] используются следующие первичные ИЭЭ: трехфазного переменного тока постоянной частоты 50, 200, 400 Гц низкого **напряжения** $U_{л}/U_{ф}=380/220$ В; трехфазного переменного тока переменной частоты. Во вторичных ИЭЭ генерируется ЭЭ трехфазного переменного тока низкой (50 Гц) или повышенной (0,2-10 кГц) частоты повышенного или среднего напряжения (6-35 кВ) и трехфазного переменного тока постоянной частоты (50 Гц) пониженного напряжения (5-36 В) с последующим выпрямлением. Достоинствами систем постоянного тока в МЭТУ являются высокая безопасность обслуживания, простота аппаратуры регулирования и защиты и управления. СЭП МЭТУ переменного тока имеют положительные качества:

- меньшая удельная масса первичной (6–7,5 кг/кВА) и вторичной (20–25 кг/кВА) СЭП переменного тока по сравнению с СЭП постоянного тока (14–16 кг/кВА и 50–60 кг/кВА соответственно);
- простота преобразования переменного тока в постоянный и переменный ток другого уровня напряжения;
- более высокая надежность, чем в СЭП постоянного тока при работе в условиях АПК и др. отраслей; отсутствие коррозии мест крепления проводников к корпусу МЭТУ.

К недостаткам следует отнести трудности получения постоянной частоты, более сложная организация параллельной работы, системы передачи и распределения ЭЭ, а также аппаратура регулирования, защиты и управления. Основные требования, предъявляемые к СЭП МЭТУ, являются такими же, как и для всех систем электрооборудования и электроники: минимальная масса, низкая стоимость и небольшие эксплуатационные расходы, высокая надежность и живучесть, максимальная стандартизация и унификация, электромагнитная совместимость с другим электрооборудованием, безопасность обслуживания и др.

Для потребителей ЭЭ МЭТУ [1] расходуется суммарная мощность до 5-10 кВт/м ширины захвата ЭС. Наиболее энергоёмкими потребителями ЭЭ являются ЭС, электропривода в системах управления электродной техникой и электронное оборудование, излучающее электромагнитную энергию в пространство. Анализ тенденций развития СЭП МЭТУ показывает, что основными типами первичных ИЭЭ по-прежнему останутся системы трёхфазного переменного тока 380/220 В, 50 и 400 Гц. ИЭЭ в таких системах будут бесконтактные ЭГ, объединенные в одной конструкции с гидромеханическими приводами. Достижения в области электромашиностроения и силовых электронных преобразователей [2, 7] делают перспективным применение в МЭТУ ЭП низких частот в повышенные и низкого напряжения в высоковольтное. В качестве преимуществ СЭП постоянного тока повышенного напряжения над системами переменного тока можно выделить:

- снижение общей массы СЭП на 25%; снижение массы электронных (цифровых) устройств контроля и управления на 40%;
- улучшение качества ЭЭ (в частности на переходных режимах и для БСДУ);
- повышение КПД системы на 15%;
- исключение перерывов в питании; повышенный уровень безопасности обслуживания персонала.

В качестве альтернативы системе постоянного тока может рассматриваться СЭП переменного тока плавающей частоты с возможностью использования "некондиционной" ЭЭ для питания ЭС. Обеспечение заданной надежности и электробезопасности с одновременным разрешением проблемы согласования характеристик источников и приемников ЭЭ МЭТУ требует, чтобы их СЭП выполнялись многоканальными с определенной избыточностью мощности, с независимым функционированием каналов и наличием резервного канала достаточной мощности. При этом должны быть использованы цифровые системы управления СЭП и ЭС бортовыми микропроцессорами и мультиплексной передачей информации.

В основе любой СЭП МЭТУ лежит источник электропитания, который может быть линейным или импульсным. Известно [2, 7], что линейные источники имеют преимущества: простота, низкие выходные пульсации и шум, высокие значения стабильности по напряжению и току, быстрое время восстановления, главным их недостатком является невысокий КПД. Этот недостаток ограничивает область применения относительно небольшими мощностями. Схемотехника подобных устройств известна [7] и в данной работе не рассматривается. Рассматриваемые импульсные вторичные источники питания по типу входного и выходного напряжений разделяют на ЭП [2, 7]:

- переменный ток – переменный ток (AC/AC-конвертеры);
- переменный ток – постоянный ток (AC/DC); постоянного напряжения (DC/DC);
- постоянный ток – переменный ток (DC/AC).

В качестве AC/AC-конвертера может использоваться любой двухтактный импульсный ЭП. К ним относятся электронные трансформаторы, преобразующие напряжение сети низкой частоты в нестабилизированное переменное напряжение для питания ЭС МЭТУ. Импульсные ЭП выпрямляют и фильтруют напряжение переменного тока без использования первичного трансформатора. Полученный в результате этого постоянный ток коммутируется мощным ключом, затем преобразуется высокочастотным высоковольтным трансформатором и может выпрямляться и фильтроваться. Из-за высокой частоты переключения, которая составляет до 1 МГц, трансформатор и конденсаторы фильтров имеют меньшие размеры, чем их эквиваленты для низкой частоты. КПД импульсных ЭП может достигать 98%. Индуктивные ЭП без гальванической развязки обладают повышенным КПД и перспективны для создания электронных устройств МЭТУ.

В сфере ЭП, можно выделить следующие основные направления и перспективы развития СЭП МЭТУ:

- увеличение КПД;
- уменьшение массогабаритов;
- стандартизация по конструкции и выходным параметрам; обеспечение требуемого качества ЭЭ;
- формирование управляемых ЭП, являющихся звеном сложных и мощных энергоемких электротехнологических процессов;
- увеличение в ЭП схемотехнических решений, оптимизированных для определенных электротехнологических процессов и электрооборудования.

Увеличение КПД

Данное направление является одним из актуальных для мощных ЭП, так как этот вопрос напрямую связан с отводом тепла, создаваемого в самом ЭП. В этом случае, с увеличением КПД даже на 1%, мы получаем существенное облегчение температурному режиму работы силовых элементов СЭП. Возрастание КПД источников в наше время получается благодаря плавному переходу от устаревшей, несовершенной схемотехники, в фундаменте которых используются в качестве силовых элементов тиристоры, к современной схемотехнике, основанной на высокочастотном импульсном преобразовании ЭЭ с ЧИМ-ШИМ управлением, а также за счет своевременного обновления элементной базы. В этом случае КПД ЭП может достигать порядка 99%. Мощные импульсные ЭП МЭТУ имеют КПД существенно меньший от прогнозируемого. Это происходит потому, что максимальные КПД можно достичь только для какого-то конкретного значения нагрузки (РО, почвенных и воздушных сред в ЭС), внешних условий окружающей среды, параметров первичного ИЭЭ.

Уменьшение массогабаритных характеристик

Развитие данного направления ЭП в последние десятилетия связано с переходом на современную импульсную схемотехнику, формированием элементной базы ЭП и, соответственно, эффективного использования в ЭП частоты преобразования от 10 кГц до 1 МГц. Такое решение позволяет уменьшить габаритные размеры ЭП и существенно уменьшить их массу. Для примера можно сравнить тиристорные выпрямители и импульсные ЭП одинаковой мощности без учета потерь на теплоту [7]: конструкционный объем ЭП на единицу вырабатываемой мощности – 4кВт/дм³, масса конструкции ЭП на единицу вырабатываемой мощности – 4кВт/кг. Дальнейшая минимизация габаритов ЭП представляется проблематичной, так как их КПД не может быть близким к идеалу, а тепло, выделяющееся на силовых элементах ЭП, следует отводить. Чем меньше геометрические габариты ЭП, тем труднее такую процедуру осуществить. Совершенствование известных методов отвода тепла, используя для этого радиаторы или водяное охлаждение не поможет существенно уменьшить габариты ЭП МЭТУ.

Увеличению надежности работы ЭП способствует работа его элементов при малых нагрузках. Считается, что самым оптимальным является выбор численного значения коэффициента нагрузки схемного элемента в интервале от 0,5 до 0,8. Все это отражается на схемотехнике ЭП и, соответственно, влияет на его габариты и массу. Необходимо предусмотреть защиту СЭП МЭТУ от воздействия непредвиденных ситуаций (резкие скачки и кратковременные падения напряжения в первичном ИЭЭ, обрывы и короткие замыкания в нагрузке, электромагнитные помехи в сети и т.п.) [1]. Обрыв в нагрузке для мощных СЭП более опасен, чем короткие замыкания. В учебной и исследовательской работе практикуются [2] так называемые «интеллектуальные» СЭП, встроенные в автоматизированные системы и управляемые через контроллер или непосредственно персональным компьютером. Такое применение ЭП предлагает дополнительные требования к надежности его системы управления: высокая помехозащищенность линии связи и стабильная работа программного обеспечения в условиях больших электрических помех, скачков напряжения ИЭЭ и его перебоев. Для надежной передачи сигнала управления используют интерфейс RS-485 с соответствующим кабелем, характеризующийся хорошими особенностями помехоподавления.

Библиографический список

1. Ляпин, В.Г. Оборудование и энергосберегающая электротехнология борьбы с нежелательной растительностью/В.Г. Ляпин; Новосиб. гос. аграр. ун-т. – 2-е изд. перераб. и доп. - Новосибирск, 2012. – 366 с.
2. Ляпин, В.Г. Электропитание устройств и систем. Учебное пособие в трёх частях. Часть 1. Лекции по теории цепей и электронных преобразователей/В.Г. Ляпин, Г.С. Зиновьев, А.В. Соболев. – Химки: ФГБВОУ ВО АГЗ МЧС России, 2016. – 220 с.
3. Гафиев, А.Э. Электронизация мобильных электротехнологических машин и установок электрического повреждения нежелательной растительности/А.Э. Гафиев, В.Г. Ляпин, М.М. Прокофьев, В.К. Куликов//Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы – Биомедсистемы-2020 [текст]: сб. тр. XXXIII Всерос. науч.-техн. конф. студ., мол. ученых и спец., 9-11 декабря 2020 г. / под общ. ред. В.И. Жулева. – Рязань: ИП Коняхин А.В. (Book Jet), 2020. – С. 51-55.
4. Ляпин, В.Г. Принципы проектирования электропреобразователей мобильных электротехнологических машин/В.Г. Ляпин, М.М. Мартынов//Доклады ТСХА: Сборник статей. Вып. 290. Ч. II. - М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2018. - С. 189-191.
5. Ляпин, В.Г. Принципы проектирования электродных систем и электропреобразователей мобильных электротехнологических машин/В.Г. Ляпин, М.М. Мартынов, Д.В. Морокин//Инновации в сельском хозяйстве, 2018, №2. – С. 84-90.
6. Ляпин, В.Г. Развитие средств моделирования источников электропитания для инфокоммуникаций и электротехнологий/В.Г. Ляпин, И.И. Зотов//Предупреждение. Спасение. Помощь. Сб. материалов XXVII Междунар. науч.-практ. конф., 16 марта 2017 г. Секция 18. Направления развития инфокоммуникационных технологий и систем оповещения РСЧС и ГО. – Химки: ФГБВОУ ВО АГЗ МЧС России, 2017. – С. 43-46.
7. Зиновьев, Г.С. Силовая электроника: учебное пособие для бакалавров/Г.С. Зиновьев. - 5-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2015. - 667 с.

УДК 616-073.753; ГРНТИ 47.29.39

РАЗРАБОТКА ДЕТЕКТОРА РЕНТГЕНОВСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А.А. Аппоротов, Е.Ю. Грачев, С.В. Евстифеева, А.А. Трубицын

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, svetamaymay23@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрен процесс определения параметров и построение САД модели детектора рентгеновских изображений.

Ключевые слова: детектор, рентгенография, рентгеновские изображения, САД модель, сцинтиллятор.

DEVELOPMENT OF AN X-RAY IMAGE DETECTOR

A.A. Apporotov, E.Yu. Grachev, S.V. Evstifeeva, A.A. Trubitsyn

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, svetamaymay23@yandex.ru

The summary. The process of determining the parameters and constructing a CAD model of an X-ray image detector is considered.

Keywords: detector, radiography, X-ray images, CAD model, scintillator.

Введение

На сегодняшний день цифровая рентгенография является одним из наиболее популярных методов исследования внутренней структуры объектов. Получение изображений в цифровом виде дает возможность эффективного применения современных информационных технологий для обработки единичных рентгеновских снимков и восстановления трехмерной структуры исследуемых объектов (рентгеновская компьютерная томография).

Наиболее распространенными на сегодняшний день являются детекторы непрямого преобразования (indirectconversion). Такие детекторы состоят из сцинтиллятора и устройства считывания изображения – CCD, CMOS или TFT матрицы. Использование крупноформатных CMOS матриц или объединение небольших в массив позволяет создавать детекторы (Digital Detector Arrays, Flat Panel Detectors) с диагональю рабочей области от одного до нескольких десятков дюймов. Рабочая область такого детектора покрывается сцинтилляционным экраном необходимого размера. Миниатюрные цифровые детекторы изготавливают на основе CCD и CMOS матриц с размером диагонали до 1 дюйма.

Определение параметров САД модели детектора рентгеновских изображений

Перед разработкой компьютерной модели было проведено экспериментальное макетирование для определения основных размеров конструкции детектора. Макетирование производилось без сцинтиллятора в оптическом диапазоне.

На первом этапе макетирования камера закреплялась на подвижном основании из жесткого конструкционного профиля (рис. 1). Перед камерой помещался тестовый образец типа USAF-1951, представляющий собой нанесенные черной краской на белом фоне шесть групп элементов с шестью элементами в каждой. Единичный элемент состоит из чередующихся вертикальных и горизонтальных черных полос, разделенных белыми полосами. Все группы и элементы имеют нумерацию. По мере увеличения номера группы и номера элемента уменьшается ширина черных полос и расстояние между ними. Вариирование расстояния между тестовым образцом и камерой позволило выявить положение, при котором хорошо различимы элементы первой группы пятого элемента. Данный результат соответствует разрешению в 157.5 мкм и совпадает с рассчитанным предельным размером пиксела в 80 мкм. Расстояние, при котором было получено максимальное разрешение, составило 180 мм. Данное значение отличается от использованного при расчетах фокусного расстояния, так как ис-

пользуемый объектив имеет фокусное расстояние 12 мм, отличающееся от рассчитанного – 7 мм.

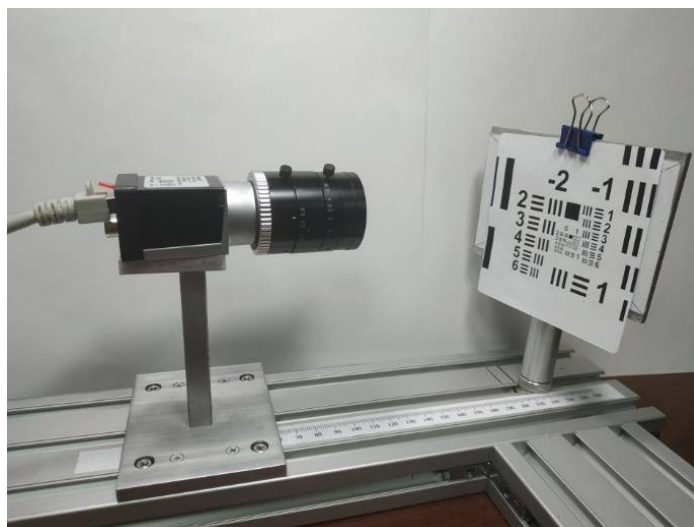


Рис. 1 Стенд для определения рабочего расстояния камеры и разрешения системы в оптическом диапазоне

Далее, с учетом определенных расстояний и сформированных ранее требований, спроектирован и изготовлен методом трехмерной печати экспериментальный прототип детектора (рис. 2), позволивший определить положение зеркала относительно камеры и входного окна детектора, положение камеры по высоте, а также уточнить размеры зеркала.



Рис. 2. Прототип разрабатываемого детектора рентгеновских изображений

Конструкция прототипа включает в себя два элемента - корпус и опорную площадку для крепления камеры. Для определения оптимального положения опорная площадка камеры перемещается по вертикали. Внутри корпуса устанавливается опорная призма для крепления зеркала. При изменении положения призмы с зеркалом меняется расстояние между объективом и входным окном детектора. Сверху корпус закрывается крышкой с входным окном 100 мм x 100 мм. На входное окно помещается тестовый образец.

При поиске оптимальных расстояний изменением положения призмы было выставлено начальное значение рабочего расстояния 180 мм, затем перемещением камеры по верти-

кали, было найдено такое положение, при котором все входное окно попало в поле видимости камеры, а ось объектива оказалась как можно ближе к середине зеркала.

Для определения размеров зеркала на стеклянную подложку последовательно закреплялись единичные зеркальные сегменты с размерами 10x25 мм. Постепенным увеличением общей площади зеркальной поверхности и смещением положений камеры и призмы было получено минимальное значение зеркальной поверхности 100 мм x 75 мм. При меньших значениях поверхности происходит обрезание рабочей области вследствие ограничений угла апертуры объектива.

Уточненное оптимальное рабочее расстояние составило 178 мм.

Разработка CAD модели детектора рентгеновских изображений

С использованием уточненных положений зеркала и камеры в среде SolidWorks была спроектирована трехмерная компьютерная модель детектора.

Единым основанием детектора служит пластина, имеющая опорные плоскости для размещения площадки крепления камеры и призмы для зеркала (рис. 3). При изготовлении основания обработка опорных плоскостей производится за одну установку на станке (в одной системе координат), что позволяет достичь их высокой параллельности и плоскостности [1].

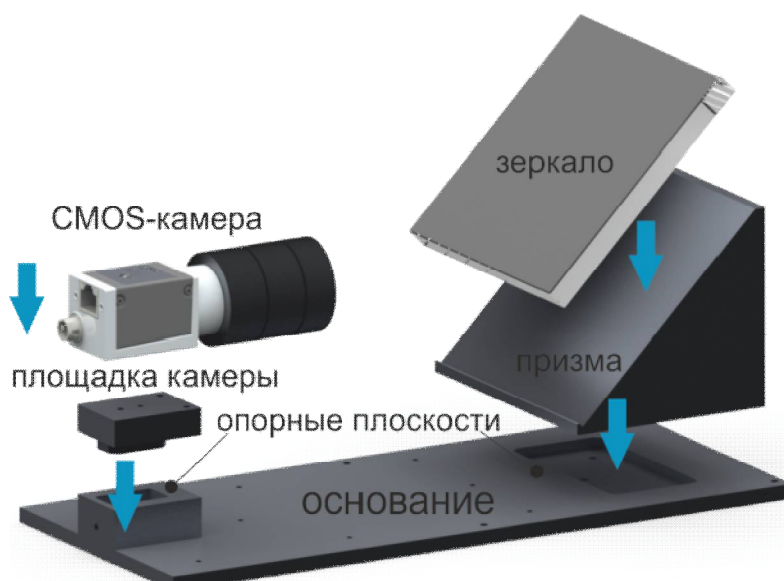


Рис. 3. Способы крепления камеры и зеркала в макете детектора

Предложенный способ изготовления основания, заключающийся в разделении опорной площадки камеры и основания на две разные детали, позволяет корректировать положение камеры, оставляя без изменений основание всего детектора [2].

Площадка крепления камеры и призма зеркала имеют специальные выступы, которые помещаются в ответные полости на основании. Для получения высокой точности размещения в процессе проектирования для групп сопрягаемых размеров была определена посадка с зазором в 50 мкм.

Входное окно детектора состоит из опорной рамки и сцинтилляционного экрана с размерами, соответствующими требованиям к рабочей области детектора (рис. 4). Рамка имеет специальную нишу, в которую закладывается сцинтилляционный экран, который затем прижимается листом карбона. Рамка с экраном и листом карбона размещается на корпусе после крепления зеркала на четырех стойках-опорах.

Лист карбона выполняет дополнительные функции защиты сцинтиллятора от механических повреждений и устранения паразитной засветки рабочего объема рентгеновского детектора сквозь входное окно. Вследствие малого коэффициента поглощения рентгена углеродом защита не оказывает существенного ослабления рентгеновского излучения и не уменьшает чувствительность детектора [3].

После крепления всех компонентов: CMOS-камеры, зеркала и входного окна камера закрывается защитным корпусом. Корпус защищает все элементы детектора от механических повреждений, предотвращает попадание пыли на поверхность зеркала и линзы объектива, изолирует камеру от внешних источников света.

Торцевые стороны детектора закрываются крышками. С целью предотвращения воздействия рассеянного рентгеновского излучения на компоненты детектора по внутреннему контуру на корпус монтируется защита из свинца. Трехмерная CAD модель детектора в сборе приведена на рисунке 5.

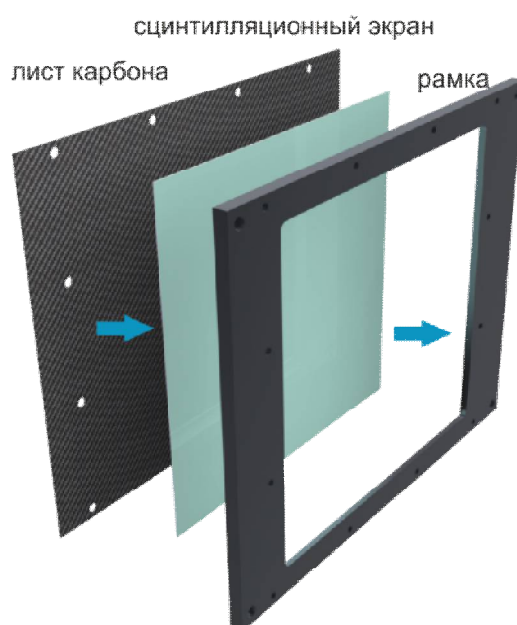


Рис. 4. Структура входного окна детектора

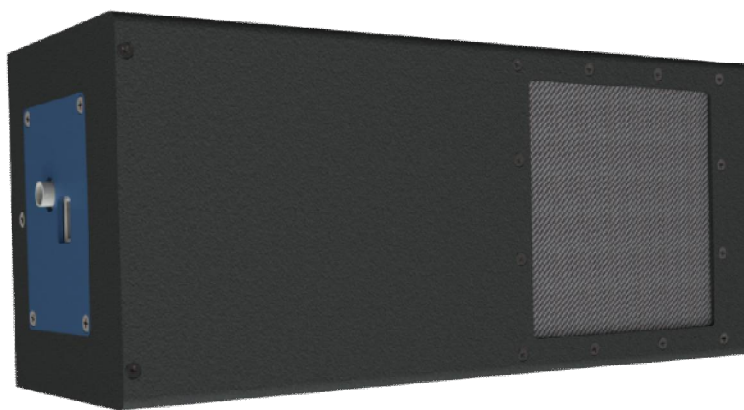


Рис. 5. 3DCAD модель детектора рентгеновских изображений

Спроектированный детектор имеет габаритные размеры 290x105x125 мм. Размер рабочей области составляет 100 мм x100 мм.

Заключение

В результате разработки детектора рентгеновских изображений были получены следующие результаты:

- построена САД-модель системы визуализации (рентгеновского детектора) и разработана соответствующая эскизная конструкторская документация;
- изготовлены узлы детектора, произведена их сборка и настройка собранного макета устройства;
- разработано программное обеспечение управления цифровой системой визуализации;
- проведены испытания и определены характеристики (размер рабочей области 100 мм x 100 мм, пространственное разрешение – 160 мкм) разработанной цифровой системы визуализации рентгеновских изображений;

Библиографический список

1. Behling, Rolf. Modern Diagnostic X-Ray Sources, Technology, Manufacturing, Reliability. Boca Raton, FL, USA: Taylor and Francis, CRC Press, 2015.
2. Ободовский А.В. Разработка и исследование технических средств микрофокусной рентгеновской томографии. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)». С.-Петербург, 2018, 135 с.
3. French standard NFE 01-010, Mechatronics Vocabulary, 2008.

УДК 620.92; ГРНТИ 44.01.11

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЦИФРОВИЗАЦИИ

Е.С. Барина, А.В. Воронов, М.Н. Махмудов, Е.Р. Федорова

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань evgeshka_barinova2706@mail.ru*

Аннотация. В данной статье представлены возможные перспективы развития электроэнергетики в процессе цифровой трансформации. Поставлен ряд задач по оптимизации системы энергоснабжения, перечислены основные проблемы, имеющие место в настоящее время, даны основные понятия и принципы цифровой трансформации.

Ключевые слова: цифровизация, цифровая трансформация, электросетевая инфраструктура, электроснабжение.

DIGITAL TRANSFORMATION OF ELECTRIC POWER ENGINEERING. BASIC CONCEPTS, GOALS, TASKS AND BASIC DIRECTIONS OF DIGITALIZATION

E.S. Barinova, A.V. Voronov, M.N. Mahmudov, E.R. Fedorova

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, evgeshka_barinova2706@mail.ru*

The summary. The article presents possible prospects for the development of the electric power industry in the process of digital transformation. It was asked to optimize the energy supply system, the main problems that arise today, and the digital principles of transformation.

Key words: digitalization, digital transformation, power grid infrastructure, power supply.

В настоящее время энергетика является одним из основных факторов устойчивого развития общества. Взаимодействуя с цифровизацией, она определяет условия жизнедеятельности цивилизации как «большой энергоинформационной системы» [1,2].

Несмотря на значительно большое число неоднозначно сформулированных определений, можно четко выявить, как будет влиять на развитие энергетических систем общемировой тренд перевода информационной части систем управления и связи на цифровую форму обработки и использования [4].

Цифровая трансформация позволит повысить надежность, качество, производительность, доступность оказания услуг в плане передачи электроэнергии и технологического снабжения ею потребителей. К примеру, одним из решений цифровизации для повышения качества электроэнергии стало применение систем накопления энергии (СНЭ) на воздушных линиях (рис.1). Также цифровая трансформация даст возможность сформировать новую инфраструктуру для усовершенствования процесса передачи электроэнергии между субъектами до максимально эффективного значения. Помимо этого, цифровая трансформация сможет обеспечить развитие конкурентных рынков сопутствующих услуг [3,5].



Рис. 3. Вариант применения СНЭ на ВЛ 0,4 кВ для поддержания качества электроэнергии

Цель цифровой трансформации состоит в изменении логики процессов и переходе компании на риск-ориентированное регулирование на основе анализа больших данных и внедрения цифровых технологий для полного преобразования энергетической электросетевой инфраструктуры. Данный переход вызовет положительные эффекты для электроэнергетики (рис. 2).

Задачи использования цифровой трансформации состоят в следующем:

1. Готовность компании адаптироваться к новым задачам и вызовам.
2. Улучшение надежности в электроснабжении потребителей.
3. Повышение эффективности работы компании.
4. Повышение доступности электросетевой инфраструктуры.
5. Развитие потенциала и квалификации кадров и новых компетенций.
6. Диверсификация бизнеса компании с помощью дополнительных сервисов.



Рис. 4. Реконструкция ПС 110/10 кВ по технологии цифровых подстанций

Основные принципы цифровой трансформации:

в рамках компании:

- снабжение наблюдаемостью объектов сети и режимов их работы;
- обеспечение автоматического управления информационными (технологическими и корпоративными) процессами, что одновременно является ожиданием потребителей и возможностью цифровизации (рис. 3);

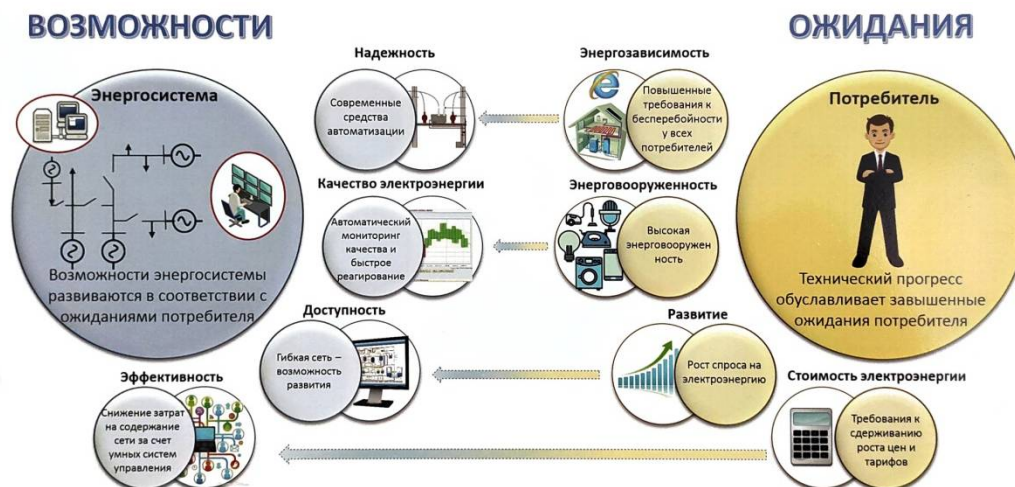


Рис. 5. Энергосистема завтра (как должно быть)

- использование принципов автоматизированного риск-ориентированного регулирования;
 - формирование цифровой СИМ-модели по единому отраслевому стандарту и информационное взаимодействие со всеми субъектами электроэнергетики (сети, потребители и т.п.);
 - интеграция и объединение различных ИТ-систем на иерархических уровнях;
 - интеграция сетевых информационных систем;
- в отношении регулируемых видов деятельности компании:*
- обеспечение уменьшения потерь электрической энергии;
 - снижение капитальных и операционных расходов;

- уменьшение времени технологического присоединения;
- увеличение надежности снабжения электричеством клиентов;
- организация более тщательного наблюдения за деятельностью компании;
- сдерживание скорости роста тарифов;

в отношении контура взаимодействия с другими субъектами:

- формирование доступной, безошибочной, простой и контролируемой системы интеллектуального коммерческого учета электрической энергии путем замены устройств учета на новые, более точные и удобные (рис. 4);



1446 точек учета с дистанционным опросом

Рис. 4. Интеллектуальный учет и передача параметров сети

- формирование инфраструктуры для несложного и результативного взаимодействия с потребителями (управление нагрузкой, распределение генерации);
- предоставление возможности автоматизации контрактных отношений в разделе предоставления сервиса по передаче, технологическому слиянию и т.д.;

в отношении развития новых нерегулируемых услуг:

- создание абсолютно новой инфраструктуры при стремлении к понятному, действенному и легко изменяющемуся процессу обмена энергией между всеми членами рынка, имеющими интерес, с низкой транзакционной себестоимостью.

Главными причинами для цифровизации является:

- быстрый рост расценок для конечного потребителя электроэнергии;
- износ сетевой инфраструктуры;
- существование избытка сетевого строительства.

Выполнение задач, поставленных перед электроэнергетикой возможно качественно организовать путем эволюции с использованием современных технологий и решений, с помощью полного перехода к цифровым сетям, цифровому управлению компанией, цифровым подстанциям. К тому же, выполнение вышеизложенных задач дает возможность перехода к новым сервисам, таким как создание меню тарифов, введение малой распределенной генерации, формирование инфраструктуры для электрических заправок и т. п.

Цифровизация даст возможность повысить качество энергобезопасности регионов России с помощью создания современных инфраструктурных возможностей и повысить качество жизни населения, за счет нового стандартного обслуживания.

Библиографический список

1. Цифровая энергетика: новая парадигма функционирования и развития под ред. Н. Д. Рогалева. – М.: Издательство МЭИ, 2019. – 300 с.
2. Цифровизация цивилизации как «большой энергоинформационной системы», Бушуев В. В., д.т.н., профессор, Генеральный директор института энергетической стратегии.
3. Халин, В. Г. Цифровизация и ее влияние на российскую экономику и общества: преимущества, вызовы, угрозы и риски / В.Г. Халин, Г.В. Чернова // Управленческое консультирование. – № 10. – 2018.
4. Цифровизация и управление в распределенных энергетических системах с ВИЭ (Тягунов М.Г., д.т.н., профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии МЭИ, академик Академии электротехнических наук РФ)
5. Концепция Цифровая трансформация 2030, Москва 2018.

УДК 621.311.426; ГРНТИ 44.29.33

МОДЕРНИЗАЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ 6-10/0,4 КВ

М.В. Графчикова

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

Аннотация. Рассмотрим необходимость применения современного оборудования при реконструкции существующей трансформаторной подстанции 6-10/0,4 кВ с двумя силовыми трансформаторами для обеспечения надежного электроснабжения в соответствии с предъявляемыми требованиями.

Ключевые слова: электроснабжение, электроэнергетика, реконструкция, трансформаторная подстанция.

MODERNIZATION OF TRANSFORMER SUBSTATIONS 6-10/0,4 KV

M.V. Grafchikova

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

The summary. We will consider necessity of application of the modern equipment at reconstruction of existing transformer substation 6-10/0,4 kV with two power transformers for maintenance of a reliable electrical supply according to shown requirements.

Keywords: an electrical supply, electric power industry, reconstruction, transformer substation

Потребители электроэнергии и владельцы электроустановок должны обеспечивать содержание электроустановок в работоспособном состоянии и их эксплуатацию в соответствии с нормативно-технических документами [1], своевременно и качественно проводить техническое обслуживание, планово-предупредительные ремонты, испытания, модернизацию и реконструкцию электроустановок и электрооборудования.

Значительная часть трансформаторных подстанций, находящихся в городах, была построена и введена в эксплуатацию в 70-х годах 20-го века, и на настоящий момент нуждается в усовершенствовании и реконструкции потому, что оборудование на физическом уровне изношено и морально устарело. Ситуация отягощается и тем, что оборудование год от года все больше изнашивается. Средняя изношенность активной части силовых трансформаторов составляет 86%, коммутационной аппаратуры 84% [2]. Положение дел в экономике государства в последние годы привело к заметному снижению темпов технического перевооружения и нового строительства.

Вместе с тем, при дефиците свободных мест в городах для строительства новых трансформаторных подстанций встает вопрос о модернизации существующих с применением современного оборудования.

В настоящее время разработано и широко внедряется взамен устаревшего оборудования трансформаторных подстанций следующее оборудование:

- вакуумные выключатели для РУ 6-10 кВ;

- микропроцессорные устройства релейной защиты;
- разъединители 6-10 кВ с заземляющими ножами и рычажным приводом;
- стандартизированные камеры типа КСО для установки в РУ 6-10 кВ;
- автоматические выключатели с электроприводом для РУ 0,4 кВ;
- интеллектуальные системы учета электрической энергии, необходимость внедрения и применения которой продиктована требованиями действующего законодательства [3],[4];
- герметичные масляные трансформаторы и силовые трансформаторы с сухой литой изоляцией.

Применение вышеуказанного оборудования позволит не только сократить расходы на текущее обслуживание и ремонт оборудования трансформаторной подстанции, но и повысить безопасность для проведения работ обслуживающим персоналом, позволит организовать дистанционное управление коммутационным оборудованием, а также производить мониторинг работы оборудования в реальном времени.

Так, например, замена масляного выключателя 6(10) кВ типа ВМГ на вакуумный выключатель ВВМ-СЭЩ-3(4)-10 производства «Электрощит Самара» с электромагнитным приводом позволяет отказаться от периодического отключения оборудования трансформаторной подстанции для проведения таких операций как проверка и долив масла в баки выключателя, регулировка контактов выключателя, осмотр и периодический ремонт привода масляного выключателя и т.д. Техническое обслуживание данного вакуумного выключателя должно проводиться раз в 8-10 лет [5].

Сухие трансформаторы с литой изоляцией по сравнению с маслонаполненными силовыми трансформаторами обладают следующими преимуществами:

- **экологическая безопасность.** Отсутствие в сухом трансформаторе масла устраняет угрозу загрязнения окружающей среды при его утечке. В случае пожара не выделяются токсичные и едкие газы. Таким образом, исключается угроза загрязнения окружающей среды;
- **безопасность при эксплуатации.** Обмотки сухих трансформаторов не горючи и не могут стать источниками пожара, в случае пожара от внешнего источника смола не поддержит горение и обеспечит противопожарный эффект;
- **не требуется дополнительных мер противопожарной безопасности** в местах установки сухого трансформатора;
- **небольшие габаритные размеры**, что обеспечивает возможность установки сухого трансформатора большей мощности в существующем трансформаторном отсеке, например, при реконструкции подстанции, и во встраиваемых в нежилые здания трансформаторных подстанциях [6];
- **устойчивость к воздействию сырости и влаги;**
- **минимальные эксплуатационные затраты**, так как отсутствует необходимость в периодической проверке и замене диэлектрической жидкости;
- **высокая надежность оборудования.**

Уменьшение времени простоя при обслуживании, а также больший ресурс оборудования повышает надежность электроснабжения объектов в целом.

Проблемой модернизации системы электроснабжения в нашей стране и внедрением прогрессивных технологий заинтересовалось и Правительство РФ, утвердив паспорт пилотного проекта "Улучшение надежности и качества электроснабжения потребителей электрической энергии за счет внедрения новых технологий и оптимизации деятельности территориальных сетевых организаций" [7].

При построении интеллектуальной системы учета электрической энергии в трансформаторной подстанции необходимо использовать элементы данной системы, обеспечивающие выполнение необходимой точности измерений. Для приборов учета электрической энергии класс точности должен быть не ниже 1,0, для трансформаторов тока и напряжения - не менее

0,5. При выборе элементов интеллектуальной системы учета помимо характеристик, предъявляемых к классу точности, необходимо выбирать элементы с максимально большим интервалом между проведением периодических проверок, установленного заводом - производителем оборудования. Увеличение межповерочного интервала способствует сокращению времени простоя оборудования, вызванного необходимостью отключения оборудования 6(10) кВ для проведения периодической проверки.

При проведении реконструкции распределительного устройства 6(10) кВ с заменой существующих ячеек на камеры типа КСО потребуется расчет и замена существующих систем сборных шин и ошиновки силового трансформатора. Замена кабельных перемычек от РУ 6(10) кВ на сборные шины даст увеличение надежности и сокращение потерь электрической энергии в них.

Для обеспечения надежного электроснабжения потребителей при отключении одной из питающих линий 6(10) кВ (при аварийном повреждении, ремонте и т.д.) необходимо предусматривать установку секционного выключателя, позволяющего переключать нагрузку обесточенной секции на другой ввод. Также, для распределительных устройств 0,4 кВ двухтрансформаторных подстанций целесообразно оснащение РУ 0,4 кВ секционными выключателями.

Применение вакуумных выключателей в РУ 6(10) кВ, а также автоматических выключателей с дистанционным приводом в РУ 0,4 кВ трансформаторных подстанций обеспечивает возможность реализации автоматического ввода резерва при авариях на питающих линиях.

Развитие современного производства и наличие на рынке большого ассортимента электротехнической продукции позволяет выполнить модернизацию существующих трансформаторных подстанций 6(10)/0,4 кВ с учетом повышения надежности электроснабжения, уменьшения трудозатрат при выполнении технического обслуживания, развития дистанционного мониторинга и управления электрооборудованием.

Целью проведения работы является реконструкция трансформаторной подстанции с целью обеспечения надежного электроснабжения потребителей РГРТУ с учетом долгосрочной перспективы.

Затраты, необходимые для обеспечения модернизации электросетевого хозяйства, в долгосрочной перспективе окупятся за счет повышения надежности электроснабжения, уменьшения затрат на техническое обслуживание электрооборудования при увеличении общего срока его службы, уменьшения технологических потерь электроэнергии при ее передаче.

Библиографический список

1. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей;
2. Пронь В.В.- Повышение надежности трансформаторных подстанций, эксплуатируемых сверх нормативного срока,- ФБГОУ «Кубанский государственный аграрный университет», - Краснодар, 2017.
3. Постановление Правительства РФ от 04.05.2012 N 442 (ред. от 29.12.2020) "О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии";
4. Постановление Правительства РФ от 19.06.2020 N 890 (ред. от 21.12.2020) "О порядке предоставления доступа к минимальному набору функций интеллектуальных систем учета электрической энергии (мощности)";
5. Интернет-ресурс: <https://electroshield.nt-rt.ru>
6. СП 256.1325800.2016. Электроустановки жилых и общественных зданий . Правила проектирования и монтажа, - Минстрой России, М.: 2016г.
7. Распоряжение Правительства РФ от 28 октября 2020 г. № 2801-р « Об утверждении паспорта пилотного проекта "Улучшение надежности и качества электроснабжения потребителей электрической энергии за счет внедрения новых технологий и оптимизации деятельности территориальных сетевых организаций"».

УДК 621.3.076.52; ГРНТИ 47.14.17

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ГЕНЕРАТОРА ЗАДАЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОРАЗРЯДНЫМ ПРЕРЫВАТЕЛЕМ ТОКА

П.В. Нурғалиев, С.А. Круглов

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

Аннотация. В работе рассматриваются особенности проектирования и разработки печатной платы генератора задающих импульсов для схемы управления газоразрядным прерывателем тока. Приводится описание работы основных элементов задающего генератора и связанные с ними нюансы монтажа на печатную плату.

Ключевые слова: генератор задающих импульсов, газоразрядный прерыватель тока, особенности проектирования печатных плат.

FEATURES OF DESIGN AND DEVELOPMENT OF A GENERATOR OF DRIVING PULSES FOR THE CONTROL CIRCUIT OF A GAS-DISCHARGE CURRENT INTERRUPTER

P.V. Nurgaliev, S.A. Kruglov

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

The summary. The paper considers the features of design and development of printed circuit board of a generator of driving pulses for the control circuit of gas-discharge current interrupter. The described of work of the main elements of circuit and related with them nuances of installing on printed circuit board are presented.

Keywords: generator of driving pulses, gas-discharge current interrupter, design features of printed circuit boards.

Введение

Газонаполненные разрядные переключающие устройства широко применяются для генерации высоковольтных импульсов в радиолокационной технике, для лазерной накачки и генерации электромагнитного (в том числе рентгеновского) излучения, в электрофизической аппаратуре, технологических установках обработки материалов, плазмохимических системах и мощных генераторах в связи с их наилучшими соответствующими характеристиками. Однако, многие существующие приборы, не могут решить все актуальные проблемы генерации импульсов, поэтому требуется изобретение новых переключателей с расширенным спектром возможностей.

Газоразрядные прерыватели тока предназначены для замыкания и размыкания тока. Их использование снижает число необходимых элементов в составе генератора. Газоразрядные прерыватели не нуждаются в охлаждении, и они восстанавливают свои свойства после работы в критическом режиме. Генераторы, имеющие в своем составе газоразрядный прерыватель тока в сочетании с индуктивным накопителем энергии, способны формировать импульсы напряжения до 100 кВ, работая в килогерцовом диапазоне частот.

Одним из ключевых элементов ГИН является задающий генератор, который обеспечивает импульсы управления всей системы. В работе [1] были представлены основные функциональные возможности задающего генератора и блок-схема работы алгоритма программного кода для микроконтроллера. В данной работе приводятся сборочный чертеж и 3D-модель печатной платы, описываются ключевые элементы устройства и особенности их монтажа на печатную плату.

Особенности проектирования печатной платы

Проектирование печатной платы проводилось в комплексной системе САПР AltiumDesigner. Все начинается с создания библиотеки элементов. Возможности среды проектирования позволяют создавать библиотеки элементов в качестве условных обозначений, которые используются для разработки принципиальной схемы, а также библиотеки посадочных мест элемента, которые используются для разработки чертежа печатной платы. При построении 3D-модели устройства необходимо учитывать габариты платы, размещение электрических элементов и отверстий, а также их соединение с помощью проводящих дорожек. Габариты платы выбираются с учетом необходимости разместить все объекты на определенном расстоянии друг от друга. Главная цель размещения – создание наилучших условий для трассировки.

В ситуации, когда частотный диапазон наведенного шума в значительной степени отличается от частотного диапазона работы схемы, необходимо создавать пассивный RC-фильтр для подавления высокочастотных помех. При использовании последовательно соединенных фильтров, настроенных на разные частотные диапазоны, более высокочастотный фильтр должен быть ближайшим к источнику помех [2].

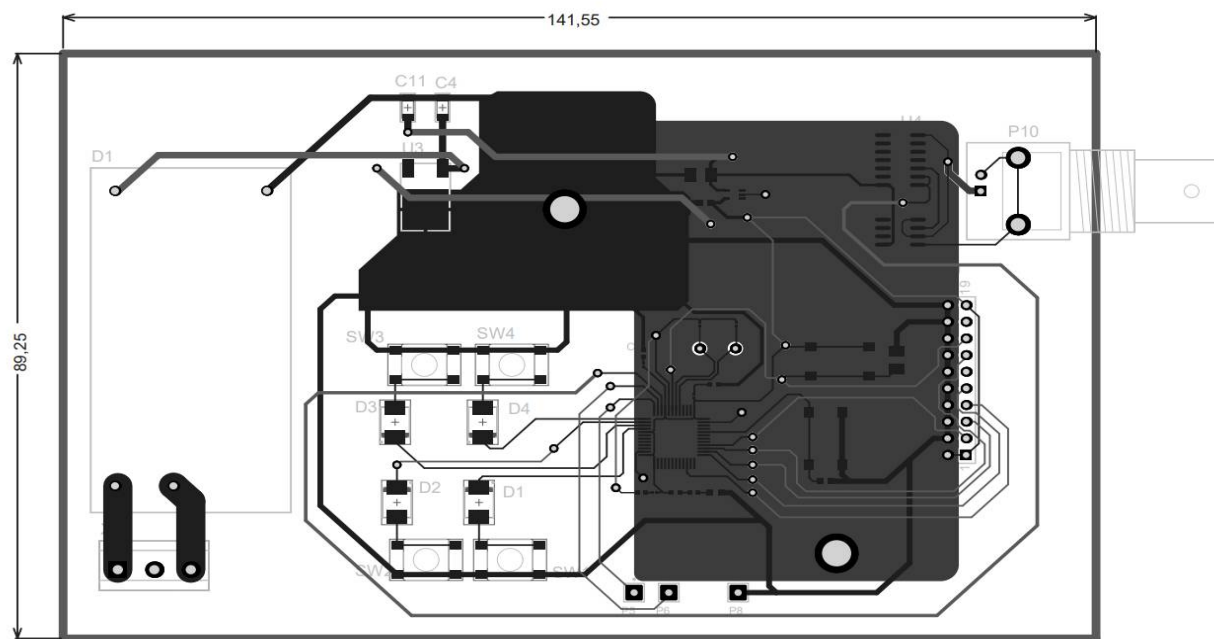


Рис. 1. Сборочный чертеж печатной платы, проектируемой в AltiumDesigner

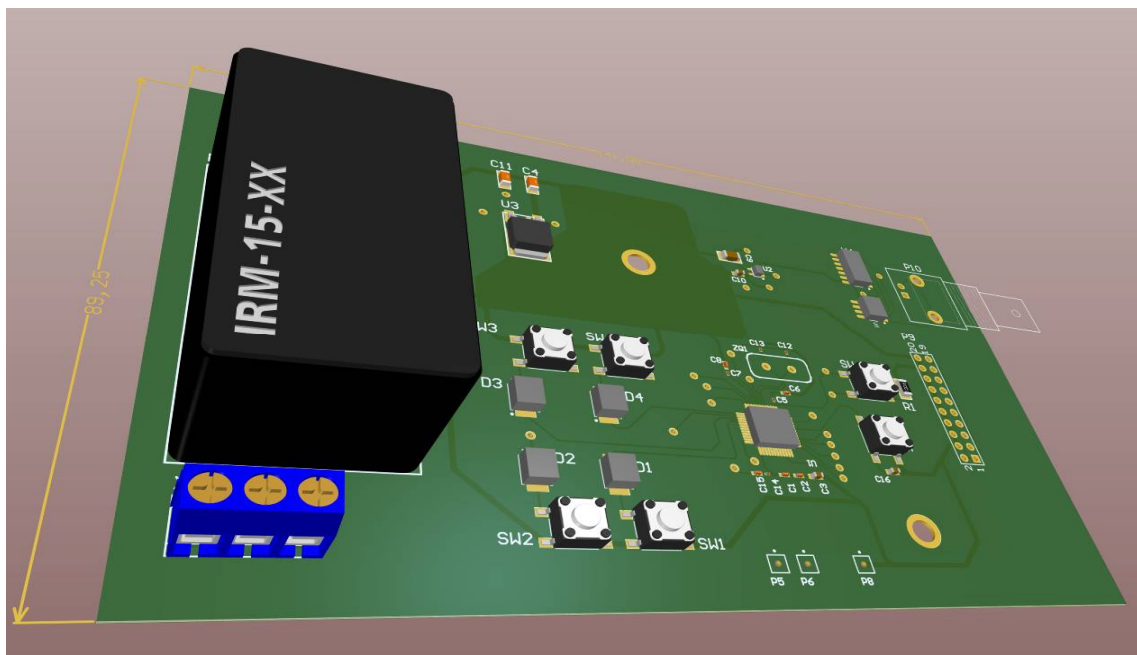


Рис. 2. 3D-модель печатной платы

Особенности разводки печатной платы

Трассировка печатных плат выполняется в виде:

- простой дорожки проводника с необходимой шириной;
- с использованием заливки сплошным полигоном.

Это необходимо для того, чтобы обеспечить стабильность работы устройства, снизить помехи в цепях и не допустить сильный нагрев и обрыв линии под действием тока.

Для соединения элементов силовой части нужно соединять проводниками большей ширины и меньшей длины. Сопротивление проводника зависит от длины и площади поперечного сечения:

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где ρ – удельное сопротивление материала, из которого изготавливается проводник;

l – длина проводника;

S – поперечное сечение проводника.

Если длина проводника будет слишком большой, а ширина маленькой – это приведет к увеличению сопротивления, а значит и к росту падения напряжения на нем, и, как следствие, неправильной работе устройства.

Для обеспечения правильной работы микроконтроллера ширина печатного проводника, подводимого к его выводам, должна быть равной 0.25 мм, согласно размерам его контактных площадок. Это соответствует третьему классу точности печатных плат. Аналогичная ширина проводников применяется для соединения с цифровой частью схемы.

Расстояние между проводниками должно быть как можно больше, чтобы исключить их взаимное электромагнитное влияние, а также соединение проводников под прямым углом. Правила, установленные в программном обеспечении AltiumDesigner, помогают избежать ошибок проектирования, которые в дальнейшем повлияют на работу устройства.

Разделение земли на аналоговую и цифровую части также является одним из простейших методов подавления шума. Полигоны земли – это простой способ улучшить производительность и предотвратить проблемы. Как правило, её принято разделять на

аналоговую и цифровую. На сами полигоны земли принято отводить один или более слоев.

Описание элементной базы

IRM-15—это миниатюрный источник питания мощностью 15 Вт, готовый к пайке на печатные платы для различных видов электронных приборов или оборудования промышленности. Этот продукт допускает универсальный диапазон входного напряжения 85÷305 В переменного тока. Огнезащитный пластиковый корпус, полностью заполненный силиконом, увеличивают тепловыделение и устойчивость к вибрациям. Кроме того, он обеспечивает фундаментальную устойчивость к пыли и влаге. В данном случае, IRM-15 применяется для обеспечения питания устройства и последующем монтаже непосредственно на плату [3]. Проводники, подводимые к контактным площадкам такого устройства, должны иметь достаточную ширину для прохождения тока в 1 А.

L4931—линейный стабилизатор напряжения. Обладает очень низким падением напряжения (около 0,4 В) и очень низким током покоя, что делает его особенно подходящим для малошумных, маломощных применений и, особенно, в системах с батарейным питанием. Доступна совместимая с TTL функция логического управления выключением. Работа устройства возможна в диапазоне температур от 40 °С до 125 °С [4]. Стабилизатор необходим для защиты цепей питания, что обеспечивает стабильную работу схемы.

TPS71533DCKR—это регулятор напряжения с малым падением напряжения. Устройство работает в диапазоне входных сигналов от 2,5 до 24 В. Малое падение напряжения и низкий ток покоя позволяют работать на чрезвычайно низких уровнях мощности. Поскольку устройства включаются, как только приложенное напряжение достигает минимального входного напряжения, выход быстро доступен для питания непрерывно работающих микросхем зарядки аккумуляторов. В данном случае, его применение обусловлено необходимостью обеспечения питанием 3.3 В микроконтроллера [5].

AD8532—двухканальный усилитель ввода-вывода с одним источником питания, выходной ток которого составляет 250 мА. Этот высокий выходной ток делает его превосходным для управления резистивными или емкостными нагрузками. Высокая производительность переменного тока с полосой пропускания 3 МГц, скоростью нарастания 5 В/мкс и низким уровнем искажений. Все они гарантированно работают от одного источника питания 3 В, а также от источника питания 5 В. Ток питания составляет всего 750 мкА на усилитель при напряжении 5 В, что позволяет низкоточным приложениям управлять сильноточными нагрузками. AD8532 работают в диапазоне температур (от -40°С до +85°С). Устройство выпускается в 8-выводном корпусе SOIC и 8-выводных корпусах MSOP. Применение его в схеме обуславливается высоким быстродействием и необходимостью увеличения амплитуды сигнала в 12 В [6].

Семейство STM32F373xx основано на высокопроизводительном 32-битном RISC-ядре ARM® Cortex®-M4, работающем на частоте до 72 МГц, со встроенным блоком с плавающей запятой (FPU), а также блоком защиты памяти (MPU) и встроенной трассировкой Macrocell™ (ETM). Семейство включает в себя высокоскоростные встроенные запоминающие устройства (до 256 Кбайт флэш-памяти, до 32 Кбайт SRAM), а также широкий спектр усовершенствованных устройств ввода-вывода и периферийных устройств, подключенных к двум шинам APB. Устройства STM32F373xx предлагают один быстрый 12-битный АЦП (1 Мс/с), три 16-битных АЦП, два компаратора, два ЦАП, маломощный RTC, 9 универсальных 16-битных таймеров, два универсальных 32-битных таймера, три базовых таймера. Они также имеют стандартные и продвинутое коммуникационные интерфейсы: два I2C, три SPI,

mixed I2S, три USART, CAN и USB. Семейство STM32F373xx работает в диапазоне температур от -40 до +85 °C и от -40 до +105 °C от источника питания 2,0 до 3,6 В, соответственно. Полный набор энергосберегающих режимов позволяет проектировать маломощные приложения.

Семейство STM32F373xx предлагает устройства в пяти пакетах в диапазоне от 48 до 100 контактов. Набор включенных периферийных устройств изменяется в зависимости от выбранного устройства. Микроконтроллер STM32F373CCT6 является главным элементом данной схемы. Он необходим: для создания импульсов нужной частоты, формы, скважности, числа импульсов в одной посылке. В его память записывается программный код, который позволяет добиться нужного результата. Для регулирования параметров импульсов непосредственно во время работы с устройством необходимо применять тактильные переключатели WS-TASV SMD Tact Switch 6X6 mm [7]. Необходимость его применения обусловлена высокой точностью ЦАП и АЦП. Так же важно правильно подобрать кварцевый резонатор, который является элементом обвязки микроконтроллера. В данном случае выбор основан на необходимости формировать импульсы определенной частоты.

MC74HC08ADTR2G – двухвходовый логический элемент И. В схеме является буферным элементом и предназначен для защиты микроконтроллера по выходному сигналу.

Header 10X2 – гнездо для монтажа на печатную плату. Необходимо для подключения интерфейсов.

Заключение

Спроектирован и разработан генератор задающих импульсов для схемы управления газоразрядным прерывателем тока с учетом всех его особенностей, включая подбор элементной базы и разводки печатных проводников платы. Сформирована 3D модель устройства.

Библиографический список

1. Материалы V Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства». – Рязань: РГРТУ, 2020 - 564 с. – стр. 19.
2. Компьютерные технологии в электронике: учеб. пособие / В.В. Климаков, Е.Ю. Грачев; Рязан. гос. радиотехн. ун-т. - Рязань: РГРТУ, 2021. – «Источники шума и помех» стр. 51.
3. DatasheetIRM-15 series [электронный ресурс]. - 2021.URL:<http://www.meanwell.ru/uploads/files/datasheets/IRM-15-15.pdf>
4. DatasheetL4931 [электронный ресурс]. - 2021.URL:<https://www.st.com/resource/en/datasheet/l4931.pdf>
5. DatasheetTPS71533DCKR [электронный ресурс]. - 2021.URL:https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps715.pdf?ts=1613324816406&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FTPS715
6. DatasheetAD8532ARZ [электронный ресурс]. - 2021.URL:https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8531_8532_8534.pdf
7. DatasheetSTM32F373CCT6 [электронный ресурс]. - 2021.URL:<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f373cc.pdf>

УДК 621.3; ГРНТИ 45.03.03

ИТЕРАЦИОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПОНЕНТ ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Е.А. Вилков

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева,
Российская Федерация, г. Казань evgenvilkov1995@gmail.com*

Аннотация. В работе описывается итерационный подход к определению компонент собственного теплового сопротивления полупроводникового прибора для формирования его одномерной тепловой модели на основе электротепловой аналогии. Предложенный подход предназначен повысить качество прогнозирования температуры кристаллов силовых полупроводниковых приборов.

Ключевые слова: тепловая модель, электротепловая аналогия, компоненты теплового сопротивления, итерационный подход.

ITERATIVE METHOD FOR DETERMINING COMPONENTS OF THERMAL RESISTANCE OF POWER SEMICONDUCTOR DEVICES

E.A. Vilkov

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev,
Russia, Kazan, evgenvilkov1995@gmail.com*

The summary. The paper describes the iterative method for determining components of self thermal resistance of power semiconductor devices. It serves for creating one direction thermal model, which based on electro thermal analogy. The proposed approach is intended to improve the quality of predicting the temperature of crystals of power semiconductor devices.

Keywords: thermal model, electric thermal analogy, components of thermal resistance, iterative approach.

В настоящее время среди силовой полупроводниковой техники значимое положение занимают электронные ключи. Они используются в промышленности для коммутации больших мощностей и являются основой преобразовательной техники. Силовые ключи бывают представлены различными типами управляемых и неуправляемых полупроводниковых приборов, такими как диоды, биполярные, полевые, IGBT транзисторы, тиристоры. Основным ограничением таких приборов является тепловой режим эксплуатации. Максимальная температура кристалла прибора определяет максимальный рабочий ток, который может протекать через устройство. При протекании электрического тока в различные моменты времени в кристаллах выделяется тепловая мощность потерь проводимости и мощность потерь коммутации. Энергия, высвободившаяся в кристалле в виде тепла, разогревает полупроводниковую структуру. Величину отводимого тепла конструкции определяет параметр тепловое сопротивление R_{th} . Таким образом температура кристалла зависит от максимальной мощности, выделяемой в процессе эксплуатации, и теплового сопротивления конструкции. При превышении допустимой максимальной температуры кристалла, во внутренних структурах происходит тепловые нарушения и устройство выходит из строя.

Для мониторинга и предсказания температуры кристалла в различных режимах эксплуатации при коммутации различных токов и напряжений на разных частотах используют тепловые модели. Одномерные тепловые модели со средоточенными параметрами, основанные на электротепловой аналогии, хорошо зарекомендовали себя для моделирования тепловых режимов СПП. Данные модели основаны на электрических RC-цепях типа Kauer или Foster, а тепловые параметры представлены электрическими аналогами.

Классический подход к определению параметров тепловых сопротивлений и тепловых емкостей предполагает расчёт теплового сопротивления и емкости для каждого элемента внутренней структуры транзистора. Эти параметры зависят от геометрических размеров, материалов и положения элементов конструкции друг относительно друга [1].

Однако такой подход имеет множество проблем. Рассмотрим их.

Теоретический расчёт позволяет точно рассчитать параметры простой конструкции. Но для элементов сложной формы, с наличием отверстий и с неравномерным распределением теплового потока теоретический расчёт становится намного сложнее.

Для расчёта теплового сопротивления и тепловой емкости необходимо знать внутреннюю структуру полупроводникового компонента, геометрические размеры и параметры материалов. Ввиду того, что полупроводниковый компонент представляет собой закрытую систему, измерить параметры конкретного прибора с помощью методов неразрушающего контроля не представляется возможным.

Параметры материалов с течением времени и в процессе эксплуатации могут изменять свои физические свойства. Таким образом, тепловые модели, рассчитанные на начальных этапах работы прибора, будут не актуальны с течением времени.

В теоретическом расчёте считается, что параметры материалов не зависят от температуры структуры, однако в реальности при изменении температуры меняется теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность, плотность и другие физические параметры [2].

Для точного определения тепловых параметров применяют не численный расчёт, а измерения, основанные на экспериментальных данных конкретного прибора. На данный момент существует множество экспериментальных способов определения теплового сопротивления приборов. Как правило, все эти способы позволяют получить значение теплового сопротивления переход-корпус или переход-атмосфера. Однако для моделирования температуры кристалла этого может оказаться недостаточно.

Для улучшения электротепловых моделей и более точного предсказания температуры конкретных приборов необходимо знать внутренние тепловые сопротивления элементов конструкции, которые являются компонентами теплового сопротивления переход-атмосфера. Кроме того, для точного моделирования прибора в динамике, в соответствии с моделями Kaufer и Foster, необходимо знать тепловые емкости элементов конструкции.

Такого рода задача была решена в работе [3]. В данном исследовании определялась функция переходного теплового сопротивления и на основании частотного отклика находились компоненты полного теплового сопротивления. Данный способ включает в себя достаточно сложную математическую обработку и требует существенных вычислительных ресурсов.

Недостатками данного метода является невозможность разделения 2х компонент теплового сопротивления в случае, если постоянная времени нагрева соответствующих элементов конструкции отличается друг от друга менее чем в 2-3 раза.

В работе были определены тепловые сопротивления транзистора «переход-выводная рамка», «переход-корпус», «переход-радиатор», и постоянные времени нагрева. Эти значения позволяют получить величину компонент теплового сопротивления, и вычислить тепловую емкость, влияющую на нестационарный тепловой процесс.

В стандарте JE51-14 [4] описывается метод анализа полупроводниковой структуры на основе вычисления кумулятивной или дифференциальной структурных функций. Кумулятивная структурная функция представляет собой временную зависимость суммарной теплоемкости $C_{th\Sigma}$ от суммарного теплового сопротивления $R_{th\Sigma}$, которые определяются выражениями (1) и (2)

$$C_{th\Sigma} = \frac{Pt}{T_j(t) - T_j(t=0)}, \quad (1)$$

$$R_{th\Sigma} = \frac{T_j(t) - T_j(t=0)Pt}{P} \quad (2)$$

Пологие участки структурной функции $Cth\Sigma(Rth\Sigma)$ соответствуют элементам конструкции объекта с высокой теплопроводностью, а участки $Cth\Sigma(Rth\Sigma)$ с резким ростом – элементам конструкции с низкой теплопроводностью.

Это позволяет определить вклад отдельных элементов структуры и конструкции объекта в общее тепловое сопротивление. Данный метод измерения теплового сопротивления был реализован, в частности, в измерительном комплексе T3Ster [5]. Однако результаты данных измерений не дают информацию о компонентах теплового сопротивления и тепловой емкости, их количестве в формате, подходящем для реализации электротепловой модели.

В качестве альтернативы в данном исследовании предложен итерационный метод определения компонент теплового сопротивления и тепловой емкости элементов структуры СПП.

Суть метода

Измерение теплового сопротивления начинается с определения и градуировки термочувствительного параметра (ТЧП). В большинстве случаев в качестве ТЧП используют рекомендованное стандартом JESD51-14 прямое падение напряжения на p - n -переходе при малом измерительном токе, однако для различных полупроводниковых приборов могут использоваться разные термочувствительные параметры. Это обусловлено внутренней структурой и характеристиками приборов. В таблице 1 приведены тип прибора и его термочувствительные параметры.

Таблица 1. Термочувствительные параметры силовых полупроводниковых приборов

Диод	Прямое падение напряжения на p - n переходе Обратный ток
Светодиод	Прямое падение напряжения на p - n переходе Обратный ток
Биполярный транзистор	Прямое падение напряжения на эмиттерном переходе
Полевой МДП-транзистор	Логарифм напряжения сток-исток Пороговое напряжение включения Напряжение затвор-исток Сопротивление открытого канала
IGBT-транзистор	Напряжение коллектор-эмиттер
Тиристор	Напряжение анод-катод Прямое падение напряжения на p - n переходе Прямой ток

Как правило в качестве ТЧП используют зависимость напряжения от температуры. Такие зависимости носят квазилинейный характер. Коэффициент наклона прямой называется тепловым коэффициентом напряжения (ТКН). Определение ТКН происходит по двум точкам при различных значениях температуры. Определив значение ТЧП прибора, можно легко найти температуру кристалла, умножив измеренное значение напряжения на ТКН.

Подавая на исследуемый полупроводниковый прибор известное значение постоянного тока, измеряя во времени падение напряжения, можно рассчитать мощность потерь проводимости. Зная температуру окружающей среды по формуле (3) можно найти зависимость теплового переходного процесса от времени.

$$Z_{th}(t) = \frac{T_1(t) - T_2(t)}{P}, \quad (3)$$

где Z_{th} – переходной тепловой процесс;

T_1 – температура кристалла СПП;

T_2 – температура атмосферы;

P – мощность тепловых потерь в кристалла.

Для перехода к тепловой модели на основе электротепловой аналогии используем функцию переходного процесса для цепи n -го порядка (4)

$$Z_{th}(t) = \sum_{i=1}^n R_{th i} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{th i}}} \right), \quad (4)$$

где R_{th} – тепловое сопротивление i -го элемента конструкции;

n – порядок тепловой RC-цепи;

$\tau_{th} = R_{th} C_{th}$ – тепловая постоянная времени, где C_{th} – теплоёмкость i -го элемента конструкции.

Исследование показало, что большое количество RC-элементов увеличивает точность предсказания переходной тепловой характеристики, но увеличивает время расчёта. В качестве компромиссного решения было определено, что для одного элемента конструкции достаточно одного RC-элемента. Расчёты показали, что переходной тепловой процесс в таком виде рассчитывается с достаточно высокой точностью. Кроме того, в таком представлении параметрам RC-цепи соответствуют реальные физические параметры теплового сопротивления и тепловой ёмкости для одного элемента конструкции. Следует учесть, что параметры в данном расчёте зависят не только от материалов и геометрических размеров, но и от взаимного положения элементов и качества контакта поверхностей [6].

Поскольку временную зависимость переходного теплового процесса можно с большой точностью реализовать различными наборами тепловых сопротивлений и ёмкостей, то было принято решение анализировать не временной переходный процесс, а тепловую структурную функцию, которая может быть представлена только единственным набором RC-цепей. Аналитическая тепловая структурная функция даёт полное представление о входящих в состав тепловых сопротивлений и тепловых ёмкостях, однако она не предполагает использование в качестве характеристики для моделирования электротепловых моделей. Получение тепловой структурной функции подробно описано в стандарте [5].

Для экспериментальной временной зависимости переходного теплового процесса (а) и для значений полученных численно были рассчитаны тепловые структурные функции (б). Графики данных функций изображены на рисунке 1.

В качестве критерия подобия было выбрано среднеквадратическое отклонение 2σ функций (5)

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((x - x')^2 + (y - y')^2)}, \quad (5)$$

При произвольных значениях RC-коэффициентов среднеквадратическое значение представляет собой большое число. Затем с помощью метода градиентного спуска, изменяя каждый из R_{th} или C_{th} параметров модели на единицу старшего разряда, определяется направление уменьшения среднеквадратического отклонения. Изменённое значение запоминается, и следующая итерация происходит с новым значением. Если изменение старшего разряда всех коэффициентов RC-модели не приводит к уменьшению среднеквадратического от-

клонения, то алгоритм начинает изменять следующий в порядке уменьшения разряд коэффициентов.

Таким образом увеличивая время расчёта, можно добиться высокой точности полученных коэффициентов. Для уменьшения времени расчёта в качестве коэффициентов начального приближения вместо произвольных величин можно использовать значения, найденные способом, описанным в работе [6].

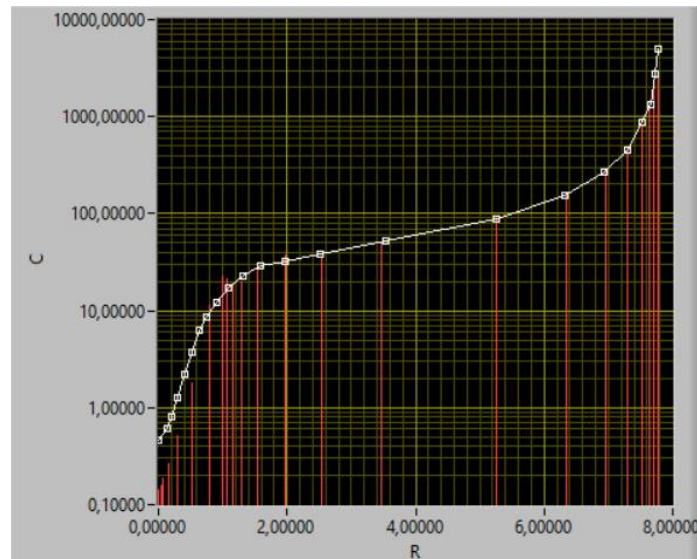


Рис. 1. Тепловые структурные функции:
(а) данные, полученные по экспериментальной зависимости (белым),
(б) результат расчёта по электротепловой модели (красным).

Описание программного решения

Определение переходного теплового процесса осуществлялось с помощью трёхмерной модели в среде ANSYS. Процедура определения заключалась в следующем. На элементе модели, соответствующем кристаллу полупроводникового прибора, выделялась тепловая мощность, эквивалентная мощности потерь проводимости при прохождении через прибор электрического тока в рабочем состоянии. Данная мощность распределялась по трёхмерной структуре и вызывала нагрев кристалла. Переходной процесс температуры кристалла был сохранён в памяти ЭВМ.

Для переходного процесса была рассчитана тепловая структурная функция, заданная таблично. В соответствии с внутренней структурой СПП была составлена линейная электротепловая модель. В качестве начальных значений коэффициентов RC-модели были выбраны произвольные величины. Проведены вычисления и переходный процесс температуры кристалла, полученный с помощью электротепловой модели, также был сохранён в памяти ЭВМ.

По формуле (5) для экспериментальных данных и для данных по электротепловой модели были определены структурные функции полупроводникового прибора. Между этими функциями было рассчитано среднеквадратическое отклонение (рис. 2).

При случайных начальных значениях R_{th} и C_{th} параметров электротепловой модели среднеквадратическое отклонение достигает значения 2 всего за одну секунду, что соответствует определению параметров наиболее габаритных элементов конструкции, таких как радиатор, и алюминиевая подложка корпуса. Затем продолжительное время идёт уточнение младших параметров модели. Это тепловое сопротивление и тепловая емкость подложки силовых ключей, изолятора, переходных пластин корпуса и кристалла СПП. Значения тепло-

вых параметров кристалла являются наименьшими среди всех тепловых параметров, это обусловлено размерами самого кристалла. Однако эти параметры являются наиболее значимыми поскольку они определяют инерционность тепловых процессов на больших частотах.

Величина разброса тепловых параметров определяет время расчёта, поскольку в данном алгоритме первыми находятся элементы с наибольшими значениями теплового сопротивления и тепловой емкости. В экспериментальных данных большое время моделирования обусловлено включением в состав RC-модели массивного алюминиевого радиатора со сложной геометрией.

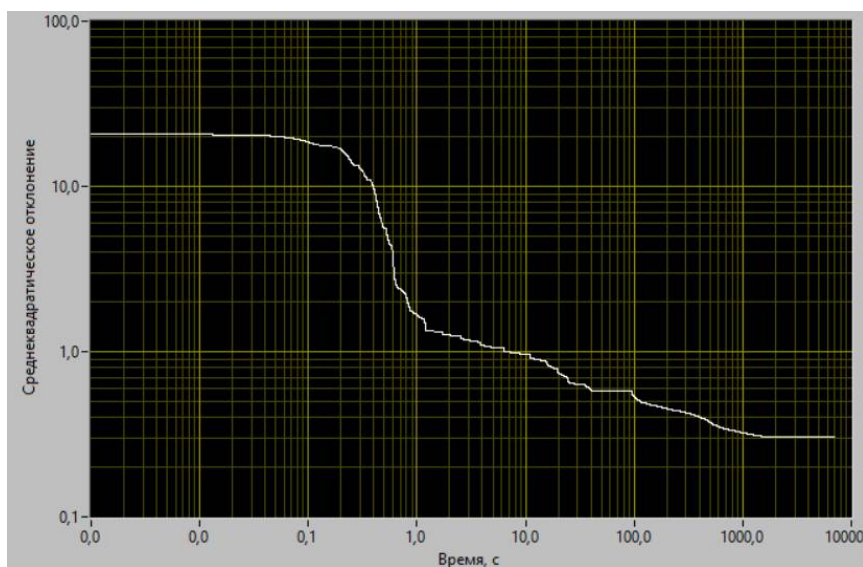


Рис. 2. Изменение среднеквадратического отклонения во времени

Данный способ определения компонент теплового сопротивления имеет следующие достоинства:

Этот метод позволяет задать и найти большое количество элементов RC-цепей $n > 7$. Ограничением данного метода является время моделирования. При времени моделирования $t \rightarrow \infty$ погрешность численного расчёта стремится к методической погрешности, которая в свою очередь определяется количеством RC-элементов.

Представление результатов в виде RC-элементов позволяет составить готовую электротепловую модель для нахождения температуры кристалла в зависимости от функции выделявшейся мощности потерь в любой программе схемотехнического моделирования

Точная калибровка ТКН силового прибора в лабораторных условиях позволяет определить параметры его электротепловой модели в условиях эксплуатации. Для этого необходимо снять переходную тепловую характеристику прибора в рабочем положении с рабочими параметрами охлаждения, радиатором, теплопроводящего контакта и определить параметры электротепловой модели относительно температуры окружающей среды.

Данная модель на основе входных данных позволит предсказать температуру кристалла СПП при различных входных воздействиях, а также судить о внутренних дефектах в случае несоответствия с реальными данными.

Библиографический список

1. Беспалов Н. Н., Ильин М. В., Капитонов С. С., Лебедев С. В. Разработка и исследование электротепловых моделей силовых полупроводниковых приборов основных типовых конструкций // Естественные и технические науки. – 2011. – № 6. – С. 405–412.
2. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах.-М. : Металлургия, 1989.-384с.
3. Смирнов В.И., Гавриков А.А., Шорин А.М. Метод измерения компонент теплового сопротивления полупроводниковых приборов и его практическая реализация // Автоматизация процессов управления. – 2017. – № 2 (48). – С. 98–105.
4. JEDEC standard JESD51 1-14. Methodology for the thermal measurement of component packages (single semiconductor device). JEDEC Solid State Technology Association, 2005-2010.
5. Вяхирев В. Измерение тепловых характеристик полупроводниковых электронных компонентов // Технологии в электронной промышленности. 2013.– №3. С. 90-92.
6. Ильин М.В., Вилков Е.А., Гуляев И.В., Бриз Дель Бланко Ф. Определение собственных тепловых сопротивлений силовых транзисторов и диодов IGBT-модуля на основе его трёхмерной модели [Текст]// Электротехника №7 - 2019 – С. 19-23. ISSN: 0013-5860

УДК 621.373.826; ГРНТИ 29.33.15

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ УСТАНОВКИ

Д.Д. Городничева

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, dask98@mail.ru*

Аннотация. В работе рассматривается лазерная твердотельная импульсная установка. Приводятся ее основные особенности, достоинства и недостатки, а также сведения о лучевой прочности и оптическом пробое.

Ключевые слова: лазерная твердотельная импульсная установка, лучевая прочность, оптический пробой.

INVESTIGATION OF A LASER SOLID-STATE PULSED SYSTEM

D.D. Gorodnicheva

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, dask98@mail.ru*

The summary. The paper considers a laser solid-state pulsed installation. Its main features, advantages and disadvantages, as well as information about the beam strength and optical breakdown are given.

Keywords: solid-state pulse system, beam strength, optical breakdown.

Лазером называется устройство, излучающее свет через процесс оптического усиления за счет стимулированного излучения электромагнитного излучения. Впервые лазер был создан в 1960 году Теодором Х. Мейманом в Исследовательских лабораториях Хьюза на основе теоретических работ Чарльза Хард Таунса и Артура Леонарда Шавлоу.

Мощные твердотельные лазеры с момента изобретения и по сегодняшний день используются в испытаниях на лучевую прочность. Излучение лазера может действовать настолько интенсивно в средах в газовом или конденсированном состоянии, что зачастую приводит к оптическому пробое и разрушению твердотельных мишеней. В настоящее время невелико число видов лазеров для подобных опытов. Широко известны наносекундные лазеры с очень короткими импульсами. Однако они сложны в использовании, так как некоторые элементы, относящиеся к оптическим, в строении таких лазеров не обладают достаточной лучевой прочностью. К ним относятся активные элементы, зеркала, выходные окна и другие. Следовательно, необходимо повысить эффективность и надежность работы

лазерных систем, которая напрямую зависит от работы отдельных элементов.

Устройство и принцип работы импульсного твердотельного лазера

Практически все лазеры по своему исполнению имеют следующие ключевые элементы:

- источник энергии (механизм «накачки» лазера);
- рабочее тело лазера;
- система зеркал («оптический резонатор»).

Стеклянный или кристаллический стержень вместе с импульсной лампой накачки окружен отражателем и помещен внутрь резонатора – между парой зеркал. Энергия световой вспышки превращается в лазерный импульс.

Работа твердотельного лазера основана на кристаллах. К ним относятся рубин, алюмоиттриевый гранат, а также стекло с добавлением неодима. Последний используется не часто. Кристаллы выращивают в лабораторных условиях, так как с экономической точки зрения их добыча не выгодна.

Неодимовые лазеры на кристалле YAG (Nd:YAG-лазер) по своим характеристикам имеют самое широкое использование. Они работают на длине волны 1064 нм, что соответствует ближнему инфракрасному диапазону спектра. Если в исполнении лазера предусмотрен нелинейный кристалл, то получаемая длина волны меньше в несколько раз. Активной средой выступает кристалл иттрий-алюминиевого граната (YAG). Часть ионов иттрия Y^{3+} в нем замещается ионами неодима (Nd^{3+}). Такой лазер имеет ряд преимуществ:

- высокий уровень механической прочности;
- повышенная твердость;
- высокий коэффициент теплопроводности;
- отсутствие необходимости в компенсации заряда.

Цилиндрические активные кристаллы-элементы неодимового лазера на торцах обязательно полируют, чтобы впоследствии нанести на них зеркальное покрытие.

Накачка осуществляется с помощью инертных газов (Xe, Kr, NaI, Hg) в лампах или диодными матрицами. В зависимости от этого излучение бывает импульсное либо непрерывное.

Лабораторные исследования на лучевую прочность неразрывно связаны с использованием неодимовых лазеров.

Понятие об оптическом пробое и лучевой прочности

Лучевая прочность – способность твердой прозрачной среды сопротивляться необратимому изменению её оптических параметров и сохранять свою целостность при воздействии мощного оптического излучения, например, излучения лазера. Она является важным параметром для оптических элементов, в том числе и в самих лазерных системах. Именно лучевая прочность сдерживает рост энергетики в лазерных системах.

Лучевая прочность определяет верхнее значение предела работоспособности элемента силовой оптики. Данное понятие возникло одновременно с появлением мощных твердотельных лазеров, фокусировка излучения которых в объём или на поверхность среды приводила к её оптическому пробое. Лучевая прочность численно характеризуется порогом разрушения (порогом пробоя) q^x – плотностью потока оптического излучения.

Под оптическим пробоем понимают процесс превращения из среды с нулевым коэффициентом поглощения в сильно поглощающую. Процесс имеет высокую скорость протекания, относится к необратимым, а также характеризуется наличием интенсивного

излучения, которое разрушает структуру исследуемой среды.

Явление оптического пробоя неразрывно связано с некоторыми физическими процессами:

- ионизацией атомов кристаллической решетки и резким увеличением концентрации свободных электронов;
- вырыванием валентных связанных электронов под действием ускоренных свободных электронов;
- развитием электронной лавины, приводящей к образованию критической концентрации электронов для излучения заданной частоты;
- нелинейным поглощением излучения и быстрым нагревом среды, приводящим к повышению давления и разрушению.

Методы определения лучевой прочности

Испытаниям на лучевую прочность обычно подвергают оптические покрытия, которые нашли свое применение в таких областях, как оптоэлектроника и квантовая электроника, оптическое приборостроение и так далее. Оптические покрытия – совокупность слоев, наносимых последовательно на поверхность оптических элементов (подложек). Лазерное излучение может понизить предельную мощность оптической системы, быстродействие и срок службы, а также препятствует созданию мощных и экономичных лазеров.

Известно, по крайней мере, два метода определения лучевой прочности. По первому методу лучевая прочность является пороговой величиной, а второй метод основан на вероятностном подходе. Вторым методом определяется лучевая прочность по международным стандартам. В России не существует единого стандарта определения лучевой прочности, поэтому в лабораториях применяются различные методы, основанные, как правило, на определении порога разрушения.

По одному из методов первой группы поверхность исследуемого образца многократно облучается мощным лазерным пучком с энергией, увеличивающейся постепенно [1]. В начале энергия не разрушает образец, но затем она увеличивается до появления микродефектов. Энергия направлена не в одну точку, а облучает последовательно новый участок поверхности.

Второй метод первой группы [2] позволяет не только оценить пороговую плотность энергии, но и определенным образом статистически проанализировать характер процесса разрушения поверхности при наличии серии пятен облучения на образце.

В РФ разработано и запатентовано устройство для экспресс-метода определения лучевой прочности [3]. Метод относится к первой группе и заключается в следующем. Исследуемый образец облучается не многократно одним лазерным пучком с постепенным увеличением энергии, а 1–2 раза матрицей пучков с разной плотностью энергии, в которой максимальная плотность энергии превышает ожидаемую лучевую прочность образца. По картинке разрушения образца и распределению интенсивности лазерного излучения на образце определяются два пучка: один с максимальным значением плотности энергии, при котором разрушение еще не фиксируется, второй – с минимальным значением плотности энергии, при котором регистрируется разрушение. Порогом разрушения исследуемого образца является среднее значение между этими двумя плотностями энергии.

Лучевую прочность также можно определить по второй группе методов, широко используемых за рубежом, «1–на–1» и «S–на–1». Эти два метода входят в международные стандарты проверки.

«1–на–1»: исследуемый образец подвергается облучению серией импульсов излучения

с одинаковой энергией, причём каждый последующий импульс смещается по горизонтали на некоторое расстояние относительно предыдущего участка облучения. Затем энергия излучения увеличивается, и облучение образца проводится по следующему нижележащему ряду и т. д. После этого для каждой энергии определяют число выстрелов, при которых произошло разрушение образца и строится зависимость вероятности разрушения образца от плотности энергии излучения [4].

«S–на–1»: аналогичен «1–на–1» за исключением того, что облучение каждого конкретного участка происходит не однократно, а до тех пор, пока не будет обнаружено разрушение или не будет достигнуто определенное заранее количество облучений S [5]. По результатам исследования определяется срок службы (количество облучений) образца при определенном значении плотности энергии.

Для обнаружения разрушений после облучения образца используются визуальная (глазом, с помощью микроскопа, с помощью регистрации изображения испытуемого образца на камеру и т. д.) или автоматическая регистрация разрушений (например, с помощью микроскопа с анализатором изображения).

Заключение

Твердотельные импульсные лазеры представляют большой интерес. Они могут быть использованы для контроля лучевой прочности широкого класса оптических материалов и покрытий. Установка контроля на лучевую прочность может использоваться как для экспресс-методики определения порога разрушения оптических элементов, так и для сканирования целого образца по методике аналогичной ISO 1-on-1. Лазеры, работающие в среднем инфракрасном диапазоне, достаточно востребованы, поэтому ведутся поиски новых материалов для них в настоящее время. При этом синтезируются и исследуются как кристаллические, так и стеклообразные материалы.

Библиографический список

1. Алексеев В. П., Бессараб А. В., Гаранин С. Г., Дмитриев Д. И. и др. Исследование лучевой прочности поверхности экспериментального лазерного стекла // Оптический журнал, 2002 Т. 69, № 1 С. 11–15.
2. Alekseev V. N., Bessarab A. V., Charukhchev A. V., Chernov V. N., Kotilev V. N., Liber V. I., Rukavishnikov N. N., Sirazetdinov V. S. Express method for estimating surface resistance of optical components to laser-induced damage. Book of abstr. XXVI European Conf. on Laser Interaction with Matter (ECLIM 2000). - Prague, 2000, p. 221.
3. Зималин Б. Г., Савкин А. В., Сухарев С. А., Шаров О. А. Устройство для определения лучевой прочности оптических элементов. Патент РФ на полезную модель № 90205, 2009 г.
4. International standard ISO 11254-1_2000 First edition 2000-06-01.
5. International standard ISO 11254-2_2001 First edition 2001-09-15.

УДК 620.9; ГРНТИ 44.29.39

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Т.С. Желнина, Е.В. Сливкин

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

Аннотация. В работе рассматриваются основные цели и принципы проектирования систем электроснабжения. Приводятся основные параметры оборудования при проектировании.

Ключевые слова: электричество, распределительная система, энергетическая система, надежность электроэнергетики.

POWER SUPPLY SYSTEMS DESIGN

T. S. Zhelnina, E. V. Slivkin

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

The summary. paper discusses the main goals and principles of designing power supply systems. The main parameters of the equipment in the design are given.

Keywords: electricity, distribution system, energy system, reliability, electric power.

Электричество на сегодняшний день является неотъемлемой частью любой сферы деятельности. Важнейшую роль оно выполняет как на промышленных предприятиях, так и на объектах социальной сферы. Перебои в электроснабжении могут приостанавливать технологические процессы, что ведет к значительным экономическим потерям. Они также могут быть чреваты серьезными последствиями для здоровья и жизни людей.

Энергетические системы, обеспечивающие электроэнергией промышленные объекты, оказывают значительное влияние на работу электроприводов, систем освещения, функционал электроустановок и, в конечном итоге, на весь производственный процесс. В связи с этим специалисты в области электроснабжения должны иметь большой спектр знаний целого ряда проблем, связанных с проектированием электроустановок промышленных предприятий.

Цели проектирования

При рассмотрении систем обеспечения электроэнергией конкретного объекта инженер должен рассмотреть различные подходы к проектированию, которые наилучшим образом соответствуют следующим общим целям.

Безопасность. Проектирование энергетической системы, которая не будет представлять электрической опасности для людей, использующих объект и оборудование, питающееся от электрической сети, является основной целью проектирования любой системы. Важно разработать систему, которая по своей сути безопасна для людей, ответственных за техническое обслуживание и содержание электрооборудования.

Максимальная непрерывность обслуживания. Необходимая степень непрерывности и надежности обслуживания должна варьироваться в зависимости от типа использования объекта, характера нагрузок или технологических процессов. Например, для небольшого коммерческого офисного здания, относящегося к третьей категории потребителей электроэнергии, отключение электроэнергии на значительное время, скажем, на несколько часов, может быть приемлемым, тогда как в более крупном коммерческом здании или промышленном предприятии может быть приемлемым только отключение на несколько минут. В других учреждениях, например, крупных медицинских центрах первой категории потребителей электроэнергии, отключение электроэнергии не допускается.

Как правило, непрерывность и надежность обслуживания могут быть увеличены за счет:

- установки нескольких источников питания;
- использования кратковременных выключателей номинальной мощности;

- предоставления альтернативных источников питания, таких как генераторы или источники бесперебойного питания;
- выбора электрооборудования и проводников самого высокого качества;
- использования наилучших методов установки, включая правильную конструкцию заземления системы;
- внедрения современных систем сигнализации, мониторинга и диагностики.

Максимальная гибкость и расширяемость. Например, электроснабжение от нескольких небольших трансформаторов может обеспечить большую гибкость для будущих изменений, чем от одного трансформатора большой мощности. Кроме того, при проектировании системы распределения электроэнергии необходимо учитывать будущее расширение здания или повышенные требования к нагрузкам.

Максимальный электрический КПД. Электрическая эффективность, как правило, может быть увеличена путем проектирования систем, которые минимизируют потери в проводниках, трансформаторах и другом оборудовании.

Минимальные затраты на техническое обслуживание. Как правило, чем проще электроэнергетическая система и электрооборудование, тем ниже связанные с этим затраты на техническое обслуживание и ошибки оператора. Поскольку электрические системы и оборудование становятся все более сложными для обеспечения большей непрерывности или гибкости обслуживания, затраты на техническое обслуживание и вероятность ошибки оператора увеличиваются пропорционально сложности.

Основные принципы проектирования систем электроснабжения

При проектировании систем электроснабжения используют следующие принципы: нисходящее и восходящее проектирование, иерархичность, декомпозиция, многоэтапность, итерационность.

Принцип декомпозиции основан на делении системы электроснабжения на компоненты для их отдельного проектирования при условии согласования разрабатываемых решений и требований. Например, разделение системы на линии электропередач, трансформаторные подстанции, распределительные устройства, релейную защиту и автоматику и так далее.

Принцип иерархичности предполагает рассмотрение систем электроснабжения по уровням с целью последовательного увеличения сложности системы совместно с декомпозицией. Например, деление системы электроснабжения по функциональному принципу при расчете электрических нагрузок.

Принцип многоэтапности проектирования состоит в разделении процесса на этапы, стадии, операции и проектные процедуры.

Нисходящее проектирование – проектирование «сверху-вниз» основано на первоочередном решении задач более высоких иерархических уровней.

Восходящее проектирование «снизу-вверх» основано на первоначальном решении задач низших иерархических уровней.

Принцип итерационности основан на разработке рациональных проектных решений. Например, сочетание нисходящего и восходящего многоэтапного проектирования с возвращением (итерацией) к иерархическим уровням для уточнения принятых решений.

При проектировании распределительных систем, инженер должен располагать большим объемом знаний о различных типах и параметрах применяемого оборудования. К основным параметрам, требующим внимания при проектировании систем распределения электроэнергии, относятся:

- долговечность и гибкость конструкции;
- характеристики нагрузок;
- требования к качеству электроэнергии;

- энергоэффективность системы;
- расположение подстанций и распределительного оборудования;
- типы источников питания, включая обычные, резервные и аварийные;
- типы применяемых шинопроводов и распределительного оборудования;
- типы силовых щитов и систем освещения;
- методы установки и монтажа оборудования.

Заключение

Надежное, безопасное и экономичное снабжение потребителей электрической энергией должного качества является, безусловно, обязательным условием нормального функционирования каждого потребителя. Важным этапом создания любой электроэнергетической системы является проектирование, ведь именно на этапе создания проекта формируется структура системы электроснабжения и закладываются основные свойства, определяющие ее технические, эксплуатационные и экономические показатели.

Библиографический список

1. В.Н. Радкевич. Проектирование систем электроснабжения. Учебное пособие, Минск, 2001.
2. Правила устройства электроустановок: 7-е издание (ПУЭ)/ Главгосэнергонадзор России. М.: Изд-во ЗАО «Энергосервис», 2007. 610 с.
3. В. Г. Сазыкин. Проектирование систем электроснабжения Книга 1. Организация проектирования. Учебное пособие, Краснодар, 2019.
4. EATON, Resources for power system designers. Basics of power system design.

УДК 620.9; ГРНТИ 44.29.39

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Д.В. Трегубов

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

Аннотация. В данной работе рассматриваются принципы и основные положения построения схем электроснабжения, классификация электрических сетей.

Ключевые слова: система электроснабжения, электрическая сеть, принципы построения электрических сетей, классификация электрических сетей, проектирование схем электрических сетей, развитие электрической сети.

FEATURES OF CONSTRUCTION OF POWER SUPPLY SYSTEMS

D.V. Tregubov

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

Abstract. This paper discusses the principles and basic provisions of the construction of power supply circuits, the classification of electrical networks.

Keywords: power supply system, electrical network, principles of construction of electrical networks, classification of electrical networks, design of electrical networks, development of electrical networks.

Требования, которые предъявляются к системе электроснабжения (СЭС), зависят от мощности потребителей и их категории надежности, так как для предприятий различной мощности требуются различные схемы электроснабжения и источники питания.

Построение схемы электроснабжения представляет собой определение:

- Схем выпуска мощности новых электростанций;

- Размещения новых промежуточных станций, связей между ними;
- Схем подключения промежуточных станций к сооружаемым сетям;
- Объема реконструкции линий и промежуточных станций, пришедших к износу;
- Количества трансформаторов на промежуточных станциях, их мощностей;
- Электрических схем соединения электростанций и промежуточных станций;
- Размещения регулирующих устройств;
- Сечений проводов ЛЭП;
- Токов короткого замыкания и их ограничения;
- Экономических показателей работы сети.

В большинстве случаев, выбор схемы электрических сетей осуществляется на данные перспективные уровни:

- Единая национальная (общероссийская) электрическая сеть – 10 лет;
- Распределительная сеть – 5 лет;
- Сеть электроснабжения предприятий, газопроводов, железных дорог и т.д. – сроки ввода в эксплуатацию объекта, с которым связано создание сети.

Основные положения построения схем электроснабжения

- Комплексное решение вопросов электроснабжения совместно со строительными и технологическими вопросами;
- Максимальное приближение источников высокого напряжения к центрам энергопотребления;
- Деление главных понизительных подстанций на несколько подстанций глубокого ввода (ПГВ);
- Для снижения токов короткого замыкания и упрощения релейной защиты необходимо применение глубокого секционирования схем электроснабжения предприятий путем разделения работы шин вторичного напряжения понизительных подстанций и распределительных устройств. Принцип глубокого секционирования предусматривает использование устройств автоматического включения резерва (АВР) на всех номиналах напряжения, что позволяет использовать глубокое секционирование при нагрузках любой категории;
- Исключение «холодного резерва» элементов СЭС для снижения потерь мощности и электроэнергии путем поддержания рабочего состояния всех элементов. Исключением являются трансформаторы, так как часть из них практически выключать на время провала нагрузки. Данный принцип позволяет повысить надежность системы, так как исправность элементов непрерывно самоконтролируется.

При проектировании схем электрических сетей необходимо обеспечить её экономическую эффективность и функционирование с учетом сооружаемых элементов. Прежде всего необходимо контролировать работоспособность функционирующих электрических сетей при перспективных электрических нагрузках с учетом износа линий и промежуточных станций и их вероятной реконструкции.

Схема электрической сети должна обеспечивать работоспособность и сохранение принятых технических решений по её развитию при возможных отклонениях уровней электрических нагрузок от номинальных, трасс воздушных линий и площадок промежуточных станций от намеченных, сроков ввода в эксплуатацию элементов системы от планируемых. Необходимо предусматривать возможность преобразования электрической станции с минимальными затратами для достижения необходимого результата.

Развитие электрической сети должно выполняться на основе технической и экономической целесообразности предпринимаемых решений, которые обеспечивают строительство

сети в соответствии с нормативно-технической документацией по проектированию линий и промежуточных станций.

При планировании развития электрической сети следует предусматривать электроснабжение действующих и перспективных потребителей электроэнергии, а также учитывать нагрузки потребителей, расположенных в рассматриваемом районе. Необходимо обеспечить минимизацию потерь электроэнергии до экономически обоснованной величины.

На основании действующих нормативных документов схемы присоединения электростанций и промежуточных станций должны обеспечить необходимую надежность питания энергоузлов. Возможно неполное резервирование отдельного энергоузла с уменьшением его максимальной нагрузки во время ремонтных работ или замены оборудования на 25%, но не более 400 МВт при электроснабжении на напряжении 750 кВ, 250 МВт – при напряжении 500 кВ, 150 МВт – при напряжении 300 кВ и 50 МВт – при 220 кВ. Проектируемая схема электрической сети и ее параметры должны обеспечивать надежность электроснабжения таким образом, чтобы в случае отключения трансформатора или линии сохранялось электроснабжение потребителей электроэнергии с соблюдением нормативного качества без ограничения нагрузки [1].

В случае различия по надежности электроснабжения рассматриваемых вариантов схем необходимо выполнить экономический анализ ущерба от недоотпуска электроэнергии. Учет ущерба при выполнении расчетов по выбору схем также выполняют в следующих случаях:

- При расчете пропускной способности системообразующих сетей по условиям взаиморезервирования;
- Для нахождения относительной эффективности мероприятий, выполняемый для обеспечения необходимой надежности;
- При обосновании эффективности повышения уровней надежности выше нормативных требований.

Классификация электрических сетей

Электрическая сеть – это совокупность подстанций и линий различного напряжения, которые необходимы для передачи и распределения электроэнергии. Электрические сети классифицируются по роду тока, назначению, напряжению, месту прокладки и принципу построения.

По роду тока электрические сети подразделяют на сети постоянного и переменного тока. Сети переменного тока являются более распространенными. Постоянный ток наиболее часто применяется для питания электротранспорта. В некоторых ситуациях на предприятиях необходимо подключение сети постоянного тока, например, для электролиза растворов и электрометаллургии. В последнее время, все более часто применяются высоковольтные линии электропередачи постоянного тока (HVDC), используемые для передачи электрической энергии от альтернативных источников. Достоинствами данной системы являются экономичность, способность работать параллельно с различными линиями постоянного тока, и возможность не синхронизировать частоты ЛЭП.

По назначению электрические сети классифицируют на питающие и распределительные. Питающая линия – это линия, выполняющая питание трансформаторной подстанции или распределительного пункта от центра питания без распределения электроэнергии по ее длине. Распределительная линия – это линия, выполняющая питание трансформаторных подстанций от распределительного пункта или центра питания. В электрических сетях напряжением менее 1000 В питающими линиями являются линии, которые идут от подстанций к распределительным щитам или пунктам, а распределительными являются линии, идущие от распределительных щитов или пунктов к

электроприёмникам.

По напряжению электрические сети разделяются на сети до 1000 В (127 В, 220 В, 380 В, 660 В) и выше 1000 В (3 кВ, 6 кВ, 10 кВ, 20 кВ, 35 кВ, 110 кВ, 150 кВ, 220 кВ, 330 кВ, 500 кВ, 750 кВ). Для поддержания напряжения в заданных пределах, необходимо компенсировать потерю в трансформаторах. Для этого, номинальные значения напряжения генераторов и вторичных обмоток трансформаторов на 5% выше напряжения электроприемников.

По месту прокладки электрические сети разделяют на внутренние и наружные. Внутренние сети прокладывают внутри помещений с использованием изолированных проводов, шин, кабелей. Наружные сети выполняют путем прокладки проводов, закрепленных на опорах (воздушные линии), а также путем прокладки кабелей, проложенных в блоках (подземные линии), коллекторах, траншеях.

По принципу построения электрические сети классифицируют на замкнутые и разомкнутые. Разомкнутая сеть – совокупность линий, питание которых осуществляется от одного источника питания. Её недостатком является прерывание питания электроприемников участка, на котором произошел обрыв линии. Для резервирования питания потребителей предусматривают возможность отключения участка сети при его повреждении. К данным сетям относятся распределительные сети напряжением 6 кВ и 10 кВ. Питание данных сетей осуществляется от шин 6 кВ, 10 кВ и 35 кВ районных подстанций или шин местных электростанций[2].

Замкнутая сеть – это сеть, питание которой осуществляется от двух или более источников питания. В данной сети питание не будет прекращено при обрыве линии, благодаря чему повышается надежность системы. Также, преимуществом данного вида сетей является уменьшение потерь напряжения, потерь активной мощности и электроэнергии. Распространены две схемы замкнутой сети: кольцевые и с двусторонним питанием.

Топология электрической сети зависит от географических условий, размещения источников электроэнергии и распределения нагрузок. Из-за большого количества данных условий, проектируемые сети имеют множество конфигураций, обладающие разными свойствами и техническими показателями.

Библиографический список

1. И.Г. Карапетян, Д.Л. Файбисович, И.М. Шапиро Справочник по проектированию электрических сетей. - 4-е изд. - М.: ЭНАС, 2012.
2. В.Д. Маньков Основы проектирования систем электроснабжения. Справочное пособие. – СПб: НОУ ДПО «УМИТЦ «Электро Сервис», 2010.

УДК 621.311.4, ГРНТИ 44.29.33

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ КОМПЛЕКТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Е.А. Варламова, С.А. Круглов

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина
Российская Федерация, Рязань lizav76@mail.ru*

Аннотация. В работе изучаются внешние факторы окружающей среды, которые могут воздействовать на любое оборудование. Рассматривают конкретное влияние их на электроустановки и степень влияния на работу без отказов и надежность установки или оборудования в целом.

Ключевые слова: отрицательное воздействие, воздействие температуры, воздействие солнца, воздействие влажности, воздействие ветра и гололеда, электроустановки, отказ оборудования, старение.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF EXTERNAL INFLUENCING FACTORS ON ELECTRICAL EQUIPMENT COMPLETE TRANSFORMER SUBSTATIONS

E.A. Varlamov, S.A. Kruglov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin
Russian Federation, Ryazan lizav76@mail.ru*

Annotation. The work examines external environmental factors that can affect any equipment. Consider their specific impact on electrical installations and the degree of impact on failure-free operation and reliability of the installation or equipment as a whole.

Keywords: negative effects, exposure to temperature, exposure to the sun, exposure to moisture, exposure to wind and ice, electrical installations, equipment failure, aging.

При проектировании и эксплуатации объектов электроснабжения для более качественной работы используют климатическое исполнение для всей установки или для отдельных ее узлов. Существуют разные категории, но все они разделяются на разные виды и тем самым характеризуют окружающую среду. Вид климатического исполнения характеризует следствие физико-химических процессов, происходящих при определенных условиях. Следствием всего этого действия являются деформации, износ, поломки, коррозии и так далее.

Выделяют три источника опасного воздействия на оборудование:

1. Энергия окружающей среды.
2. Энергия внутренних источников энергии (все что связано с рабочими процессами).
3. Потенциальная энергия, накопленная в процессе изготовления.

Механические, электрические и магнитные свойства материалов сильно зависят от природных явлений, таких как температура, влажность, напряженность электрического поля среды и другие.

Следствием воздействия физико-химических факторов окружающей среды являются отказы технических устройств, а это, в свою очередь, напрямую влияет на надежность и безотказность всей системы (установки). Зная воздействующую энергию и время, в течении которого все происходит, можно рассчитать вероятность интенсивности отказов, она, в свою очередь, позволяет понять, насколько устройство может противостоять негативно воздействующей на него энергии.

Не стоит и исключать факторы, не связанные с производственными процессами, а точнее:

1. При перевозке.
2. При заправке горючим.
3. При негативном влиянии от легковоспламеняющихся или взрывоопасных веществ от соседних предприятий.

4. При любых механических ударах.

Так же внешнее воздействие может быть связано с природными действиями: ветер, наводнения, землетрясения, морозы, жара и другие. При проектировании и выборе оборудования всегда необходимо все это учитывать. Все природные явления разбиты на категории и подгруппы и имеют при этом свое обозначение. Например, такое как, УХЛ. Так обозначают умеренно холодный климат. Это означат что температура в той местности лежит в пределах от -22°C до $+25^{\circ}\text{C}$, влажность при 20°C 60%, либо верхнее значение при 25°C 80% и т.д. [1]. Виды воздействующих климатических факторов и их значения могут устанавливать в зависимости от макроклиматических районов, но это применяют для конкретных типов технических изделий. Кратко рассмотрим влияние внешних климатических факторов на материалы механизмов.

Воздействие температур

Различают три вида тепловых воздействий:

1. Непрерывное. Влияет при анализе надежности систем, при работе в стационарном режиме. Как правило, повреждения вызваны повышением температуры предельно допустимого значения при эксплуатации.
2. Периодическое. Рассматривают при суточном изменении температуры, при повторном кратковременном включении под нагрузку или при резких колебаниях условий эксплуатации.
3. Аперриодическое. Оценивают при внезапном отказе от теплового удара. Высокая скорость изменения температуры приводит к быстрому изменению размеров материалов. Как правило бывает в следствии неправильного выбора или учета коэффициента линейного расширения сопрягаемых материалов.

Для оценки показателей надежности оборудования комплектных трансформаторных подстанций необходимо знать изменение внешней температуры. Изменение температуры описывается случайным процессом:

$$T(t) = \bar{T}(t) + \varphi(t), \quad (1)$$

где $\bar{T}$ - средняя температура на время t (с 0 часов 1 января по 24 часа 31 декабря);

φ -случайная составляющая температуры на время t .

$\bar{T}(t)$ можно рассчитать по формуле:

$$\bar{T}(t) = A_0 + \sum_{i=1}^n A_i \cos \omega_i t + B_i \sin \omega_i t, \quad (2)$$

где A_0 – коэффициент, численно равный математическому ожиданию среднегодовой температуры, $^{\circ}\text{C}$;

$A_i B_i$ – амплитуды колебаний математического ожидания температуры на частоте ω_i [2].

Воздействие солнца и солнечной радиации

Важным фактором, влияющим на состояние электроустановок КТП, стоящих на открытых поверхностях, также является воздействие солнечного излучения. Оно вызывает старение материалов изоляторов, проводов и корпуса подстанций.

На плотность светового потока от солнца влияет многое, например, влажность или наличие паров, это создает препятствие на пути прохождения светового луча, а значит часть энергии теряется внутри и до поверхности земли, и до оборудования доходит не все. Наибо-

лее сильное воздействия на материалы оказывают перпендикулярно падающие лучи. Повреждения от излучения подразделяются на две группы:

- фотохимические повреждения;
- фотоокислительные повреждения.

Большая часть оборудования, а точнее выключатели, трансформаторы, шины, разъединители и т.д., состоит из металлов и их различных сплавов, это означает, что наиболее губительными являются фотоокислительные повреждения. При одновременном воздействии влаги и кислорода в ходе химической реакции выделяется дополнительная энергия. Как следствие, при попадании ультрафиолетового излучения оборудование КТП подвержено коррозии, и в этот момент меняются свойства металла. Из-за этого повышается вероятность отказов и, как следствие, падает надежность оборудования и, соответственно, надежность передачи энергии потребителю.

Для разрушения материалов достаточно попадания солнечной радиации, от которой происходит старение и отказы в работе. В основе старения лежат два одновременно протекающих процесса: деструкция (разрыв связей между атомами и молекулами) и структурирование (образование новых связей). Таким образом, в результате старения изменяются механические и электрические свойства электроустановок подстанции. Основным действием солнечного излучения является нагрев поверхностей, следовательно, повышение температуры (воздействие которой было уже рассмотрено выше).

Воздействие влажности

Рассмотрим влияние влажности окружающей среды. Влага содержит: пары воды, растворы солей и кислот. Из-за оседания ее на металлах образуется пленка из электролита и, как следствие, химические реакции, что приводит к разрушению металла – коррозии. Показатели надежности зависят от относительной влажности воздуха, которая описывается случайным процессом с математическим ожиданием:

$$\bar{\varphi}(t) = C_0 + \sum_{j=1}^n (C_j \cos \omega_j t + D_j \sin \omega_j t), \quad (3)$$

где C_0 - коэффициент равный математическому ожиданию средней годовой относительной влажности, %;

C_j, D_j – амплитуды колебания математического ожидания влажности, соответствующие частоте ω_j .

Существует несколько видов атмосферной коррозии (зависят от толщины пленки влаги на поверхности металла), показаны на рисунке 1:

- сухая коррозия, происходит при отсутствии влажной пленки (I);
- влажная коррозия, толщина пленки образуется из-за конденсации (самая высокая коррозия) (II);
- мокрая коррозия, наибольшая толщина пленки (III);
- погружение металла в воду (IV) [1].

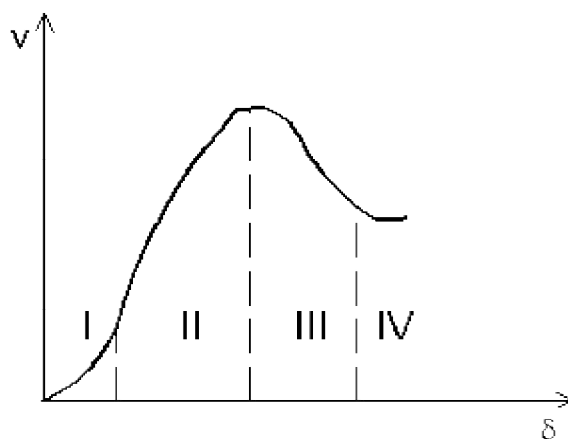


Рис. 1. Зависимость скорости коррозии от толщины пленки влаги

Воздействие гололеда и ветра на электроустановку

Ветер может оказывать различное влияние на электрооборудование комплектной трансформаторной подстанции. Рассмотрим негативное, так как оно влияет на отказы и надежность энергоснабжения. Воздействие ветра и гололеда на технические изделия приводит к возрастанию действующих аэродинамических и физических нагрузок, а также приводит к образованию льда что снижает электрическое сопротивление материалов.

Влияние гололедно-ветрового црежима оценивается вероятностно-статистическими методами, так как это случайный фактор, и используют для этого распределение Гудрича:

$$F(x) = \exp\{-K_{x\Gamma} x^{n_{x\Gamma}}\}, \quad (4)$$

где $K_{x\Gamma}$, $x^{n_{x\Gamma}}$ - параметры уравнения.

Влияние гололеда отрицательно в любых его проявлениях. При застывании воды происходит уменьшение электрического сопротивления, что приводит к появлению пробоев. Вода попадает в поры и застывает в них, при этом происходит расширение и материал разрушается. Однако при оттаивании ситуация не лучше. Жидкость вытекает, но поры меньше не могут стать, от этого создается рыхлость, что также отрицательно влияет на оборудование.

Истощающее воздействие оказывает ветер, его можно оценить через распределенную ветровую нагрузку:

$$p = q_0 n_h c b, \quad (5)$$

где q_0 – динамическое давление ветра на высоте 10 м. над поверхностью земли;

n_h – поправочный коэффициент на увеличение динамического давления в зависимости от высоты над поверхностью земли;

c – аэродинамический коэффициент;

b – коэффициент, учитывающий воздействие пульсации динамического давления ветра.

Библиографический список

- ГОСТ 15150-69 Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды.
- <https://studfile.net/preview/5996807/page:19/#36>

УДК 621.311.4, ГРНТИ 44.29.33

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОМЫШЛЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ПРОДУКЦИИ IEK

А.А. Четвергов

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

Аннотация. Освещение промышленных предприятий является одним из самых сложных и интересных по той причине, что оно имеет огромное количество требований, таких как соответствие нормативам и нормам, безопасность, экономичность, надёжность, привлекательный внешний вид. Подобный вид освещения должен быть надёжным, устойчивым к механическому внешнему воздействию и вибрации. Зачастую срок службы подобного оборудования составляет не менее 25 лет, именно поэтому рекомендуется заранее подумать о такой важной составляющей, как экономичность, чтобы свести энергопотребление к минимуму. Сегодня предлагается огромное количество экономичных светильников. Ежегодно растет популярность на световое оборудование, источником света в котором являются светодиоды.

Ключевые слова: освещение промышленных предприятий, экономичность освещения

COMPARISON OF INDUSTRIAL LIGHTING CHARACTERISTICS USING IEK PRODUCTS

A.A. Chetvergov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin
Russian Federation, Ryazan, aleksanderchetvergov@yandex.ru*

Annotation. The lighting of commercial enterprises is one of the most complex and interesting ones because it has a huge number of necessary demands, such as meeting norms and requirements, security, cost-effectiveness, dependability, attractive appearance. The appropriate kind of lighting should be stable, resistant to mechanical external experience and vibration. Sometimes the service life of a suitable equipment should be at least 25 years, so it is recommended to reserve the time of such an important component as efficiency in order to minimize energy consumption. Nowadays a lot of economic lamps are offered. The popularity of solid-state lighting with LEDs is growing.

Keywords: lighting of industrial enterprises, efficiency of lighting

Промышленное освещение

Условия искусственного освещения на промышленных предприятиях влияют на зрительную работу, физическое и моральное состояние людей, следовательно, на производительность труда, качество продукции и производственный травматизм.

Основные требования, предъявляемые к промышленному освещению:

- создание освещенности, соответствующей — характеру зрительной работы;
- обеспечение постоянного уровня освещенности и равномерности освещения поверхности;
- отсутствие ослепления от источников освещения и предметов в поле зрения;
- надежность и простота в эксплуатации, экономичность

Светодиодные светильники ДСП 1304-1307, ДСП 1318-1319

Эффективное решение для освещения паркингов, складских, производственных, подсобных и подвальных помещений с высотой подвеса до 8 метров, с высоким содержанием пыли и влаги.

Преимущества

- Высокая эффективность: эффективность 80 лм/Вт снижает потребление электроэнергии.
- Равномерное освещение: матовый рассеиватель дает равномерное свечение без слепящего эффекта.
- Отсутствие пульсаций: пульсация менее 5%, комфортное свечение для человеческого глаза.
- Транзитное подключение: возможно транзитное подключение светильников, что позволяет сэкономить затраты на материалы.
- Электромагнитная совместимость: не оказывающее вредных воздействий ни на окружающую среду и на работоспособность другого электрооборудования.

Конструкция

Установка:

Монтаж светильника осуществляется при помощи стальных скоб, накладной или навесной монтаж. Тросы в комплект не входят.

Конструкция:

Все части корпуса светильника выполнены из ударопрочного поликарбоната, не поддерживающего горение.

Оптическая часть:

Рассеиватель светильника выполнен из матового светостабилизированного поликарбоната, устойчивого к УФ-лучам, сохраняет цвет и светопропускающую способность на протяжении всего срока службы.

Технические характеристики

Модель	1304	1305	1304Д	1305Д	1306	1307	1318	1319
Мощность, Вт	18				36		48	
Световой поток, лм	1440		1440		2880		3840	
Цветовая температура	4000	6500	4000	6500	4000	6500	4000	6500
Номинальное напряжение, В	230 В/50 Гц							
Датчик движения	-		да		-			
Пульсация, не более	5%							
Индекс светопередачи, Ra	>80							
Коэффициент мощности	0,9							
Рабочая температура, °С	-25...+50							
Степень защиты	IP65							

Монтаж светильника

Монтаж светильника на рабочую поверхность производится при помощи монтажных скоб и саморезов входящих в комплект поставки. Для монтажа необходимо закрепить две монтажные скобы на стене или потолке и защелкнуть в них корпус светильника.

Светильники ДСП 2101-2202 для Т8

Для общего освещения общественных, производственных, подсобных помещений с повышенным содержанием пыли и влаги.

Светодиодные лампы Т8 поставляются отдельно.

Технические характеристики

Модель	2101	2102	2201	2202
Тип лампы	T8			
Количество ламп	1	2	1	2
Размер лампы, мм	600		1200	
Цоколь	G13			

Светодиодные линейные лампы Т8

Мощность лампы, Вт	10		18	20	24
Световой поток, лм	900	1000*	1620	2000	2160
Напряжение, В	170...264				
Цветовая температура, К	4000/6500				
Индекс светопередачи, Ra	>80				
Цоколь	G13				
Рабочее напряжение, В	170...264				
Длина, мм	600			1200	

Светодиодные аварийные светильники ДСП 1336А

Светильники ДСП предназначены для общего и аварийно-эвакуационного освещения общественных. Производственных и подсобных помещений с повышенным содержанием пыли и влаги (IP65). Светильники имеют универсальное подключение (постоянного и непостоянного действия- зависит от схемы). Соответствуют требованиям ГОСТ Р МЭК 60598-2-22 по аварийному освещению.

Преимущества

- Высокий световой поток: высокий световой поток в дежурном режиме 3060 лм. Высокий световой поток в аварийном режиме, 22% светового потока от дежурного режима, 680 лм.
- Аккумуляторная батарея: высокая емкость аккумулятора, время работы в аварийном режиме 180 мин.
- Интеллектуальная система зарядки АКБ: встроенная электронная защита батареи от избыточного разряда и перезаряда, увеличенный срок службы батареи до 3-х лет.
- Транзитное подключение: возможность транзитного подключения светильников до 20 штук, что позволяет сэкономить затраты на материалы.

Конструкция

- Система быстрого безинструментального подключения проводов – FASTCONNECT, возможность подключения на уже установленном светильнике.
- В комплект идет маркировочный стикер.
- Кнопка «ТЕСТ» для проверки работы светильника. Зеленый индикатор указывает о рабочем состоянии аккумулятора.

Технические характеристики

Мощность, Вт	36
Световой поток рабочий/аварийный режим, лм	3060/680
Цветовая температура, К	5000/6500
Номинальное напряжение, В	230 В/50 Гц
Коэффициент пульсации, не более	5%
Индекс цветопередачи, Ra	>70
Коэффициент мощности	0,9
Степень защиты	IP65
Время работы АКБ, мин	180
Рабочая температура, °С	0...40

Светильники для высоких пролётов ДСП 3004-3015

Эффективное решение освещения открытых пространств, складских и производственных помещений с высотой подвеса свыше 6 метров, с высоким содержанием пыли и влаги, где требуется высокий уровень освещённости и качество засветки.

Гарантия 5 лет.

Преимущества

- Высокая эффективность: световая отдача составляет 140лм/Вт снижает потребление электроэнергии.
- Широкий диапазон рабочего напряжения: диапазон рабочего напряжения составляет 100...253 В.
- Электромагнитная совместимость: не оказывающее вредных воздействий ни на окружающую среду и на работоспособность другого электрооборудования.
- Простой монтаж: светильник монтируется путём подвеса на рым-болт, это наиболее простой, быстрый и распространённый вид монтажа для подобных светильников.

Конструкция

- Драйвер и светодиодный модуль идеально интегрированы в корпус, все компоненты разрабатывались в комплексе, в результате достигается необходимый уровень теплоотвода.
- Корпус светильника имеет цельнометаллический литой корпус, изготовленный из алюминия.
- Вторичная оптика для моделей 60 /90 и рассеивать для модулей 120 выполнены из стабилизированного поликарбоната, который имеет высокий коэффициент прозрачности.

Технические характеристики

Модель	3004/3005/3006	3007/3008/3009	3010/3011/3012	3013/3014/3015
Мощность, Вт	100	150	200	250
Световой поток, лм	14 000	21 000	28 000	35 000
Тип КСС	Г60/Г90/Д120			
Цветовая температура	6500			
Номинальное напряжение, В	230 В/50 Гц			
Пульсация, не более	5%			
Индекс цветопередачи, Ra	>70			
Коэффициент мощности	0,9			
Рабочая температура, °С	-45...+50			
Степень защиты	IP65			

Светодиодные свет/ильники ДСП 1304-1307, ДСП 1318-1319

Эффективное решение для освещения открытых пространств, складских и производственных помещений с высотой подвеса свыше 6 метров, с содержанием пыли и влаги.

Преимущества

- Высокая эффективность: световая отдача составляет 100 лм/Вт снижает потребление электроэнергии.
- Защитное покрытие: порошковая покраска. Надежная защита от ржавчины и механических воздействий, сохранение первоначального внешнего вида на протяжении всего срока службы.
- Электромагнитная совместимость: не оказывающее вредных воздействий ни на окружающую среду и на работоспособность другого электрооборудования.
- Простой монтаж: светильник монтируется путем подвеса на рым-болт. Это наиболее простой, быстрый и распространенный вид монтажа для подобных светильников.

Конструкция

- Светильники имеют литой цельнометаллический корпус. Изготовленный из алюминия, за счет чего достигается необходимый уровень теплоотвода для комфортной работы светильника в широком диапазоне температур окружающей среды от -20 до +40 °С.
- В качестве рассеивателя использовано каленое стекло, которое имеет высокую механическую прочность (IK8)

Технические характеристики

Модель	4001	4002	4003	4004	4005	4006
Мощность, Вт	100		150		200	
Световой поток, лм	10 000		15 000		20 000	
Тип КСС	Д					
Цветовая температура	4000	6500	4000	6500	4000	6500
Номинальное напряжение, В	230 В/50 Гц					
Пульсация, не более	5%					
Индекс цветопередачи, Ra	>70					
Коэффициент мощности	0,9					
Рабочая температура, °С	-20...+40					
Степень защиты	IP65					

Библиографический список

1. <https://www.iek-edu.com/>
2. Оболенцев Ю. Б., Гиндин Э. Л. Электрическое освещение общепромышленных помещений - Москва: Энергоатомиздат, 1990

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

С.И. Овчинников

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, semen97@bk.ru*

Аннотация. В работе рассматриваются электрофизические характеристики автоматических выключателей, разработка новой методики проверки выключателей.

Ключевые слова: Методика проверки, автоматический выключатель, проверка автоматических выключателей, химический анализ, термостойкость.

DEVELOPMENT OF A METHODS FOR RESEARCHING ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF CIRCUIT BREAKERS

S.I. Ovchinnikov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russian Federation, Ryazan, semen97@bk.ru*

Annotation. The paper discusses the electrophysical characteristics of circuit breakers, the development of a new method for checking the switches.

Keywords: Testing technique, circuit breaker, circuit breaker testing, chemical analysis, heat resistance.

Цели работы – исследование электрофизических характеристик, разработка методики для проверки автоматических выключателей и недопущения поступления некондиционной продукции.

Рекомендации настоящей методики применяются при проведении проверки и испытаний автоматических выключателей, аппаратов защиты электродвигателей от перегрузки (тепловые и другие виды реле), различных пускателей и простых реле, а также выключателей нагрузки на напряжение до 1 кВ.

Различают следующие группы коммутационных аппаратов:

- Автоматические выключатели – это механический коммутационный аппарат, способный включать, проводить и отключать токи в нормальном состоянии цепи, а также включать, проводить в течение заданного времени и автоматически отключать токи в указанном аномальном состоянии цепи [1].
 - Неавтоматические выключатели – это контактный коммутационный аппарат, предназначенный для переключения электрических цепей. В распределительных устройствах до 1 кВ
 - Плавкие предохранители – элемент электросети, выполняющий защитную функцию.
- Для проведения испытаний используют современное оборудование, а именно:
- Для проверки характеристик расцепления и превышения температуры, используют прогулочный стенд САТУРН-М ;
 - Для проверки электрической прочности изоляции используют аппарат для испытаний 10кВ АИСТ 10;
 - Для проверки сопротивления изоляции используют мегаомметр Е6-32 Радио-Сервис;
 - Проверку конструкции и материалов осуществляют с помощью современного рентгенофлуоресцентного спектрометра M1 Mistral Bruker.

Данная разработанная методика создана для улучшения качества продукции, в ней изложены основные методы испытаний продукции. Основная задача проверки – предупредить поступление некондиционной продукции. Производство, эксплуатация и испытания продукции проводятся в соответствии с национальными стандартами и регламентирующими документами Российской Федерации. Нормативная документация, действующая в отношении модульных автоматических выключателей:

- ГОСТ Р 50345-2010 (МЭК 60898-1: 2003)
- ПУЭ. Издание седьмое

Методика состоит из 17 испытаний:

1. Проверка внешнего вида и состояния упаковки
2. Проверка маркировки
3. Проверка габаритных размеров и массы изделия
4. Проверка размеров упаковки.
5. Проверка конструкции
6. Проверка винтовых зажимов
7. Проверка на вытягивание проводника
8. Проверка превышения температуры[3]
9. Проверка крепления на DIN-рейку
10. Проверка характеристик расщепления[2]
11. Проверка электрической прочности изоляции.
12. Проверка сопротивления изоляции
13. Проверка потерь мощности
14. Проверка конструкции и материалов.

14.1 Визуальный осмотр. Измерения размеров. Запрос документации на комплектующие.

14.2 Провести химический анализ контактной группы автоматических выключателей с помощью современного рентгенофлуоресцентного спектрометра M1 Mistral.

15. Проверка термостойкости.

16. Проверка влияния температуры окружающей среды на характеристику расщепления.

17. Проверка стойкости к аномальному нагреву и огню. Испытание раскалённой проволокой

В отличие от предыдущей методики в новой появилось следующее:

1. Проверка конструкции и материала с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра, что позволяет улучшить материал контактных групп автоматического выключателя. Добавлен химический анализ контактных групп автоматического выключателя, соответствующий Директиве 2011/65/ЕС от 27/01/03 RoHS, запрещающей использование вредных веществ – свинца, ртути, кадмия, шестивалентного хрома [4].
2. Проверка влияния температуры окружающей среды на характеристику расщепления (ГОСТ Р 50345-2010), что позволяет проверить влияет ли температура окружающей среды на работоспособность автоматических выключателей, получить показания характеристик расщепления согласно ГОСТу Р 50345-2010.
3. Проверка термостойкости. Позволяет определить изменения физических, механических и электрических свойств в зависимости от температуры и температурно-временной зависимости необратимого изменения свойств.

Данная методика разрабатывалась для периодического подтверждения качества продукции и стабильности технологического процесса с целью подтверждения возможности продолжения изготовления продукции по действующей конструкторской и технологической документации и продолжения ее приемки.

Библиографический список

1. Рябов В.И. «Электрооборудование»-5-е изд. перераб.-М.: Экономика, 2010;
2. ГОСТ Р 50345-2010 «Аппаратура малогабаритная электрическая. Автоматические выключатели для защиты от сверхтоков бытового и аналогичного назначения»;
3. ГОСТ 6827-76 «Электрооборудование и приемники электрической энергии. Ряд номинальных токов»;
4. Лайтинен Г.А. «Химический анализ»-2-е изд., перераб.-М.: Химия, 2016.

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
Воробьев М.Д., Юдаев Д.Н. Оценка информативности компонент фликкерной составляющей НЧ-шума при прогнозировании эмиссионной активности металлопористых катодов вакуумных СВЧ приборов.....	5
Калинин Н.А., Мишин В.Ю., Климаков В.В., Серебряков А.Е. Разработка цифровой системы управления частотной подставкой лазерного гироскопа.....	11
Агаев Г.Д. Интенсивность накачки твердого лазера с дельтовидным сечением.....	15
Дармаев А.Н., Морев С.П., Муравьев Э.К., Саблин В.М. Улучшение массогабаритных характеристик многолучевого прибора с реверсной магнитной фокусирующей системой.....	19
Дармаев А.Н., Морев С.П., Муравьев Э.К., Саблин В.М. Многолучевая электронно-оптическая система с криволинейными осями формирования парциальных электронных потоков.....	23
Бабкова Н.И., Баймагамбетова Л.Т., Горшкова Е.В., Плешкова Л.С., Кириченко Д.И., Нестеров Д.А., Шестеркин В.И. Неразъемные соединения деталей из углеграфитовых материалов с керамикой ВК94-2 методом пайки.....	27
Чиркин М.В., Серебряков А.Е., Иваненко Ю.Р. Моделирование системы регулирования периметра цифрового кольцевого лазерного гироскопа.....	30
Федяев В.К., Маранкин Н.М. Коэффициент полезного действия диодного автогенератора.....	37
Горлин О.А., Герасёв В.С. Исследование резонансной системы пятирезонаторного усилительного клисторна 2-см диапазона.....	41
Секция «ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА».....	47
Баскакова А.В., Логинов Д.С., Рыбин Н.Б. Исследование структуры поверхности покрытий магнитоуправляемых контактов после их коммутационных испытаний.....	47
Әсембаева Ә.Р., Немкаева Р.Р., Гусейнов Н.Р., Нагмадин Ш.Н., Рягузов А.П. Структура и свойства а-C<Pdx> пленок, синтезированных ионно-плазменным методом с использованием отрицательного напряжения смещения на подложке.....	52

Логинов Д.С., Холомина Т.А., Литвинов В.Г., Зинуков А.А. Устройство для автоматизированных испытаний магнитоуправляемых контактов.....	56
Баскаков Н.А., Мишустин В.Г. Квантовомеханический расчет контакта металл-полупроводник.....	62
Бекмурат Ф., Немкаева Р., Гусейнов Н., Маркизат М., Раисова Т.Д., Рягузов А.П. Изучение влияния условий синтеза на структуру и оптические свойства аморфных алмазоподобных углеродных пленок с наночастицами иридия.....	66
Зинуков А.А., Логинов Д.С., Холомина Т.А. Алгоритм работы устройства для испытаний магнитоуправляемых контактов.....	71
Чернобровкина А.С., Литвинов В.Г., Трегулов В.В., Ермачихин А.В. Исследование механизмов токопрохождения в полупроводниковых структурах POR-Si/P-Si с толстыми пленками POR-Si.....	74
Васин А.В., Рыбин Н.Б., Трегулов В.В. Исследование структуры пористого кремния методом растровой электронной микроскопии.....	80
Трусов Е.П., Воробьев Ю.В., Ермачихин А.В., Якубов А.О. Изменение параметров температурной зависимости удельного сопротивления $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ в процессе изотермического отжига.....	84
Денисова Ю.Н. Исследование полупроводников методом спектроскопии адмиттанса.....	90
Ермачихин А.В., Воробьев Ю.В., Трусов Е.П., Литвинов В.Г. Шумовые характеристики солнечных элементов на основе гетероперехода кристаллический/аморфный кремний в темноте и при освещении.....	94
Школин С.Е., Рыбина Н.В. Анализ текстур микро- и наноэлектроники на основе их параметров.....	98
Мантя М.Ф., Гудзев В.В., Литвинов В.Г., Мишустин В.Г. Комплексное исследование электрофизических свойств барьерных структур на основе a-Si:H.....	103
Назимов Д.Р., Мишустин В.Г. Моделирование переходных процессов в полупроводниках в режиме CELIV измерения...	110
Трофимов Е.С., Судакова А.Ю., Толкач Н.М., Вишняков Н.В. Разработка измерительного стенда для исследования оптических характеристик тонкопленочных структур на основе системы Ge-Sb-Te.....	115
Люфт Е.Н., Рыбина Н.В. Исследование информационно-корреляционных характеристик поверхности пленок A-Si:H, полученных при различных режимах изготовления.....	118

Секция «ПРОМЫШЛЕННАЯ СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ».....	124
Ляпин В.Г., Гафиев А.Э. Разработка и исследование источника вторичного электропитания мобильных электротехнических установок: проблемы и перспективы.....	124
Аппоротов А.А., Грачев Е.Ю., Евстифеева С.В., Трубицын А.А. Разработка детектора рентгеновских изображений.....	130
Барина Е.С., Воронов А.В., Махмудов М.Н., Федорова Е.Р. Цифровая трансформация электроэнергетики. Основные понятия, цели, задачи и основные направления цифровизации.....	134
Графчикова М.В. Модернизация трансформаторных подстанций 6-10/0,4 КВ.....	138
Нургаалиев П.В., Круглов С.А. Особенности проектирования и разработки генератора задающих импульсов для схемы управления газоразрядным прерывателем тока.....	141
Вилков Е.А. Итерационный метод определения компонент теплового сопротивления силовых полупроводниковых приборов.....	146
Городничева Д.Д. Исследование лазерной твердотельной импульсной установки.....	152
Желнина Т.С., Сливкин Е.В. Проектирование систем электроснабжения.....	156
Трегубов Д.В. Особенности построения систем электроснабжения.....	158
Варламова Е.А., Круглов С.А. Анализ влияния внешних воздействующих факторов на электротехническое оборудование комплектных трансформаторных подстанций.....	162
Четвергов А.А. Сравнение характеристик промышленного освещения на примере продукции ИЕК.....	166
Овчинников С.И. Разработка методики по исследованию электрофизических характеристик автоматических выключателей.....	171

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ

Научное издание

В 10 томах

Том 2

Под общей редакцией О.В. Миловзорова.

Подписано в печать 15.06.21. Формат 60х84 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