МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ ИНФОРМАТИЗАЦИИ
СОЮЗ МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И СВЯЗИ РЯЗАНСКОЙ ОБЛАСТИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ В.Ф. УТКИНА

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ

СТНО-2026

IX МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФОРУМ

Сборник трудов

Том 2

Рязань
2026

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

Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2026 [текст]: сб. тр. IX междунар. науч.-техн. форума: в 11 т. Т.2./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2026.

ISBN 978-5-7722-0443-6

Т.2: – 198 с.,: ил.

ISBN 978-5-7722-0445-0

Сборник включает труды участников IX Международного научно-технического форума «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2026.

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 разработки и применения элементов искусственного интеллекта в информационных системах и образовании, различные аспекты 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 978-5-7722-0443-6

© Рязанский государственный
радиотехнический университет, 2026

ISBN 978-5-7722-0445-0

ИНФОРМАЦИЯ О IX МЕЖДУНАРОДНОМ ФОРУМЕ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» СТНО-2026

IX Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2026 состоялся 03.03.2026-05.03.2026 в г. Рязань в Рязанском государственном радиотехническом университете имени В.Ф. Уткина.

В рамках форума «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2026 состоялась работа четырех Международных научно-технических конференций:

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

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

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

- Алгоритмическое и программное обеспечение вычислительных систем и сетей;
- Искусственный интеллект и информационные технологии;
- ЭВМ и системы;
- Модели искусственного интеллекта в САПР;
- Информационные технологии в конструировании электронных средств;
- Интеллектуальные системы и технологии в образовании;
- Информационные системы и защита информации;
- Математические методы и модели в научных исследованиях и прикладных проблемах. К 90-летию И.П. Карасева - основателя теории управления "в малом";
- Обработка данных, 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;
- 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:

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

Миловзоров О.В., зам. начальника управления организации научных исследований, к.т.н, доц. – координатор, главный редактор сборника трудов Форума;

Миронов Вал.В., профессор кафедры высшей математики, д.ф.-м.н., проф. – ответственный редактор сборника трудов Форума;

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

члены оргкомитета:

Аронов Л.В., доцент кафедры радиоуправления и связи, к.т.н., доц.;

Бабаян П.В., зав. кафедрой автоматики и информационных технологий в управлении, к.т.н., доц.;

Бубнов С.А., доцент кафедры вычислительной и прикладной математики, к.ф.-м.н., доц.;

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

Волченков В.А., доцент кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники, к.т.н.;

Горлин О.А., доцент кафедры электронных приборов, к.т.н., доц.;

Городничева Е.В., ассистент кафедры автоматизации информационных и технологических процессов;

Гостин А.М., доцент кафедры систем автоматизированного проектирования вычислительных средств, к.т.н., доц.;

Губарев А.В., доцент кафедры информационно-измерительной и биомедицинской техники, к.т.н., доц.;

Гуржин С.Г., доцент кафедры информационно-измерительной и биомедицинской техники, к.т.н., доц.;

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

Дмитриева Т.А., доцент кафедры вычислительной и прикладной математики, к.т.н., доц.;

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.;

Каширин И.Ю., доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной и прикладной математики, д.т.н., проф.;

Киселёва О.В., доцент кафедры экономической безопасности, анализа и учета, к.э.н., доц.;

Кислицына Т.С., старший преподаватель кафедры радиотехнических систем;

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

Клочко 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.;

Крошилина С.В., доцент кафедры вычислительной и прикладной математики, к.т.н., доц.;

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

Кузьмин Ю.М., доцент кафедры информационной безопасности, к.т.н., доц.;

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

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

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

Лукьянова Г.С., зав. кафедрой высшей математики, к.ф.-м.н., доц.;

Маметова Ю.Ф., доцент кафедры иностранных языков, к.п.н., доц.;

Миронов В.В., старший преподаватель кафедры Воздушно-космических сил;

Митрошин А.А., доцент кафедры систем автоматизированного проектирования вычислительных средств, к.т.н., доц.;

Мишустин В.Г., доцент кафедры микро- и наноэлектроники, к.ф.-м.н., доц.;

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

Паршин А.Ю., доцент кафедры радиотехнических устройств, к.т.н., доц.;

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.;

Подгорнова Н.А., доцент кафедры государственного, муниципального и корпоративного управления, к.э.н., доц.;

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

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

Саблина В.А., доцент кафедры электронных вычислительных машин, к.т.н., доц.;

Сапрыкин А.Н., доцент кафедры систем автоматизированного проектирования вычислительных средств, к.т.н., доц.;

Семенов А.Р., доцент кафедры химической технологии, к.ф.-м.н.;

Скрипкина О.В. доцент кафедры экономической безопасности, анализа и учета, к.э.н., доц.;

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

Соловьева И.П., доцент кафедры экономики, менеджмента и организации производства, к.э.н., доц.;

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

Тарасова В.Ю., ассистент кафедры электронных вычислительных машин, магистр;

Торженова Т.В. доцент кафедры экономической безопасности, анализа и учета, к.э.н., доц.;

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

Холопов С.И., зав. кафедрой автоматизированных систем управления, к.т.н., доц.;

Цыцына М.И., ассистент кафедры космических технологий, магистр;

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

Челебаев С.В., доцент кафедры автоматизированных систем управления, к.т.н., доц.;

Щевьев А.А., доцент кафедры истории, философии и права, к.п.н., доц.

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

СЕКЦИЯ «МИКРОВОЛНОВАЯ, ОПТИЧЕСКАЯ И КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»

УДК 537.876.42; ГРНТИ 47.45.31

МОДЕЛИРОВАНИЕ СУММАТОРА МОЩНОСТИ НА ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЯХ

О.А. Горлин, Д.О. Бирюков

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

Аннотация. В статье представлены результаты разработки четырех-канального сумматора мощности на полосковых линиях. Разработана 3-D модель сумматора с параметрами: переходное ослабление в среднем 6.1 дБ; неравномерность деления не более 0,07 дБ; значение КСВН не более 1.22; неравномерность фазы между каналами не более 1.2°. Сумматор рассчитан на работу с сигналами мощностью до 7 кВт и может быть использован в составе СВЧ-устройств для эффективного сложения и распределения мощности с малыми потерями.

Ключевые слова: электрические параметры, рабочая полоса частот, симметричная полосковая линия, сумматор

MODELING OF A POWER SUMMATOR ON STRIP LINES

O.A.Gorlin, O.D. Biryukov

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

Abstract. The article presents the results of the development of a four-channel power summing device based on strip lines. A 3-D model of the summing device has been developed with the following parameters: average transition attenuation of 6.1 dB; division unevenness of no more than 0.07 dB; VSWR of no more than 1.22; and phase unevenness between channels of no more than 1.2°. The summing device is designed to handle signals with a power of up to 7 kW and can be used in microwave devices for efficient power addition and distribution with low losses.

Keywords: electrical parameters, operating frequency band, symmetrical strip line, sum-tor

В настоящее время ведется поиск путей повышения мощности за счет сложения энергии усилительных модулей (УМ). Новое поколение мощных полевых и биполярных транзисторов обладают более высокими выходными характеристиками и находят все более широкое применение в уже разработанных компактных УМ. Варианты использования того или иного вида суммирующей линии зависит от множества параметров, таких как выходная мощность, диапазон рабочих частот, неравномерность фазы на каналах и т.д. [1, 2].

В соответствии с техническим заданием четырёхканальный сумматор мощности должен соответствовать следующим основным требованиям:

- частотный диапазон 3,0 ÷ 3,4 ГГц;
- низкие потери не более 0,7 дБ;
- требования к габаритным размерам не более 300 х 100 х 20 мм;
- уровень мощности выходного импульсного сигнала от 5000 до 7000 Вт.

Выбор конкретного типа линии зависит от комплекса параметров приведенный в таблице 1:

Таблица 1. Требования к использованию линий

Параметр	Влияние на выбор	Типичный диапазон значений
Выходная мощность	Определяет допустимые потери и тепловые нагрузки	До 50 Вт - микрополосковые; 50-200 Вт - полосковые; >200 Вт – коаксиальные / волноводы
Диапазон рабочих частот	Влияет на тип линии и материалы подложки	До 2 ГГц - микрополосковые; 2-18 ГГц - полосковые; >18 ГГц - волноводы
Неравномерность фазы на каналах	Критична для когерентного сложения мощности	Допустимо ≤5 дБ для фазированных решёток, 10–15 - для других применений
Полоса пропускания	Определяет тип сумматора и линии	Узкополосные системы – кольцевые сумматоры; широкополосные – мостовые или квадратурные
Габариты и масса	Важны для мобильных и компактных устройств	Микрополосквые линии выигрывают по компактности
Тепловые характеристики	Особенно критичны для высокомощных систем	Требуют учёта теплоотвода и возможного принудительного охлаждения
Стоимость и технологичность	Влияют на выбор для серийного производства	Микрополосковые платы дешевле при массовом выпуске

Целью работы является сравнение видов сумматоров, описание их преимуществ и недостатков, нахождение оптимальной линии передач под заданные условия, исследование и разработка модели сумматора мощности.

В соответствии с требованиями технического задания была выбрана симметричная полосковая линия в качестве базовой конструкции сумматора. Данный тип линии обладает следующими преимуществами:

- низкие потери на излучение за счёт эффективной экранировки;
- компактные габариты, соответствующие ограничениям ТЗ;
- способность обеспечивать проходную мощность до 7 кВт.

На первом этапе проектирования был разработан одиночный каскад на основе Y‑сумматора. Его создание преследовало две основные цели:

- оценка электрических характеристик конструкции в рабочем диапазоне частот.
- оптимизация топологии устройства при выявлении отклонений от требуемых параметров.

3D‑модель конструкции создана в программном пакете CST Studio Suite. Геометрические размеры элементов были предварительно рассчитаны аналитически, а затем использованы при построении модели. Визуализация итоговой конструкции представлена на рисунке 1 [3, 4].

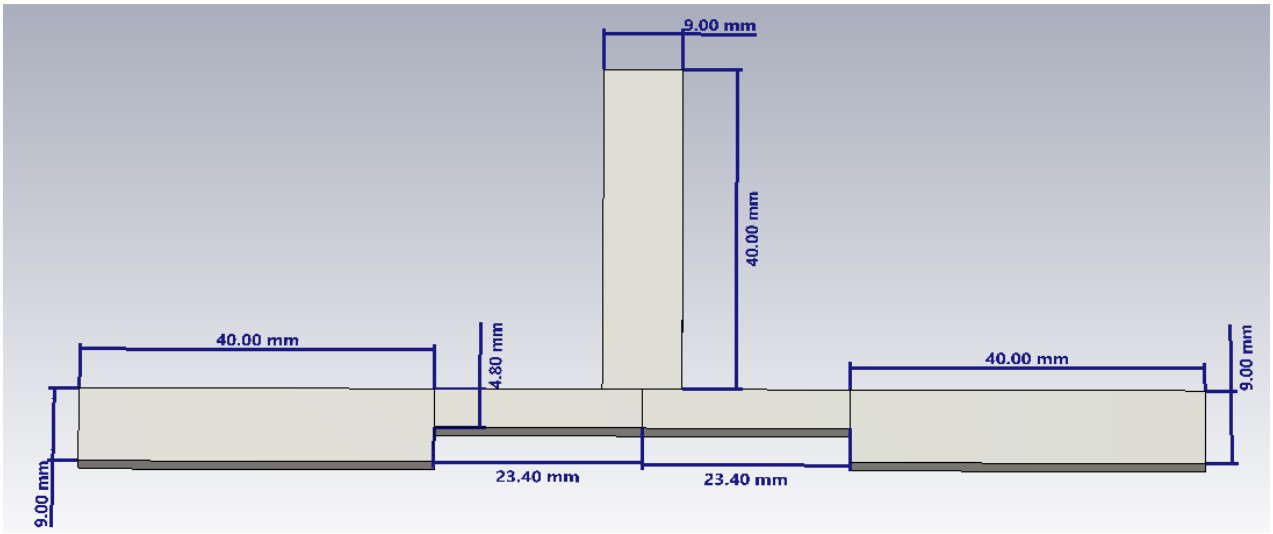


Рис. 1. Модель Y-сумматора в CST Studio

Результаты моделирования сумматора (рисунки 2 и 3) показали соответствие требованиям ТЗ: деление мощности близко к идеальным 3 дБ, а КСВН не превышает 1,13. Это подтверждает эффективность выбранной конструкции для равномерного распределения мощности и минимизации отражений.

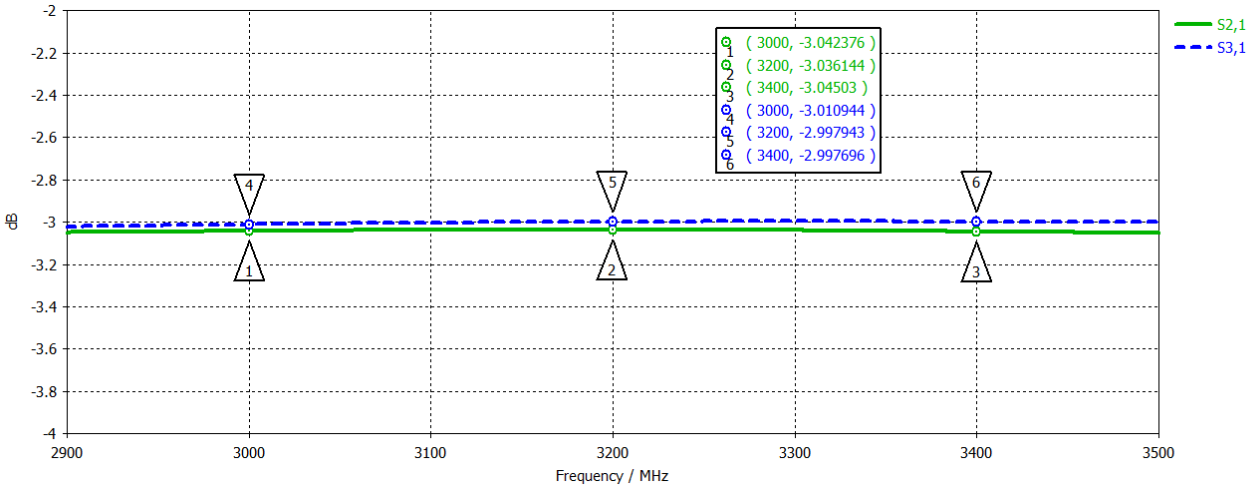


Рис. 2. Частотная зависимость переходного ослабления одного каскада Y-сумматора

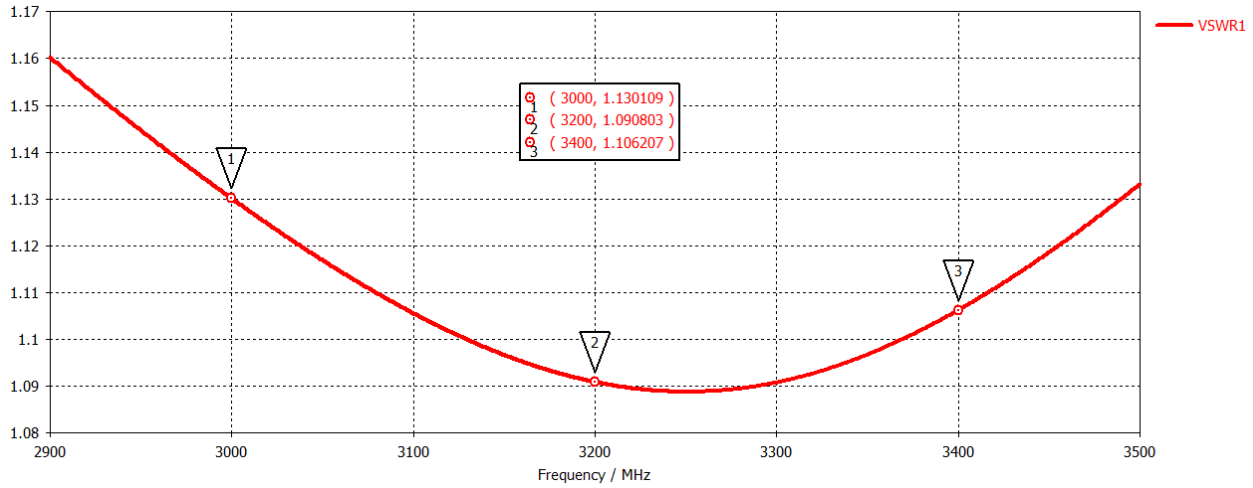


Рис. 3. Частотная зависимость КСВН входа одного каскада Y-сумматора

Для реализации четырех-портового сумматора применено бинарное объединение трёх идентичных каскадов Y-сумматоров (рисунок 4). Такая топология обеспечивает равномерное распределение мощности и минимизацию отражений в многоканальной структуре.

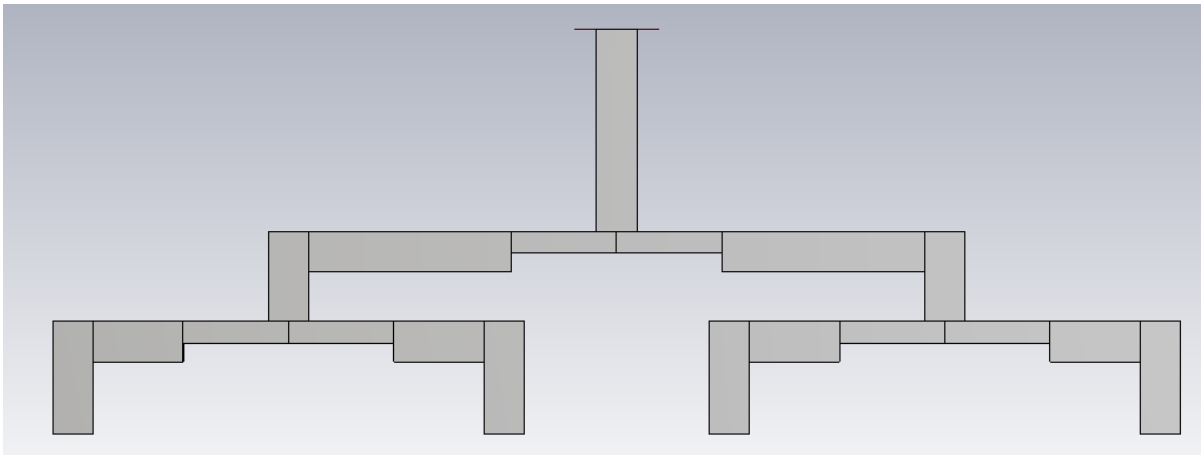


Рис. 4. Объединение трех каскадов Y-сумматор в CST Studio

Анализ в программе CST Studio характеристик выявил, что неравномерность переходного ослабления между выходными портами составляет 0,6 дБ. Максимальное значение КСВН превышает требования ТЗ и составляет 1,44. Коррекция неравномерности деления осуществлялась посредством увеличения ширины одного из четвертьволновых трансформаторов во входных каскадах сумматора для компенсации взаимного влияния близкорасположенных полосковых линий. Уменьшение значения КСВН достигалось путем срезов в местах прямых углов по всей длине проводника. Результаты моделирования оптимизированной модели приведены на рисунках 5 и 6.

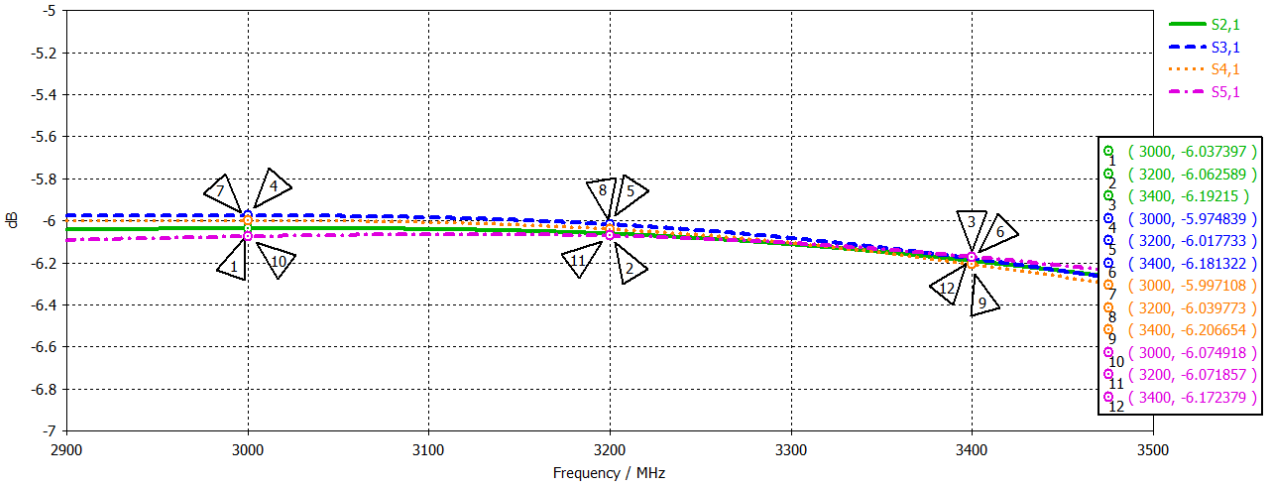


Рис. 5. Частотная зависимость переходного ослабления четырехканального сумматора

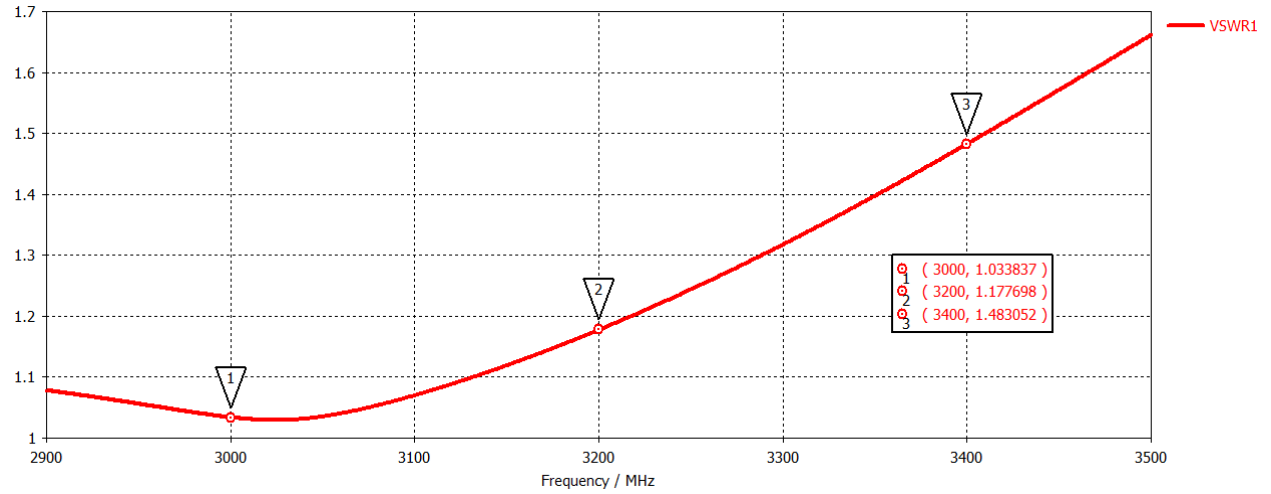


Рис. 6. т Частотная зависимость КСВН четырехканального сумматора

Результаты моделирования демонстрируют улучшение равномерности распределения мощности между портами до значения 0,1 дБ. Однако при анализе графика КСВН выявлено смещение центральной частоты до значения приблизительно 3,05 ГГц, вследствие чего на частоте 3,4 ГГц наблюдаемое значение КСВН, равное 1,41, превышает установленное в ТЗ.

Для смещения центральной частоты сумматора выполнялась регулировка длин четвертьволновых сегментов и выравнивания межпортовых расстояний для обеспечения симметрии выходных характеристик и равномерного распределения сигнала. По результатам проведенных измерений установлено, что характеристики устройства полностью соответствуют требованиям ТЗ, включая равномерность деления мощности по частоте равную не более 0,1 дБ, переходное ослабление в среднем равное 6,1 дБ и значения КСВН выходного порта не более 1,20 [5 - 7].

Для соблюдения требуемого расстояния между экранирующими плоскостями и надежного крепления центрального проводника необходимо введение в конструкцию сумматора втулок-держателей (рисунок 7). В качестве материала втулок был выбран фторопласт, как материал с малой диэлектрической проницаемости (ε = 2,1), близкой к воздуху (ε = 1), для минимизации искажения электромагнитного поля. Держатели размещены в местах 50 Ом линий для избежание влияния на трансформацию сопротивления в Y-сумматорах.

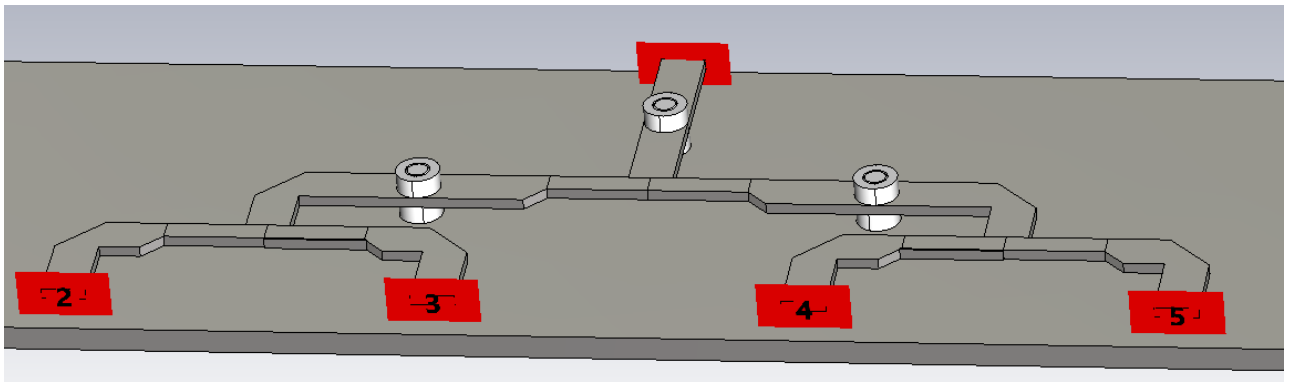


Рис. 7. Модель сумматора с фторопластовыми втулками-держателями

В ходе проектирования сумматора была выполнена установка фторопластовых втулок-держателей, обеспечивающих механическую стабильность конструкции. Однако моделирование выявило негативное влияние этих элементов на электрические параметры устройства: значение КСВН возросло до 1,27, что превышало целевое требование ТЗ (≤1,22).

Анализ показал, что причиной ухудшения согласования стало изменение распределения электромагнитного поля вблизи мест крепления втулок, приводящее к локальным неоднородностям импеданса в тракте передачи сигнала.

Для устранения выявленного недостатка была проведена оптимизация расположения фиксирующих элементов относительно 50-омной линии передачи. Корректировка позиций втулок позволила:

- минимизировать возмущение электромагнитного поля;
- снизить локальные отражения сигнала;
- восстановить требуемый уровень согласования импедансов.

Повторное моделирование оптимизированной конструкции подтвердило достижение целевых показателей:

- переходное ослабление – в среднем 6,05 дБ (близко к теоретическому минимуму для четырехканальной системы);
- неравномерность деления мощности – не более 0,07 дБ, что гарантирует равномерное распределение сигнала между каналами;
- КСВН – не более 1,22, что свидетельствует о хорошем согласовании импедансов во всём рабочем диапазоне;
- неравномерность фазы между каналами – не более 1,2.

Таким образом, проведённая оптимизация позволила устранить негативное влияние механических элементов крепления на электрические характеристики сумматора и обеспечить полное соответствие конструкции требованиям технического задания.

Заключение

В ходе проведённого исследования выполнен комплексный анализ различных типов линий передачи, конструкций суммирующих устройств и принципов формирования многоканальных сумматоров. На основании полученных данных осуществлён обоснованный выбор конструкции сумматора, подобраны соответствующие материалы и проведены необходимые расчёты параметров линий передачи.

Проектирование устройства реализовано в программе электромагнитного моделирования CST Studio:

- сформирована и смоделирована топология базового элемента – Y−сумматора;
- отдельные структуры объединены в четырёхканальный сумматор;
- проведена оптимизация топологии устройства;
- определены места размещения механических элементов – втулок-держателей;
- выполнено моделирование итоговой конструкции с учётом всех конструктивных особенностей.

Результаты моделирования подтвердили корректность выбранных технических решений и соответствие разработанного сумматора требованиям технического задания:

- переходное ослабление – в среднем 6,1 дБ;
- неравномерность деления мощности – не более 0,07 дБ, что гарантирует равномерное распределение сигнала между каналами;
- КСВН – не более 1,22, что свидетельствует о хорошем согласовании импедансов;
- неравномерность фазы между каналами – не более 1,2;
- максимальная мощность – до 7000 Вт.

Разработанный четырёхканальный сумматор мощности может быть успешно применён в составе СВЧ-устройств для сложения и распределения сигналов большой мощности с минимальными потерями.

Перспективным направлением дальнейших исследований является экспериментальная проверка изготовленного устройства и его внедрение в реальные радиотехнические системы.

Библиографический список

1. Дмитриенко Г.В. Проектирование полосковых устройств СВЧ/Г.В. Дмитриенко// М-во образования Рос. Федерации. Ульяновск. 2001. – 112 с.
2. Коколов А.А., Схемы сложения мощности для монолитных интегральных СВЧ-усилителей / А.А. Коколов, Л.И. Бабак // Наноэлектроника. нанотехнология. фотоника. физическая и плазменная электроника. – 2011, № 2. – С.24-30.
3. Курушин А.А. Проектирование СВЧ устройств в CST STUDIO SUITE / А.А. Курушин// Москва. – 2016. – 433 с.
4. Малорацкий Л.Г. Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях/ Л.Г. Малорацкий, Л.Р. Явич // М.: «Сов. радио». – 1972. – 232 с.
5. Бахарев С.И. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / С.И. Бахарев, В.И. Вольман, Ю.Н. Либ и др.; Под ред. В.И. Вольмана // М.: Радио и связь. – 1982. – 328 с.
6. Чернушенко А.М. Конструирование экранов СВЧ-устройств: Учебник для вузов / А.М. Чернушенко, Б.В. Петров, Л.Г. Малорацкий и др.; под ред. А.М. Чернушенко// М.: Радио и связь, – 1990. – 352 с.
7. Панасюк Ю.Н., Устройства сверхвысоких частот: учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению 211000 «Конструирование и технология электронных средств» / Ю.Н. Панасюк, А.П. Пудовкин. – Тамбов: Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. – 80 с.

УДК 621.382; ГРНТИ 47.09.29

РАЗРАБОТКА ШИРОКОПОЛОСНОГО МИКРОПОЛОСКОВОГО СВЧ РАЗВЯЗЫВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ВЫСОКОГО УРОВНЯ МОЩНОСТИ

О.А. Горлин, О.А. Костиков

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

Аннотация. В статье показаны результаты моделирования мощного миниатюрного микрополоскового развязывающего устройства на 2 кВт. Разработана модель аналога циркулятора ЦФМ, оптимизированы магнитная система и проводник с целью улучшения выходных параметров циркулятора. Разработана конструкторская документация с использованием радиотехнической оснастки, изготовлен опытный образец и проведены испытания на мощности.

Ключевые слова: высокий уровень мощности, миниатюрные микрополосковые развязывающие устройства, полоса частот, циркулятор

DEVELOPMENT OF A WIDEBAND MICROSTRIPING MICROWAVE UNLOCKING DEVICE HIGH POWER LEVEL

O.A. Gorlin, O.A. Kostikov

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

Abstract. The article shows the results of modeling a powerful miniature microstrip decoupling device with a power of 2 kW. A model of a CFM circulator analog has been developed, and the magnetic system and conductor have been optimized to improve the circulator's output parameters. Design documentation has been developed using radio engineering tools, and a prototype has been manufactured and tested for power.

Keywords: high power level, miniature microstrip decoupling devices, frequency band, circulator

Циркуляторы, вентили и другие устройства СВЧ диапазона сейчас находят широкое применение в военных и промышленных приборах, и устройствах [1-5]. Циркулятор ферритовый магнитный (ЦФМ) использовался в усилительных блоках для защиты мощных источников радиосигналов от переотражений в СВЧ-трактах, для обеспечения их стабильности в случае изменяющейся во времени нагрузки и для развязки передатчика, приемника и антенны в радиолокационных системах до 1.2 кВт, но в связи модернизацией и повышения мощ-

ности усилительного блока до 2 кВт на сегодняшний день данное развязывающее устройство (РУ) не применяется [6, 7].

Целью данной работы является разработка конструкции РУ на выходную мощность 2 кВт на базе циркулятора ЦФМ, модели в CST Microwave Studio, исследование и оптимизация РУ с целью улучшения выходных электрических параметров, разработки конструкторской документации, изготовления экспериментального образца и проведение испытаний.

Габаритные размеры и основные параметры были взяты из конструкторской документации (КД) РУ ЦФМ, которые соответствуют значениям, указанным в таблице 1.

Таблица 1. Требования к параметрам ЦФМ

Наименование параметра	Единица величины	Величина параметра
Прямые потери, не более	дБ	0,5
Развязка, не менее	дБ	15
КСВН входа, не более	-	1,5
Диапазон рабочих частот, не более	ГГц	2,7-2,9

Исходная конструкция РУ ЦФМ показала низкую надежность при мощности 1,5 кВт: выходила из строя в результате электрического пробоя (время работы ≤ 4 с). Для повышения устойчивости к электрическому пробою в конструкцию были интегрированы керамические кольца. Данный элемент позволил:

- улучшить теплоотвод;
- повысить электрическую изоляцию между компонентами;
- снизить локальные напряжённости электрического поля.

В среде Компас-3D была разработана трёхмерная модернизированная модель аналога ЦФМ (рисунок 1). Модель экспортирована в CST Microwave Studio для исследования и оптимизации основных электрических параметров. Конструктивное решение с полосковыми выводами для поверхностного монтажа обеспечивает снижение общих прямых потерь.

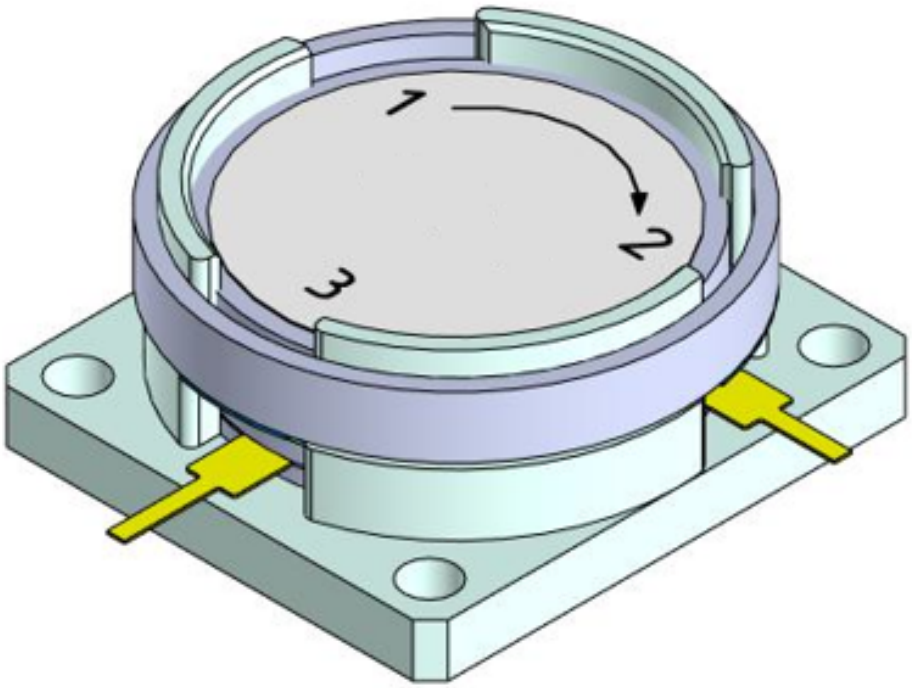


Рис. 1. Трёхмерная модель развязывающего устройства с модернизированной внутренней конструкцией

Проведено моделирование и оптимизация проводника и магнитной системы РУ с учётом добавленных керамических колец. Результаты численного моделирования РУ с использованием керамических колец представлены на рисунке 2 и в таблице 2.

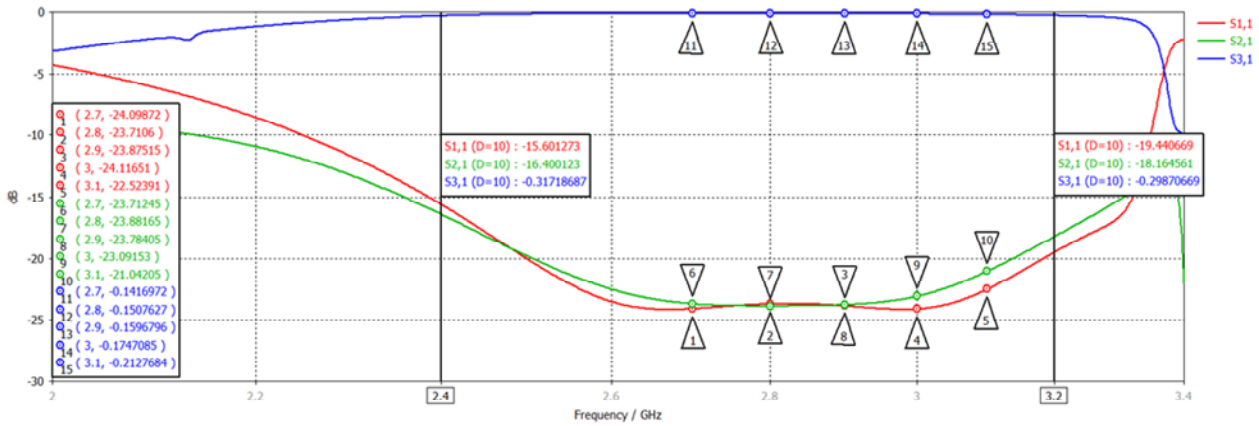


Рис. 2. Частотная зависимость прямых потерь, развязки и КСВН РУ

Таблица 2. Параметры РУ полученные по результатам моделирования

Параметры	2,4 ГГц	2,8 ГГц	3,2 ГГц
1. Прямые потери, дБ	-0,31	-0,15	-0,30
2. Развязка, дБ	-16,40	-23,88	-18,16
3. КСВН, дБ	-15,60 (1,40)	-23,71 (1,14)	-19,44 (1,17)

В результате моделирования, оптимизации проводника и магнитной системы показано, что данный циркулятор работает в полосе частот 800 МГц и удовлетворяет требованиям таблицы 1.

На основе трёхмерной модели разработана конструкторская документация. По данной документации изготовлен опытный образец РУ, а также специализированная радиотехническая оснастка для проверки РУ на мощности 2 кВт (рисунок 3). Результаты измерений на векторном анализаторе обзор-304 показаны в таблице 3.

Таблица 3. Результаты измерений на векторном анализаторе обзор-304

Частота, ГГц	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2
Вносимые потери, дБ	0,84	0,46	0,23	0,16	0,27	0,32	0,43
Развязка, дБ	13,7	17,2	21,3	22,9	20,2	17,1	14,9
КСВ	1,74	1,25	1,22	1,26	1,27	1,31	1,35

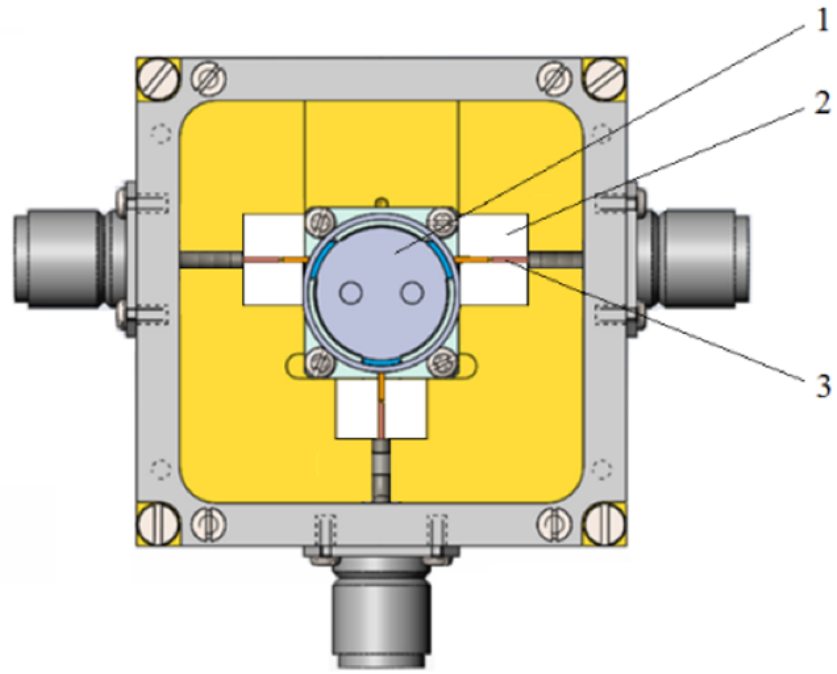
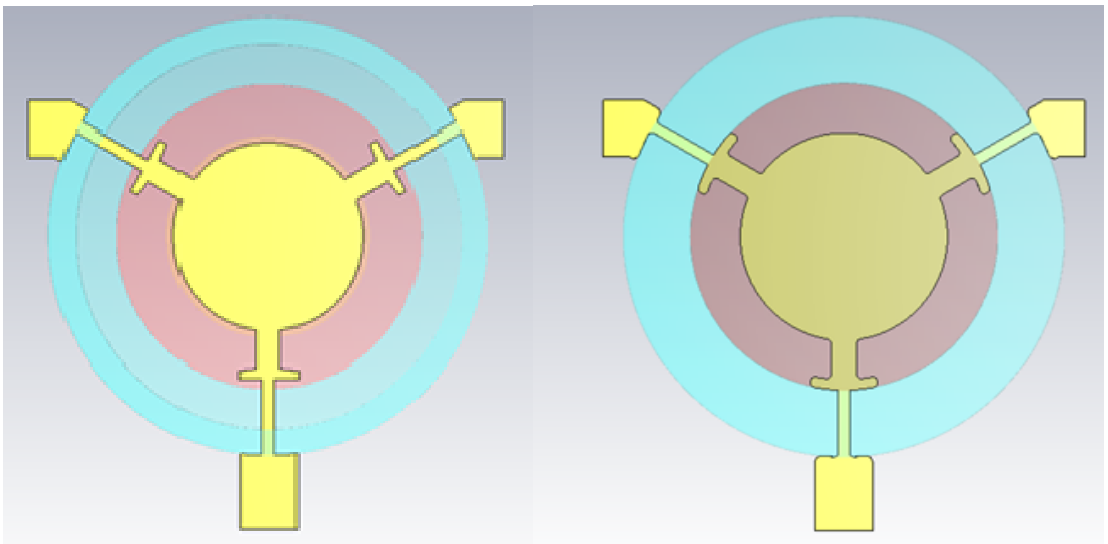


Рис. 3. Радиотехническая оснастка для настройки и проверки развязывающего устройства 2 кВт: 1 – РУ 2 кВт; 2- плата; 3 – соединительный кабель разъема с развязывающим устройством

Результаты эксперимента показали, что РУ соответствует требованиям таблицы 1 в полосе частот 2,7-3,1 ГГц (увеличение на 200 МГц), что меньше полученных при моделировании, а также на мощности 2 кВт возникал электрический пробой. Было выяснено, что это связано со сложностью позиционирования проводника в РУ. Даже небольшие отклонения меняют электромагнитные свойства РУ и сужают диапазон рабочих частот и ухудшает выходные электрические параметры, поэтому для устранения этого недостатка изменили топологию проводника (рисунок 4).



а б

Рис. 4. Топология проводника РУ: а – начальная топология проводника, б – новая топология проводника

Для устроения электрического пробоя все острые углы в проводнике были скруглены, затем четверть волновые трансформаторы отведены к границе диэлектрического кольца и скорректирована их геометрия для получения наилучших выходных параметров РУ.

Результаты экспериментального образца РУ с новой топологией проводника были получены и приведены в таблице 4.

Таблица 4. Результаты измерений на векторном анализаторе обзор-304

Частота, ГГц	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3
Вносимые потери, дБ	0,49	0,45	0,32	0,19	0,16	0,27	0,32	0,43	0,49
Развязка, дБ	15,1	16,2	19,2	22,3	24,9	23,2	19,1	17,3	15,4
КСВ	1,48	1,41	1,21	1,18	1,12	1,14	1,18	1,35	1,45

В ходе экспериментальных исследований установлено, что РУ соответствует требованиям таблицы 1 в широкой полосе частот 2,5-3,3 ГГц (800 МГц). При испытаниях на мощности 2 кВт выявлены критические зоны – поддиапазоны 2,5–2,7 ГГц и 3,1–3,3 ГГц, в которых возникал электрический пробой из-за превышения допустимых электрических нагрузок.

Детальный анализ показал, что стандартные требования таблицы 1 не учитывают специфику работы устройства на высокой мощности. Для обеспечения надёжности РУ при 2 кВт необходимо ужесточить следующие параметры:

- ограничить прямые потери значением не более 0,35 дБ, чтобы минимизировать нагрев элементов;
- обеспечить развязку не менее 18 дБ для снижения взаимного влияния трактов;
- поддерживать КСВ не выше 1,35 для оптимального согласования импедансов и предотвращения отражений.

Экспериментально подтверждено, что в полосе частот 2,7–3,1 ГГц РУ удовлетворяет всем уточнённым требованиям. Это делает его пригодным для интеграции в приёмо-передающие модули, работающие на мощности до 2 кВт, с гарантированной устойчивостью к электрическим пробоям.

Заключение

Разработана трёхмерная модель модернизированного аналога ЦФМ в среде КОМПАС-3D с последующим экспортом в CST Microwave Studio для электромагнитного моделирования и оптимизации параметров.

Численное моделирование продемонстрировало расширение рабочей полосы пропускания устройства до 800 МГц с соблюдением требований таблицы 1. При этом выявлено, что стандартные нормы не отражают особенности функционирования РУ при повышенных мощностях, что создаёт риски электрических пробоев.

В ходе экспериментальных исследований установлено, что в диапазоне частот 2,7–3,1 ГГц устройство соответствует ужесточённым требованиям:

-прямым потерям (≤0,35 дБ);

-развязке (≥18 дБ);

-коэффициенту стоячей волны (КСВ ≤1,35).

Полученные результаты подтверждают возможность применения, разработанного РУ в составе приёмо-передающих модулей мощностью до 2 кВт с обеспечением надёжной работы и устойчивости к пробоям в указанном частотном диапазоне.

Библиографический список

1. Щербаков В.С. Развитие СВЧ электроники в России / В.С. Щербаков // «СВЧ-электроника». Материалы научно-технической конференции. Фрязино, 2016.
2. Вамберский М.В. Конструирование ферритовых развязывающих приборов СВЧ / М.В. Вамберский, В.П. Абрамов, В.И. Казанцев // М.: Радио и связь, - 1982. 134 с.
3. J. Helzajn The Stripline Circulator Theory and Practice. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008. – 640 p.
4. S. Takeda Circuit Simulator for wideband lumped element circulator / S. Takeda, T. Okada // Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), 2018. – Pp. 1262-1264.
5. Каталог продукции фирмы ОАО «завод Магнетон» http://magneton@magneton.ru.
6. Setiawan A. Design of 3 GHz Stripline Ferrite Circulator for Radar Applications / Setiawan A., Maulana Y., Sulaeman Y., Praludi T., Taryana Y. // International Conference on Radar, 2017. – Pp. 154-157.
7. S. Khim Design and Synthesis of Ferrite Strip-Line Circulator Based on Enhanced Closed Form Solution and Power Handling Analysis / S. Khim, S. Cheab, S. Soeung, G. Shen NG // IEEE ACCESS, 2022. – Pp. 813-831.

УДК 621.382; ГРНТИ 47.09.29

РАЗРАБОТКА ШИРОКОПОЛОСНОГО КОАКСИАЛЬНОГО СВЧ РАЗВЯЗЫВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ВЫСОКОГО УРОВНЯ МОЩНОСТИ

О.А. Горлин, А.М. Орлов

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

Аннотация. В статье представлены результаты разработки широкополосного коаксиального СВЧ развязывающего устройства с предельным уровнем мощности выходного сигнала до 7.5 кВт. Разработана конструкция и 3-D модель циркулятора, оптимизированы резонаторная часть и подобрана магнитная система с целью увеличения полосы частот. Изготовлен опытный образец и проведены предварительные испытания.

Ключевые слова: электрические параметры, рабочая полоса частот, мощные коаксиальные развязывающие устройства, вносимые потери

DEVELOPMENT OF A BROADBAND COAXIAL MICROWAVE UNLOCKING DEVICE OF HIGH POWER LEVEL

O.A. Gorlin, A.M. Orlov

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

Abstract. The article presents the results of the development of a broadband coaxial microwave decoupling device with a maximum output power level of up to 7.5 kW. A design and 3-D model of the circulator have been developed, and the resonator part and magnetic system have been optimized to increase the frequency band. A prototype has been manufactured and preliminary tests have been conducted.

Keywords: electrical parameters, operating frequency band, high-power coaxial decoupling devices, insertion losses

В настоящее время в S-диапазоне коаксиальные развязывающие устройства (РУ) находят широкое применение для радиолокации, медицинских ускорителей и систем связи, так как на этих частотах размеры компонентов позволяют найти оптимальный баланс между габаритами, рабочей полосой частот и мощностью [1-5]. Коаксиальные развязывающие устройства высокого уровня мощности предназначены для защиты мощных источников радиосигналов от переотражений в СВЧ-трактах, для обеспечения их стабильности в случае изменяющейся во времени нагрузки и для развязки передатчика, приемника и антенны в радиолокационных системах [6,7]. Современные разработки отечественных и зарубежных предприятий мощных широкополосных развязывающих устройств показывают сложность полу-

чения минимальных прямых потерь, большой полосы частот и высокой мощности [6,7] из-за чего они являются узкополосными.

Современные разработки коаксиальных РУ высокого и уровня мощности в S-диапазоне фокусируются на следующих основных параметрах:

– непрерывная мощность, которая варьируется от 100 до 1000 Вт;

– импульсная мощность, которая варьируется от 5 до 10 кВт при малой скважности;

– развязка от 18 дБ;

– вносимые потери 0.2–0.4 дБ.

Для обеспечения этих параметров в РУ используют следующие конструктивно-технологические приемы:

- установка систем охлаждения;
- установка автоматических систем контроля и управления КСВН;
- установка автоматических систем контроля и управления магнитных систем;
- герметизация и заполнение специальными средствами.

Перечисленные приемы широко применяются для разработки мощных СВЧ ферритовых циркуляторов и вентилей высокого и сверхвысокого уровня мощности, но при этом усложняют его конструкцию.

Целью данной работы является разработка модели мощного развязывающего устройства в системе CST Microwave Studio, исследование и оптимизация электрических параметров и геометрических размеров для улучшения выходных электрических параметров, увеличение рабочей полосы частот и реализации экспериментального образца.

Ранее разработанная тепловая модель коаксиального развязывающего устройства на 7,5 кВт в программе Comsol Multiphysics показала максимальные температуры на проводнике 83,3 0С и феррите 41,6 0С, что показывает использование данного РУ на мощностях до 10 кВт [8].

В программе CST Microwave Studio была разработана 3-D модель (рисунок 1) аналога коаксиального циркулятора ФКЦВ23-27, а исходные данные были взяты из ЕСКФ.430441.085ТУ СВЧ-ПРИБОРЫ и ЭЛЕМЕНТЫ завода «МАГНЕТОН» [7] и должны соответствовать значениям, указанным в таблице 1.

Таблица 1. Требования к параметрам коаксиального РУ

Наименование параметра	Единица величины	Величина параметра
Прямые потери, не более	дБ	0,3
Развязка, не менее	дБ	20
КСВН входа, не более	-	1,25
Предельный уровень мощности импульсного входного сигнала, не более	Вт	7500
Предельный средний уровень мощности входного сигнала, не более	Вт	750

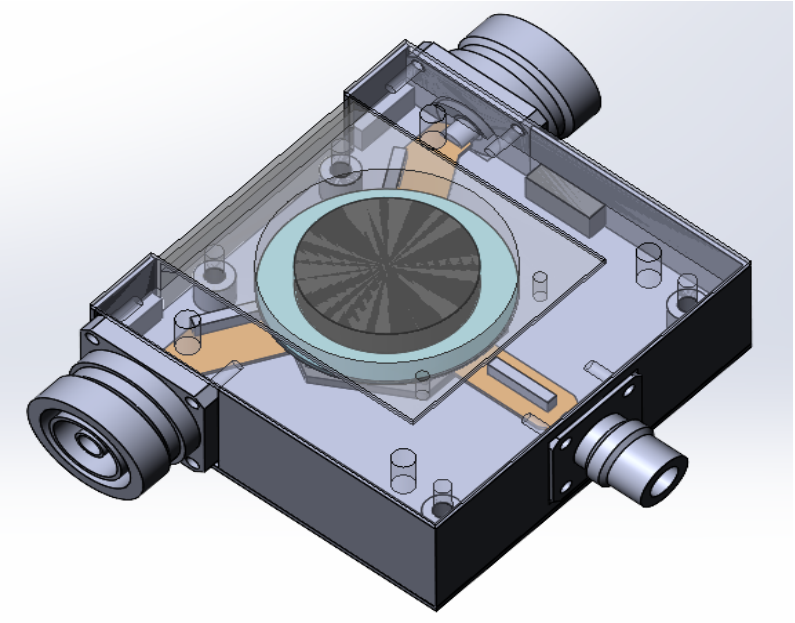


Рис. 1. Модель развязывающего устройства, выполненная в CST Microwave Studio

Моделирование РУ в программе показало результаты, приведенные на рисунке 2 и таблице 2.

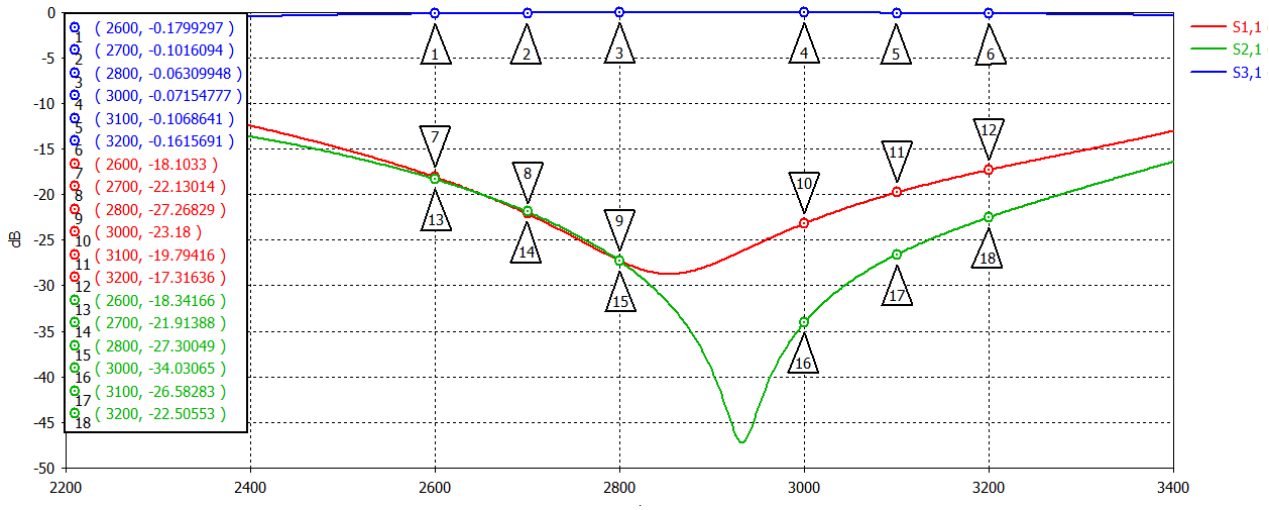


Рис. 2. Частотная зависимость прямых потерь, развязки и КСВН развязывающего устройства с диаметром проводника 38 мм

Таблица 2. Параметры РУ, полученные по результатам моделирования

Параметры	2,7 ГГц	2,8 ГГц	3,0 ГГц	3,1 ГГц
1. Прямые потери, дБ	-0,10	-0,06	-0,07	-0,10
2. Развязка, дБ	-21,91	-27,30	-34,03	-26,58
3. КСВН, дБ	-22,1 (1,17)	-27,3 (1,09)	-23,2 (1,15)	-19,8 (1,22)

В результате моделирования показано, что данное РУ способно работать в полосе частот 400 МГц. Данная модель сопоставлялась с экспериментальным параметрами, показанными ЕСКФ.430441.085ТУ на РУ ФКЦВ23-27. Экспериментально полученные результаты соответствовали результатам моделирования с погрешностью в 3 %.

Для упрощения конструкции вместо подстроечных поликоровых пластин была модернизирована топология проводника с применением четверть волновых трансформаторов, которые были оптимизированы для получения минального КСВН и максимальной развязки (рисунок 3).

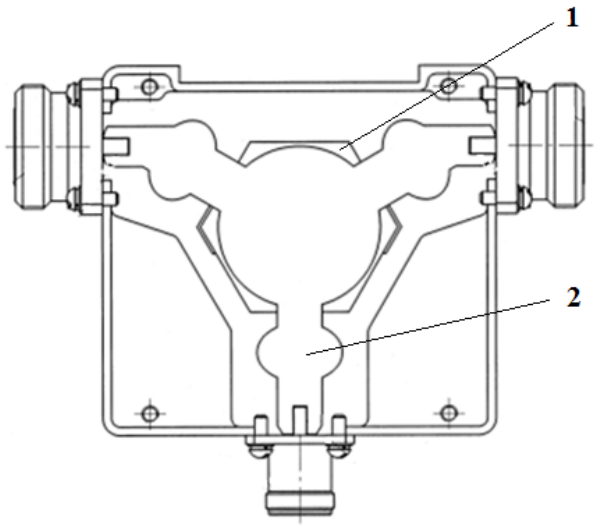


Рис. 3. Развязывающее устройство 7,5 кВт: 1 – ферритовая пластина,
2 – проводник с четверть волновыми трансформаторами

Для расширения полосы частот проведена оптимизация резонаторной части проводника и внешнего магнитного поля методом покоординатного спуска с целью повышения значений выходных параметров, полученые результаты показаны на рисунке 3 и в таблице 3.

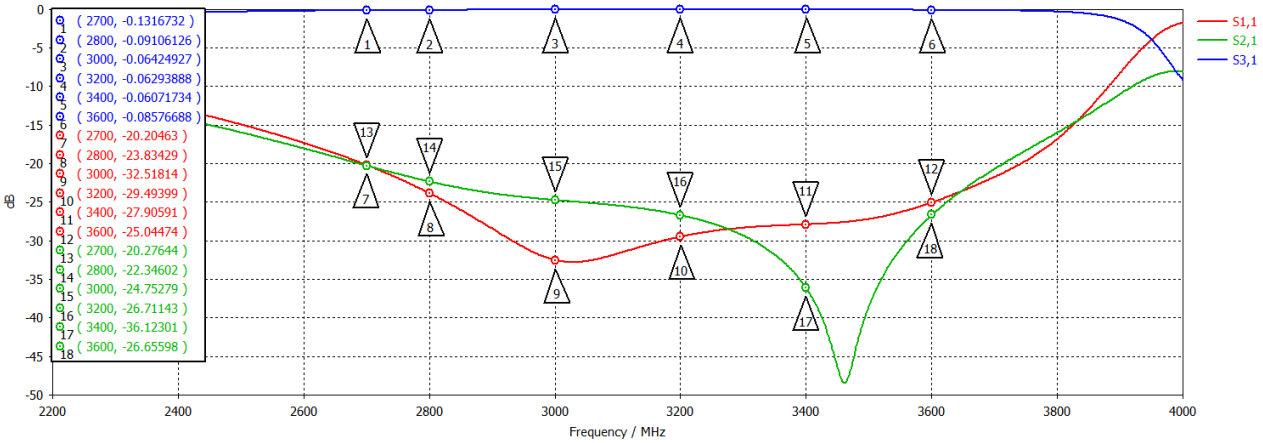


Рис. 3. Частотная зависимость прямых потерь,
развязки и КСВН развязывающего устройства с диаметром проводника 35 мм

Таблица 3. Параметры развязывающего устройства полученные по результатам моделирования

Параметры	2,7 ГГц	3,0 ГГц	3,2 ГГц	3,4 ГГц
1. Прямые потери, дБ	-0,13	-0,06	-0,06	-0,08
2. Развязка, дБ	-20,27	-24,75	-26,71	-36,12
3. КСВН, дБ	-20,2 (1,21)	-32,5 (1,05)	-29,5 (1,07)	-27,9 (1,09)

В результате моделирования и оптизации РУ получены выходные электрические параметры, удовлетворяющие требованиям таблицы 1 в диапазоне 2,7–3,6 ГГц. По данной модели была разработана конструкторская документация и изготовлен экспериментальный образец. По результатам эксперимента установлено:

- вносимые потери в полосе частот 2,6-3,5 ГГц не превышают -0,23 дБ;
- КСВН в полосе частот 2,6-3,5 ГГц не превышает 1,23;
- развязка в полосе частот 2,6-3,5 ГГц не менее -20,6 дБ.

За счет изменения магнитного поля можно (примерно на 100-150 МГц) сдвигать рабочую полосу без ухудшения выходных электрических параметров.

Заключение

Разработана 3-D модель коаксиального развязывающего устройства, исследована и оптимизирована резонаторная часть, а также магнитная система. Моделирование РУ показало увеличение рабочей полосы с 400 МГц до 900 МГц с параметрами, удовлетворяющими требованиям таблицы 1, а изготовленный экспериментальный образец подтвердил соответствие моделируемых и экспериментальных результатов. Данный экспериментальный образец по сравнению с РУ ФКЦВ23-27 имеет более простую конструкцию и работает в полосе частот, в два раза превышающую исходную.

Библиографический список

1. Вамберский М.В. Конструирование ферритовых развязывающих приборов СВЧ / М.В. Вамберский, В.П. Абрамов, В.И. Казанцев // М.: Радио и связь, - 1982. 134 с.

2. Д.П. Ефремов, Современное состояние развития производства в области ферритовых развязывающих приборов // «Электроника и микроэлектроника СВЧ», том 1, 2015, С. 201-206.

3. Н. Егоров, Мощные СВЧ-устройства – решения компании FERRITE MICROWAVE TECHNOLOGIES// Электроника НТБ, №4, 2014, С.150-154.

4. Helzajn J. The Stripline Circulator Theory and Practice. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008, 604 p.

5. David M. Pozar. Microwave Enineering. // Wley.-4th ed/ 2011, 756 p.

6. Каталог продукции фирмы ООО «Чэнду Чэнсинь Механическое Оборудование» https://www.chengxinmachinery.ru/коаксиальный-циркулятор.

7. Каталог продукции фирмы ОАО «завод Магнетон» http://magneton@magneton.ru.

8. Горлин О.А. Метод моделирования тепловых характеристик коаксиального циркулятора высокого уровня мощности / О.А. Горлин, В.В. Климаков // Сборник трудов VIII Международного научно-технического форума. Рязань РГРТУ, 2025, Том 2. - С.77-82.

УДК 004.94; ГРНТИ 47.29.33

ГИБРИДНЫЙ МИКРОФИЗИЧЕСКИЙ ПОДХОД С НЕЙРОСЕТЕВЫМ КОНТРОЛЛЕМ ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНОГО 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕНОСА РЕЗОНАНСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В БЕЗЭЛЕКТРОДНЫХ СВЧ-ИСТОЧНИКАХ СЛОЖНОЙ КОНСТРУКЦИИ

И.И. Железнов, В.П. Будак

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Российская Федерация, Москва, zheleznov96y@gmail.com

Аннотация. Предложен гибридный микрофизический подход для высокоточной 3D-моделирования переноса резонансного излучения в сложных безэлектродных СВЧ-источниках (коаксиальной ртутно-аргоновой и тороидальной XeBr эксимерной лампе). Метод сочетает строгий микрофизический формализм Келдыша, волновой оптический аппарат функции Вигнера-Вилла для учёта частичной пространственной когерентности и дифракции, а также нейросетевой контроллер (NNC) на основе архитектуры Vision Transformer (ViT), обученный с подкреплением (PPO) для динамической адаптации расчётной сетки. NNC оптимизирует распределение вычислительных ресурсов, выделяя высокое разрешение в областях с большими градиентами и волновыми эффектами. Реализация на GPU обеспечивает ускорение расчётов в 10-11 раз при сохранении точности ключевых параметров (погрешность ≤1% по интегральной яркости, ≤5% по градиентам) по сравнению с равномерными сетками. Продемонстрирована эффективность подхода для моделирования переноса

излучения в ртутно-аргоновой коаксиальной лампе (линия 253.7 нм) и тороидальной эксилампе на XeBr (полоса 283 нм), где учтены плазмохимическая кинетика, неоднородности и дифракция на геометрических элементах.
Ключевые слова: математическое моделирование, перенос резонансного излучения, неравновесная газоразрядная плазма, формализм Келдыша, функция Вигнера, уравнение переноса спектральной плотности, адаптивные воксельные сетки, нейросетевой контроль, обучение с подкреплением, трансформер, GPU-вычисления, коаксиальный разряд, тороидальная эксилампа.

A HYBRID MICROPHYSICS APPROACH WITH NEURAL NETWORK CONTROL FOR HIGH-PRECISION 3D SIMULATION OF RESONANT RADIATION TRANSFER IN COMPLEX ELECTRODELESS MICROWAVE SOURCES

I.I. Zheleznov, V.P. Budak
National Research University "MPEI",
Moscow, Russian Federation, zheleznov96y@gmail.com

The summary. A hybrid microphysical approach for high-precision 3D modeling of resonant radiation transport in complex electrodeless microwave sources (coaxial mercury-argon and toroidal XeBr excimer lamps) is proposed. The method combines the rigorous Keldysh microphysical formalism, the wave-optical apparatus of the Wigner-Ville function to account for partial spatial coherence and diffraction, and a neural network controller (NNC) based on the Vision Transformer (ViT) architecture, trained with reinforcement learning (PPO) for dynamic mesh adaptation. The NNC optimizes the distribution of computational resources, prioritizing high resolution in regions with large gradients and wave effects. GPU implementation accelerates calculations by 10-11 times while maintaining the accuracy of key parameters (error ≤1% for integrated radiance, ≤5% for gradients) compared to uniform grids. The effectiveness of the approach for modeling radiation transfer in a mercury-argon coaxial lamp (253.7 nm line) and a toroidal XeBr excilamp (283 nm band) is demonstrated, taking into account plasma-chemical kinetics, inhomogeneities, and diffraction by geometric elements.
Keywords: adaptive computational grids, neural network control, electrodeless microwave discharge, microchannel excilamp, resonant radiation transfer, Wigner distribution function (WDF), GPU computing, machine learning.

Проектирование высокоэффективных безэлектродных СВЧ-источников УФ- и ВУФ-излучения, таких как коаксиальные лампы для фотохимии и тороидальные эксилампы для стерилизации, требует точного прогнозирования пространственно-энергетических характеристик генерируемого излучения. Ключевым процессом, определяющим эффективность этих устройств, является перенос резонансного (атомарного) или эксимерного (молекулярного) излучения внутри оптически плотной неравновесной плазмы. Традиционные подходы к моделированию этого процесса сталкиваются с тремя фундаментальными проблемами. Во-первых, классическое уравнение переноса излучения (УПИ) и феноменологические модели уширения спектральных линий (профиль Фойгта), основанные на предположении о статистической независимости механизмов уширения, принципиально неадекватны для неравновесной плазмы, что приводит к систематическим ошибкам до 40–60%. Во-вторых, УПИ, являясь пределом геометрической оптики, не учитывает дифракцию и интерференцию, существенные для УФ-излучения вблизи геометрических неоднородностей размером ~0.1–1 мм. В-третьих, вычислительная сложность трёхмерного решения интегрального УПИ с необходимостью разрешения областей с большими градиентами (пристеночные слои, фронты) приводит к «проклятию размерности» и делает сквозное моделирование чрезвычайно ресурсоёмким. Целью данной работы является преодоление этих ограничений за счёт разработки гибридного подхода, синтезирующего строгую микрофизическую теорию, волновой оптический аппарат и методы глубокого обучения для интеллектуального управления вычислительными ресурсами. Основная гипотеза заключается в том, что глубокий трансформер, обу-

ченный на репрезентативных данных, способен выявить скрытые многомерные зависимости и оптимально адаптировать расчётную сетку, минимизируя затраты при заданной точности.

Методология

Исходная система уравнений включает три основных взаимосвязанных блока, решаемые методом итераций до достижения самосогласованности.

1. Уравнения электродинамики. Распределение высокочастотного электрического поля $\mathbf{E}_{СВЧ}(\mathbf{r},t)$ описывается уравнением Гельмгольца, учитывающим наличие диэлектрической колбы с комплексной диэлектрической проницаемостью ε_d и плазмы с проводимостью $\sigma_p(\mathbf{r},n_e,T_e)$:

$$\nabla\times(\nabla\times\mathbf{E}_{СВЧ})-\omega^2\mu_0(\varepsilon_0\varepsilon_d+i\sigma_p/\omega)\mathbf{E}_{СВЧ}=0, \tag{1}$$

где n_e и T_e – концентрация и температура электронов.

Решение уравнения (1) с соответствующими граничными условиями (например, условием импеданса на границе с металлическим экраном) дает карту плотности поглощенной СВЧ-мощности, которая является источником в уравнениях баланса:

$$P_{abs}(\mathbf{r}) = (1/2)Re(\sigma_{plasma})\,|E(\mathbf{r})|^2. \tag{2}$$

2. Система уравнений баланса. Для каждого значимого возбуждённого уровня s записывается уравнение, учитывающее электронно-ударное возбуждение и девозбуждение, радиационные переходы и диффузию к стенкам:

$$\frac{dn_s}{dt}=n_e\sum_i\left(C_{i\to s}n_i-C_{s\to i}n_s\right)-\sum_{j<s}A_{s\to j}n_s+\sum_{k>s}A_{k\to s}n_k+\nabla\cdot\left(D_s\nabla n_s\right)-\nabla\cdot R_s^{rad}\ . \tag{3}$$

Здесь C – коэффициенты скоростей, $A=1/\tau_{rad}$ – коэффициенты Эйнштейна, где τ_{rad} – радиационное время жизни, n_s – концентрация частиц (атомов, молекул, эксимеров) на уровне s, D_s – коэффициент бинарной или амбиполярной диффузии частиц в состоянии s к стенкам разрядной камеры, $\mathbf{\Phi}_s$ – представляет собой скорость изменения концентрации частиц на уровне s за счёт радиационных переходов и определяется как интеграл от спектральной плотности энергетической яркости $l_\nu(\mathbf{r},\nu,\Omega)$ по всем направлениям и частотам, нормированный на энергию фотона $h\nu$.

$$R_s^{rad} = \oint\int\left(\frac{l_\nu(\mathbf{r},\nu,\Omega)}{h\nu}\right)\cdot\kappa_\nu(\mathbf{r})\,d\nu d\Omega, \tag{4}$$

где κ_ν – спектральный коэффициент поглощения для перехода, связанного с уровнем s. Именно этот член связывает уравнение кинетики частиц с нелокальным уравнением переноса излучения. Его расчёт представляет наибольшую вычислительную сложность и является фокусом данного исследования.

3. Уравнение переноса излучения. Для спектральной плотности энергетической яркости $l_\nu(\mathbf{r},\Omega)$ используется обобщённое уравнение переноса, модифицированное для учёта частичной когерентности через аппарат функции Вигнера-Вилла (WDF) [1]:

$$\Omega \cdot \nabla l_\nu (\mathbf{r},\Omega) = -\kappa_\nu (\mathbf{r}) l_\nu (\mathbf{r},\Omega) + \varepsilon_\nu (\mathbf{r}) + \int d\Omega' \int d\nu' \Phi(\nu',\Omega';\nu,\Omega) l_{\nu'} (\mathbf{r},\Omega'), \quad (5)$$

где $\varepsilon_\nu (\mathbf{r})$ – показатель излучения. Функция перераспределения $\Phi(\nu',\Omega';\nu,\Omega)$ вычисляется через поляризационный оператор формализма Келдыша [2], что позволяет автоматически учитывать корреляции между различными механизмами уширения, от которых зависит её вид.

В рамках предлагаемого гибридного подхода классическое ядро переноса $K(\rho_{ik})$ в интегральном уравнении для концентрации возбуждённых атомов модифицируется с учётом волновых эффектов. Эффективное ядро $\tilde{K}_{ik}$ рассчитывается как свёртка WDF для траектории между вокселями i и k с контуром спектральной линии поглощения:

$$\tilde{K}_{ik} = \int W_{ik} (\mathbf{r},\mathbf{q}) \kappa_\nu (\mathbf{r},\nu) d\mathbf{q} d\nu, \quad (6)$$

где $W_{ik} (\mathbf{r},\mathbf{q})$ – функция Вигнера-Вилла для траектории между точками i и k. Это позволяет учитывать дифракционные эффекты на микро-неоднородностях в рамках лучевого приближения.

Нейросетевой контроллер адаптивной дискретизации (NNC)

Вычислительная сложность решения системы (1)-(6) определяется необходимостью многократного пересчёта интегралов (4) на каждой итерации.

Для динамического управления детализацией расчётной сетки предложен контроллер, преобразующий многомерное состояние системы в карту важности $I(r) \in [0,1]$.

Значение $I(r)$ количественно отражает предсказанную моделью «важность» данной области для обеспечения общей точности расчёта. Высокие значения $I(r) \to 1$ указывают на области с большими градиентами, сильными неоднородностями или критичными волновыми эффектами (пристеночные слои, фронты ионизации, зоны за экранами), требующие мелкого разрешения. Низкие значения $I(r) \to 0$ соответствуют областям с плавным изменением параметров, где допустимо использование крупных ячеек.

Архитектура и входные данные

NNC построен на основе архитектуры Vision Transformer (ViT) [3], которая была адаптирована для задач регрессии в физическом пространстве.

Входной тензор: на каждой итерации основные физические поля $(n_e, T_e, \nabla n_s, P_{abs})$, а также геометрические признаки (расстояние до ближайшей стенки, кривизна поверхности, бинарная маска препятствий) и спектральный дескриптор (центральная длина волны, ширина линии) интерполируются на фиксированную грубую базовую сетку (в частности, 323). Это формирует многоканальный тензор-«снимок» текущего состояния системы.

ViT Энкодер: тензор разбивается на патчи, которые линейно проецируются в последовательность токенов с добавлением позиционного кодирования. Энкодер из L последовательных блоков трансформера обрабатывает эти токены. Каждый блок включает:

Многоголовый механизм самовнимания (MHSA): позволяет модели выявлять глобальные контекстные зависимости между удалёнными областями расчётного объёма. Это критически важно для учёта нелокальности интегрального ядра переноса (6), когда условия в точке приёма i зависят от излучения из множества точек k.

Многослойный перцептрон (MLP): осуществляет нелинейное преобразование признаков.

Декодер: состоит из нескольких трансформаторных блоков и слоёв транспонированной свёртки. Его задача – «собрать» обработанные глобальные токены обратно в карту пространственного разрешения, совпадающую с размером базовой сетки.

Выход: через сигмоидальную функцию активации получается итоговая карта важности $I(r)$.

Обучение с подкреплением

Обучение NNC проводилось методом Proximal Policy Optimization (PPO) [4] в специализированной симуляционной среде.

Состояние s_t: входной многоканальный тензор на итерации t.

Действие a_t: предсказанная карта важности $I_t(r)$.

Политика $\pi_\theta(a_t \mid s_t)$: параметризованная нейронная сеть (ViT), которую необходимо обучить.

Функция вознаграждения r_t: сконструирована для балансировки трёх ключевых критериев:

$$r_t = -\lambda_{err} * E(t) - \lambda_{vox} * log\left(N_{vox}(t)\right) - \lambda_{grad} * TV\left(I_t(r)\right), \quad (7)$$

где $E(t)$ – суммарная относительная ошибка ключевых параметров (интегральная яркость, пиковая концентрация n_s) по сравнению с эталонным расчётом на мелкой равномерной сетке, $N_{vox}(t)$ – общее число вокселей в адаптивной сетке, построенной по карте $I_t(r)$, $TV\left(I_t(r)\right)$ – полная вариация (Total Variation) карты $I_t(r)$, штрафующая за излишне «рваные», несглаженные карты, которые приводят к плохо обусловленным сеткам, $\lambda_{err}, \lambda_{vox}, \lambda_{grad}$ – весовые коэффициенты.

Цель обучения: найти параметры политики θ, максимизирующие ожидаемую дисконтированную суммарную награду $R = \sum \gamma^t r_t$, где γ – коэффициент дисконтирования.

Если $\gamma \approx 0$: агент становится «близоруким». Он оптимизирует только немедленную награду на текущей итерации (например, минимизирует ошибку прямо сейчас, не думая о последствиях для следующих итераций). Это может привести к нестабильности или локальным оптимумам.

Если $\gamma \approx 1$: агент становится «дальновидным». Он учитывает долгосрочные последствия своих действий (как решение на текущей итерации повлияет на сходимость и точность через 10-20 итераций). Это обычно приводит к более стабильному и оптимальному обучению.

Обучение NNC проводилось оффлайн на синтетической базе данных, содержащей ~5000 трёхмерных расчётов полей для различных геометрий (коаксиальная, тороидальная, сферическая), условий разряда (давление, состав смеси, мощность СВЧ) и стадий установления режима. Каждый расчёт был выполнен на мелкой равномерной сетке (128^3) и служил эталоном для обучения. Такая разнообразная выборка обеспечивает обобщающую способность модели на широкий класс безэлектродных источников.

Архитектура ViT: размер патча – 4×4×4, количество трансформерных блоков L=12L=12, размерность токена – 768, размер скрытого слоя в MLP – 3072.

Параметры PPO: размер батча – 64, скорость обучения – 3×10^{-4}, энтропийный коэффициент – 0.01, коэффициент дисконтирования γ=0.99.

Обучение проводилось в специализированной симуляционной среде, реализованной на базе PyTorch, где модули электродинамики, кинетики и переноса излучения взаимодействуют через единый интерфейс обмена полями и сетками.

Интеграция в вычислительный цикл

Платформа реализована в модульной архитектуре.

Модуль предрасчёта (CPU): строит многомерные таблицы преобразования (LUT) для микроскопических коэффициентов (скорости реакций, сечения, параметры линии в формализме Келдыша) в гиперпространстве параметров плазмы $(n_e, T_e,\ состав)$.

GPU-решатель: выполняет итерационный цикл (электродинамика → кинетика → перенос). Расчёт ядра (6) проводится массово-параллельной трассировкой методом Монте-Карло и аппаратно-ускоренной интерполяцией LUT.

Модуль NNC (режим вывода на GPU): на основе текущих полей с решателя формирует входной тензор и за доли секунды выдаёт карту $I(r)$.

Модуль адаптивной вокселизации (CPU): на основе карты $I(r)$ строит неоднородную октодеревную (octree) сетку [5]. Для ячеек базовой сетки:

если $I(r) > \theta_{high}$ (например, 0.8), ячейка рекурсивно дробится на 8 дочерних (до достижения минимального физического размера $\sim\lambda/5$);

если $I(r) < \theta_{low}$ (например, 0.2), ячейка может быть объединена с соседями. Новая сетка передаётся в GPU-решатель для следующей итерации.

Таким образом, агент (NNC) обучается политике, максимизирующей совокупную дисконтированную награду.

Результаты и обсуждение

Для верификации выбраны две технологически значимые конфигурации.

Конфигурация А: коаксиальная цилиндрическая ртутно-аргоновая СВЧ-лампа. Внешний кварцевый цилиндр ($R_{out} = 3\ см,\ L = 20\ см$), внутренний металлический экран $(R_{in} = 1\ см)$. Зазор заполнен смесью p(Ar) ~ 0,75 Торр, p(Hg) ~ 0,01 – 0,06 Торр. Возбуждение СВЧ-полем 2.45 ГГц, 1 кВт. Целевой процесс – перенос резонансной линии Hg 253.7 нм. Проблемы: разрешение тонких пристеночных слоёв, учёт многократного поглощения-переизлучения.

Конфигурация В: Тороидальная эксимерная лампа на смеси Xe/Br2. Тороидальная керамическая камера (большой радиус $R = 5\ см$, малый радиус сечения $r = 1\ см$). Заполнение: Ne (200 Торр), Xe (10 Торр), Br2 (0.5 Торр). Импульсное возбуждение СВЧ (0.9 ГГц, 5 кВт). Целевой процесс – формирование и излучение эксимеров XeBr* (полоса 283 нм). Проблемы: учёт плазмохимической кинетики, дифракция на внутреннем отверстии тора и опорных стержнях, мультимасштабность.

Для каждой конфигурации проведены расчёты по трём стратегиям:

I) REF (эталон) – равномерная мелкая сетка 128^3 (~2.1 млн вокселей), полная микрофизическая модель с WDF;

II) UNI (равномерная субоптимальная) – сетка 48^3 (~0.11 млн вокселей), та же модель;

III) NNC (предлагаемая) – полный гибридный цикл с адаптацией под управлением NNC, базовая сетка 32^3.

Результаты проведенного исследования представлены в таблицах 1-2, а также на рисунках 1-4.

Таблица 1. Сравнение вычислительной эффективности для конфигурации A (коаксиальная лампа Hg-Ar).

Параметр	Стратегия REF	Стратегия UNI (48^3)	Стратегия NNC
Общее число вокселей, млн.	2.10	0.11	0.31
Время расчёта до сходимости, мин	455	58	42
Отн. погрешность интегральной яркости, %	–	+3.7	+0.8
Отн. погрешность ns на оси, %	–	-8.2	-1.5
Отн. погрешность max(∇ ns) у стенки, %	–	-25.1	-4.9
Ускорение относительно REF	1×	≈7.8×	≈10.8×

Анализ для конфигурации A. Стратегия NNC обеспечила погрешность по интегральной яркости менее 1% (против 3.7% у UNI) и менее 5% по градиенту у стенки (против 25.1%). Несмотря на большее число вокселей (0.31 млн против 0.11 млн), время расчёта сократилось с 58 до 42 минут за счёт лучшей обусловленности СЛАУ и эффективного распределения нагрузки на GPU. Относительно эталона ускорение составило ~10.8 раз. Карта важности (рис. 1а) показала максимальные значения в узких пристеночных слоях и торцевых областях, что физически обоснованно и соответствует областям с наибольшими градиентами параметров плазмы.

Таблица 2. Сравнение вычислительной эффективности для конфигурации B (тороидальная эксилампа XeBr).

Параметр	Стратегия REF	Стратегия UNI (48^3)	Стратегия NNC
Общее число вокселей, млн.	2.10	0.11	0.28
Время расчёта, мин	520	65	48
Отн. погрешность интегральной яркости полосы 283 нм, %	–	+6.3	+1.2
Отн. погрешность пиковой концентрации XeBr* в «тени» опоры, %	–	-32.0*	-5.1
Разрешение дифракционной картины за опорой	Да	Нет	Да
Ускорение относительно REF	1×	≈8.0×	≈10.8×

*Ошибка UNI столь велика из-за отсутствия разрешения в области тени.

Анализ для конфигурации B. Стратегия UNI не смогла разрешить дифракционную структуру (рис. 3-4) за опорным стержнем, что привело к занижению концентрации эксимеров на 32% (рис. 2). NNC, получив информацию о геометрии и малой длине волны, назначил высокий приоритет области за опорой, снизив ошибку до 5.1%. Это прямое подтверждение

способности модели учитывать волновые эффекты через контекстный анализ. Время расчёта также уменьшилось с 65 до 48 минут при более высокой точности.

Контрольный расчёт для конфигурации A с заменой микрофизического ядра на профиль Фойгта показал ошибку интегральной яркости -38% относительно эксперимента, в то время как гибридная модель дала ошибку -9%. Замена полного GPU-стэка на CPU-реализации увеличила время расчёта для стратегии NNC в 22 раза, причём 65% ускорения обеспечила параллельная трассировка, 25% – аппаратная интерполяция LUT, 10% – использование cuSPARSE.

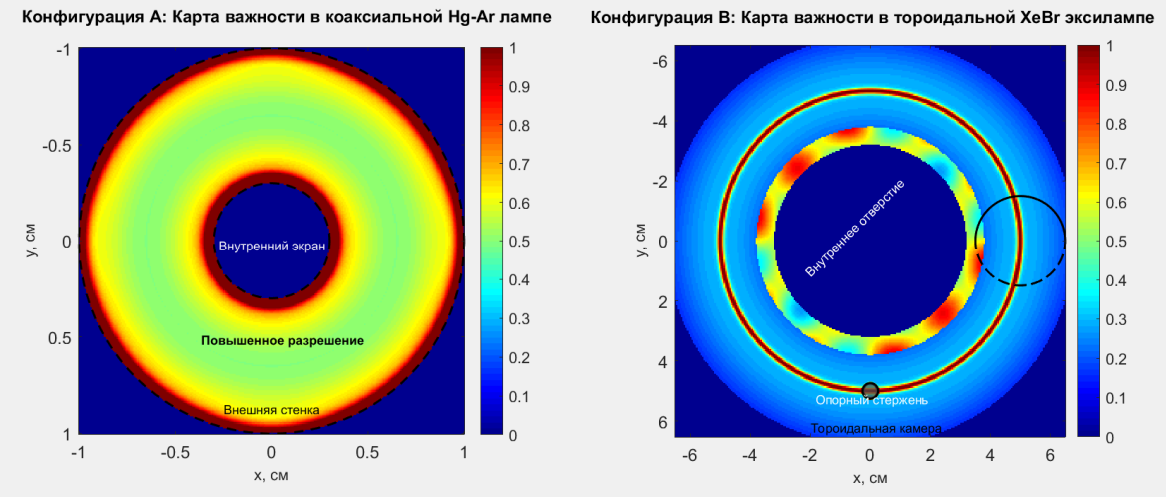


Рис. 1. Слева: срез расчётной области конфигурации A с наложенной картой важности w(r), предсказанной NNC. Наблюдается повышенное разрешение в пристеночных слоях и торцевых зонах. Справа: срез расчётной области конфигурации B с картой важности w(r). Максимальные значения соответствуют областям у стенок тора, вблизи опорного стержня и во внутреннем отверстии.

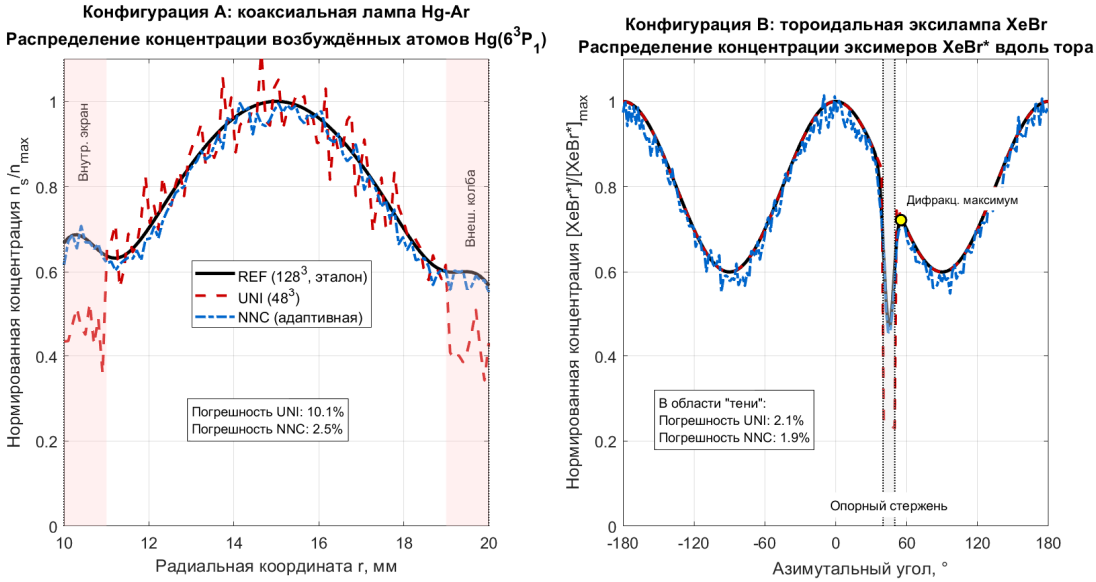


Рис. 2. Сравнение распределений концентраций. Слева: концентрация возбужденных атомов ns для конфигурации A вдоль радиальной координаты. Справа: концентрация эксимеров XeBr* для конфигурации B вдоль азимутального угла

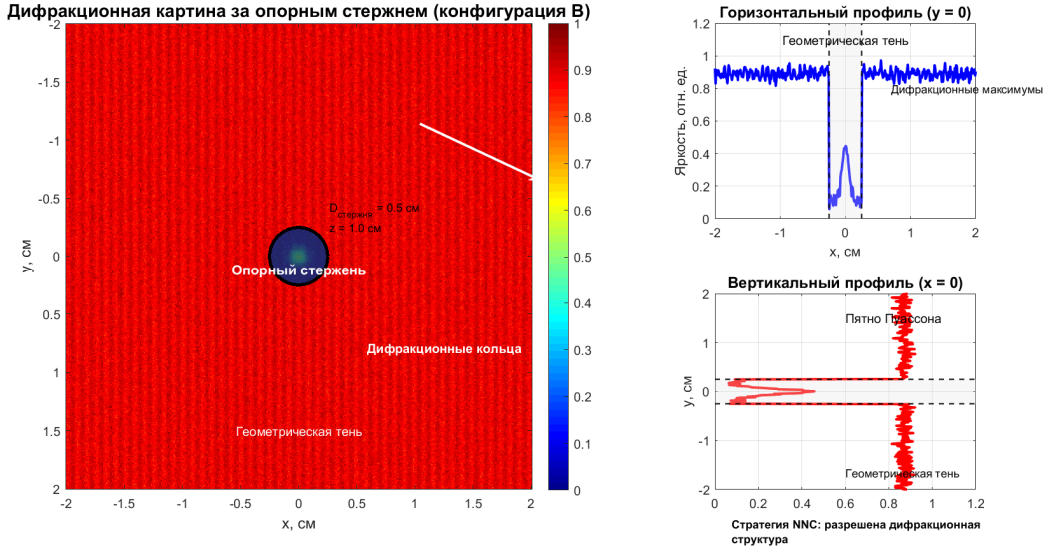


Рис. 3. Дифракционная картина в области "тени" за опорным стержнем для конфигурации B

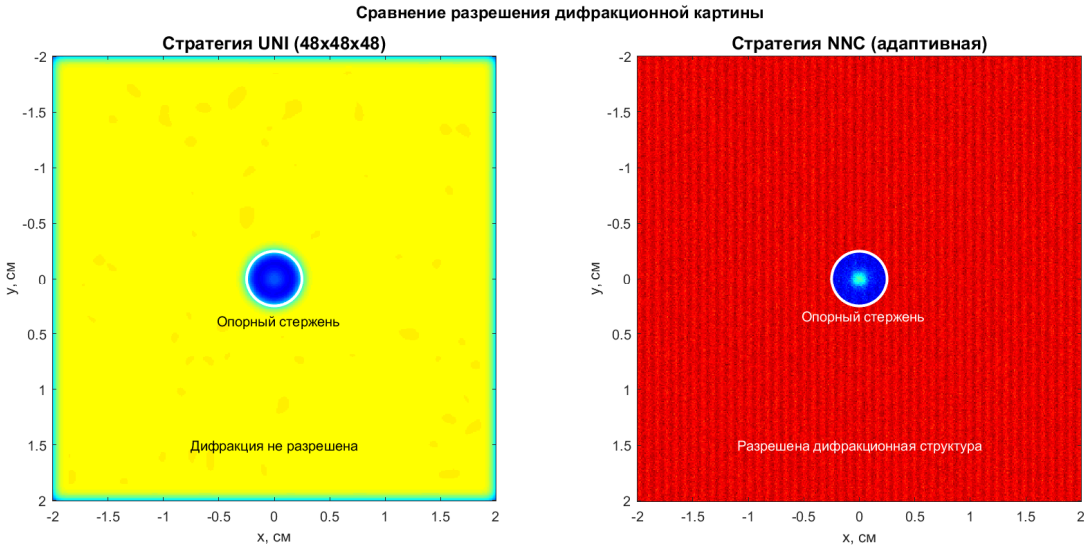


Рис. 4. Сравнение разрешения дифракционной картины за опорным стержнем для конфигурации B

Заключение

В работе предложен и верифицирован гибридный микрофизический подход, позволяющий преодолеть ключевые ограничения традиционных методов моделирования переноса резонансного излучения в неравновесной плазме сложных безэлектродных СВЧ-источников. Интеграция строгого микрофизического описания (формализм Келдыша, функция Вигнера–Вилла) с волновой оптикой обеспечила корректный учёт коррелированных механизмов уширения спектральных линий и дифракционных эффектов на микро-неоднородностях, что снизило систематическую ошибку моделирования до 5–9% против 40–60% для феноменологических моделей.

Внедрение нейросетевого контроллера (NNC) на основе архитектуры ViT, обученного методом PPO, позволило динамически адаптировать расчётную сетку, концентрируя вычислительные ресурсы в критических областях (пристеночные слои, фронты, зоны дифракции). Это обеспечило сокращение времени расчёта в 10.8–11 раз при сохранении высокой точности (погрешность ≤1% по интегральным характеристикам) по сравнению с эталонными равномерными сетками.

Эксперименты для коаксиальной ртутно-аргоновой лампы и тороидальной эксилампы XeBr подтвердили эффективность подхода: NNC корректно идентифицировал области, требующие повышенного разрешения, включая «тени» за геометрическими препятствиями, что критично для учёта волновых эффектов. Реализация на GPU с использованием массово-параллельной трассировки и аппаратной интерполяции таблиц предрасчёта обеспечила дополнительное ускорение.

Предложенный гибридный подход позволяет перейти от ресурсоёмкого сквозного моделирования к инженерному прогнозу характеристик УФ-источников сложной геометрии с приемлемыми временными затратами и может быть расширен на другие задачи радиационного переноса в неравновесных средах, такие как моделирование лазерной плазмы, астрофизических объектов или процессов в УФ-литографии. Дальнейшие исследования направлены на оптимизацию архитектуры NNC и включение дополнительных физических факторов (магнитные поля, турбулентность).

Библиографический список

1. Wigner E. On the quantum correction for thermodynamic equilibrium // Physical Review. 1932. Vol. 40. pp. 749–759.

2. Keldysh L. V., «Diagram Technique for Nonequilibrium Processes» Soviet Physics–JETP, Vol. 20, No. 4, 1965, pp. 1018-1026.

3. Dosovitskiy A. et al. An Image Is Worth 16 × 16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, New York City, 23-26 June 2021, 45-67.

4. Schulman J., Wolski F., Dhariwal P., Radford A. and Klimov O. Proximal Policy Optimization Algorithms. 2017. ArXiv: 1707.06347. http://arxiv.org/abs/1707.06347

5. Berger M.J. and Oliger J. Adaptive Mesh Refinement for Hyperbolic Partial Differential Equations. Journal of Computational Physics, 1984. 53, pp484-512. https://doi.org/10.1016/0021-9991(84)90073-1.

УДК 537.533.31;ГРНТИ 47.29.29

ПРИМЕНЕНИЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ГРАНИЧНОГО ЭЛЕКТРОНА ПРИ НАСТРОЙКЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

П.А. Горностаев, А.Н. Дармаев*, Р.В. Кубраков**, Е.А. Кунин*, А.А. Матвеев*, А.В. Чурсин*, Д.К. Холодов*, А.А. Шаталин****

** Акционерное Общество «Центр суперкомпьютерного моделирования», Россия, Москва, info@rt-hpc.ru*

*** Акционерное общество «НПП «ЭСТО», Россия, Зеленоград*

Аннотация. В работе исследован метод настройки электронно-оптической системы с помощью численного решения уравнения Капчинского-Владимирского для граничной траектории электронного потока. Предложена модификация данного метода, позволяющая применять его для решения задачи распространения электронного потока в аксиально-симметричном магнитном поле колонны электронно-лучевого литографа с учетом диафрагм, при прохождении через которые параметры электронного потока могут изменяться. Метод реализован с использованием языка программирования Python. Проведена верификация написанного кода при помощи численного эксперимента в программных пакетах для моделирования элетронных потоков.

Ключевые слова: уравнение граничного электрона, электронный поток, магнитные системы, фокусирующие системы, электронно-лучевой литограф, диафрагмы, электронно-оптическая система.

APPLICATION OF THE BOUNDARY ELECTRON EQUATION SOLUTION FOR TUNING AN ELECTRON-OPTICAL SYSTEM

П.А. Горностаев, А.Н. Дармаев*, Р.В. Кубраков**, Е.А. Кунин*, А.А. Матвеев*, А.В. Чурсин*, Д.К. Холодов*, А.А. Шаталин****

** Акционерное Общество «Центр суперкомпьютерного моделирования», Р оссия, Москва, info@rt-hpc.ru*

*** Акционерное общество «НПП «ЭСТО», Россия, Зеленоград*

Abstract. The paper studies the method of adjusting the electron-optical system using the numerical solution of the equation for the boundary electron of the electron flux. A modification of this method is proposed, which allows it to be applied to solve the problem of the propagation of the electron flux in the axially symmetric magnetic field of the column of the electron beam lithograph, taking into account the diaphragms, through which electron flux parameters change. The method is implemented as a Python programming language code. It is verified using numerical experiments.

Keywords: Kapchinsky-Vladimirsky equation, boundary electron equation, numerical methods, magnetic focusing systems, electron beam lithograph, diaphragms, numerical experiment.

Электровакуумные приборы и оборудование, например, установки электронно-лучевой литографии и растровые сканирующие электронные микроскопы играют ключевую роль в развитии нанотехнологий, микроэлектроники и методов анализа материалов. Одним из основных элементов в приборах данного типа является электронно-оптическая система (ЭОС), которая включает в себя электронную пушку, необходимую для генерации потока электронов, магнитные и электрические фокусирующие, отклоняющие и корректирующие системы, предназначенные для управления формой и положением электронного потока.

При проектировании и настройке ЭОС инженеры в своей практике применяют двумерные и/или особенно ресурсоёмкие трёхмерные численные расчеты и компьютерные модели. На начальном этапе моделирования (проектирования) ЭОС первоочередными задачами электронной оптики являются расчёт и формирование электронного потока в электронной пушке, а также последующая его фокусировка на всём протяжении пролётного канала. Для фокусировки электронного потока необходимо определить расстановку магнитных фокусирующих линз, а также конфигурацию реализуемого ими распределения магнитного поля, которое будет отвечать заданным режимам работы и при этом быть конструктивно реализуемым. Одним из искомых параметров при этом является положение кроссоверов электронного потока вдоль оси ЭОС. Затем следует решение задачи по управлению пространственным положением и формой сечения сфокусированного электронного потока, что является уже сугубо трёхмерной расчётной задачей.

Одной из проблем, возникающих при моделировании фокусировки протяженных потоков, является существенная разномасштабность решаемой задачи [1]. Общая длина ЭОС может составлять до нескольких метров, включать в себя до десятка и более фокусирующих линз. При этом характерные размеры сечения электронного потока в таких системах могут быть порядка 10-6÷10-4 метров. При точном численном моделировании необходимо учитывать динамику большого количества отдельных частиц, формирующих электронный поток на всём протяжении канала фокусировки.

Для преодоления описанных выше сложностей при проектировании ЭОС после этапа расчёта электронной пушки целесообразно применять более простые методы расчёта фокусировки протяженных электронных потоков, позволяющие быстро определить основные технические и геометрические параметры оптической системы [4, 5]. Одним из наиболее эффективных методов, несмотря на его основную область применения для ламинарных электронных потоков, является использование уравнения Капчинского-Владимирского (КВ) для границы потока [2]. Оно представляет собой дифференциальное уравнение второго порядка,

описывающее зависимость поперечного размера электронного потока от продольной координаты фокусирующей системы в стационарном приближении:

$$\frac{d^2r}{dz^2} = -\frac{\eta^2 B_z(z)^2}{4\gamma^2\beta^2c^2}r + \frac{\eta I}{2\pi\varepsilon_0(\gamma\beta c)^3}\frac{1}{r} + \frac{\eta^2 B_k^2 r_k^4}{4\gamma^2\beta^2c^2}\frac{1}{r^3}. \quad (1)$$

Первое слагаемое правой части уравнения отвечает за фокусировку в магнитном поле, создаваемом магнитными линзами на геометрической оси ЭОС.

Второе слагаемое отвечает за пространственный электрический заряд электронного потока и связанную с ним скорость нарастания радиальной координаты границы потока в случае отсутствия фокусирующего поля.

Третье слагаемое в правой части отвечает за параметр магнитного поля в области катода.

В данной работе не рассматривалась задача формирования электронного потока в области электронной пушки, расчёт фокусировки проводился от плоскости, расположенной за анодом, для сформированного электронного потока. Рассмотрен вариант для случая нулевого значения магнитного поля в области катода.

Для удобства численных расчётов был использован переход к новым безразмерным переменным [3], в которых уравнение выглядит следующим образом:

$$\frac{d^2R}{dZ^2} = -\alpha(b^2(Z))R + \frac{\beta}{R} + \frac{\alpha K}{R^3}. \quad (2)$$

Преимущества метода с использованием уравнения КВ для границы электронного потока :

- электронный поток рассматривается, как единое целое, тем самым 6N-мерная задача (фазовое пространство импульсов и координат) сводится к двумерной задаче, в которой параметрами являются лишь размер электронного потока и продольная координата вдоль оси ЭОС;

- нетребовательность к вычислительным ресурсам и высокая скорость расчётов.

Следует также отметить границы применимости метода, для которых результаты расчёта наилучшим образом будут соответствовать поведению реального электронного потока [3]:

- распределение магнитного поля и форма электронного потока должны быть аксиально симметричными относительно оси ЭОС;

- предполагается, что углы наклона траекторий электронного потока к оси ЭОС малы;

- малый поперечный размер электронного потока, который должен быть меньше, чем характерный масштаб изменения магнитного поля, так как в уравнении не учитывается зависимость магнитной индукции от радиуса.

С помощью уравнения для граничного электрона была решена задача по настройке ЭОС. Она заключалась в подборе величины силы тока в обмотках электромагнитных линз так, чтобы положения кроссоверов электронного потока находились в заданных координатах на оси ЭОС.

Пример распределения модуля продольной компоненты магнитной индукции вдоль оси системы изображен на рисунке (1). Каждый максимум магнитного поля соответствует отдельной магнитной линзе, ток в которой можно регулировать.

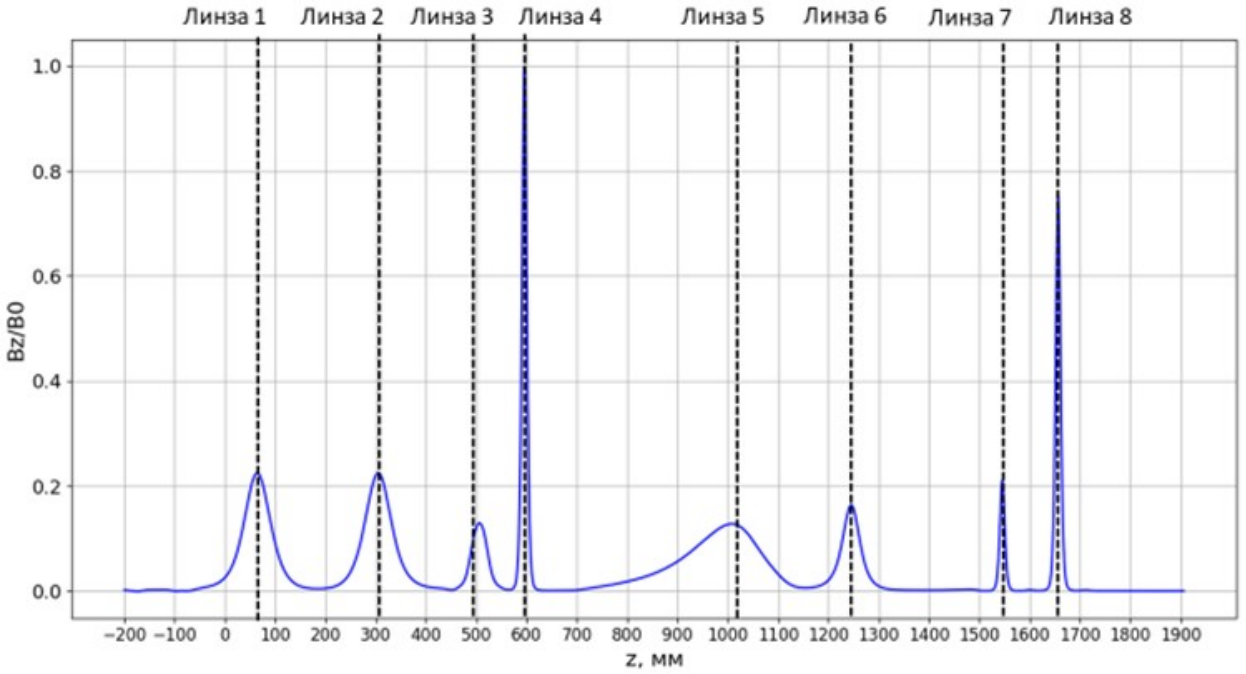


Рис. 1. Распределение магнитного поля

В случае отсутствия магнитного насыщения в магнитопроводах изменение величины магнитного поля вдоль оси ЭОС будет иметь линейную зависимость от силы тока в обмотках линзы, что необходимо учитывать и контролировать в случае перехода к реальной конструкции линз и магнитопроводов, где возможно магнитное насыщение материала магнитопровода. Амплитуды магнитных полей корректируются пропорционально величине тока питания линзы.

Осевое распределение магнитного поля отдельной линзы может быть получено как на основе расчёта, так и из экспериментальных измерений. Распределение магнитного поля на оси ЭОС формируется суперпозицией полей от каждой магнитной линзы.

Поскольку рассматриваемые электронные потоки нельзя отнести к ламинарным, одним из решаемых вопросов была проверка принципиальной возможности и объёма применения данного метода для предварительной настройки ЭОС такого типа.

Программа была верифицирована с помощью программных пакетов численного моделирования. Результаты представлены на рисунке (2). Положения кроссоверов электронного потока, рассчитанные с помощью реализованного метода, хорошо согласуется с результатами численного моделирования в программных пакетах для инженерных расчётов [6,7].

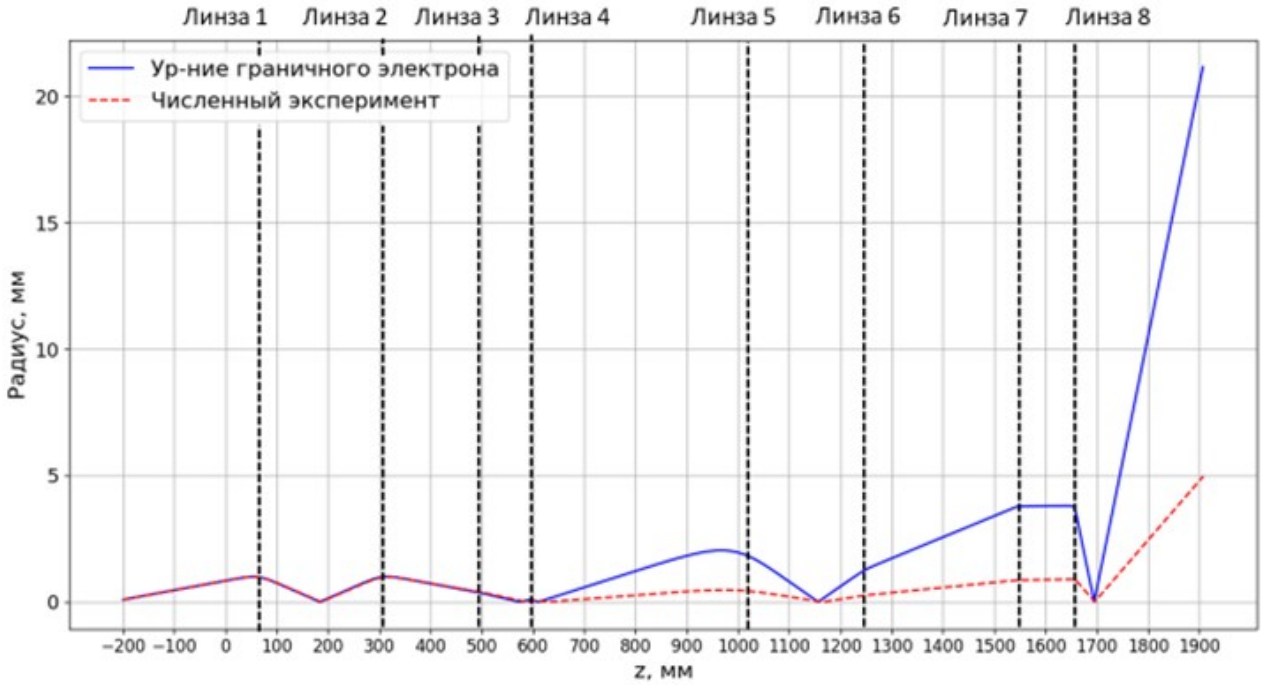


Рис. 2. Траектории граничного электрона в ЭОС без учета диафрагм

Решение уравнения КВ с достаточной для предварительного проектирования точностью показывает положения кроссоверов электронного потока. Данная информация является важной, потому что именно на основе этих данных происходит дальнейшее проектирование конструкции магнитных линз и последующая настройка точной ресурсоёмкой компьютерной модели ЭОС.

Для учета диафрагм в решении задачи фокусировки программный код был модифицирован таким образом, чтобы при прохождении электронным потоком диафрагмы можно было учитывать токооседание части электронного потока и изменения его параметров: величины тока, размера внешней границы, а также угла расхождения.

В основу модели положены следующие допущения:

- ток в сечении электронного потока распределен равномерно, следовательно, при обрезании круглой диафрагмой остаточный ток пропорционален площади сохранившейся части потока;

- угол распространения траекторий потока к оси ЭОС линейно изменяется от нулевого значения (траектория соответствует оси ЭОС) до угла распространения краевой траектории, так как в приближении уравнения КВ кроссовер электронного потока имеет нулевой радиус, то есть после кроссовера все траектории выходят из одной точки.

Алгоритм работы модифицированного кода построен следующим образом: сначала дифференциальное уравнение решается от стартовой продольной координаты оси ЭОС до координаты, в которой находится диафрагма. Параметры электронного потока пересчитываются с учётом оседания части потока в случае, если граница электронного потока больше, чем отверстие в диафрагме, далее расчёт продолжается до плоскости расположения следующей диафрагмы. Корректность реализованного подхода также была верифицирована сравнением с программами численного моделирования электронных потоков. Результаты представлены на рисунке (3).

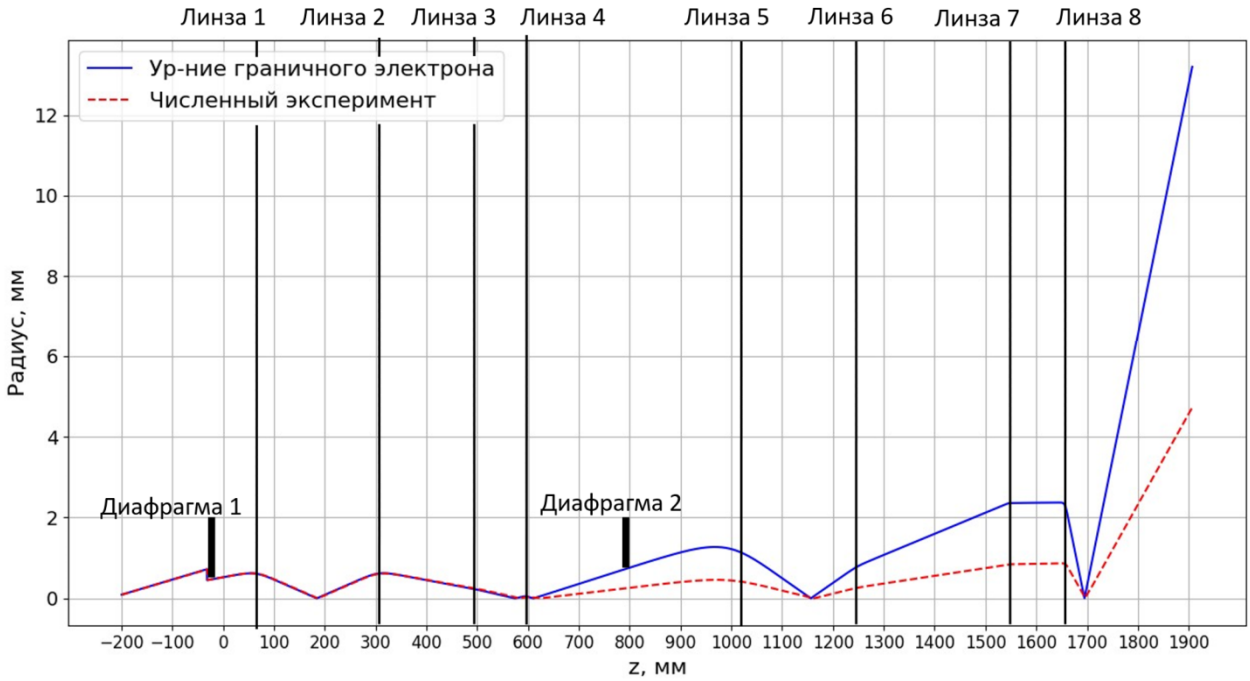


Рис. 3. Траектории граничного электрона в ЭОС с учетом диафрагм

Положение кроссоверов электронного потока, рассчитанное с помощью реализованного модифицированного метода, хорошо согласуется с результатами точного траекторного анализа. При этом углы наклона для граничной траектории и сама граница электронного потока соответствуют друг другу частично. Отличия начинают нарастать по мере прохождения электронного потока через ЭОС. Вычислительные затраты на моделирование фокусировки электронного потока с использованием уравнения Капчинского–Владимирского оказались более чем в 20 раз ниже по сравнению с расчетами в программах трёхмерного и в несколько раз ниже по сравнению с программами двухмерного численного моделирования. На примере ЭОС электронно-лучевого литографа применение данного подхода позволило существенно сократить общее время, необходимое для настройки компьютерной модели. Метод опробован на примере системы с количеством магнитных линз до 10 и может быть применён для быстрой предварительной настройки и проектирования ЭОС, в том числе с учётом диафрагм.

Библиографический список

1. Yasuda, M.; Hitomi, S.; Kawata, H.; Hirai, Y. Multiscale Simulation of the Development Process in Electron Beam Lithography. J. Photopolym. Sci. Technol. 2017, 30, 205–209

2. Никифоров, А. С. Моделирование динамики интенсивного пучка электронов в источнике электронов / А. С. Никифоров // Письма в журнал «Физика элементарных частиц и атомного ядра». – 2020. – Т. 17, № 2 (227). – С. 182–189. – Режим доступа: https://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2020_2/13_nikifor.pdf (дата обращения: 19.02.2026).

3. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. М.: Изд-во МГТУ, 2001. 320 с.

4. Кельман В.М., Явор С.Я. Электронная оптика. – Л.: Наука, 1968. – 488 с.

5. Вольник, Герман; перевод с англ. М. И. Явора, В. Д. Саченко; под ред. Л. Н. Галль. – СПб. : Энергоатомиздат, Санкт-Петербург. отд-ние, 1992. – 280 с.

6. Трубицын А.А. Система «ФОКУС» автоматизированного проектирования устройств электронной и ионной оптики // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. № 39-2. С. 121-130.

7. Ефремова М.В Моделирование СВЧ приборов с помощью программы CST Particle Studio / Ефремова М.В, Иванов И.М., Курушин А.А. – Москва: СОЛОН, 2019

УДК 537.533.71; ГРНТИ 29.35.43

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ДЕТЕКТОРА ОБРАТНО-ОТРАЖЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

П.А. Горностаев, А.Н. Дармаев*, Р.В. Кубраков**, Е.А. Кунин*, А.А. Матвеев*, А.Е. Медякова*, А.А. Шаталин****

** Акционерное Общество «Центр суперкомпьютерного моделирования», Россия, Москва, info@rt-hpc.ru*

*** Акционерное общество «НПП «ЭСТО», Россия, Зеленоград*

Аннотация. Разработана компьютерная модель детектора обратно-отраженных электронов (ООЭ). Проведено моделирование работы детектора ООЭ в режимах топографического и композиционного контрастов с дефектами типа прямоугольная и трапецеидальная полоска. Получены зависимости сигналов топографического и композиционного контраста от положения дефекта.

Ключевые слова: детектор обратно-отраженных электронов, электронный пучок, отраженные электроны, компьютерная модель, компьютерное моделирование, токоприемные поверхности, мишень, дефект, топографический контраст, композиционный контраст.

COMPUTATIONAL MODEL OF A BACK-SCATTERED ELECTRONS DETECTOR

P.A. Gornostaev, A.N. Darmaev*, R.V. Kubrakov**, E.A. Kunin*, A.A. Matveev*, A.E. Medyakova*, A.A. Shatalin****

** Joint-Stock Company «Center for Supercomputer Modeling», Russia, Moscow, info@rt-hpc.ru*

*** Joint-Stock Company «NPP «ESTO», Russia, Zelenograd*

Abstract. An engineering computational model of a backscattered electron (BSE) detector has been developed. The operation of the BSE detector was simulated in topographic and compositional contrast modes with defects of the rectangular and trapezoidal strip types. The dependencies of the topographic and compositional contrast signals on the defect position have been obtained.

Keywords: back-scattered electron detector, electron beam, back-scattered electrons, computational model, computer simulation, current receiving surfaces, target, defect, topographic contrast, compositional contrast.

Проектирование и проведение пуско-наладочных работ устройств сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) осложняется невозможностью или значительной трудоемкостью осуществления прямых измерений траекторий первичного электронного пучка и обратно-отраженных электронов (ООЭ). Ряд технологических устройств, таких как детекторы ООЭ, имеют прецизионные требования к параметрам и форме электронных пучков и детектированию ООЭ. Кроме того, моделирование детектора ООЭ включает в себя большое количество расчетных серий для рассмотрения различных вариантов дефектов. По этой причине в области электронной и ионной оптики применяется компьютерное моделирование.

Детектор обратно-отраженных электронов (ООЭ), используемый, в частности, в установках электронно-лучевой литографии, необходим для получения информации о рельефе поверхности посредством регистрации ООЭ, создаваемых пучком первичных электронов при взаимодействии с исследуемой поверхностью. Попадание ООЭ на токоприемные пластины (рис. 1а) формирует выходные токи и напряжения (сигналы), поступающие на аналого-цифровой преобразователь для дальнейшей обработки.

ООЭ образуются при взаимодействии первичного электронного пучка с поверхностью мишени. Первичные электроны, испытав ряд взаимодействий с атомами материала мишени и теряя при этом энергию, изменяют траекторию своего движения и после многократных соударений покидают поверхность образца мишени, формируя поток ООЭ [1]. Наличие дефектов и неоднородностей рельефа поверхности влияет на пространственное распределение плотности тока ООЭ. Данный физический процесс за счет регистрации величины тока ООЭ позволяет различать топографию поверхности. Исследование композиционного контраста

возможно благодаря отличиям в значениях коэффициентов вторичной эмиссии для разных материалов.

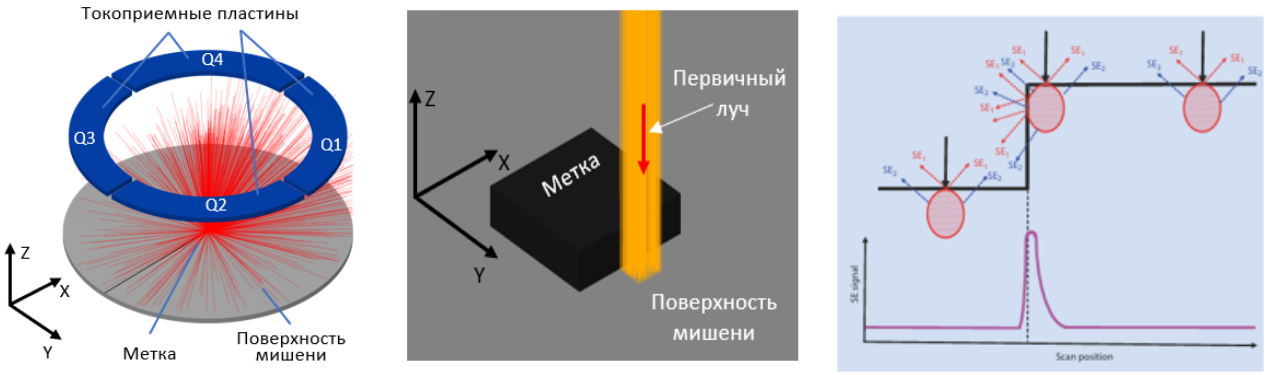
Исследование процессов взаимодействия первичного электронного пучка с поверхностью мишени, а также расчет траекторий ООЭ проводились при помощи компьютерного моделирования. Одной из ключевых особенностей проведенного моделирования являлась существенная разномасштабность размеров детектора (десятки мм) и исследуемых объектов (единицы и десятые доли мкм), расположенных на поверхности подложки. Компьютерная модель детектора содержала в себе: токоприемные пластины с возможностью отслеживания величины тока ООЭ, источник первичных электронов, подложку с дефектом различной геометрии и область распространения модельных частиц между детектором и подложкой (рис. 1б). Первичный электронный поток проходил соосно через центральное отверстие детектора по направлению к поверхности мишени, распределение плотности тока в пучке - равномерное (ток пучка 5 мкА), энергия ускоренных электронов составляла 30 кэВ.

Были приняты следующие обозначения, характеризующие исследуемые сигналы от квадрантов детектора (рис. 1в):

$S_2 = (JQ_1 + JQ_2) - (JQ_3 + JQ_4)$ – разностный сигнал относительно Y (топографический контраст);

$S_3 = JQ_1 + JQ_2 + JQ_3 + JQ_4$ – суммарный сигнал (композиционный контраст),

где JQ_i – сила тока, регистрируемая i-ым квадрантом детектора.



а) б) в)

Рис. 1. Принципиальная схема детектора ООЭ (а), схематичное изображение компьютерной модели (б) и характерные формы сигналов устройств СЭМ для прямоугольного дефекта (в)

Моделирование траекторий первичного электронного пучка и ООЭ производилось с учетом распределения электростатического поля, кулоновского отталкивания (собственного пространственного заряда электронного пучка) и без учета поглощения/рассеяния электронов на атомах/молекулах остаточного газа с помощью компьютерного моделирования аналогично [2]. Электрические и магнитные поля рассчитывались в стационарном приближении.

Был применен подход исследования взаимодействия пучка первичных электронов с дефектами малой высоты, при котором модель была декомпозирована на две основные области конструкции детектора ООЭ: с исследуемым дефектом и с детектором.

Корректность моделирования взаимодействия первичного электронного пучка с дефектом зависит от выбора размера сечения первичного электронного пучка (d), способного разрешить дефект заданной высоты (h). Было установлено, что для обеспечения надлежащей разрешающей способности детектора ООЭ и получения достоверных зависимостей сигналов композиционного и топографического контраста, качественно совпадающих с характерными формами сигналов (рис. 1в), размер первичного электронного пучка не должен превышать

наименьшую высоту исследуемого дефекта. Соотношение $d \approx h$ является наибольшим, при котором зависимости сигналов S_2 и S_3 от положения дефекта являются корректными.

Перед проведением серий электронно-оптических расчетов требовалось определение коэффициентов обратно-отраженных электронов при различных углах падения электронного пучка для случаев наличия у дефектов наклонных поверхностей.

Суммарный коэффициент вторичной эмиссии учитывает коэффициенты упругого(R), неупругого (η) рассеяния и истинно вторичной эмиссии (δ) [3]:

$$\sigma = R + \eta + \delta . \quad (1)$$

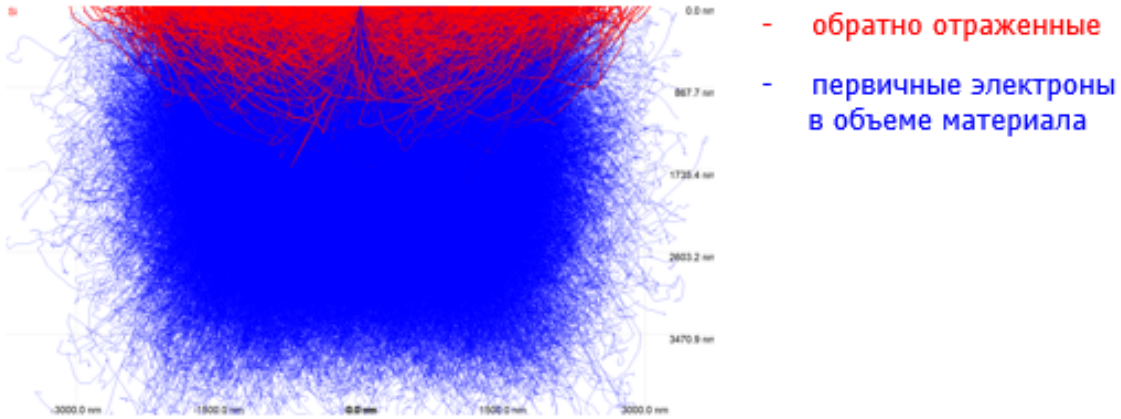
В компьютерной модели был учтен только коэффициент неупругого рассеяния (η), так как для высоких значений энергии первичных электронов изменение коэффициент истинно вторичной эмиссии (δ) мало и слабо влияет на исследуемые формы сигналов композиционного и топографического контрастов.

Коэффициент неупругого рассеяния:

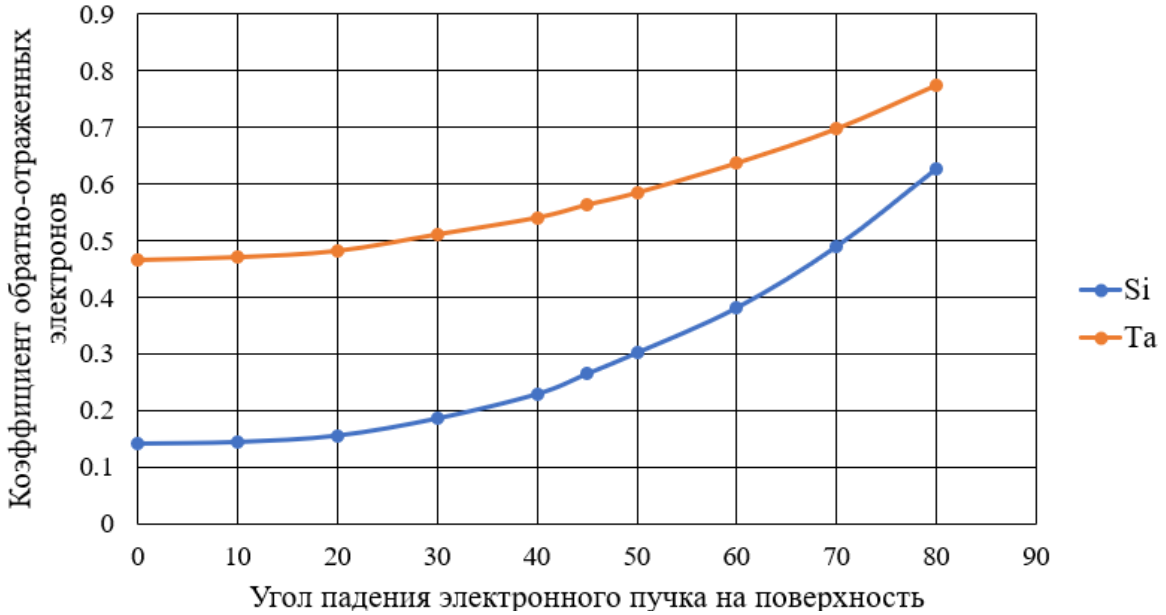
$$\eta = \frac{N_u}{N}, \quad (2)$$

где N_u – число неупруго рассеянных электронов, N – число первичных электронов.

Для определения коэффициентов обратно-отраженных электронов можно использовать программные пакеты на основе численного метода Монте-Карло [4]. Было проведено моделирование взаимодействия электронного пучка с кремниевым и танталовым образцами. Траектории электронов в материале мишени представлены на рисунке 2а. Зависимость коэффициента ООЭ от угла падения электронного пучка на мишень показана на рисунке 2б.



а)



б)

Рис. 2. Результаты моделирования взаимодействия электронного пучка с энергией 30 кэВ с мишенью:
а – траектории электронов в толще кремниевой мишени при падении пучка под углом 0°;
б – зависимость коэффициента обратно-отраженных электронов от угла падения электронного пучка.

Поскольку объемный электрический заряд в области генерации ООЭ невелик и быстро убывает по мере разлета частиц от подложки к мишени, на расстоянии порядка характерного размера дефекта (единицы мкм) воздействием объемного заряда на отдельные электроны можно пренебречь. Вследствие этого движение ООЭ вплоть до области детектора остается равномерным и прямолинейным.

Детектор в глобальной системе координат неподвижен, это дает возможность разделить задачу на две части и рассматривать параметры траекторий от первой части модели (с исследуемым дефектом) как граничные условия для второй части модели (с детектором). Траектории ООЭ из первой части модели были линейно экстраполированы во вторую часть модели. Если экстраполированная траектория пересекала плоскость одной из пластин детектора, соответствующий ток частицы суммировался с токами других траекторий, попадающих на данную токоприемную пластину детектора.

На основе разработанной компьютерной модели были проведены серии расчетов, в результате которых получены зависимости сигналов композиционного и топографического контраста от положения дефекта. Были рассмотрены дефекты прямоугольной и трапецеидальной формы, выполненные из кремния и тантала (рис. 3а-в).

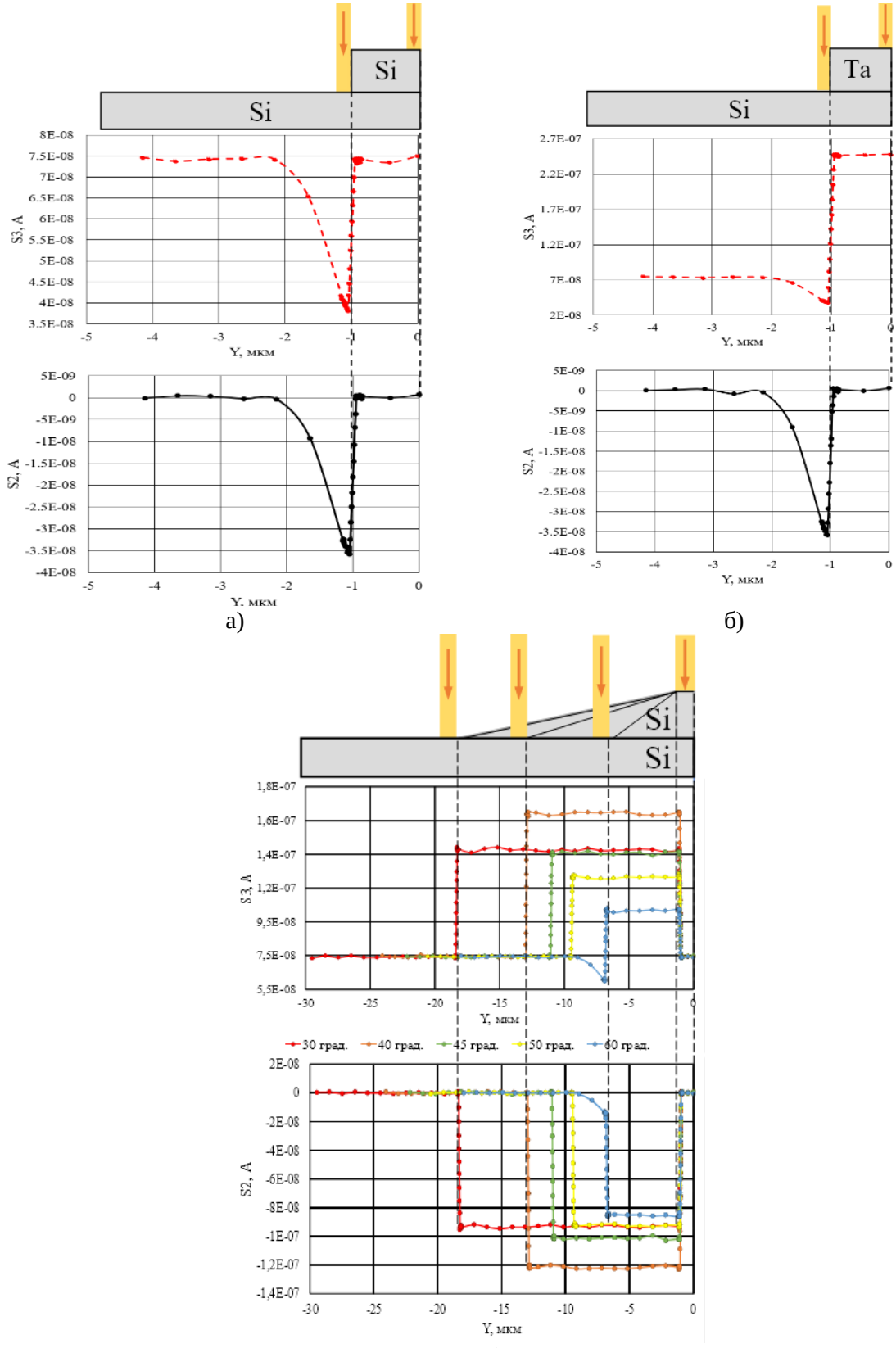


Рис. 3. Сигналы композиционного и топографического контраста для прямоугольного дефекта из кремния (а), тантала (б), трапецеидального дефекта из кремния (в)

Полученные в результате моделирования зависимости качественно соответствуют характерными формами сигналов детектора ООЭ (рис. 1в).

Библиографический список

1. Goldshtein J.I. Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis 4th Edition. / Goldshtein J.I., Newbury D.E., Michael J.R., Ritchie N.W.M., Scott J.H.J., Joy D.C. – New York: Springer New York, 2018. – 550 p.
2. Ефремова М.В Моделирование СВЧ приборов с помощью программы CST Particle Studio / Ефремова М.В, Иванов И.М., Курушин А.А. – Москва: СОЛОН, 2019.
3. Протасов Ю.С. Твердотельная электроника. / Протасов Ю.С., Чувашев С.Н. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003.
4. Needs R.J., Towler M.D., Drummond N.D., López Ríos P. and Trail J.R. – Chem. Phys. – 2020. – №152.

УДК 621.385.21; ГРНТИ 59.41.33

ПРЯМОНАКАЛЬНЫЙ ТЕРМОЭМИССИОННЫЙ КАТОД ИЗ ФОЛЬГИ ТУГОПЛАВКОГО МЕТАЛЛА ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Д.А. Тихомиров, Р.Ю. Богачев, С.Д. Журавлев, В.И. Шестеркин
Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Алмаз»,
Российская Федерация, г. Саратов, TihomirovDA@almaz-rpe.ru

Аннотация. В работе представлена конструкция прямонакального термоэмиссионного катода (ПТЭК) для сканирующих электронных микроскопов. Приведены ватт-амперные и вольт-амперные характеристики ПТЭК, изготовленного из молибденовой фольги, в диоде. Исследована стабильность термоэлектронной эмиссии от времени.
Ключевые слова: лазерное фрезерование, прямонакальный термоэмиссионный катод, сканирующий электронный микроскоп.

DIRECT-FACING THERMOEMISSION CATHODE MADE OF FOLGE OF HARD METAL FOR ELECTRON MICROSCOPY

D.A. Tikhomirov, R.Yu. Bogachev, S.D. Zhuravlev, V.I. Shesterkin
JSC «RPE «Almaz»,
Russian Federation, Saratov, TihomirovDA@almaz-rpe.ru

The summary. The paper presents the design of a direct-fired thermionic cathode (DFTC) for scanning electron microscopes. The watt-ampere and volt-ampere characteristics of a DFTC made of molybdenum foil in a diode are presented. The stability of thermionic emission over time is investigated.
Keywords: laser milling, direct-current thermionic cathode, scanning electron microscope.

Источником электронов в приборах для электронной микроскопии являются прямонакальные термоэмиссионные катоды (ПТЭК) из нити тугоплавкого металла в форме шпильки или U-образной дуги, которая разогревается до температуры начала термоэлектронной эмиссии джоулевым теплом протекающего по ней тока [1]. В качестве материала обычно используется вольфрам. Несмотря на большое значение работы выхода электронов (4.5 эВ), его используют благодаря высоким эксплуатационным характеристикам в течение длительного времени наработки при высокой рабочей температуре, достигающей 2000 К. Известно, что в процессе эксплуатации катода его термоэлектронная эмиссия снижается вследствие адсорбции остаточных газов, прежде всего O, O_2 и H_2O, повышающие работу выхода электронов с эмитирующей поверхности. Для восстановления работы выхода эмитирующей поверхности, адсорбированные газы удаляют путем прогрева поверхности до температуры, превышающей рабочую. С этой точки зрения вольфрам наиболее предпочтителен перед другими тугоплавкими металлами из-за высокой температуры плавления [1]. Для снижения рабочей температуры катода применяется кристаллический гексаборид лантана (LaB_6) с низким значением работы выхода электронов (2.66 эВ) в форме прямоугольного параллелепипеда размером 0.2мм × 0.4мм × 0.5 мм, прикрепленного к вершине U-образной дуги. Одна из граней парал-

лелепипеда с ориентацией <100>, обращенная в сторону вакуума, обрабатывается до сферической поверхности с радиусом кривизны ~15 мкм [2]. Ножки дуги приварены к металлическим держателям в виде отрезков проволоки диаметром ~1 мм, которые закреплены в отверстиях диска из диэлектрического материала и подключены к источнику напряжения. Недостатком данных конструкций является то, что до температуры начала термоэлектронной эмиссии разогревается вся дуга до держателей её ножек.

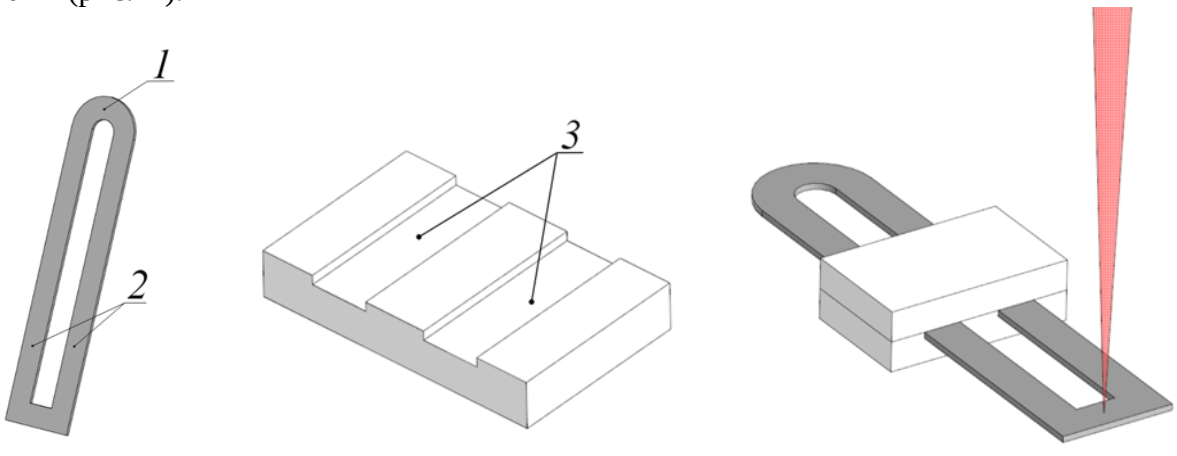
В [3] предложена конструкция ПТЭК в форме U-образной дуги с локальным участком на вершине длиной 200 - 500 мкм и площадью поперечного сечения в 10÷20 раз меньше площади поперечного сечения ножек дуги. Согласно закона Джоуля-Ленца, при протекании электрического тока по дуге, на локальном эмиссионном участке выделяется теплоты в n^2 (где: n – отношение диаметра дуги к диаметру локального участка) больше, чем на таком же по длине участке дуги. При определенной мощности протекающего тока температура локального участка на вершине достигает температуры начала термоэлектронной эмиссии, поверхность дуги соответствующей температуры не достигает и ток термоэлектронной эмиссии отсутствует.

Недостатком данной конструкции является сложность формирования на вершине катода локального участка с малым трудно контролируемым диаметром поперечного сечения. Данная конструкция не обладает достаточной механической прочностью. В процессе механического закрепления ножек дуги к держателям, размещенным в отверстиях керамического диска, локальный участок с малым поперечным сечением ломается [1].

В данной работе представлены конструкция ПТЭК, обеспечивающая термоэлектронную эмиссию с локального участка малых поперечных и продольных размеров на вершине дуги, необходимую механическую прочность, а также приведены результаты исследований эмиссионных характеристик при различных температурах.

Конструкция прямонакального термоэмиссионного катода

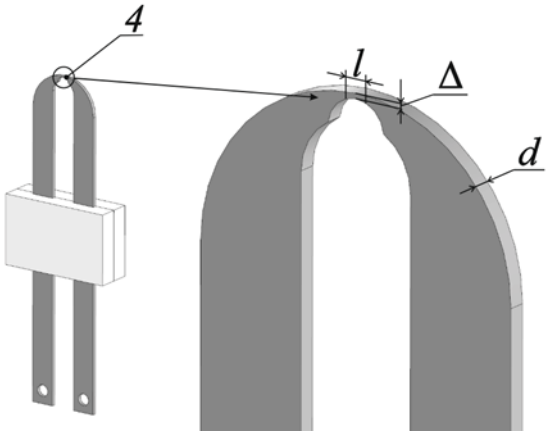
В отличие от существующих конструкций ПТЭК в форме U-образной дуги вместо проволоки использована фольга из тугоплавкого металла (в данном случае из молибдена марки МЧ) толщиной 150 мкм. На начальном этапе изготовления ножки U-образной дуги соединены перемычкой (рис.1а). Для обеспечения механической прочности конструкции катода ножки дуги примерно на средине их длины размещают в пазах диэлектрической пластины глубиной меньше полутолщины фольги (рис.1б) и фиксируют второй идентичной пластиной. Обе пластины неразъемно скрепляют между собой и удаляют перемычку между ножками (рис.1в).



а) б) в)

Рис. 1 Последовательность изготовления ПТЭК: а) – U-образная дуга (1 – вершина дуги; 2 – ножки дуги); б) – диэлектрическая пластина с пазами (3); в) - катод в сборе.

Локальный эмитирующий участок в форме перемычки малых размеров (рис. 2), соединяющий ножки на вершине дуги формируют методом микроразмерного лазерного фрезерования [4].



а) б)

Рис. 2. ПТЭК с эмитирующим участком (4) на вершине U-образной дуги

Длина l и высота Δ эмитирующей перемычки имеют размеры примерно равные толщине фольги d и много меньше ширины ножек L: $l \approx \Delta \approx d << L$. Согласно закона Джоуля-Ленца количество выделившейся теплоты Q в проводнике при протекании тока I заданной величины за промежуток времени t прямо пропорционально сопротивлению R проводника:

$$Q = I^2 \times R \times t.$$

Сопротивление проводника обратно пропорционально его площади поперечного сечения. Таким образом, при уменьшении площади поперечного сечения перемычки на вершине U-образной дуги при протекании электрического тока заданной величины её температура может достигать температуры начала термоэлектронной эмиссии, в то время как температура ножек не достигает температуры начала термоэлектронной эмиссии.

Для фольги из молибдена толщиной 150 мкм соотношения $L / d \approx 40$ и L: $l \approx \Delta \approx d << L$ обеспечивают нагрев перемычки мощностью накала 5,5 Вт до температуры ≈1100 °С, оставляя ножки дуги не эмитирующими.

Исследование эмиссионных характеристик ПТЭК

Эмиссионные характеристики ПТЭК были исследованы в составе диода, размещенного в стеклянную колбу при давлении остаточных газов 2×10^{-7} Торр (рис. 3). Плоский анод из молибдена в форме диска размещен на расстоянии 1 мм от эмитирующей электроны перемычки.

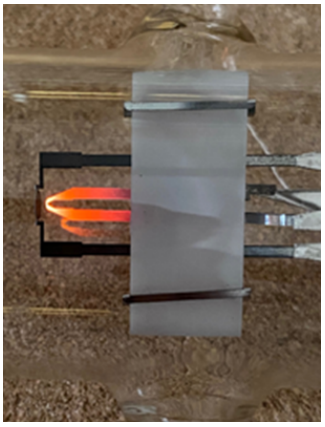


Рис. 3. Фотография диода с ПТЭК в стеклянной колбе.

На рисунке 4 представлен график зависимости температуры эмитирующего участка на вершине U-образной дуги ПТЭК от мощности накала.



Рис. 4. Зависимость температуры эмитирующего участка ПТЭК от мощности накала

Для анализа эффективности ПТЭК (А / Вт), в сравнении с другими типами катодов, полезна зависимость эмиссионного тока от мощности, затрачиваемой на разогрев катода (рис. 5).

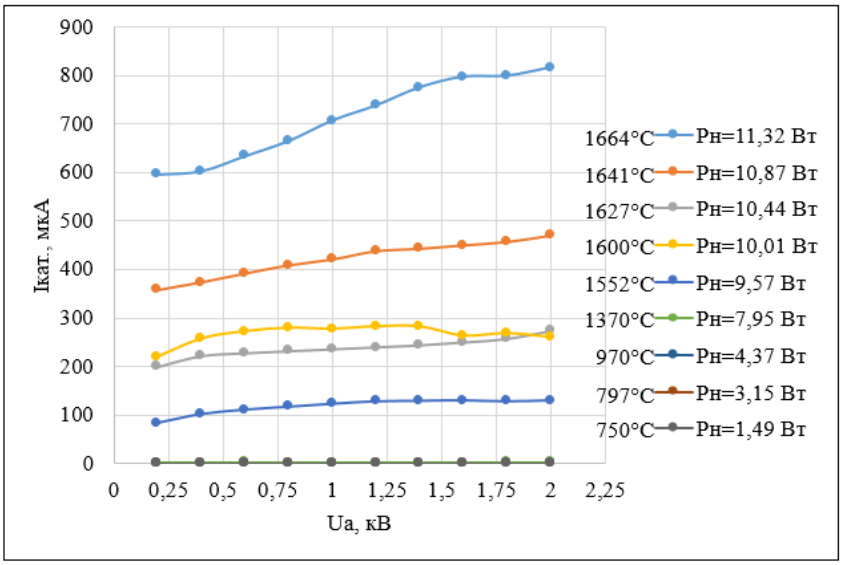


Рис. 5. Зависимость эмиссионного тока катода от напряжения на аноде при различной температуре накала

Зависимости тока катода от напряжения (рис. 5) подчиняются уравнению Чайльда – Ленгмюра и не выходят в зону режима температурного ограничения. Для сканирующих электронных микроскопов величина рабочего тока не превышает 100 мкА. Для исследуемого катода приведенное значение эмиссионного тока достигается при яркостной температуре не выше 1000 °С.

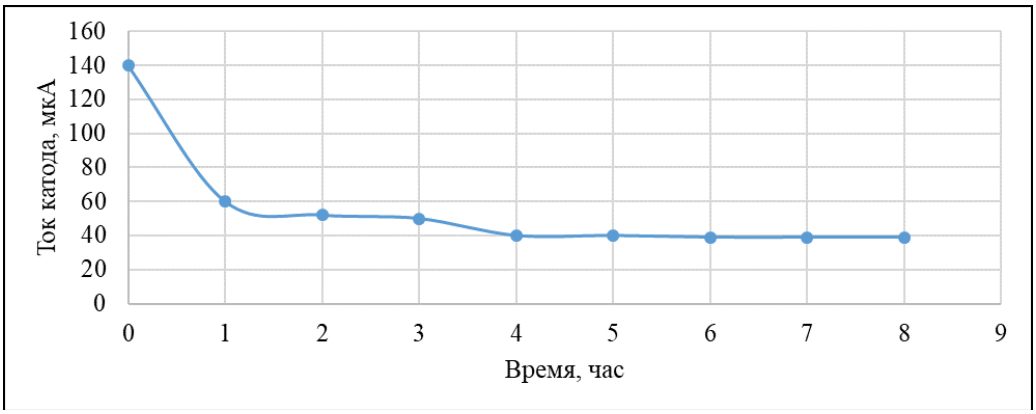


Рис. 6. Изменение эмиссионного тока от времени

На рисунке 6 представлен график изменения величины эмиссионного тока при яркостной температуре T = 1000 °C (мощность накала 4,5Вт) от времени наработки при вакууме 2 × 10^{-7} Торр. Интенсивное снижение тока термоэлектронной эмиссии наблюдалось в первый час работы катода. В течение следующего часа происходило плавное уменьшение, а затем стабилизация эмиссии катода. Согласно имеющимся данным публикаций [5], снижение эмиссионного тока связано с „отравлением" катода атомарным и молекулярным кислородом, парциальное давление которых составляет ≈ 6.3×10^{-9} Торр и ≈ 2.8×10^{-9} Торр соответственно. Адсорбированный на поверхность катода атомарный кислород, имеющий более высокую электроотрицательность (по шкале А. Оганова [6]) (3.78) по сравнению с электроотрицательностью молибдена (2.47), образует диполь с отрицательным зарядом на вершине. Каждый диполь на поверхности молибдена создает в некоторой дельта-окрестности атома кислорода напряженность электрического поля, повышающую потенциальный барьер, а, следовательно, и работу выхода электронов в данной дельта-окрестности. Можно предположить, что в первый час работы катода в процессе адсорбции атомарного кислорода количество диполей на поверхности катода возрастало и приводило к уменьшению эффективной площади катода с работой выхода молибдена 4.5 эВ. В течение последующего часа работы катода скорость адсорбции атомов кислорода уменьшалась, вследствие кулоновского отталкивания, что приводило к стабилизации плотности упаковки атомов кислорода и снижению скорости изменения тока катода. В дальнейшем процессы адсорбции и десорбции атомов кислорода уравновесились и эмиссионный ток стабилизировался.

Выводы

Предложена конструкция прямонакального термоэмиссионного катода для сканирующих электронных микроскопов из фольги тугоплавкого материала в форме U-образной дуги с локальным эмиссионным центром на вершине. Эмиссионный ток до 100 мкА получен при температуре эмиссионного центра не более 1000 °C. Показано, что эмиссионный ток катода в первый час работы снижается более чем в 2 раза, а в последующий час эмиссионная способность катода стабилизируется на уровне 40 мкА, что в 3.5 раза меньше первоначального уровня. Механическая прочность конструкции увеличена за счет фиксации пространственного положения ножек дуги диэлектрическими втулками.

Библиографический список

1. Georg Gartner, Wolfram Knapp, Richard G. Forbs. Modern Developments in Vacuum Electron Sources // Topics in Applied Physics. Springer Nature Switzerland AG 2020. 597 P. (https: doi.org / 10.1007/ 978-3-030-47291-7).
2. Патент JP 2009295376(A) Thermionic electron emission cathode.

3. Патент № 2801593 (Российская Федерация). Прямонакальный термоэмиссионный катод // Журавлев С.Д., Шестеркин В.И., Крачковская Т.М., Емельянов А.С. Заявка № 2023101042. Заявлено 18.01.2023. Дата регистрации в государственном реестре изобретений 11.08.2023.

4. В.И. Шестеркин, Т.Н. Соколова, С.П. Морев, Д.А. Бессонов, Е.Л. Сурменко, А.Н. Дармаев, Д.А. Комаров, Э.К. Муравьев, П.Д. Шалаев, К.В. Шумихин. Улучшение свойств автоэмиссионных ячеек из стеклоуглерода при формировании острий с высоким аспектным отношением методом лазерного фрезерования // Радиотехника и электроника. 2016. Том.61. №9. С.896-904.

5. Кудинцева Г.А., Мельников А.И., Морозов А.В., Никонов Б.А. Термоэлектронные катода // Изд. «Энергия». Москва. 1966. 368 с.

6. C.Tantardini, A. Oganov. Thermochemical electronegativities of the elements // Nature Communications. 2021-04-07. Vol. 12. 9ss. 1. P. 2087. Doi: 10.1038/s41467-021-22429-0.

УДК 532.54; ГРНТИ 30.17.51

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ЭЛЕКТРОРАСПЫЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

П.А. Анисимов*, А.Н. Дармаев, Е.А. Кунин**, С.П. Масленников*, А.А. Матвеев**, А.С. Степанцов**, Г.В. Феоктистов***

**Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Россия, Москва, APA014@campus.mephi.ru,*

***Акционерное Общество «Центр суперкомпьютерного моделирования», Россия, Москва, darmaev.a@rt-hpc.ru,*

Аннотация. Рассмотрен физический механизм электрораспыления жидкости и характерные стадии данного процесса. Разработана компьютерная модель, описывающая его начальную стадию. Проведена верификация модели путем сравнения с аналитической зависимостью, описывающей равновесную высоту поднятия мениска под действием капиллярного эффекта. Проведено сравнение модели с известными экспериментальными результатами для конуса Тейлора в плоском конденсаторе. Разработана модель начальной стадии электрораспыления жидкости.

Ключевые слова: моделирование, капиллярный эффект, конус Тейлора, система электрораспыления жидкости, электроспрей.

NUMERICAL SIMULATION OF LIQUID ELECTROSPRAYING: DETERMINATION OF INITIAL-STAGE PARAMETERS

P.A. Anisimov*, A.N. Darmaev, E.A. Kunin**, S.P. Maslennikov*, A.A. Matveev**, A.S. Stepantsov**,G.V. Feoktistov***

**National Research Nuclear University MEPhI, Russia, Moscow, APA014@campus.mephi.ru,*

***Joint Stock Company "Center for Supercomputer Modeling", Russia, Moscow, darmaev.a@rt-hpc.ru,*

Abstract. The physical process of liquid electrospraying has been considered and its characteristic stages have been determined. A computer model of the initial stage has been developed. The model has been verified against an analytical relationship describing the equilibrium height of the meniscus rise under capillary effects. The model of Taylor cone formation in a plane capacitor has been verified against known experimental results. Results in the form of a stable droplet flow have been obtained.

Keywords: modelling, capillary effect, Taylor cone, liquid electrospray system, electrospray.

Разработка, а также оптимизация конструкции и режимов работы систем электрораспыления жидкости (ЭРЖ), применяющихся, например, в масс-спектрометрии и нанолитографии [1], сопровождается значительными материальными и временными затратами при натурном моделировании. Кроме того, высокая сложность реализуемого физического процесса не позволяет с достаточной информативностью охарактеризовать устройство в ходе экспериментальных исследований. Современный подход к решению обозначенной проблемы

заключается в создании компьютерных моделей и проведении на их основе виртуальных экспериментов.

Процесс электрораспыления включает в себя несколько последовательных стадий (рис. 1) [2]:

- подача рабочей жидкости через капилляр в область действия электрического поля с последующим образованием конуса Тейлора;
- эмиссия капельного потока из вершины конуса Тейлора;
- многократное разделение капель за счет преобладания электростатических сил над силами поверхностного натяжения вплоть до образования потока ионов в газовой фазе;
- динамика ионного потока в ионно-оптической системе устройства.

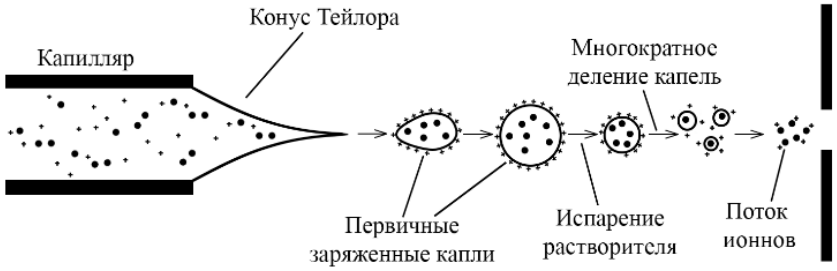


Рис. 1. Принципиальная схема системы ЭРЖ

В работе проводилось исследование начальной стадии ЭРЖ методами компьютерного моделирования (КМ), которое включало в себя верификацию модели динамики жидкости в капиллярном канале с аналитической зависимостью Борелли-Жюрена [3] и сравнение результатов КМ для задачи образования конуса Тейлора в плоском конденсаторе с известными экспериментальными данными (валидация КМ) [4] и моделирование образования устойчивого капельного потока. В рамках моделирования динамики жидкости в капиллярном канале также была проведена кросс-верификация между различными программными пакетами для дополнительного подтверждения корректности численной реализации выбранной математической модели.

Для математического описания исследуемого процесса требуется совместное решение уравнений гидродинамики в многофазной постановке и системы уравнений Максвелла.

Система уравнений, описывающая динамику сплошной среды в ламинарном режиме, которая характеризуется плотностью ρ, давлением p, углом смачивания $\theta = \frac{3\pi}{8}$ и вектором скорости $\vec{u}$ в данной точке расчетной области, имеет вид:

$$\begin{cases} \rho\left(\vec{u}\cdot\nabla\right)\vec{u} = \nabla[-p\boldsymbol{I} + K] + \vec{F} + \rho\vec{g} \\ \rho\nabla\cdot\vec{u} = 0 \end{cases}, \tag{8}$$

где $\boldsymbol{I}$ – единичная матрица;

K – тензор вязких напряжений;

$\vec{F}$ – вектор внешней силы;

$\vec{g}$ – ускорение свободного падения.

В качестве вектора внешней силы реализуется объемная электростатическая сила, вызывающая деформацию поверхности раздела фаз и образование так называемого конуса Тейлора:

$$\vec{F} = \rho_V\vec{E} - 0{,}5\cdot\vec{E}^2\varepsilon_0\nabla\varepsilon_r, \tag{9}$$

где ρ_V – объемная плотность заряда;

$\vec{E}$ – вектор напряженности электрического поля;

ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость;

ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость.

Распределение электрического поля в расчётной области определяется уравнениями Максвелла:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \vec{D} = \rho_V \\ \vec{E} = -\nabla V \end{cases}, \quad (10)$$

где $\vec{D}$ – вектор электрической индукции;

V – электростатический потенциал.

Под действием электростатической силы жидкостная фаза приходит в движение, что сопровождается перераспределением объемной плотности электрического заряда:

$$\frac{\partial \rho_V}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_V \vec{u}) - \nabla \cdot (\mu \nabla V) = 0, \quad (11)$$

где μ – электрическая проводимость.

Динамика границы раздела фаз $\frac{\partial \phi}{\partial t}$ описывается уравнением:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \phi = \gamma \nabla \cdot (\varepsilon_{ls} \nabla \phi - \phi(1-\phi)\frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|}), \quad (12)$$

где γ – гидродинамический параметр реинициализации;

ε_{ls} – величина толщины границы раздела фаз.

Граница раздела фаз обусловлена наличием сил поверхностного натяжения $\vec{F}_{st}$:

$$\begin{cases} \vec{F}_{st} = \sigma \delta \kappa \vec{n}_{int} + \delta \nabla_S \sigma \\ \kappa = -\nabla \cdot \vec{n}_{int}; \nabla_S = (I - \vec{n}_{int}\vec{n}_{int}^T)\nabla \end{cases}. \quad (13)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения;

δ – Дельта-функция Дирака;

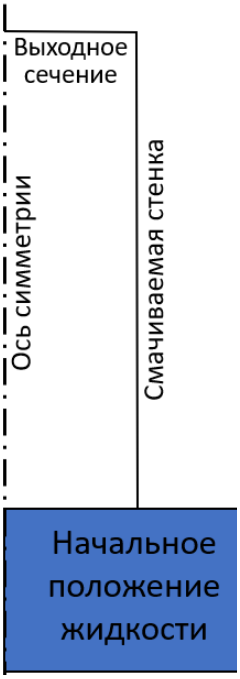
κ – кривизна поверхности;

$\vec{n}_{int}$ – вектор нормали к поверхности жидкости.

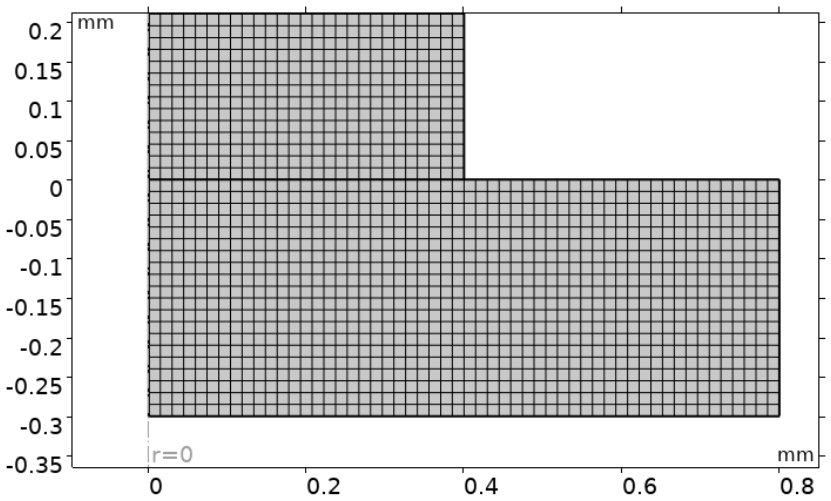
Таким образом, система уравнений (1)-(6) позволяет описать динамику диэлектрической жидкости в капиллярном канале под действием электрического поля.

Динамика жидкости в капиллярном канале

Как правило конструкция системы электрораспыления жидкости включает в себя капиллярный канал. Моделирование подъема жидкости в капиллярном канале проводилось для случая отсутствия электрических полей. Граничные условия (свободное течение жидкости, смачиваемая поверхность) и параметры конечно-элементной сетки приведены на рисунке 2.



а)



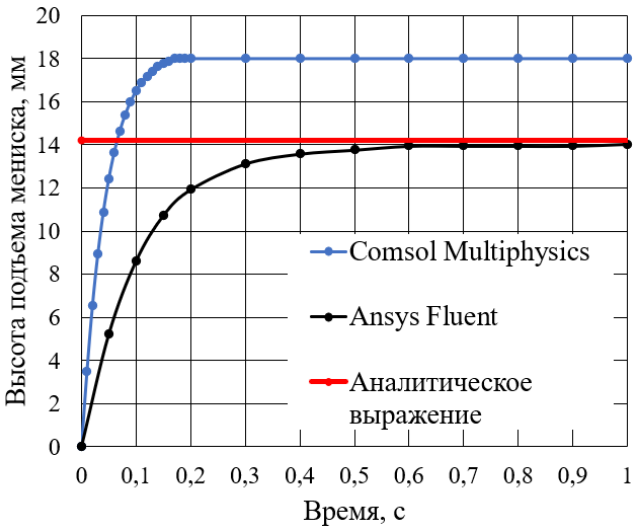
Количество конечных элементов – 33,5 тыс.;
размер конечных элементов – 15 мкм

б)

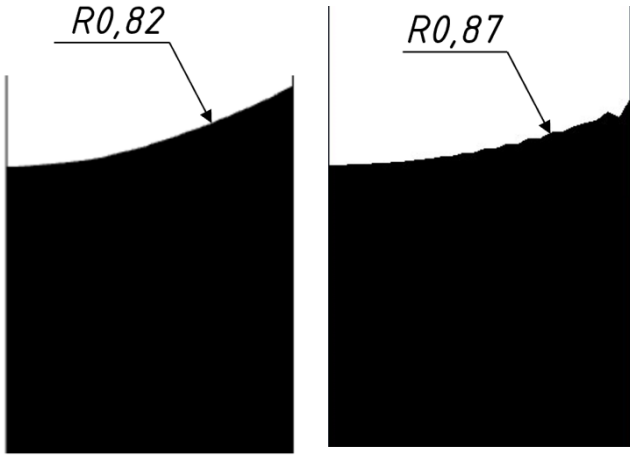
Рис. 2. Граничные условия модели исследования капиллярного эффекта а) и конечно-элементная сетка расчетной области б)

Сопоставление результатов моделирования в программных пакетах *Ansys Fluent* и *Comsol Multiphysics* с аналитической зависимостью Борелли-Жюрена [3] для капилляра диаметром $d_c = 0{,}8$ мм и воды в нём представлены на рисунке 3:

$$h = \frac{4\sigma \cos\theta}{d_c \rho g}. \qquad (14)$$



а)

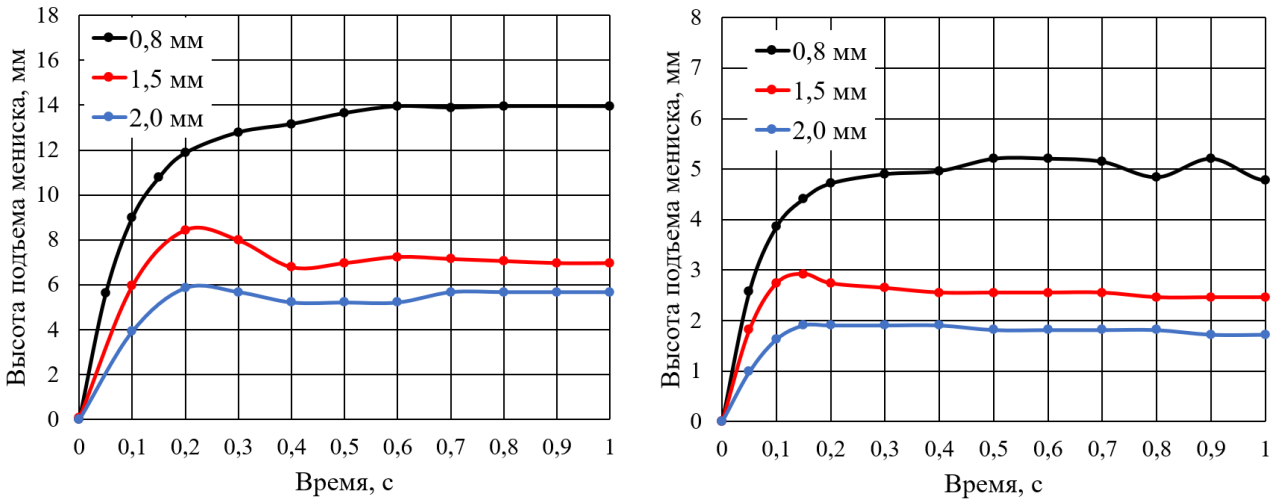


Comsol Multiphysics Ansys Fluent

б)

Рис. 3. График зависимости высоты подъема центра мениска от времени а) и форма мениска б)

Также были получены аналогичные зависимости высоты подъема мениска в капиллярах различных диаметров для воды и спирта (рис. 4).



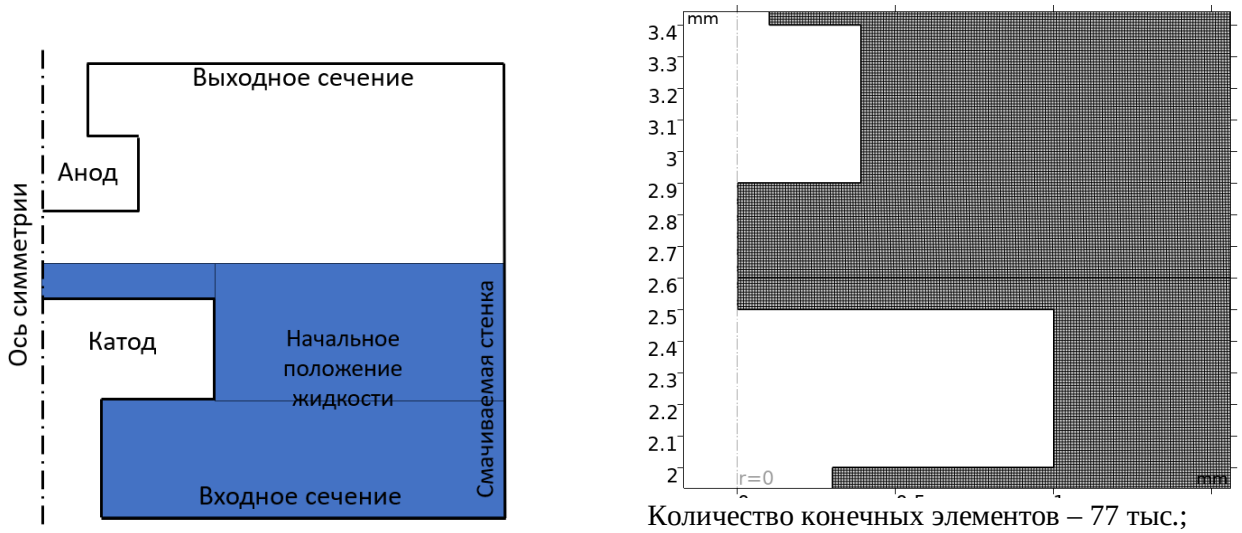
а) б)

Рис. 4. График зависимости высоты подъема мениска от времени для воды а) и спирта б)

Образование конуса Тейлора в плоском конденсаторе

Обязательным условием образования капельной фазы в системе ЭРЖ является формирование из жидкости конуса Тейлора, при этом вблизи вершины формируется область с высокой напряженностью электрического поля. В качестве тестовой задачи был рассмотрен плоский конденсатор, погруженный в жидкость, как наиболее наглядная и простая модель.

Граничные условия (нулевой массовый расход во входном сечении, свободное течение в выходном сечении, смачиваемая поверхность, электрический потенциал катода и анода) и параметры конечно-элементной сетки показаны на рисунке 5.

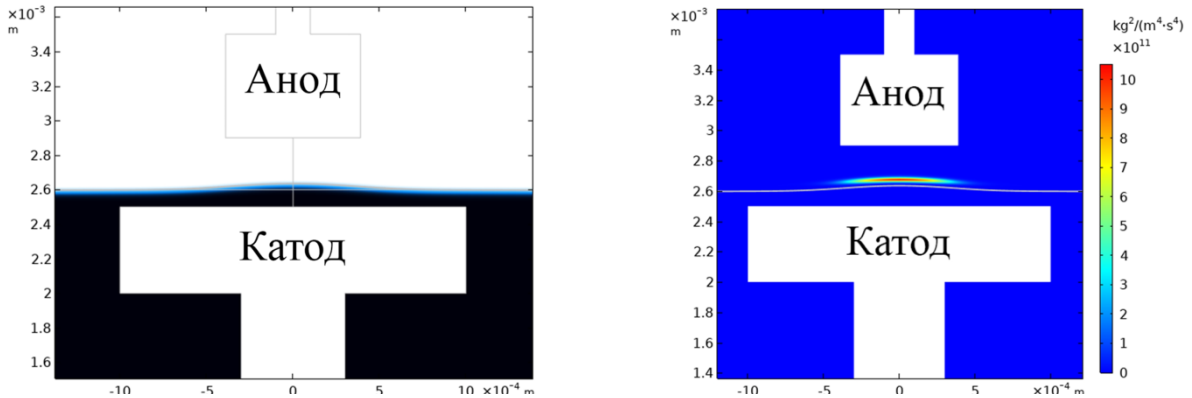


Количество конечных элементов – 77 тыс.;
размер элемента – 9 мкм

а) б)

Рис. 5. а) Граничные условия модели исследования образования конуса Тейлора в плоском конденсаторе и б) конечно-элементная сетка расчетной области

В результате моделирования была получена граница жидкостной фазы под влиянием электростатической силы (рис. 6).



а) б)

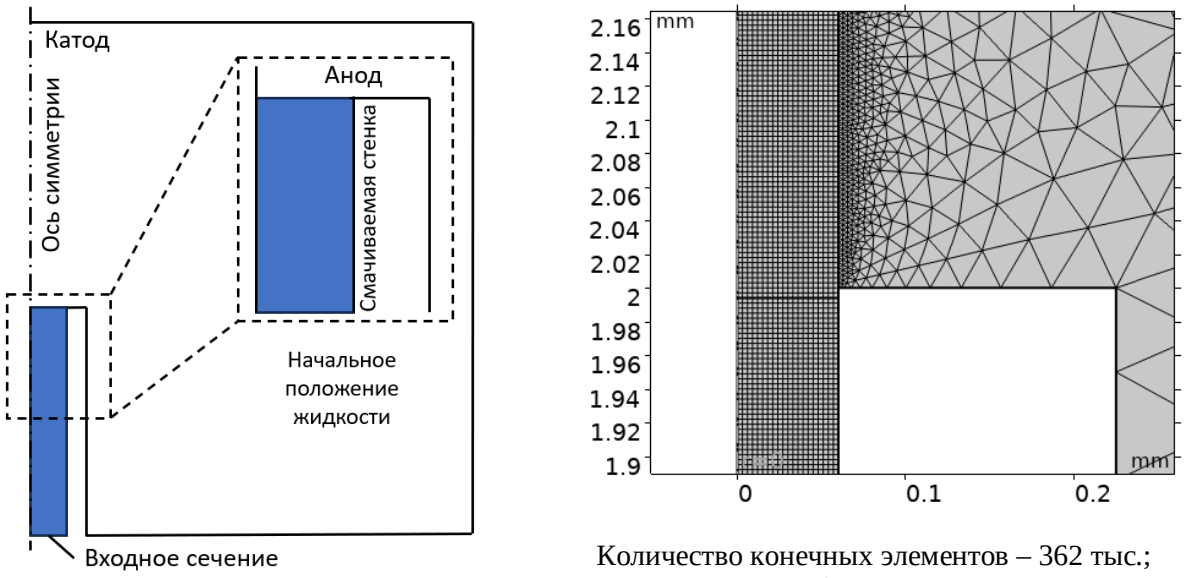
Рис. 6. Распределение жидкости а) и электростатической силы б) в плоском конденсаторе

На приведённых изображениях можно наблюдать, что под действием электрического поля из жидкости сформировался характерный усеченный конус. Амплитудное значение объемной электростатической силы отражает концентрацию силовых линий электрического поля вблизи его вершины. Однако на данный момент достичь равновесного установления границы жидкостной фазы не удалось, так как процесс в рассматриваемой системе имеет высокую степень неустойчивости. Дальнейшие работы будут заключаться в разработке экспериментального стенда с целью уточнения граничных условий и калибровки КМ.

Система электрораспыления жидкости

После верификации КМ динамики жидкости в капиллярном канале и анализа КМ образования конуса Тейлора в плоском конденсаторе, была разработана модель системы электрораспыления жидкости для исследования эмиссии капельного потока из вершины конуса Тейлора.

Граничные условия (массовый расход во входном сечении, свободное течение в выходном сечении, смачиваемая стенка, электрический потенциал катода и анода) и параметры конечно-элементной сетки показаны на рисунке 7.

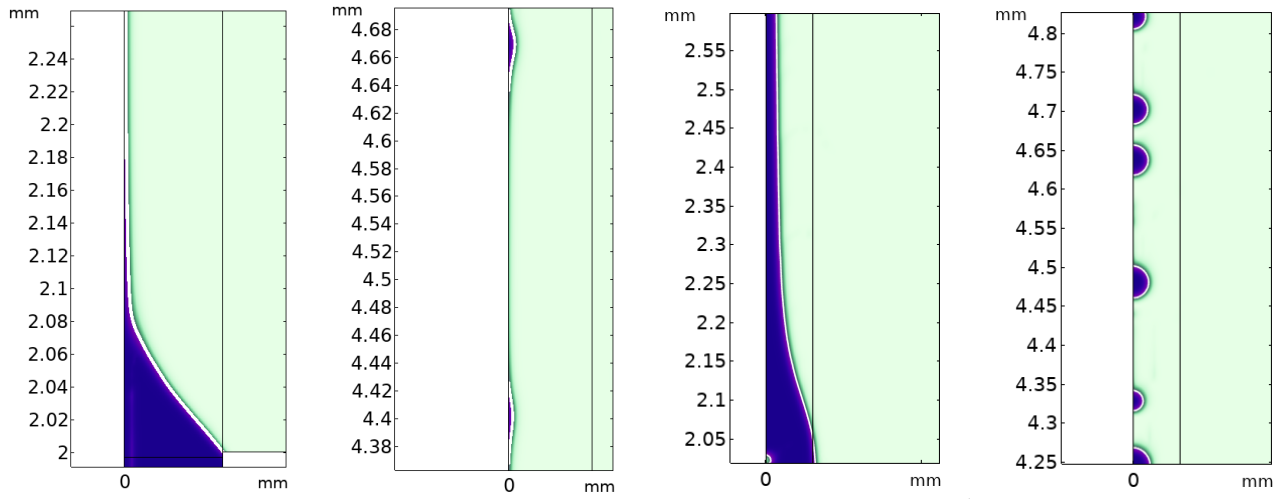


Количество конечных элементов – 362 тыс.;
размер элементов в области фазы жидкости – 3 мкм

а) б)

Рис. 7. а) Граничные условия модели электрораспыления жидкости
и б) конечно-элементная сетка расчетной области

Результаты образования капель при различных расходах жидкости через входное сечение показаны на рисунке 8.



а) б)

Рис. 8. Образование капель в системе электрораспыления жидкости при расходе 2,6 мл/ч а) и 12 мл/ч б)

Полученная картина распределения жидкостной фазы соответствует материалам [2], а методика моделирования может лежать в основе исследований последующих стадий ЭРЖ и проведения комплексного моделирования устройств подобного класса.

Библиографический список

1. Sweet M.L., Pestov D., Tepper G.C., McLeskey J.T. Electrospray aerosol deposition of water soluble polymer thin films // Applied Surface Science. – 2014. – Vol. 289. – № 1. – P. 150–154.

2. Dastourani H. A physical insight into electrospray process in cone-jet mode: Role of operating parameters / H. Dastourani, M. R. Jahannama, A. Eslami-Majd // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2018. – Vol. 70. – P. 315–335.

3. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. – Москва: Химия. 1988. – 464 с.

4. А.М. Орлов, И.О. Явтушенко, О.Г. Рынкова, “Трансформация конуса Тейлора в усеченный при разрядах на вязких жидких диэлектриках”, ЖТФ, 87:7 (2017), 1111–1115; Tech. Phys., 62:7 (2017), 1126–1130

УДК 537.533.3; ГРНТИ 29.35.37

ПРОГРАММА РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОННО ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МИКРОФОКУСНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКИ

Г.Н. Фролов, Е.А. Козлов

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

Аннотация. Рассматривается задача автоматизированного поиска параметров электронно-оптической системы для микрофокусных рентгеновских трубок. Разработан алгоритм на основе метода Монте-Карло, позволяющий подбирать геометрические и физические параметры системы, обеспечивающие формирование электронного зонда с током порядка 10 мкА. Приводится математическая модель формирования электронного пучка в электронно-оптической системе (ЭОС) рентгеновской трубки с учетом токопрохождения и аберраций. Выполнен сравнительный анализ катодов из гексаборида лантана (LaB_6) и вольфрама (W). Определены оптимальные диапазоны параметров ЭОС для обоих типов катодов.

Ключевые слова: электронно-оптическая система, метод Монте-Карло, катод LaB_6, вольфрамовый катод, фокусировка пучка, аберрации, микрофокусная рентгеновская трубка.

PROGRAM FOR CALCULATING THE ELECTRON-OPTICAL SYSTEM OF A MICROFOCUS X-RAY TUBE

G.N. Frolov, E.A. Kozlov
Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, george.froloff@mail.ru

Abstract. The problem of automated search for parameters of the electron-optical system for microfocus X-ray tubes is considered. An algorithm based on the Monte Carlo method is developed, which allows selecting geometric and physical parameters of the system that ensure the formation of an electron probe with a current of about 10 μA. A mathematical model of electron beam formation in the electron-optical system (EOS) of an X-ray tube is presented, taking into account current transmission and aberrations. A comparative analysis of cathodes made of lanthanum hexaboride (LaB_6) and tungsten (W) is performed. The optimal ranges of EOS parameters for both types of cathodes are determined.
Keywords: electron-optical system, Monte Carlo method, LaB_6 cathode, tungsten cathode, beam focusing, aberrations, microfocus X-ray tube.

Введение

При проектировании электронно-оптических систем (ЭОС) микрофокусных рентгеновских трубок появляется необходимость согласования множества взаимосвязанных параметров. От выбора геометрических и физических характеристик зависят конечные параметры электронного пучка – диаметр и ток, определяющие разрешающую способность и производительность. Целью данной работы является разработка программы для автоматического поиска параметров ЭОС, обеспечивающих формирование электронного пучка с током порядка 10 мкА при минимальном диаметре для двух типов катодов: из гексаборида лантана (LaB_6) и вольфрама (W).

Программа предназначена для автоматического расчета параметров микрофокусной рентгеновской трубки. Расчет трубки в данной программе не рассматривает работу центрирующей. Алгоритм расчета включает в себя рассмотрение хода электронных лучей, движущихся с катода и последовательно проходящих через систему конденсорной линзы, апертурной диафрагмы и объективной линзы [1].

Анализ исходных данных и выбор рабочих диапазонов

На первом этапе работы был проведен анализ решений и физических ограничений, связанных с проектированием и разработкой микрофокусных рентгеновских трубок. На основе литературных данных и инженерного опыта были определены начальные диапазоны параметров, которые затрагивают большинство реализуемых конфигураций [2-4]:

- положение кроссовера: 5–20 мм;
- диаметр кроссовера: 10–40 мкм;
- ток пушки: 10–100 мкА;
- угол расходимости пучка с катода: 1–10°;
- положение анодной диафрагмы: 20–30 мм;
- диаметр анодной диафрагмы: 2–10 мм;
- положение конденсорной линзы: 45–140 мм;
- фокусное расстояние конденсорной линзы: 20–150 мм;
- положение апертурной диафрагмы: 135–170 мм;
- диаметр апертурной диафрагмы: 200–1000 мкм;
- положение объективной линзы: 160–340 мм;
- фокусное расстояние объективной линзы: 5–40 мм;
- целевой диаметр пучка на мишени: LaB_6 – 0.4–0.6 мкм, W – 1.25–1.5 мкм;
- целевой ток пучка на мишени: 10 ± 1 мкА;

Столь широкие диапазоны выбраны специально, чтобы обеспечить возможность нахождения случайных комбинаций параметров.

Методология расчета

Для решения многосоставной задачи был разработан алгоритм на основе метода Монте-Карло. Данный подход позволяет эффективно исследовать влияние множества параметров на целевые – ток и диаметр электронного пучка. Программа последовательно генерирует случайные наборы значений, выполняет расчет электронно-оптической системы и проверяет соответствие полученных параметров пучка с целевыми значениями.

Алгоритм реализует три вложенных цикла:

- цикл по катодам : последовательный расчет для LaB_6 и W;
- цикл набора решений – выполняется до накопления заданного количества N валидных конфигураций;
- цикл подбора параметров : генерация случайных значений и последовательный расчет элементов системы.

Генерация случайных параметров осуществляется следующим образом:

- для целочисленных параметров применяется функция randi([min, max]);
- для непрерывных величин используется rand() с последующим масштабированием: min + (max-min)·rand();
- для диаметра апертуры дополнительно выполняется округление до значения, кратного 10 мкм, для удобства изготовления.

Последовательность расчета строго соответствует ходу электронного пучка:

1. Генерация параметров пушки (ток, угол расходимости и энергия пучка, положение и диаметр кроссовера).
2. Расчет анодной диафрагмы – определение тока, угла и диаметра пучка после диафрагмы.
3. Расчет конденсорной линзы – вычисление положения изображения, его размера и угловой расходимости.
4. Расчет апертурной диафрагмы – ограничение пучка, определение прошедшего тока.
5. Расчет объективной линзы – финальное формирование пучка
6. Расчет зонда – вычисление диаметра зонда на образце с учетом всех аберраций.

Физические модели

Ход лучей рассматривается в параксиальном приближении геометрической оптики. Все линзы рассматриваются как «тонкие», для которых применима формула тонкой линзы [5]:

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{q}=\frac{1}{f},$$

где p – расстояние от предмета до линзы;

q – расстояние от линзы до изображения;

f – фокусное расстояние.

Увеличение линзы определяется классическим соотношением:

$$M = \left|\frac{q}{p}\right|.$$

В зависимости от угла входа α_0 и соотношения между p и f возможны несколько режимов работы линзы, каждый из которых требует соответствующих формул расчета.

Принимаем гауссово распределение плотности тока в сечении пучка:

$$j(r) = j_0 \exp\left(-\frac{r^2}{R^2}\right),$$

ток, прошедший через линзу с диаметром канала D, определяется интегрированием:

$$I = 2\pi j_0 \int_0^{D/2} r \exp\left(-\frac{r^2}{R^2}\right) dr.$$

В результате интегрирования получено аналитическое выражение:

$$I = I_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{D^2}{4R^2}\right)\right],$$

где I_0 – ток пучка на входе в линзу, а R – характерный радиус, связанный с диаметром пучка d_e соотношением $d_e = 2R$.

Конечный диаметр электронного пучка на образце рассчитывается с учетом четырех факторов:

$$d = \sqrt{d_g^2 + d_s^2 + d_d^2 + d_c^2},$$

где: d_g^2 – гауссов диаметр (размер изображения источника);
d_s^2 – сферическая аберрация;
d_d^2 – дифракционный предел (диск Эйри);
d_c^2 – хроматическая аберрация.

Гауссов диаметр:

$$d_g^2 = \frac{4I}{\beta \pi^2 \alpha^2};$$

Сферическая аберрация:

$$d_s^2 = \left(\frac{1}{2} C_s \alpha^3\right)^2;$$

Дифракционный предел:

$$d_d^2 = \left(\frac{0.61\lambda}{\alpha}\right)^2;$$

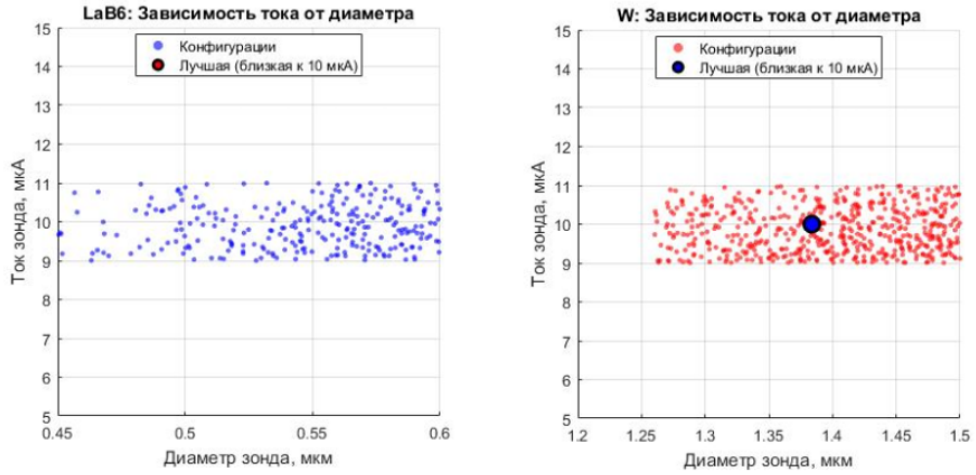
Хроматическая аберрация:

$$d_c^2 = \left(C_c \alpha \frac{\Delta E}{E_0}\right)^2.$$

Здесь I – ток пучка;
β – яркость катода;
α – угол сходимости пучка на мишени;
C_s и C_c – коэффициенты сферической и хроматической аберрации;
λ – длина волны электронов;
ΔE – энергетический разброс электронов;
E_0 – энергия пучка.

Результаты моделирования

Первоначальные расчеты в широких диапазонах параметров позволили выявить области, с наибольшим числом решений. Анализ показал, что, несмотря на широкие границы поиска, наибольшее число совпадающих решений выпадают в узких диапазонах (см. рисунок 1).



а) б)

Рис. 1. Зависимость тока зонда от диаметра для широких диапазонов а) LaB_6, б) W

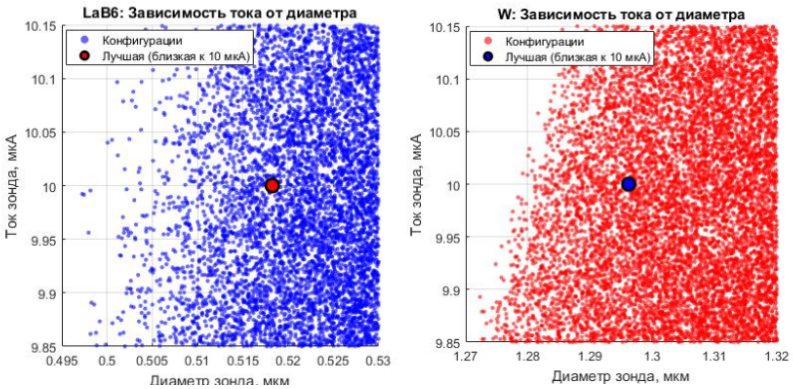
На основе анализа результатов моделирования были сформированы итоговые суженные диапазоны параметров, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Итоговые диапазоны параметров ЭОС

Параметр	LaB_6	W
Положение кроссовера, мм	[13, 14]	[13, 14]
Диаметр кроссовера, мкм	[25, 26]	[25, 26]
Ток пушки, мкА	[10, 100]	[10, 100]
Угол расходимости, град	[2, 3]	[2, 3]
Диаметр анода, мм	[8, 9]	[8, 9]
Положение анода, мм	[21, 22]	[21, 22]
Диаметр апертуры, мкм	[600, 640]	[600, 640]
Положение апертуры, мм	[153, 154]	[153, 154]
Положение конденсора, мм	[76, 80]	[76, 80]
Фокусное конденсора, мм	[42, 45]	[42, 45]
Положение объектива, мм	[234, 236]	[234, 236]
Фокусное объектива, мм	[5, 7]	[5, 7]

Основное различие между катодами LaB_6 и W заключается в их физических характеристиках: яркость LaB_6 ($1 \cdot 10^1$ А/м²·ср) на порядок выше, чем у W ($1 \cdot 10^9$ А/м²·ср), а разброс энергии, напротив, ниже – 1.5 эВ против 2.0 эВ соответственно [6].

Эти различия предопределяют существенно лучшие характеристики пучка при использовании LaB_6. Минимальный достигнутый диаметр зонда составил: для LaB_6 – 0.505 мкм и для вольфрама – 1.285 мкм (см. рисунок 2).



а) б)

Рис 2. Зависимость ток от диаметра пучка: а) катод LaB_6, б) катод W

Таким образом, LaB_6 обеспечивает меньший диаметр зонда при том же токе 10 мкА, что делает его предпочтительным выбором для микрофокусных трубок.

Исследование зависимости фокусных расстояний от тока зонда показало, что для достижения тока 10 мкА оптимальные значения составляют: фокусное расстояние конденсора: 43–44 мм; фокусное расстояние объектива: 4.5–5.5 мм (см. рисунки 3-4).

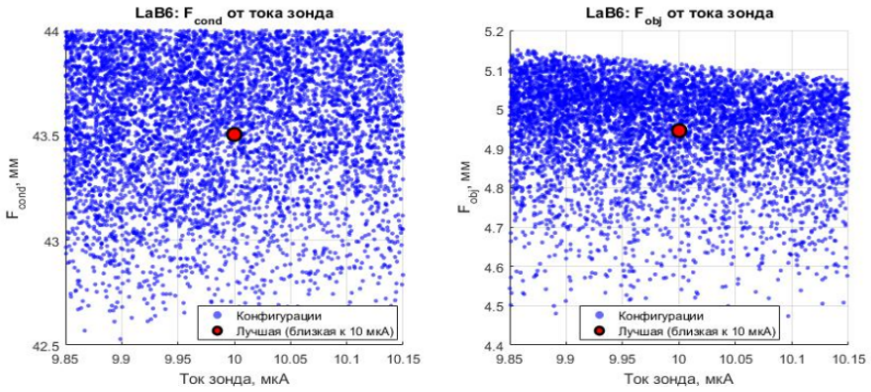


Рис. 3. Зависимость фокусных расстояний от тока для LaB_6

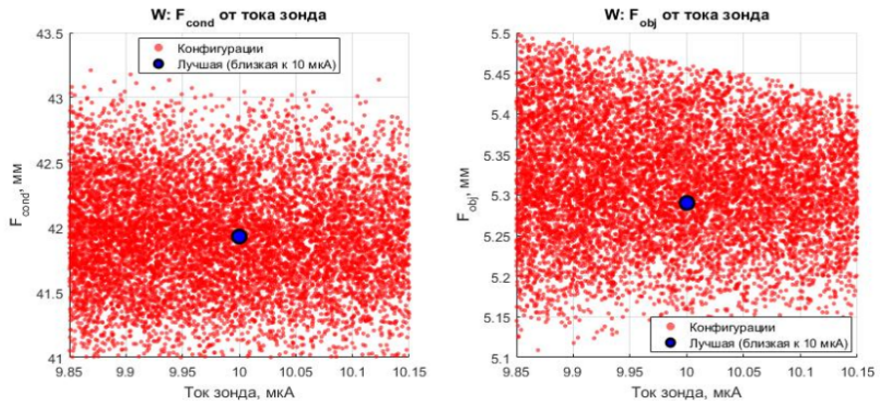


Рис. 4. Зависимость фокусных расстояний от тока для W

Апертурная диафрагма является критическим элементом, определяющим компромисс между диаметром зонда и током. Оптимальное положение диафрагмы находится в интервале 153–154 мм при диаметре 620–640 мкм. Уменьшение диаметра апертуры позволяет получить более меньший электронный пучок, однако ценой снижения тока.

Заключение

Разработан алгоритм автоматизированного поиска параметров ЭОС на основе метода Монте-Карло, который учитывает все основные физические процессы, формирующие электронный пучок в рентгеновской трубке.

1. Определены оптимальные диапазоны геометрических и физических параметров для двух типов катодов – LaB_6 и W, которые обеспечивают формирование электронного зонда с током 10 мкА.
2. Показано, что LaB_6 позволяет получить зонд диаметром 0.505 мкм, что в 2.5 раза меньше, чем для W (1.285 мкм), благодаря более высокой яркости и меньшему разбросу энергии.
3. Установлено, что конструкция ЭОС может быть реализована для обоих типов катодов – оптимальные положения и фокусные расстояния линз.
4. Выявлены критические параметры, требующие наиболее точной реализации: положение и диаметр апертурной диафрагмы, а также фокусные расстояния линз.

Разработанная программа и полученные результаты могут быть непосредственно использованы при проектировании микрофокусных рентгеновских. Метод Монте-Карло показал свою эффективность для решения многосоставных задач оптимизации в электронной оптике.

Библиографический список

1. Хокс П. Электронная оптика и электронная микроскопия / П. Хокс. – М.: Мир, 1974. – 320 с.
2. Гоулдстейн Дж. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ / Дж. Гоулдстейн, Д. Ньюбери, П. Эчлин. – М.: Мир, 1984. – 348 с.
3. Иванов С.А., Щукин Г.А. Рентгеновские трубки технического назначения. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние 1989. – 200с.
4. Средства и методы компьютерной микротомографии / А. А. Трубицын, Е. Ю. Грачев, Д. А. Морозов [и др.] // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2018. – № 66-2. – С. 55–62.
5. Козлов Е. А. Аналитический расчет спектра рентгеновского излучения микрофокусной рентгеновской трубки с анодом «тепловая труба» / Е. А. Козлов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2019. – № 69. – С. 202–210.
6. Козлов Е.А., Трубицын А.А., Грачев Е.Ю. Предельные оценки минимальных размеров фокусного пятна в микрофокусных рентгеновских трубках // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2025. – № 92. – С.250–261.

УДК 621.386.22; ГРНТИ 29.31.15

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА КАТОДНОГО УЗЛА МИКРОФОКУСНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКИ

Е.Ю. Грачев, А.А. Трубицын, Е.А. Козлов

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

Аннотация. В работе выполнено исследование теплового режима катодного узла микрофокусной рентгеновской трубки. Сделана оценка температурного распределения в элементах катодного узла при различных токах накала. Моделирование выполнено в программной среде Comsol Multiphysics с использованием физических интерфейсов Joule Heating и Surface-to-Surface Radiation. В результате численного эксперимента получены значения температуры элементов конструкции при токах накала от 4,8 до 5,4 А. Показано, что температура изолятора может превышать 150 °С, что накладывает ограничения на применяемые материалы по нагревостойкости и термическому расширению. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании катодных узлов рентгеновских трубок.

Ключевые слова: микрофокусная рентгенография, открытая рентгеновская трубка, термокатод, моделирование теплового режима, излучение в вакууме.

MODELING THE THERMAL CONDITIONS OF THE CATHODE UNIT OF A MICROFOCUS X-RAY TUBE

E.Yu. Grachev, A.A. Trubitsyn, E.A. Kozlov
Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, monopol_rus@mail.ru

The summary. This paper examines the thermal conditions of the cathode assembly of a microfocus X-ray tube. The temperature distribution in the cathode assembly components was assessed at various filament currents. The simulation was performed in the Comsol Multiphysics software environment using the Joule Heating and Surface-to-Surface Radiation physics interfaces. A numerical experiment yielded temperature values for the structural components at filament currents ranging from 4.8 to 5.4 A. It was shown that the insulator temperature can exceed 150°C, which imposes limitations on the heat resistance and thermal expansion of the materials used. The obtained results can be used in the design of cathode assemblies for X-ray tubes.
Keywords: microfocus radiography, open X-ray tube, thermal cathode, thermal mode modeling, radiation in a vacuum.

В современной промышленности и науке инструменты неразрушающего контроля играют важную роль. Возможность увидеть и проанализировать внутреннюю структуру объекта дает технологу и ученому мощнейший инструмент для внедрения новых разработок, оценки технологических рисков и изучения объектов в нативном состоянии. Среди основных методов неразрушающего контроля наиболее популярными и информативными являются компьютерная микрофокусная рентгенография и компьютерная микротомография высокого разрешения. В процессе исследования объект просвечивается излучением рентгеновского источника, имеющего малый размер фокусного пятна. Получаемое таким образом увеличенное теневое изображение в рентгеновских лучах преобразуется плоскопанельным детектором в цифровой двойник доступный для обработки и анализа. Используя технику накопления плоских изображений объекта с разных ракурсов и применяя математические методы, можно восстановить трехмерную структуру объекта и получить информацию о его строении без разрушения.

При выборе источника рентгеновского излучения для просвечивания объектов исследователи и разработчики оборудования все больше отдают предпочтение трубкам открытого типа. Несмотря на сложность конструкции и высокую стоимость рентгеновские микрофокусные трубки являются наиболее универсальным инструментом. Имея оптическую систему, схожую по принципу работы с электронным микроскопом и способность к сервисной замене практически любого узла, в том числе и сгоревшего катода, трубки открытого обладают практически неограниченным сроком службы.

Являясь сложным высокотехнологичным продуктом, рентгеновские источники открытого типа при разработке требуют решения большого количества задач, среди которых расчет и проектирование:

- конструкции высоковольтного ввода питания;
- катодного узла и электроной пушки,
- электронно-оптической системы;
- мишени для торможения пучка.

При решении перечисленных задач выполняется большое количество исследований, направленных на оптимизацию параметров каждого узла с учетом тепловых режимов, электрической прочности и механики тепловых деформаций.

Настоящая работа посвящена исследованиям теплового режима катодного узла электронной пушки рентгеновского источника. Катодный узел будучи размещенным на массивном изоляторе, одновременно играющем роль высоковольтного разъема для подключения, испытывает воздействие высоких температур. Использование сильно различных по свойствам материалов при изготовлении конструкции усложняет выбор оптимальной геометрии и

требует численного моделирования тепловых процессов, протекающих в условиях, имитирующих работу прибора.

Конструкция катодного узла

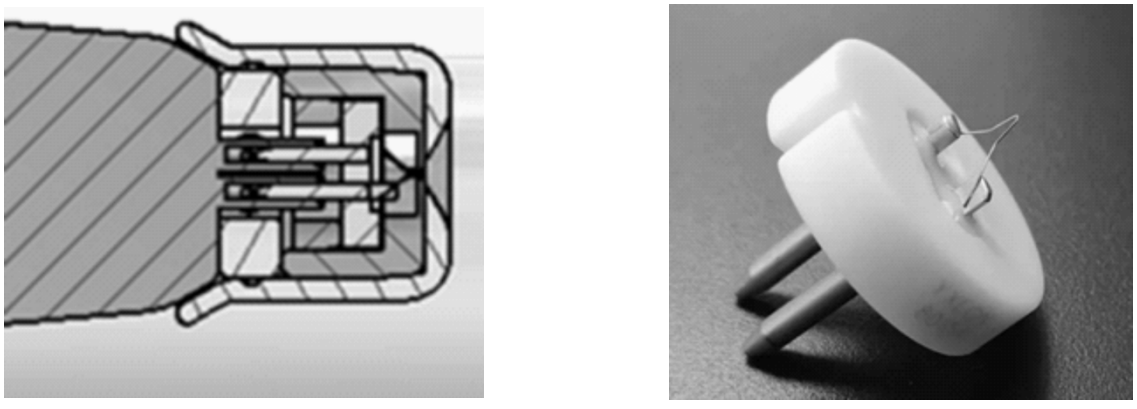
Для создания численной модели катодного узла и выбора режимов эксплуатации использовались данные о наиболее популярных рентгеновских источниках открытого типа производства компаний X-Ray Worx [1] и COMET (YXLON) [2]. Для уменьшения числа входных параметров были проанализированы технические параметры моделей с ускоряющим напряжением только 160 кВ и мишенью прострельного типа.

В большинстве случаев современные источникики работают в так называемом режиме постоянной мощности. В этом режиме пользователь оперирует одним из параметров, влияющих на свойства генерируемого излучения. Например, изменяя ускоряющее напряжение трубки, второй параметр – ток пучка на мишени автоматически подстраивается системой управления для поддержания макисмальной мощности, доступной для выбранного разрешения (размера фокусного пятна). Дополнительно может быть реализован пользовательский режим с возможностью регулировки и тока на мишени и ускоряющего напряжения с автоматической защитой мишени от перегрева.

Конструкция катодного узла большинства источников представляет собой чашу электрода Венельта, с закрепленным и выровненным относительно ее оси катодом (рисунок 1, а). Данный узел является полностью сменным и пользователь при сгорании катода меняет один отъюстированный производителем узел на другой. При замене новый катодный узел устанавливается на центрирующее металлическое основание, закрепленное на изоляторе. Таким образом образуется составная конструкция электрода Венельта имеющая один электрический потенциал относительно катода. В качестве источника электронов большинство современных трубок использует обычные термоэмиссионные катоды из вольфрамовой шпильки, закрепленной на токовводах (рисунок 1, б). Токовводы в свою очередь закреплены в керамическом основании в форме диска.

Постановка задачи моделирования

Для моделирования теплового режима катодного узла в среде SolidWorks была создана его упрощенная трехмерная модель, по размерам соответствующая реальной конструкции. Для учета теплообмена с окружающей средой вокруг катодного узла смоделирована оболочка, имитирующая внешнюю стенку корпуса рентгеновского источника. Катод размещается внутри электрода Венельта, который закрепляется на изоляторе. Для пропускания электрического тока через катод в теле изолятора спроектированы металлические токовводы.



(а) (б)

Рис.1. Конструкция катодного узла рентгеновского источника (а), фото катода микрофокусной трубки (б)

Тепловым источником в модели является нить катода, нагреваемая за счет пропускания постоянного тока через ее контакты. Диапазон токов для моделирования выбирался исходя из следующих соображений. Анализируя характеристики и кривые постоянной мощности разных моделей трубок, можно оценить диапазон токов пучка на мишени. Так, для модели XWT-160-T с мощностью на аноде 10 Вт максимальное значение тока составляет 500 мкА при ускоряющем напряжении 20 кВ, для модели XWT-160-THE с мощностью на аноде 80 Вт максимальное значение тока может быть установлено на уровне 800 мкА при ускоряющем напряжении в диапазоне 20-100 кВ. Здесь стоит отметить, что указанные значения мощностей должны быть скорректированны при переходе трубки в микрофокусный режим, в котором типичным значением является 3-4 Вт для вольфрамовой мишени и не более 15 Вт для алмазной мишени с разрешением в обоих случаях 2-3 мкм. Таким образом, ток пучка лежит в пределах от 50 мкА до 700 мкА для разных видов мишеней. Исходя из критерия максимальной яркости (теоретический предел Ленгмюра) [3] и необходимой величины тока, выполнена оценка температуры острия катода, которая составила порядка 2700 K. Используя кривые накала вольфрамового катода и требуемое значение температуры, получена необходимая величину тока накала. Для значения температуры 2700 K она составила около 5 А. Данное значение также хорошо коррелирует с характеристиками источника тока накала высоковольтного генератора для микрофокусных трубок, например производства Gulmay [4].

Используя полученные данные о токе накала, был выбран диапазон значений для моделирования в пределах 4.8-5.4 А для оценки температуры в разных частях исследуемой конструкции.

Компьютерная модель катодного узла

Численное моделирование теплового режима катодного узла для разных токов накала выполнялось в среде Comsol Multiphysics (рисунок 2). Из-за отсутствия воздуха внутри корпуса рентгеновского источника во время его работы основными механизмами передачи тепла можно считать излучение и теплопроводность по конструктивным элементам. Исходя из этого, пространство, окружающее катодный узел рассматривалось как вакуум с соответствующими свойствами. Из-за связанности процессов нагрева катода и его охлаждения, моделирование выполнялось в режиме мультифизической задачи с использованием итерфейсов Joule Heating (Heat Transfer in Solids + AC/DC) и Surface to Surface radiation. Таким образом учитывался нагрев за счет «джоулева тепла» и рассеяние тепла за счет излучения между элементами конструкции.

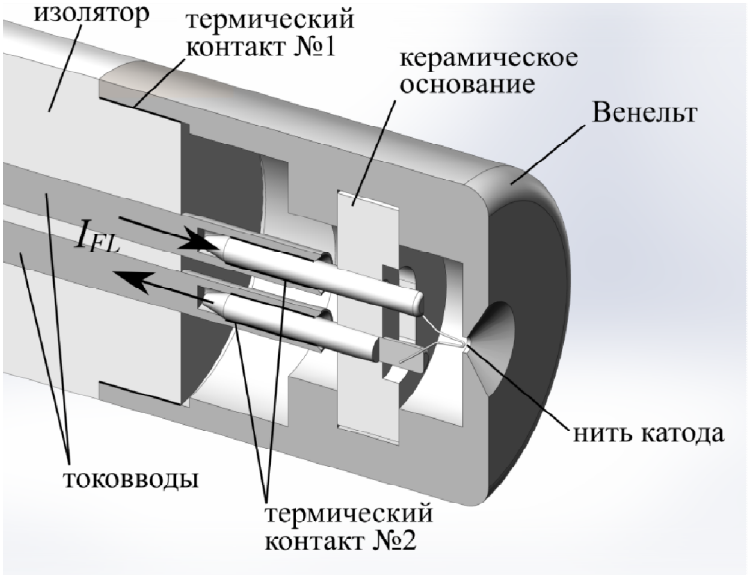


Рис. 2. Модель катодного узла рентгеновского источника

При установке катодного узла на изолятор ножки катода погружаются в отверстия токовводов, проходящих через тело изолятора. В результате образуется электрический и термический контакт между указанными деталями. Также при размещении катодного узла на изоляторе образуется еще один термический контакт – изолятор-металл. Термические контакты в остальных частях катодного узла не учитывались при моделировании, так как температура в области нити катода высока и основным механизмом передачи тепла является излучение.

Результаты моделирования

Используя граничные условия, рассмотренные ранее, было выполнено моделирование теплового режима катодного узла для различных токов накала (рисунок 3). По результатам проведенного моделирования была составлена таблица 1, в которой приведены значения температуры при различных токах накала в точках конструкции: Т1 – на внешней поверхности Венельта, Т2 – в теле изолятора, Т3 – в месте контакта материала изолятора и токоввода.

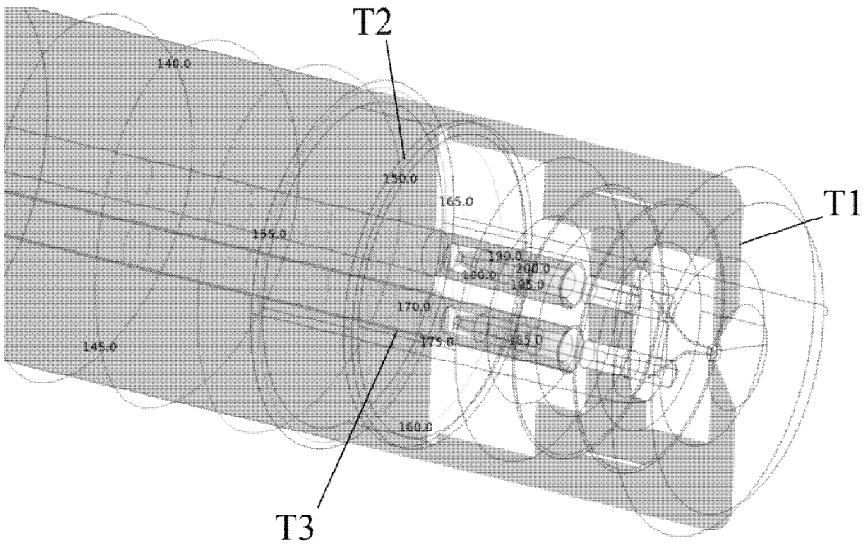


Рис. 3. Поле температур катодного узла для тока накала 5.4 А

Таблица 1. Значения температуры в различных точках конструкции для различных токов накала

Ток накала, А	Температура, °С		
	T1	T2	T3
4.8	142.8	129.2	134.6
5.0	152.2	138.7	143.6
5.2	161.5	147.8	152.3
5.4	173.2	156.8	161.2

Результаты численного эксперимента показывают сильный разогрев конструкции при токах накала катода, соответствующих рабочему режиму. Видно что температура тела изолятора повышается до значений более 150 °С. В месте контакта металлического токоввода и материала изолятора температура достигает еще более высоких значений порядка 160 °С.

Оценка температуры в разных точках конструкции позволяет сделать вывод о возможности применения для изолятора ограниченного круга материалов. Например, это могут быть керамика или электроизоляционные компаунды с классом нагревостойкости Н и выше [5]. Также при проектировании изолятора необходимо учитывать различие значений ТКЛР токовводов и изоляционного метериала. Большая разница ТКЛР может привести к разрушению изолятора из-за возникших напряжений и вызвать натекание объема рентгеновского источника.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2024-0001).

Библиографический список

1. Microfocus X-Ray Tubes. X-RAY WorX GmbH, https://www.x-ray-worx.com
2. Industrial X-ray. Finding the flaws: non-destructive testing with industrial X-ray. Comet, https://yxlon.comet.tech/en/technologies/industrial-x-ray
3. Гоулдстейн, Дж. Практическая растровая электронная микроскопия / Дж. Гоулдстейна, Х. Яковица ; пер. с англ. под ред. В. И. Петрова. – М. : Мир, 1978. – 656 с.
4. Microfocus X-ray Generators and Sources. Gulmay Limited, https://www.gulmay.com
5. ГОСТ 8865-93 СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ. Оценка нагревостойкости и классификация. – Москва : Издательство стандартов, 2003. – 8 с.

УДК 537.291; ГРНТИ 25.35.39

ПРОБЛЕМЫ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА НИЗКОПЕРВЕАНСНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУШЕК

А.А. Трубицын, Е.Ю. Грачев, Е.А. Козлов, М.С.Новикова

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина, Российская Федерация, Рязань, assur@bk.ru

Аннотация. Развиты средства численного моделирования низкопервеансных электронных пушек, преданазначенных для использования в электроных микросокпах, электронных спектрометрах, микрофокусных рентгеновских трубках и т.п. Проанализированы причины снижения точности моделирования при уменьшении диаметра катода пушки. Предложен и протестирован алгоритм корректного траекторного анализа электронно-оптической схемы пушки с катодом произвольногодиаметра.

Ключевые слова: электронная оптика, электронная пушка, численное моделирование.

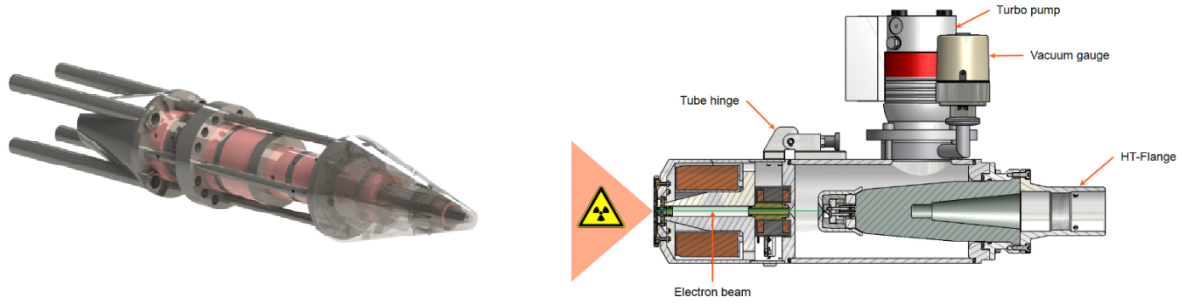
PROBLEMS OF NUMERICAL ANALYSIS OF LOW-PERVEANS ELECTRON GUNS

A.A. Trubitsyn, E.Yu. Grachev, E.A. Kozlov, M.S. Novikova
Ryazan State Radiotechnical University named after V.F. Utkin,
Russian Federation, Ryazan, assur@bk.ru

Abstract. Numerical modeling tools for low-perveance electron guns intended for use in electron microscopes, electron spectrometers, microfocos X-ray tubes, etc. are developed. The causes of the decrease in modeling accuracy with decreasing gun cathode diameter are analyzed. An algorithm for correct trajectory analysis of the electron-optical design of a gun with a cathode of arbitrary diameter is proposed and tested.
Keywords: electron optics, electron gun, numerical modeling.

Электронные пушки являются источником ускоренных и сфокусированных электронов, при воздействии которых на объект возникает генерация потоков вторичных частиц, таких как электроны (в электронных микроскопах и спектрометрах), ионы (в источниках ионов), рентгеновские кванты (в микрофокусных рентгеновских трубках) и даже нейтроны (в нейтронных генераторах).

Электронные пушки имеют достаточно простую конструкцию (электрод-анод-управляющий электрод), однако именно они определяют основные характристикик перечисленных выше технически сложных устройств (рис. 1).



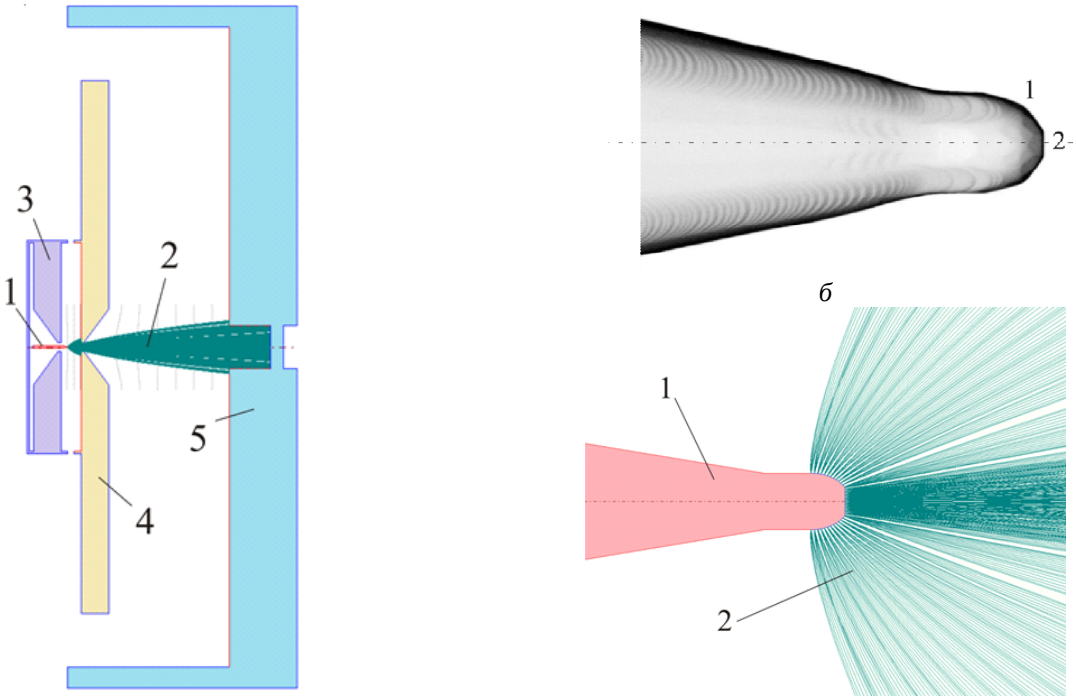
а *б*

Рис. 1. Современные приборы, в состав которых входит электронная пушка: *а* – интегрированная система ускорения и электростатической фокусировки электронного луча, встраиваемая в энергоанализатор типа цилиндрическое зеркало, *б* – микрофокусная рентгеновская трубка открытого типа.

Основным средством разработки современных систем электронной оптики, в том числе электронных линз, являются численные методы и соответствующее компьютерное программное обеспечение. Перечисленные в начале статьи эмиссионные системы относятся к классу низкопервеансных, поскольку их микропервеанс не превышает величину 10^{-2} $A/V^{3/2}$ [1]. Численный анализ низкопервеансных катодных линз не требует учета пространственного заряда, но даже в таких упрощающих условиях возникают сложности при проведенении практических расчетов.

Основная проблема заключается в резком скачке производных потенциала вблизи катода, который требует детального анализа прикатодной области при численном интегрировании уравнений движения в траекторном анализе.

Численные эксперименты позволили установить характер нерегулярного поведения осевого распределения потенциала $\Phi(z)$ у поверхности катода. На рисунке 2, *а* представлена схема электронной пушки с катодом Шоттки (рис. 2, *б*, *в*), диаметр эмиттирующей площадки которого составляет 0.5 мкм [2].



а *б* *в*

Рис. 2. Электронная пушка с катодом Шоттки: (*а*) электронно-опическая схема пушки; (*б*) изображение катода (1 – тело катода, 2 – плоская эмиттирующая площадка диаметром 0.5 мкм); (*в*) прикатодная область в увеличенном виде (1 – катод, 2 – траектории электронов, 3 – супрессор, 4 – экстрактор, 5 – анод),

.

На рисунке 3 представлены характерные расчетные зависимости потенциала Ф(z) и первых двух его производных на оси симметрии электронной пушки с началом графиков на поверхности катода. Внешний вид функций Ф(z) (рис. 3, *а*) и Ф’(z) (рис. 3, *б*) не позволяет сделать какие-либо выводы об особенностях их поведения. В то же время на зависимости Ф”(z) (рис. 3, *в*) обнаруживается резкий всплеск в начале графика.

Анализ зависимостей Ф”(z) для катодов с разными диаметрами 0.5 - 100 мкм (см. также работу [3] по исследованию пушки с катодом диаметром 2.27 мм) позволил установить факт локализации нерегулярного поведения рассматриваемой функции на расстоянии, приблизительно равном диаметру катода и тенденцию роста амплитуды скачка при снижении диаметра.

Разложение аксиально-симметричного потенциала в ряд по степеням координаты r [4]

$$u(r,z) = \Phi_0(z) - \left(\frac{r}{2}\right)^2 \Phi''(z) + \frac{1}{(2!)^2}\left(\frac{r}{2}\right)^4 \Phi^{IV}(z) - \frac{1}{(3!)^2}\left(\frac{r}{2}\right)^6 \Phi^{VI}(z) + \cdots + \frac{(-1)^k}{(k!)^2}\left(\frac{r}{2}\right)^{2k} \Phi^{(2k)}(z) + \cdots \quad (1)$$

позволяет установить наличие и характер особенности составляющих градиента E_z и E_r в области нерегулярного поведения Ф”(z).

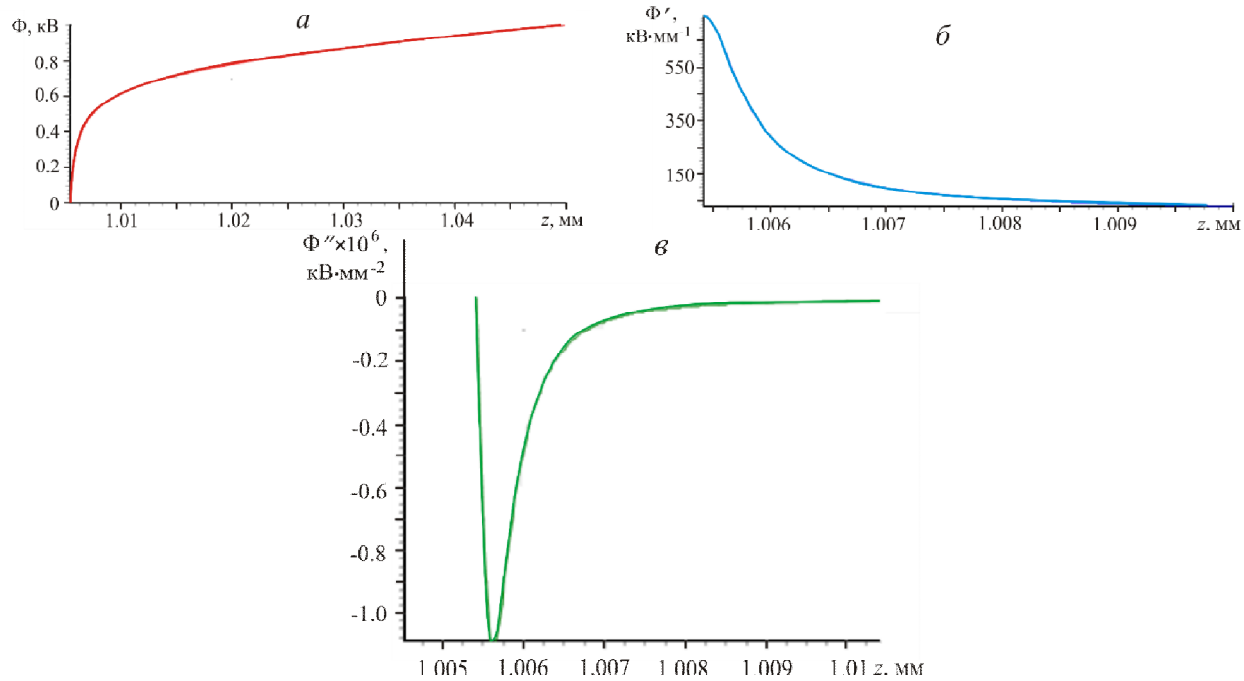


Рис. 3. Осевое распределение потенциала (*а*), его первая (*б*) и вторая (*в*) производные.

Действительно, в нашем случае пучок электронов движется вблизи оси z, т.е. является параксиальным, поэтому пренебрегая в (1) слагаемыми со степенью *r*, равной 2, и выше, чем 2, можем записать

$$\begin{cases} E_z = -\dfrac{\partial \mathrm{u}(\mathrm{r},\mathrm{z})}{\partial z} = -\Phi'(z), \\ E_r = -\dfrac{\partial \mathrm{u}(\mathrm{r},\mathrm{z})}{\partial r} = \dfrac{r}{2}\Phi''(z). \end{cases}$$

Второе уравнение системы показывает наличие резко меняющейся силы $e{\cdot}E_\mathrm{r}$, действующей на электрон *e* в радиальном направлении, в случае скачкообразного изменения Ф”(*z*). Поэтому вполне очевидно, что шаг интегрирования дифференциальных уравнений (ДУ) движения по времени при расчете траекторий электронов в прикатодной области должен обеспечивать пространственный шаг, значительно меньший, чем толщина слоя нерегулярного поведения градиента потенциала. Алгоритмы автоматического выбора шага интегрирования [5] вполне справляются с такой проблемой. Главное внимание здесь должно быть уделено корректному вычислению правой части ДУ (составляющих градиента E_z и E_r).

Для решения задач теории потенциала в наших работах [6] развивается метод граничных элементов (МГЭ), позволяющий определить потенциал в любой точке рабочего пространства.

Для применения конечно разностных формул при вычислении каждой из составляющих градиента в точке с координатами (*z*, *r*) необходимо МГЭ определить потенциалы в узлах, расположенных на расстоянии Δh друг от друга на прямой, параллельной соответствующей оси (см. рис. 4). При этом в зависимости от расстояния текущей точки (*z*, *r*) от катода могут использоваться правые или центральные конечные разности (рис. 4). Здесь дополнительно подчеркнем, что в представляемом алгоритме трассировки электронов не требуется вычисление сетки потенциалов во всей анализируемой области, и заметим, что алгоритм расчета потенциала в *K* узлах методом граничных элементов допускает элементарное распараллеливание на *K* потоков, которое, кстати, реализовано в авторской программе FOCUS Pro [7].

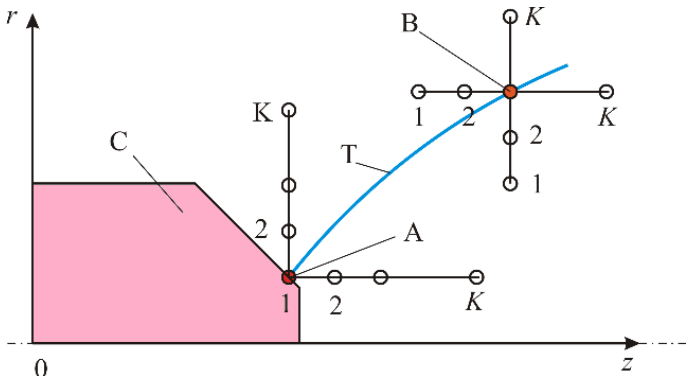


Рис. 4. Схема вычислений составляющих градиента потенциала:
С – катод, Т – траектория электрона, А – текущий узел на поверхности катода,
В – текущий узел вдали от катода.

В настоящей работе предложен и реализован алгоритм поиска оптимального шага дифференцирования Δh на основе решения уравнения $\Phi_c''(\Delta h) = 0$, где нижний индекс “c” означает значение второй производной по z функции распределения осевого потенциала на поверхности катода. Равенство нулю второй производной на поверхности плоского катода следует из уравнения Лапласа.

Разработанный алгоритм верифицировался на расчетах пушки с катодом Шоттки (рис. 2). В качестве «эталона» принимались результаты расчетов траекторий электронов в программном приложении EOD (Electron Optics Design) [8], конечно-элементные алгоритмы которого как раз отлажены для численного анализа источников с катодом Шоттки. Относительная погрешность расчетов по величине отклонения от закона сохранения энергии при K=11 в Focus Pro составила менее 10^{-5} %. В EOD тот же параметр при вычислениях в реальном времени оказался почти на порядок хуже, при этом отличие по результатам моделирования траекторий в FOCUS Pro и EOD не превысило 10^{-1} %. Заметим, что закон сохранения энергии грубо нарушается при расчетах как в FOCUS Pro, так и в EOD без принятия специальных алгоритмических мер в прикатодной области.

Дополнительно отметим, что в широко применяемых для моделирования полей сеточных методах конечных разностей (МКР) и конечных элементов (МКЭ), в отличие от МГЭ, решение задачи поиска оптимального шага Δh несравнимо сложнее, поскольку на каждом шаге оптимизации потребуется построение сетки во всей расчетной области.

Финансирование работы

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 25-29-00124) https://rscf.ru/project/25-29-00124/.

Библиографический список

1. Хокс, П. Электронная оптика и электронная микроскопия / П. Хокс. – М .: Мир, 1974. – 320 с.
2. Handbook of Charged Particle Optics, 2nd edition. Edited by J. Orloff. - NY: CRC Press, 2009. - 688 p.
3. Hanyu Gao, Guoquan Ding, Xin Zhou, Dongbo Chang, Ying Tian and Mengxiang Dang. Numerical study for the effect of angle between inner wall of Wehnelt electrode and its axis on beam dynamics in a thermionic electron gun // AIP Advances. - 2025, 15. - 015030. doi: 10.1063/5.0240111.
4. Scherzer O. Zur Theorie der elektronenoptischen Linsenfehler // Z. Phys. – 1933, 80. - P. 193–202.
5. Butcher John C. Numerical methods for ordinary differential equations in the 20th century // J. Comput. Appl. Math. – 2000, 125 (1–2). – P. 1–29. doi:10.1016/S0377-0427(00)00455-6.
6. Gurov V.S., Saulebekov A.O., Trubitsyn A.A. Analytical, Approximate-Analytical and Numerical Methods in the Design of Energy Analyzers. In Peter W. Hawkes, editor: Advances in Imaging and Electron Physics. V. 192. - London: Academic Press, 2015. - 209 p.

7. Трубицын А.А. Система «ФОКУС» автоматизированного проектирования устройств электронной и ионной оптики // Вестник РГРТУ. - 2012, №1, вып. 39, часть 2. - С. 121-130.
8. Lencova B., Zlamal J. A new program for the design of electron microscopes // Physics Procedia. – 2008, No. 1. - P. 315-324. DOI: 10.1016/j.phpro.2008.07.111.

УДК 532.54; ГРНТИ 30.17.51

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ЭЛЕКТРОРАСПЫЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

П.А. Анисимов*, А.Н. Дармаев, Е.А. Кунин**, С.П. Масленников*, А.А. Матвеев**, А.С. Степанцов**, Г.В. Феоктистов***

**Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Россия, Москва, APA014@campus.mephi.ru,*
***Акционерное Общество «Центр суперкомпьютерного моделирования», Россия, Москва, darmaev.a@rt-hpc.ru,*

Аннотация. Рассмотрен физический механизм электрораспыления жидкости и характерные стадии данного процесса. Разработана компьютерная модель, описывающая его начальную стадию. Проведена верификация модели путем сравнения с аналитической зависимостью, описывающей равновесную высоту поднятия мениска под действием капиллярного эффекта. Проведено сравнение модели с известными экспериментальными результатами для конуса Тейлора в плоском конденсаторе. Разработана модель начальной стадии электрораспыления жидкости.
Ключевые слова: моделирование, капиллярный эффект, конус Тейлора, система электрораспыления жидкости, электроспрей.

NUMERICAL SIMULATION OF LIQUID ELECTROSPRAYING: DETERMINATION OF INITIAL-STAGE PARAMETERS

P.A. Anisimov*, A.N. Darmaev, E.A. Kunin**, S.P. Maslennikov*, A.A. Matveev**, A.S. Stepantsov**, G.V. Feoktistov***

**National Research Nuclear University MEPhI, Russia, Moscow, APA014@campus.mephi.ru,*
***Joint Stock Company "Center for Supercomputer Modeling", Russia, Moscow, darmaev.a@rt-hpc.ru,*

Abstract. The physical process of liquid electrospraying has been considered and its characteristic stages have been determined. A computer model of the initial stage has been developed. The model has been verified against an analytical relationship describing the equilibrium height of the meniscus rise under capillary effects. The model of Taylor cone formation in a plane capacitor has been verified against known experimental results. Results in the form of a stable droplet flow have been obtained.
Keywords: modelling, capillary effect, Taylor cone, liquid electrospray system, electrospray.

Разработка, а также оптимизация конструкции и режимов работы систем электрораспыления жидкости (ЭРЖ), применяющихся, например, в масс-спектрометрии и нанолитографии [1], сопровождается значительными материальными и временными затратами при натурном моделировании. Кроме того, высокая сложность реализуемого физического процесса не позволяет с достаточной информативностью охарактеризовать устройство в ходе экспериментальных исследований. Современный подход к решению обозначенной проблемы заключается в создании компьютерных моделей и проведении на их основе виртуальных экспериментов.

Процесс электрораспыления включает в себя несколько последовательных стадий (рис. 1) [2]:

- Подача рабочей жидкости через капилляр в область действия электрического поля с последующим образованием конуса Тейлора; эмиссия капельного потока из вершины конуса Тейлора;

- Многократное разделение капель за счет преобладания электростатических сил над силами поверхностного натяжения вплоть до образования потока ионов в газовой фазе;
- Динамика ионного потока в ионно-оптической системе устройства.

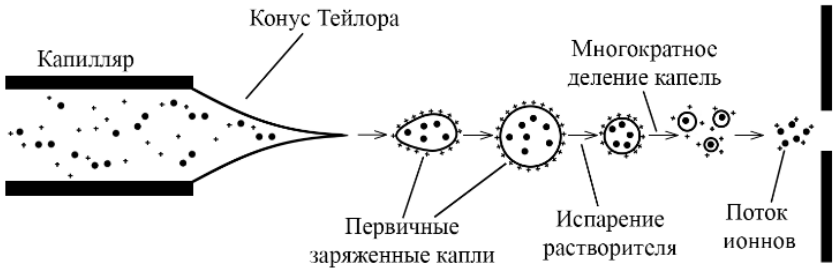


Рис. 1. Принципиальная схема системы ЭРЖ

В работе проводилось исследование начальной стадии ЭРЖ методами компьютерного моделирования (КМ), которое включало в себя верификацию модели динамики жидкости в капиллярном канале с аналитической зависимостью Борелли-Жюрена [3] и сравнение результатов КМ для задачи образования конуса Тейлора в плоском конденсаторе с известными экспериментальными данными (валидация КМ) [4] и моделирование образования устойчивого капельного потока. В рамках моделирования динамики жидкости в капиллярном канале также была проведена кросс-верификация между различными программными пакетами для дополнительного подтверждения корректности численной реализации выбранной математической модели.

Для математического описания исследуемого процесса требуется совместное решение уравнений гидродинамики в многофазной постановке и системы уравнений Максвелла.

Система уравнений, описывающая динамику сплошной среды в ламинарном режиме, которая характеризуется плотностью ρ, давлением p, углом смачивания $\theta = \frac{3\pi}{8}$ и вектором скорости $\vec{u}$ в данной точке расчетной области, имеет вид:

$$\begin{cases} \rho\left(\vec{u}\cdot\nabla\right)\vec{u} = \nabla[-p\boldsymbol{I} + K] + \vec{F} + \rho\vec{g} \\ \rho\nabla\cdot\vec{u} = 0 \end{cases}, \tag{15}$$

где $\boldsymbol{I}$ – единичная матрица;

K – тензор вязких напряжений;

$\vec{F}$ – вектор внешней силы;

$\vec{g}$ – ускорение свободного падения.

В качестве вектора внешней силы реализуется объемная электростатическая сила, вызывающая деформацию поверхности раздела фаз и образование так называемого конуса Тейлора:

$$\vec{F} = \rho_V\vec{E} - 0{,}5\cdot\vec{E}^2\varepsilon_0\nabla\varepsilon_r, \tag{16}$$

где ρ_V – объемная плотность заряда;

$\vec{E}$ – вектор напряженности электрического поля;

ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость;

ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость.

Распределение электрического поля в расчётной области определяется уравнениями Максвелла:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \vec{D} = \rho_V \\ \vec{E} = -\nabla V \end{cases}, \tag{17}$$

где $\vec{D}$ – вектор электрической индукции;

V – электростатический потенциал.

Под действием электростатической силы жидкостная фаза приходит в движение, что сопровождается перераспределением объемной плотности электрического заряда:

$$\frac{\partial \rho_V}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_V \vec{u}) - \nabla \cdot (\mu \nabla V) = 0, \tag{18}$$

где μ – электрическая проводимость.

Динамика границы раздела фаз $\frac{\partial \phi}{\partial t}$ описывается уравнением:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \phi = \gamma \nabla \cdot (\varepsilon_{ls} \nabla \phi - \phi(1-\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|}), \tag{19}$$

где γ – гидродинамический параметр реинициализации;

ε_{ls} – величина толщины границы раздела фаз.

Граница раздела фаз обусловлена наличием сил поверхностного натяжения $\vec{F}_{st}$:

$$\begin{cases} \vec{F}_{st} = \sigma \delta \kappa \vec{n}_{int} + \delta \nabla_S \sigma \\ \kappa = -\nabla \cdot \vec{n}_{int}; \nabla_S = (I - \vec{n}_{int} \vec{n}_{int}^T) \nabla \end{cases} \tag{20}$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения;

δ – Дельта-функция Дирака;

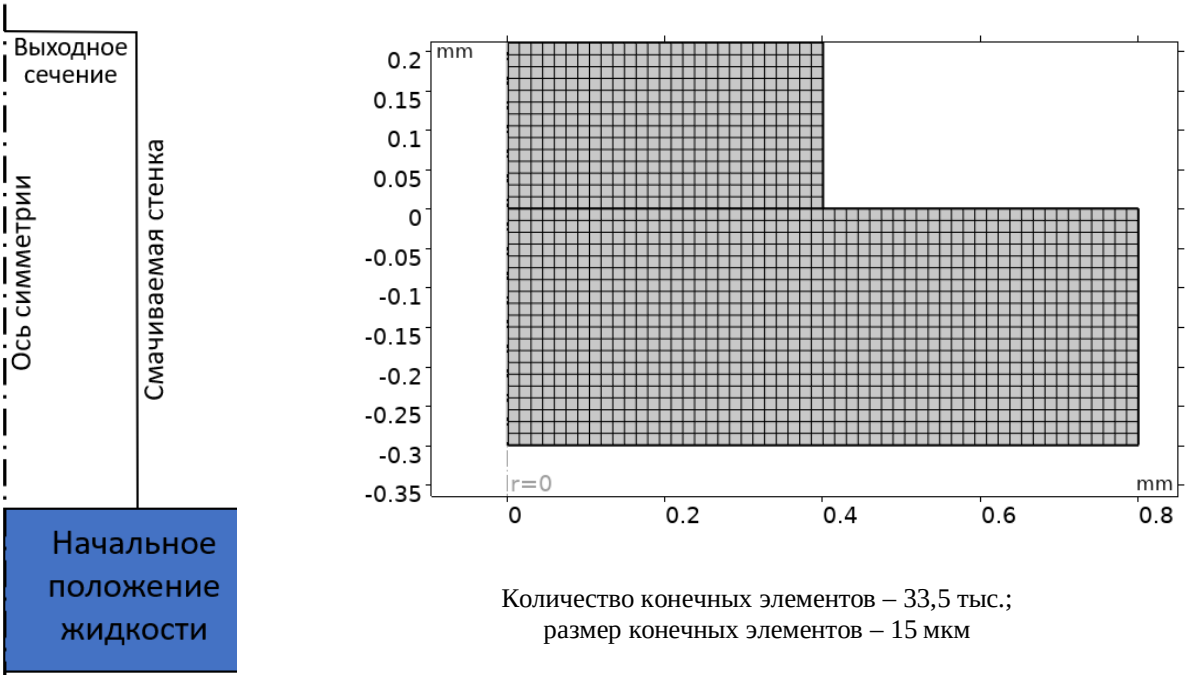
κ – кривизна поверхности;

$\vec{n}_{int}$ – вектор нормали к поверхности жидкости.

Таким образом, система уравнений (1)-(6) позволяет описать динамику диэлектрической жидкости в капиллярном канале под действием электрического поля.

Динамика жидкости в капиллярном канале

Как правило конструкция системы электрораспыления жидкости включает в себя капиллярный канал. Моделирование подъема жидкости в капиллярном канале проводилось для случая отсутствия электрических полей. Граничные условия (свободное течение жидкости, смачиваемая поверхность) и параметры конечно-элементной сетки приведены на рис. 2.



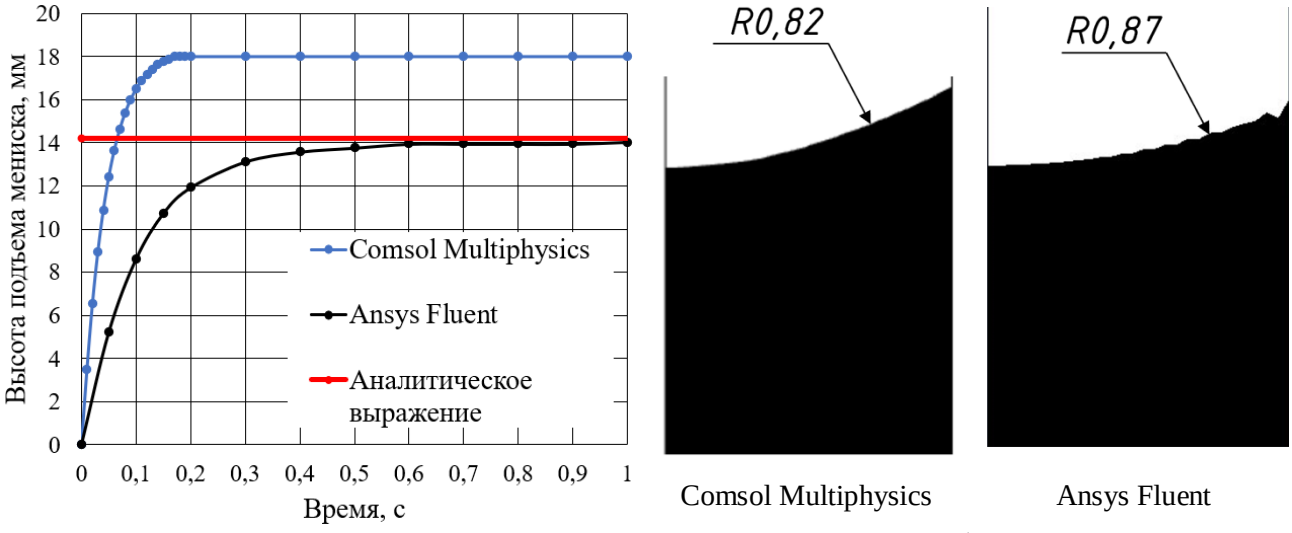
а) б)

Количество конечных элементов – 33,5 тыс.;
размер конечных элементов – 15 мкм

Рис. 2. Граничные условия модели исследования капиллярного эффекта (а) и конечно-элементная сетка расчетной области (б)

Сопоставление результатов моделирования в программных пакетах *Ansys Fluent* и *Comsol Multiphysics* с аналитической зависимостью Борелли-Жюрена [3] для капилляра диаметром $d_c = 0{,}8$ мм и воды в нём представлены на рис. 3:

$$h = \frac{4\sigma \cos\theta}{d_c \rho g} \tag{21}$$



а) б)

Рис. 3. График зависимости высоты подъема центра мениска от времени (а) и форма мениска(б)

Также были получены аналогичные зависимости высоты подъема мениска в капиллярах различных диаметров для воды и спирта (рис. 4).

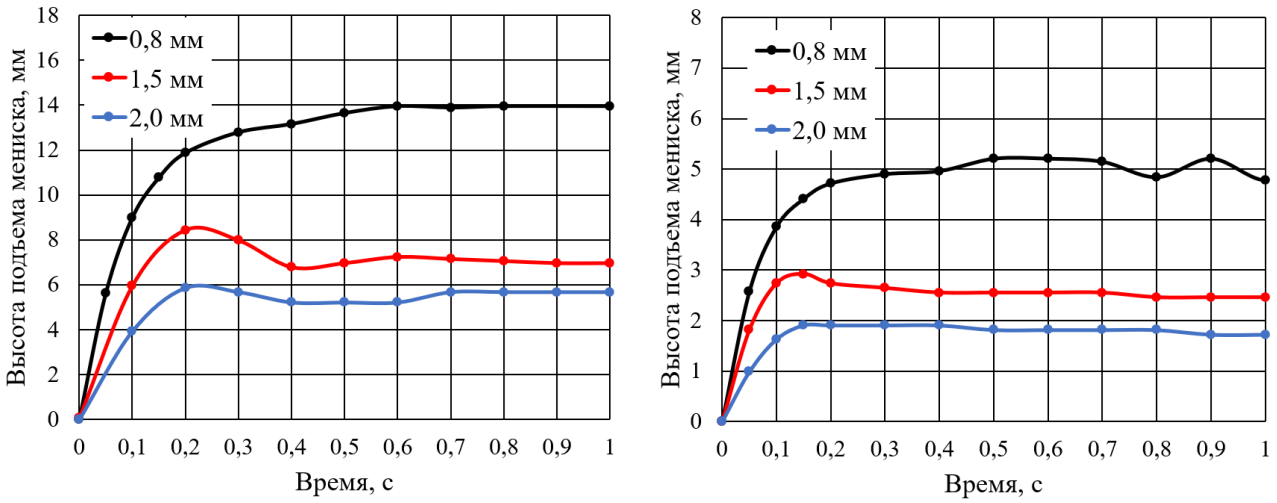


Рис. 4. График зависимости высоты подъема мениска от времени для воды (а) и спирта (б)

Образование конуса Тейлора в плоском конденсаторе

Обязательным условием образования капельной фазы в системе ЭРЖ является формирование из жидкости конуса Тейлора, при этом вблизи вершины формируется область с высокой напряженностью электрического поля. В качестве тестовой задачи был рассмотрен плоский конденсатор, погруженный в жидкость, как наиболее наглядная и простая модель.

Граничные условия (нулевой массовый расход во входном сечении, свободное течение в выходном сечении, смачиваемая поверхность, электрический потенциал катода и анода) и параметры конечно-элементной сетки показаны на рисунке 5.

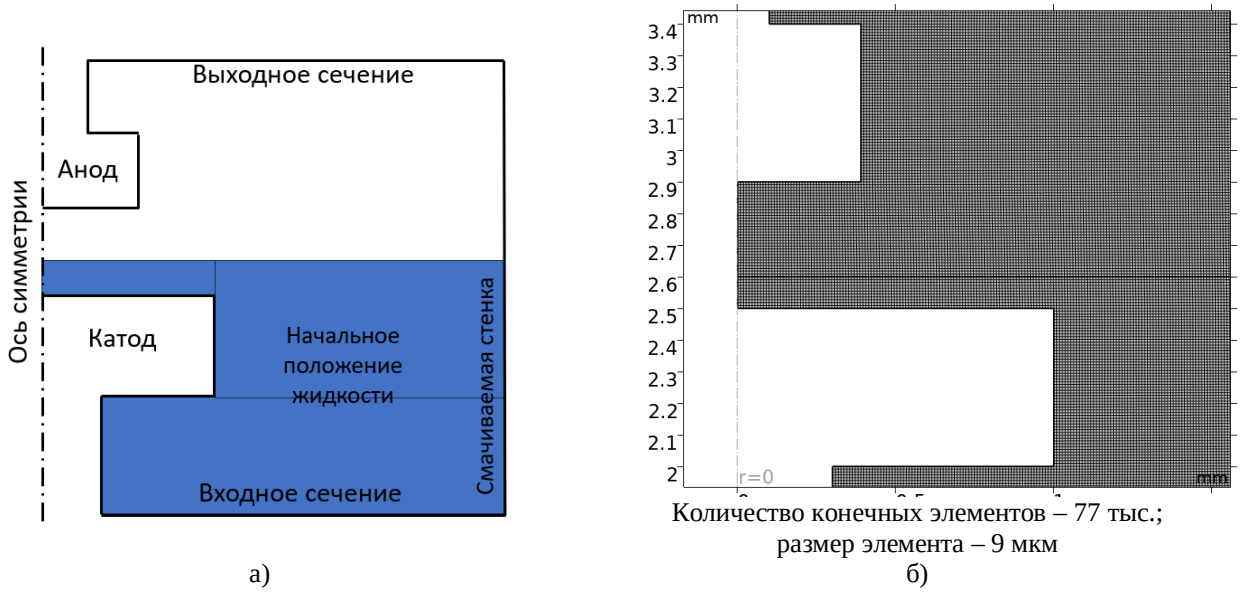
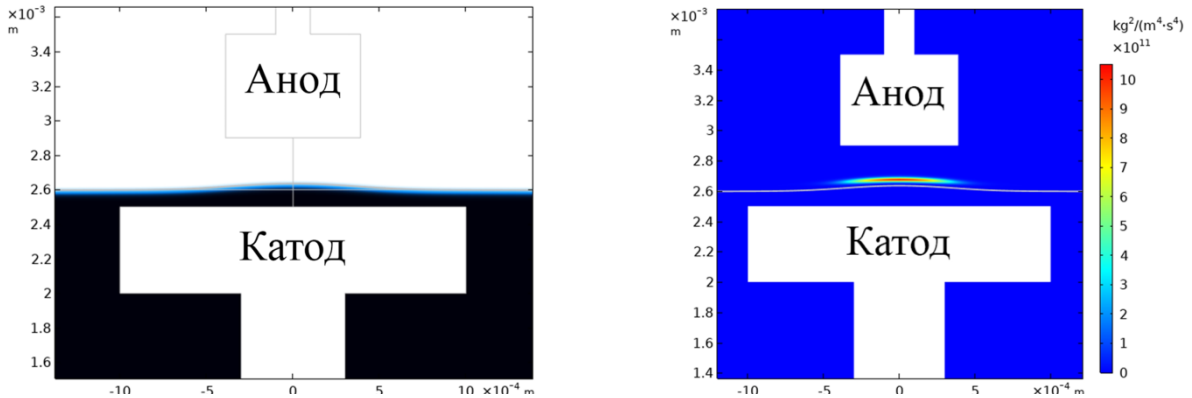


Рис. 5. а) – Граничные условия модели исследования образования конуса Тейлора в плоском конденсаторе и б) – конечно-элементная сетка расчетной области

В результате моделирования была получена граница жидкостной фазы под влиянием электростатической силы (рис. 6).



а) б)

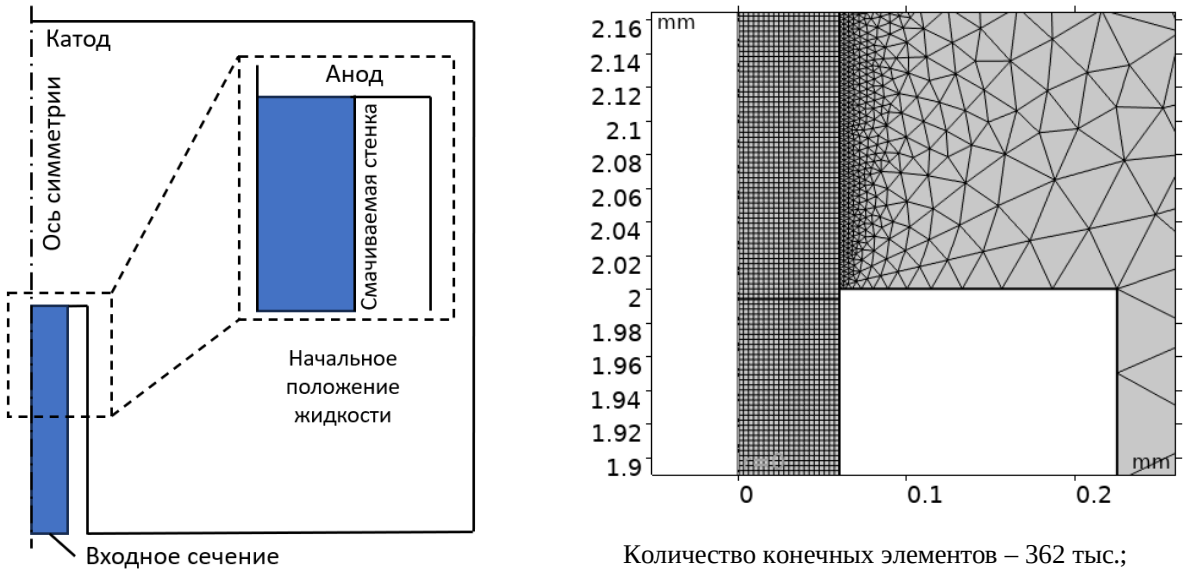
Рис. 6. Распределение жидкости а) и электростатической силы б) в плоском конденсаторе

На приведённых изображениях можно наблюдать, что под действием электрического поля из жидкости сформировался характерный усеченный конус. Амплитудное значение объемной электростатической силы отражает концентрацию силовых линий электрического поля вблизи его вершины. Однако на данный момент достичь равновесного установления границы жидкостной фазы не удалось, так как процесс в рассматриваемой системе имеет высокую степень неустойчивости. Дальнейшие работы будут заключаться в разработке экспериментального стенда с целью уточнения граничных условий и калибровки КМ.

Система электрораспыления жидкости

После верификации КМ динамики жидкости в капиллярном канале и анализа КМ образования конуса Тейлора в плоском конденсаторе, была разработана модель системы электрораспыления жидкости для исследования эмиссии капельного потока из вершины конуса Тейлора.

Граничные условия (массовый расход во входном сечении, свободное течение в выходном сечении, смачиваемая стенка, электрический потенциал катода и анода) и параметры конечно-элементной сетки показаны на рисунке 7.

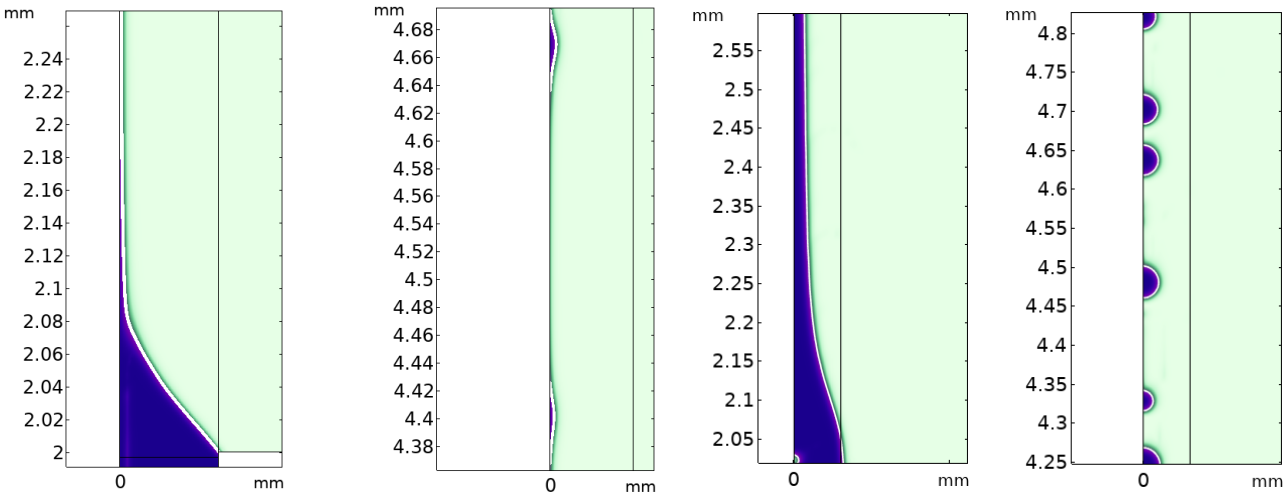


Количество конечных элементов – 362 тыс.;
размер элементов в области фазы жидкости – 3 мкм

а) б)

Рис. 7. а) – Граничные условия модели электрораспыления жидкости
и б) – конечно-элементная сетка расчетной области

Результаты образования капель при различных расходах жидкости через входное сечение показаны на рисунке 8.



а) б)

Рис. 8. Образование капель в системе электрораспыления жидкости при расходе 2,6 мл/ч (а) и 12 мл/ч (б)

Полученная картина распределения жидкостной фазы соответствует материалам [2], а методика моделирования может лежать в основе исследований последующих стадий ЭРЖ и проведения комплексного моделирования устройств подобного класса.

Библиографический список

1. Sweet M.L., Pestov D., Tepper G.C., McLeskey J.T. Electrospray aerosol deposition of water soluble polymer thin films // Applied Surface Science. – 2014. – Vol. 289. – № 1. – P. 150–154.

2. Dastourani H. A physical insight into electrospray process in cone-jet mode: Role of operating parameters / H. Dastourani, M. R. Jahannama, A. Eslami-Majd // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2018. – Vol. 70. – P. 315–335.

3. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. – Москва: Химия. 1988. – 464 с.

4. А. М. Орлов, И. О. Явтушенко, О. Г. Рынкова, “Трансформация конуса Тейлора в усеченный при разрядах на вязких жидких диэлектриках”, ЖТФ, 87:7 (2017), 1111–1115; Tech. Phys., 62:7 (2017), 1126–1130

УДК 621.385.632; ГРНТИ 47.29.37

ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ НИЗКОВОЛЬТНОГО МНОГОЛУЧЕВОГО СВЧ УСИЛИТЕЛЯ KU-ДИАПАЗОНА

Н.А. Голованов, А.В. Галдецкий, С.П. Морев

АО «НПП «Исток» им. Шокина», Российская Федерация, г. Фрязино, info@istokmw.ru

Аннотация. В работе рассмотрена возможность создания компактной низковольтной электронно-оптической системы (ЭОС) с униполярным распределением осевой компоненты индукции магнитного поля магнитной фокусирующей системой (МФС), предназначенной для транспортировки многолучевого электронного потока в протяженном канале вакуумного СВЧ усилителя, предназначенного для работы в Ku-диапазоне. Проведено проектирование ЭОС и расчет транспортировки электронного потока в многолучевой ЭОС с током 1,26 А при ускоряющем напряжении 2,7 кВ в пролетном канале 1.0 мм.

Ключевые слова: электронно-оптическая система, магнитная фокусирующая система, транспортировка электронного потока в магнитном поле.

ELECTRON OPTICAL SYSTEM FOR A LOW-VOLTAGE MULTIBEAM Ku-BAND MICROWAVE AMPLIFIER

N.A. Golovanov, A.V. Galdetsky, S.P. Morev

JSC NPP Istok named after Shokin", Russian Federation, Fryazino,, info@istokmw.ru

The summary. This paper explores the feasibility of developing a compact, low-voltage electron optical system (EOS) with a unipolar distribution of the axial magnetic field component created by a magnetic focusing system (MFS). This system is intended for transporting a multi-beam electron flow within the extended interaction channel of a vacuum microwave amplifier designed for operation in the Ku-band. The design of the EOS and the calculation of electron beam transport in a multibeam EOS with a current of 1.26 A at an accelerating voltage of 2.7 kV in a drift channel of 1.0 mm are presented.

Keywords: electron-optical system, magnetic focusing system, electron beam transport in a magnetic field.

Введение

Разработка новых поколений вакуумных компактных усилителей по прежнему является основным трендом в развитии СВЧ электронной техники. Так, в работе [1] были представлены результаты разработки 19-ти лучевой ЭОС клистрона Ku-диапазона с выходной мощностью 400 Вт при ускоряющем напряжении 2.5 кВ. Транспортировка электронного потока в этой ЭОС обеспечивалась магнитной фокусирующей системой (МФС) с униполярным распределением магнитного поля на оси ЭОС величиной 0.2 Тл. Плотность тока с катода в приборе составляла более 20 А/см2, (ток парциального пучка составлял 35 мА, диаметр катода и канала 0.5 мм, что существенно ограничивало его долговечность работы прибора.

В настоящей работе, рассмотрена возможность создания ЭОС, предназначенной для формирования и транспортировки электронного потока в многолучевой ЭОС вакуумного СВЧ усилителя нового типа для Ku-диапазона с током пучка 1.26 А, при ускоряющем напряжении 2.7 кВ при плотности тока катода менее 3 А/см2.

Постановка задачи

В [2] было показано, что при разработке широкополосной ЛБВ значение безразмерного параметра $\gamma_e a$ может быть увеличено почти в два раза (с 0.7 до 1.8) при сохранении относительно высоких значений электронного КПД. При разработке ЛБВ W-диапазона такой подход позволил в [3] существенно увеличить диаметр пролетного канала, уменьшить величину фокусирующего магнитного поля, сохранив при этом за счет оптимизации параметров замедляющей системы высокие значения электронного КПД [4].

В [5] было рассмотрено проектирование компактной многолучевой ЭОС R-типа СВЧ усилителя W-диапазона с ускоряющим напряжением 10 кВ. В этой ЭОС оси парциальных электронных пушек расположены в одной плоскости и сходятся по радиусу окружности, на которой находятся центры катодов. Такое же расположение парциальных потоков было применено для 20-лучевой ЭОС R-типа с ускоряющим напряжением 2.7 кВ с пониженной плотностью токоотбора с катода.

Результаты расчётов

Была спроектирована 20-лучевая ЭОС с планарным расположением электронных потоков, параметры парциальных электронных пушек которой представлены в таблице 1. Амплитуда униполярного магнитного поля для фокусировки пучков составила 0.15 Тл (таблица 2).

Таблица 1. Параметры ЭОС	
Ток пучка, мА	70.0
Напряжение на ЗС, В	2700
Микропервеанс, мкА/В$^{3/2}$	0.025
Диаметр катода, мм	2.0
Диаметр канала, мм	1.0
Тип катода	импрегнированный
Плотность тока на катоде, А/см^2	2.23
Плотность тока в пучке, А/см^2	35.6
Компрессия пучка по площади без учета поперечных скоростей ($U_{\perp max}$ =0)	25
Компрессия пучка по площади с учетом поперечных скоростей ($U_{\perp max}$ =0.7В)	16

Таблица 2. Параметры МФС	
Амплитуда поля на оси, Тл	0.15
Период МПФС, мм	B_0=const
Параметр магнитного поля	B_0=const
Бриллюэновский радиус пучка a_p в МФС, мм	0.201
Заполнение канала пучком (R_p/R_{kan}) при $U_{\perp max}$ = 0 В	0.402
Средний радиус пучка в МФС R_p при $U_{\perp max}$ =0.7 В, мм	0.25
Заполнение канала пучком (a_p/R_{kan}) при $U_{\perp max}$ = 0.7 В	0.5

Магнитная фокусирующая система для рассматриваемой многолучевой ЭОС может быть образована кольцевыми магнитами с аксиальной и радиальной намагниченностью, вложенными друг в друга так, что их оси совпадают и перпендикулярны плоскости, на которой расположены оси парциальных пучков (рисунок 1).

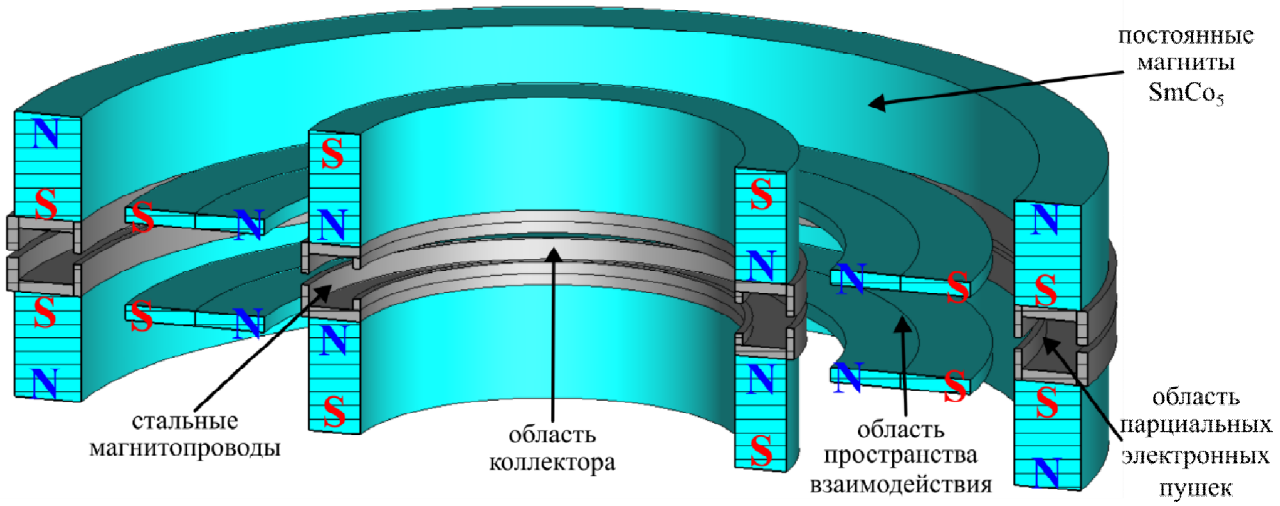


Рис. 1. МФС для многолучевой ЭОС

На рисунке 2 представлено распределение осевой компоненты индукции магнитного поля для парциальной ЭОС.

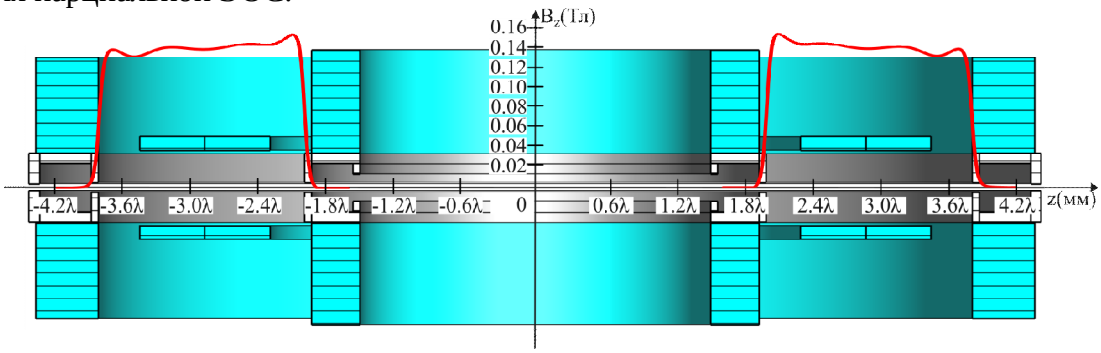


Рис. 2. Распределение магнитного поля вдоль оси парциальной ЭОС

Расчёт транспортировки парциального электронного потока в поле магнитной системы R-типа проведён с учётом влияния поперечных составляющих скоростей и представлен на рисунке 3. Заполнение электроноого потока в пролётном канале по всей длине пространства взаимодействия состаялет 0.55.

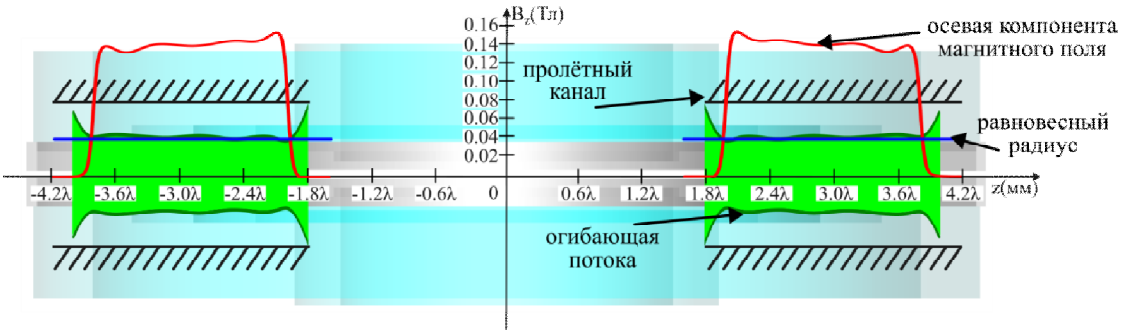


Рис. 3. Граница многоскоростного электронного потока в пролетном канале парциальной ЭОС вместе с профилем магнитного поля

Заключение

В работе рассмотрена новая конструкция низковольтной ЭОС с МФС на постоянных кольцевых магнитах с аксиальной и радиальной намагниченностью для фокусировки ЭП малогабаритного усилителя СВЧ Ku-диапазона. Предложенная конструкция МФС обеспечила одинаковую фокусировку ЭП в одной плоскости по азимуту и возможность существенного уменьшения плотности тока на катоде многолучевой электронной пушки.

Вес представленной магнитной системы R-типа с кольцевыми магнитами из материала SmCo5 вместе со стальными магнитопроводами составил 1.6 кг.

Анализ результатов транспортировки ЭП в МФС с амплитудой 0.15 Тл показал, что при ускоряющем напряжении 2.7 кВ и парциальном токе 70 мА (суммарный 1.26 А для 20 лучей) удаётся обеспечить прохождение ЭП в канале с заполнением, не превышающим 0.5.

Библиографический список

1. Закурдаев А.Д. Мощные малогабаритные и миниатюрные клистроны для бортовых РЛС. Этапы развития. Электронная техника. СВЧ техника. – 2003. – Вып. 2 (482). – С. 40-47.

2. Ильина Е.М., Кузьмин Ф.П., Морев С. П. Динамическая расфокусировка электронных потоков в мощных спиральных лампах бегущей волны с меняющимся по длине типом дисперсии // Радиотехника и электроника 2006. - Т. 51, № 7. – С.870-878.

3. Иванов А.А., Дармаев А.Н., Морев С.П. Разработка электронно-оптической системы для низковольтной лампы бегущей волны W-диапазона//Материалы XVI Междунар. зимней школы-семинара по радиофизике и электронике СВЧ, 2-7 февраля 2015, Саратов.

4. Иванов А.А. Увеличение КПД ЛБВ W-диапазона при неизменных энергетических параметрах электронного пучка//Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2024. С.151-154.

5. Голованов Н.А., Галдецкий А.В., Морев С.П. Магнитная фокусирующая система для многолучевого СВЧ усилителя W-диапазона // Сборник трудов конференции «VIII международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании «СТНО-2025»». Рязань, 4 – 6 марта, 2025. Т. 2, с. 36 – 39.

СЕКЦИЯ «ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА»

УДК 621.315.592: ГРНТИ 29.19.31

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕРАТИВНОГО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Ю.Д. Гудков, В.Г. Мишустин

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина, Российская Федерация, Рязань, gudlov4000@mail.ru

Аннотация. В работе представлены результаты моделирования оптического поглощения в полупроводниковой структуре на основе монокристаллического кремния с использованием нейросети «Perplexity». Результаты получены в среде компьютерного моделирования Maple.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, нейросеть, оптическое поглощение, монокристаллический кремний, гетероструктура a-Si:H/c-Si.

SIMULATION OF OPTICAL ABSORPTION IN SEMICONDUCTORS USING GENERATIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Yu.D. Gudkov, V.G. Mishustin

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkina, Russian Federation, Ryazan, gudlov4000@mail.ru

Abstract. The paper presents the results of modeling optical absorption in a semiconductor structure based on single-crystal silicon using the Perplexity neural network. The results were obtained in the Maple computer modeling environment.

Keywords: computer modeling, neural network, optical absorption, single-crystal silicon, a-Si:H/c-Si heterostructure.

Введение

Математическое моделирование процессов оптического поглощения в полупроводниках является важным инструментом при проектировании приборных структур и электронных компонентов. Это относится не только к фоточувствительным элементам и оптоэлектронным приборам [1], но и к полупроводниковым структурам вообще, поскольку оптическое поглощение используется при исследовании электрофизических свойств материалов и структур [2]. Сложности построения адекватной модели носят междисциплинарный характер и включают несколько аспектов:

- понимание фундаментальных механизмов процессов фотогенерации и рекомбинации носителей;
- решение связанных систем дифференциальных уравнений, описывающих распространение оптического излучения в твердом теле и кинетику носителей;
- учет дефектов структуры реальных полупроводниковых материалов и морфологии границ раздела в многослойных системах;
- калибровку теоретической модели на основе реальных экспериментальных данных.

Целью данной работы является разработка и калибровка математической модели оптического поглощения в двухслойной структуре на основе гетероперехода аморфный гидрогенизированный кремний – монокристаллический кремний (a-Si:H/c-Si), позволяющей с высокой степенью достоверности описать физические процессы в такой системе.

Подготовка к моделированию с применением технологии генеративного искусственного интеллекта

При моделировании были использованы данные о распределении мощности солнечного излучения [3], которое показано на рисунке 1. Интенсивность падающего монохроматического света в твердом теле в зависимости от глубины проникновения и длины волны описывается законом Бугера-Ламберта-Бера:

$$I(\lambda, x) = I_0 \cdot \exp(-\alpha(\lambda) \cdot x), \quad (1)$$

где $I(\lambda, x)$ – интенсивность прошедшего света с длиной волны λ на глубине x;

I_0 – интенсивность падающего света на поверхности образца;

$\alpha(\lambda)$ – коэффициент поглощения света на данной длины волны, который имеет характерную зависимость для каждого конкретного материала (рисунок 2) [4].

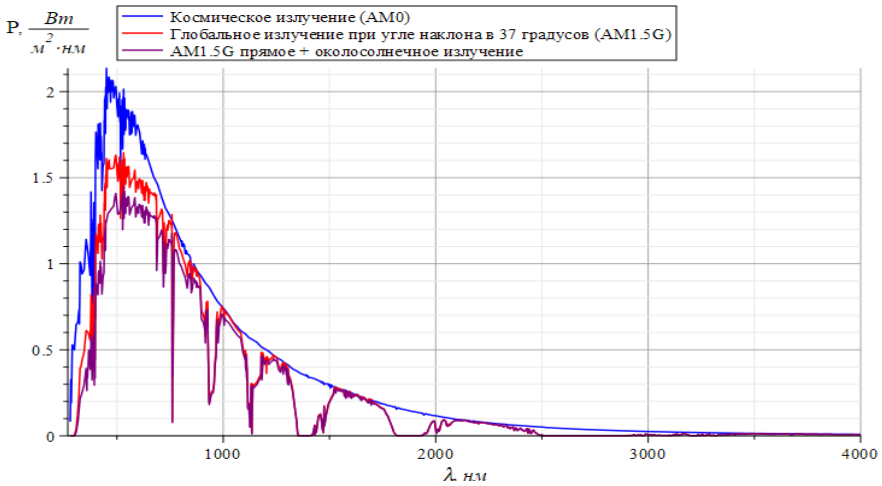


Рис. 1. Спектральная плотность мощности солнечного излучения [3]

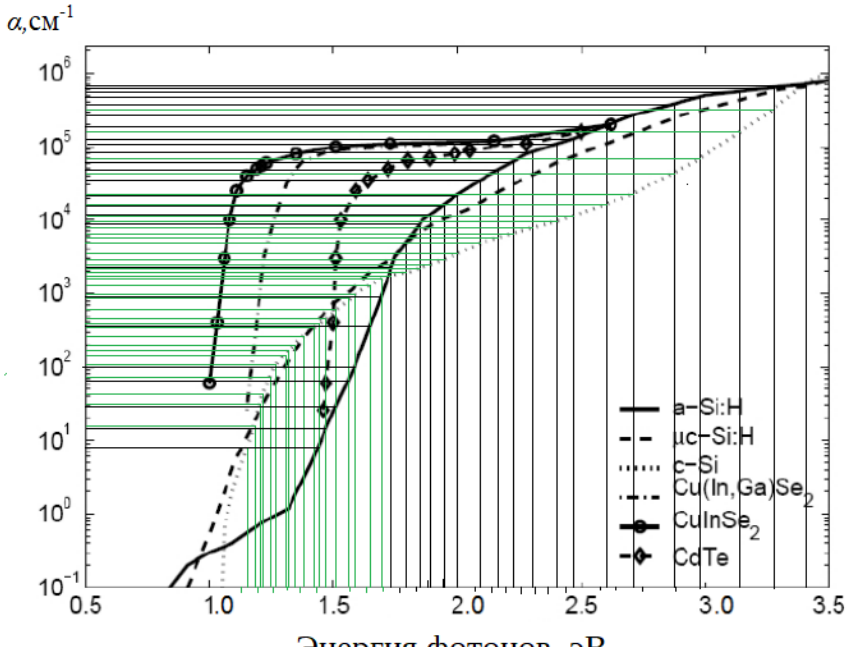


Рис. 2. Зависимость α(hν) для разных материалов [4]

Для моделирования физических процессов математические функции должны быть заданы в виде формулы, т.е. необходимо установить четкую и однозначную взаимосвязь между аргументом и значением функции. Для выполнения математических действий над функцией и решения задач прогнозирования аналитический способ является практически единственным пригодным при математическом моделировании.

Однако при аналитическом описании функции имеется следующая проблема. В литературных источниках, содержащих результаты экспериментальных исследований, информация представляется в виде графических зависимостей. Серьезную трудность представляет собой перенос информации из графической формы в табличную, которая является наиболее подходящей для аппроксимации и подбора соответствующей аналитической зависимости. Так, на рисунке 2 показано, как по экспериментальному графику устанавливалась зависимость оптического коэффициента поглощения от энергии падающих фотонов света для a-Si:H и c-Si в «ручном» режиме.

На рисунке 3 представлены результаты, полученные для коэффициента оптического поглощения в c-Si при «ручном» и «машинном» пересчете с экспериментального графика (рисунок 2). В первом случае из точек на экспериментальном графике опускались перпендикуляры на оси координат и определялись пары соответствующих значения α и λ. Результаты представлены в виде последовательности точек на координатной плоскости.

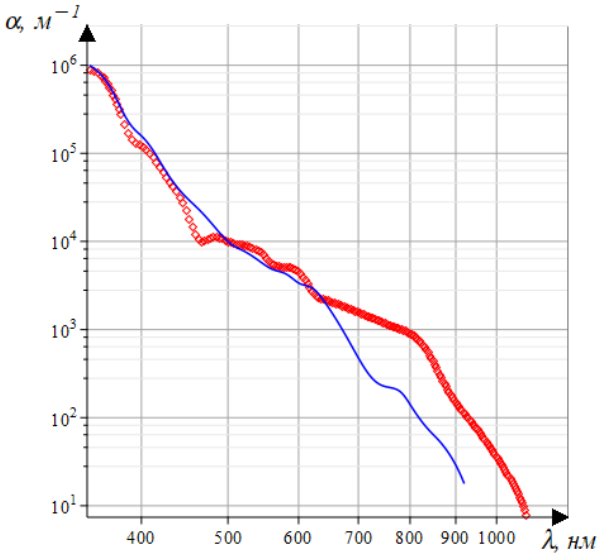


Рис. 3. Спектральная зависимость α(λ) для монокристаллического кремния: сплошная линия – аналитическая зависимость, построенная с помощью нейросети Perplexity; точки – кривая, построенная в «ручном» режиме [7]

При «машинной» обработке графика использовались возможности нейронной сети Perplexity [5], а значение коэффициента оптического поглощения рассчитывались в среде компьютерного моделирования Mapple [6] по следующей формуле:

$$\alpha(\lambda) = (2+a)\cdot 10^{2+b}\cdot\left(\frac{hc}{\lambda} - E_g\right)^{\frac{1}{2}c}. \qquad (2)$$

Здесь E_g – ширина запрещенной зоны (щели подвижности) полупроводника. Для согласования результатов математического моделирования с экспериментальными данными были введены подгоночные параметры a, b и c – безразмерные коэффициенты, полученные эмпирически. Их значения приведены в таблице 1 для каждого из материалов – a-Si:H и c-Si [7].

Таблица 1 – Значения эмпирических коэффициентов для a-Si:H и c-Si

Полупроводниковый материал	*a*	*b*	*c*	E_g, эВ
c-Si	3.60	2.00	4.00	1.12
a-Si:H	6.50	4.21	4.00	1.72

Результаты моделирования

При моделировании оптического поглощения в гетероструктуре a-Si:H/c-Si был проведен расчет коэффициента пропускания света в зависимости от координаты и длины волны падающего света:

$$T(\lambda, x) = \frac{I(\lambda, x)}{I(\lambda_{\max})} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где $I(\lambda_{\max})$ – интенсивность света, соответствующая максимальной спектральной мощности солнечного света на длине волны $\lambda_{\max}$ = 480 нм.

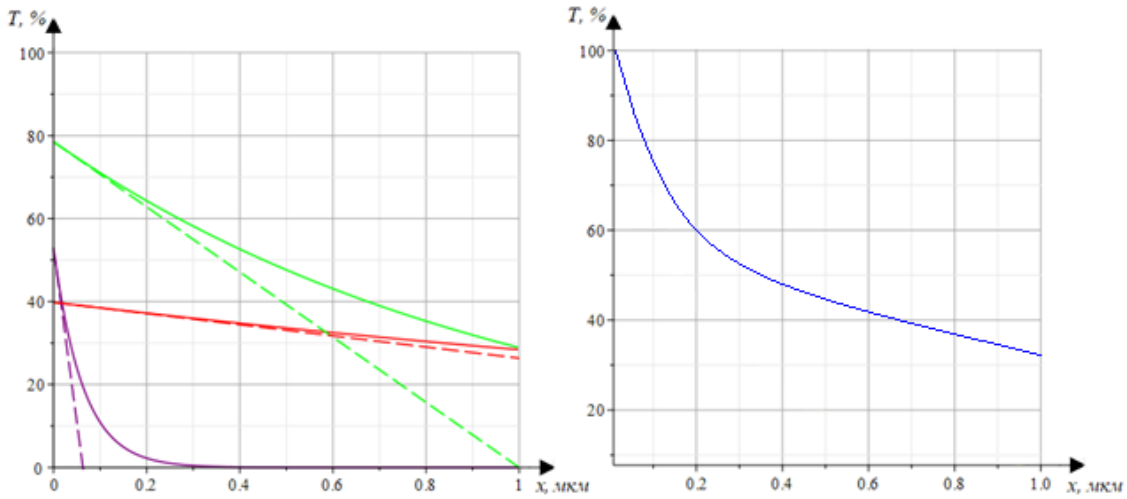
При моделировании были использованы следующие исходные данные:

- гетероструктура a-Si:H/c-Si сформирована путем плазмохимического осаждения в тлеющем разряде аморфного гидрогенизированного кремния на поверхность монокристаллического кремния;
- толщина пленки a-Si:H составляет 0,1 мкм.

Также были сделаны следующие допущения:

- не учитывался процесс переотражения на границе раздела слоев;
- свет падает на поверхность под углом, равным 90°;
- рассматривается процесс собственного поглощения.

Результаты моделирования оптического поглощения представлены на рисунке 4. При прохождении монохроматического света через монокристаллический кремний наиболее интенсивно поглощается коротковолновое излучение (рисунок 4, *а*). Так эффективная глубина поглощения для фиолетового (320 нм), зеленого (520 нм) и красного (670 нм) составляет 0,65 мкм, 0,9 мкм и 4 мкм соответственно. Оптическое поглощение «белого» света (AM1.5) определяется интегральным поглощением монохроматического света с соответствующей длиной волны из всего видимого спектра с учетом спектральной зависимости мощности излучения (рисунок 4, *б*).



а *б*

Рис. 4. Оптическое поглощение в монокристаллическом кремнии:
а – поглощение монохроматического излучения; б – поглощение «белого» света (AM1.5)

Заключение

Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод, что при облучении коротковолновым светом (λ = 320 нм) практически весь световой поток поглощается в тонком приповерхностном слое толщиной 0,1 – 0,2 мкм в зависимости от полупроводникового материала. Так в двухслойной структуре a-Si:H/c-Si коротковолновое излучение поглощается в a-Si:H и фактически не достигает c-Si. Это объясняется более высоким коэффициентом поглощения света в a-Si:H по сравнению с c-Si, а также наличием высокой плотности состояний на поверхности. Напротив, при длине волны λ = 670 нм большая часть излучения проходит тонкий слой a-Si:H практически без потерь и попадает в c-Si [7]. При освещении «белым» светом значительная часть светового потока поглощается в приповерхностной области, но за счет наличия длинноволнового излучения в спектре глубина проникновения оказывается порядка нескольких микрон. Зависимость интенсивности прошедшего света от глубины проникновения можно описать экспоненциальной функцией с переменной постоянной спада (рисунок 4, *б*).

Моделирование оптического поглощения на примере гетероструктуры a-Si:H/c-Si демонстрирует свою эффективность и достаточно хорошее совпадение с результатами реальных экспериментов. Тем не менее, для модели требуется «настройка» для конкретных материалов и структур, при этом существует риск, что модель, идеально описывающая одну конкретную структуру, будет полностью несостоятельна при попытке спрогнозировать характеристики другой, даже схожей системы. Таким образом, моделирование оптического поглощения в полупроводниковых материалах – это компромисс между физической точностью, вычислительной сложностью и инженерной целесообразностью, а результат моделирования – лишь прогноз, качество которого полностью зависит от адекватности выбранных моделей и точности исходных данных. Все это необходимо учитывать при проведении соответствующих расчетов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2025-0002) с использованием научного оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета имени В.Ф. Уткина.

Библиографический список

1. Полагин М.В., Мишустин В.Г. Развитие технологии фотоэлектрических преобразователей на основе неупорядоченных полупроводников // В сборнике: Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2025. Сборник трудов VIII Международного научно-технического форума: в 10 т. Т. 2. Рязань, Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2025. С. 164 - 167.

2. Вишняков Н.В., Гудков Ю.Д., Мишустин М.В. и др. Измерительный комплекс для исследования переходных процессов в барьерных структурах на основе неупорядоченных полупроводников // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: сб. тр. Междунар. конф., часть I. – М.: МИЭТ, 2025. С 39 - 40.

3. ASTM G173-03 Reference Spectra Derived from SMARTS v. 2.9.2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://rredc.nrel.gov/solar//spectra/am1.5/ASTMG173/ASTMG173.html (дата обращения: 20.02.2026).

4. H. M.Upadhyaya, T. M. Razykov, and A. N. Tiwari, Thin Film PV Technology, in CRC Handbook of Energy Conservation and Renewable Energy, edited by F. Kreith and D. Y. Goswami, CRC Press. 2007. 1560 p.

5. Электронный сервис Perplexity AI [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.perplexity.ai (дата обращения: 22.02.2026).

6. Система компьютерной алгебры Maple [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://basissoft.ru/map_product_maple.html (дата обращения: 24.02.2026).

7. Ю.Д. Гудков, В.Г. Мишустин Применение нейросетевых технологий при моделировании оптического поглощения в полупроводниковых структурах // Материалы XXX Всероссийской НТК студентов, молодых ученых и специалистов НИТ-2025. Том 2. Рязань. ИП Коняхин А.В. (Book Jet), 2025. С. 204 – 206.

УДК 620.3; ГРНТИ 29.19.22

ПОЛУЧЕНИЕ И ДИАГНОСТИКА МЕМБРАН ПОРИСТОГО АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Н.К. Званкович, А.М. Соколов, Е.Н. Муратова
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Российская Федерация, Санкт-Петербург, nikolayzvankovich@gmail.com

Аннотация. В работе рассматривается метод электрохимического травления для получения пористого анодного оксида алюминия (ПАОА). Представлены результаты синтеза серии образцов мембран ПАОА. Проведена диагностика полученных наноструктур методом растровой электронной (РЭМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ).
Ключевые слова: пористый анодный оксид алюминия, электрохимическое травление, наноструктуры, растровая электронная микроскопия, атомная силовая микроскопия самоорганизация.

SYNTHESIS AND DIAGNOSTICS OF NANOSTRUCTURED POROUS ANODIC ALUMINUM OXIDE

N.K. Zvankovich, A.M. Sokolov, E.N. Muratova
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Russia, Saint Petersburg, nikolayzvankovich@gmail.com

Abstract. This paper discusses the method of electrochemical etching for producing porous anodic alumina (PAA). The results of the synthesis of a series of PAA membranes are presented. Diagnostics of the obtained nanostructures was carried out using scanning electron microscopy (SEM) and atomic force microscopy (AFM).
Keywords: porous anodic alumina, electrochemical etching, nanostructures, scanning electron microscopy, atomic force microscopy, self-organization.

Пористый анодный оксид алюминия (ПАОА) является перспективным наноструктурированным материалом с упорядоченной системой нанопор. Морфология, механическая и химическая стабильность мембран позволяет их использовать в качестве нанореакторов для синтеза наноматериалов в сенсорике и катализе [1, 2]. Высокое отношение поверхности к объему, а также возможность управления размерами пор делают ПАОА востребованным в таких областях, как разделение газов и жидкостей, адресная доставка лекарств и наноэлектроника [3, 4].

Процесс анодирования является технологически простым и эффективным методом получения самоорганизованных структур. Технология электрохимического травления (ЭХТ) обладает рядом важных достоинств: высокой скоростью, низкой себестоимостью и ресурсозатратностью [5]. Ключевыми характеристиками, определяющими функциональные свойства таких мембран, являются геометрические параметры пористой структуры: диаметр пор, межпоровое расстояние и их упорядоченность [6,7].

Целью данной работы является синтез мембран пористого анодного оксида алюминия и исследование их поверхностной морфологии с использованием методов атомно-силовой микроскопии.

Физико-химические основы процесса анодного окисления алюминия

Анодное окисление – это электрохимический процесс, при котором алюминий, выступающий в роли анода в соответствующем электролите, окисляется с образованием на его поверхности оксидной пленки (Al_2O_3). Общая реакция может быть записана как:

$$2Al + 3H_2O \rightarrow Al_2O_3 + 6H^+ + 6e^-$$

В зависимости от электролита получаемая пленка может иметь тип барьерного или пористого оксида. Барьерный оксид образуется в нейтральных электролитах и не имеет пор.

Пористый оксид образуется в кислых электролитах, например, в щавелевой или серной кислотах.

Первоначальное расположение пор не является упорядоченным. Сначала на поверхности металла появляются отдельные ячейки в более энергетически выгодных местах. Однако по мере увеличения напряжения анодирования между уже имеющимися ячейками начинают образовываться новые, постепенно заполняя поверхность, что приводит к формированию гексагонально упорядоченных структур.

Методика эксперимента

Синтез пористого анодного оксида алюминия (ПАОА) был выполнен методом двухстадийного анодного окисления на вертикальной установке прижимного типа (рис. 1). В качестве исходного материала использовалась алюминиевая фольга толщиной 0,1 мм [8].

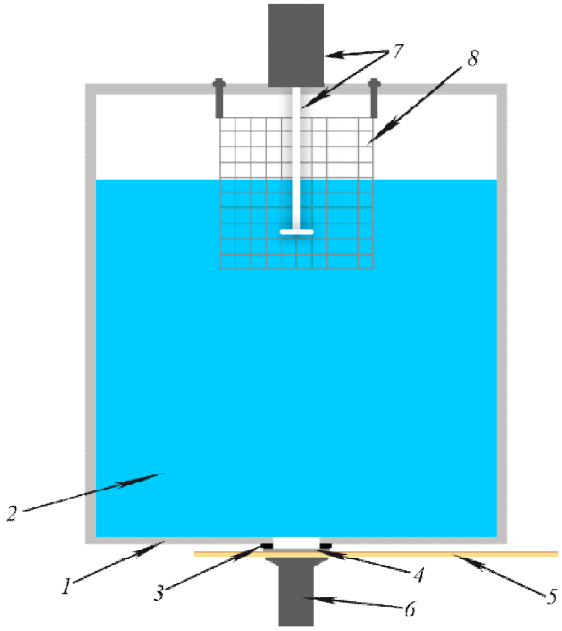


Рис. 1. Схема вертикальной электролитической ячейки прижимного типа: 1 – фторопластовая ванна; 2 – раствор электролита; 3 – резиновая прокладка; 4 – алюминиевая фольга; 5 – электрод – анод (медный); 6 –струбцина; 7 – электродвигатель с мешалкой; 8 – электрод – катод (алюминиевый)

Синтез мембран включал в себя несколько этапов. На начальном этапе производилась подготовка подложки – последовательная очистка в ацетоне, изопропиловом спирте и дистиллированной воде. Второй этап – анодирование алюминия в 0,3М растворе щавелевой кислоты ($C_2H_2O_4$) при постоянном напряжении от 90 до 100 В с ограничением величины тока в 0,2 А. Для обеспечения стабильности процесса использовалось активное перемешивание электролита. Установка предварительно охлаждалась в морозильной камере в течение 25 минут для поддержания низкой температуры во время травления. Длительность всего процесса анодирования варьировалась от 30 до 60 минут. Заключительный этап синтеза – удаление остаточного алюминиевого слоя с обратной стороны образца химическим травлением в пересыщенном водном растворе хлорида меди ($CuCl_2$).

Исследование морфологии полученных структур ПАОА проводилось с помощью растрового электронного и атомно-силового микроскопов.

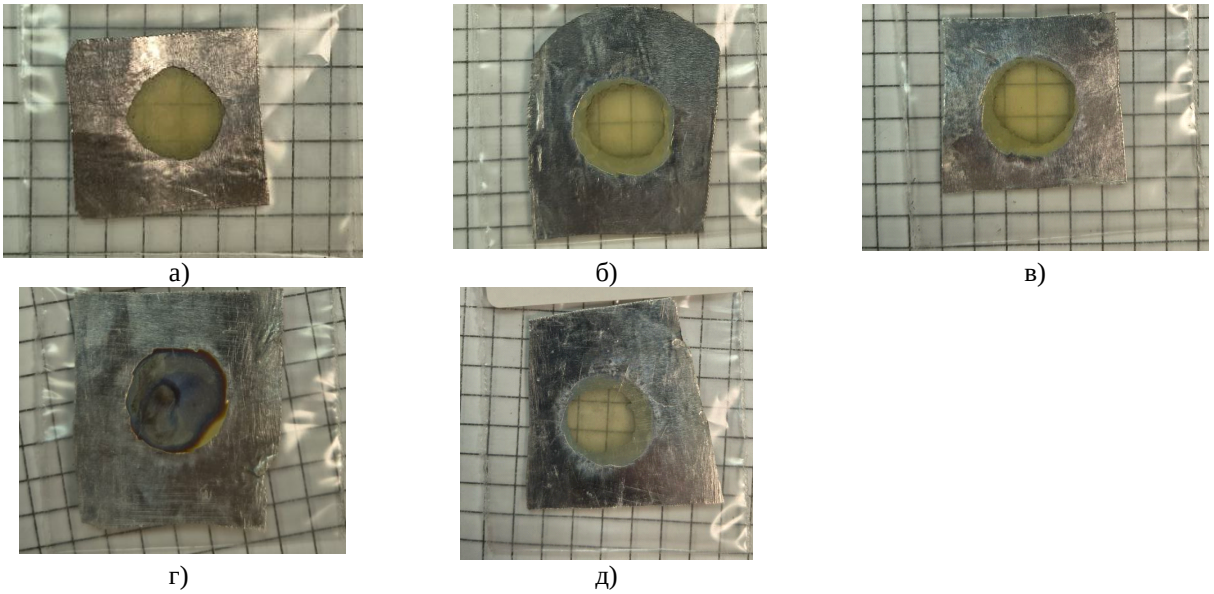
Результаты и их обсуждение

В результате синтеза была получена серия из шести образцов мембран ПАОА (рис. 2). Технологические условия получения образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Условия синтеза образцов ПАОА

Образец	t, мин	I, A	U, B
1	30	0,2	95
2	43	0,2	95
3	56	0,2	95
4	43	0,2	100
5	35	0,2	90

Изображения полученных мембран представлены на рисунке 2.

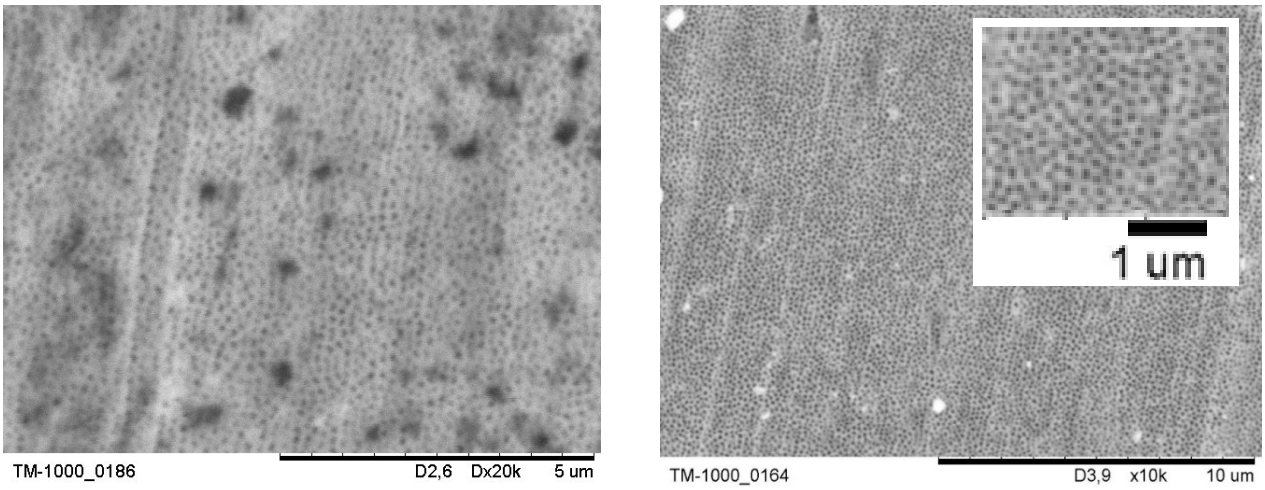


а) б) в)

г) д)

Рис. 2. Фотографии типичных образцов ПАОА, полученных в электролите на основе щавелевой кислоты при различных временах анодирования: а – 30мин, б – 43мин, в – 56 мин, г – 43 мин (100В), д – 35 мин

Методом растровой электронной и атомно-силовой микроскопии была исследована морфология поверхности. Результаты представлены на рисунках 3–4.



а) б)

Рис. 3. РЭМ изображения поверхности мембраны: а) образец №1; б) образец №2

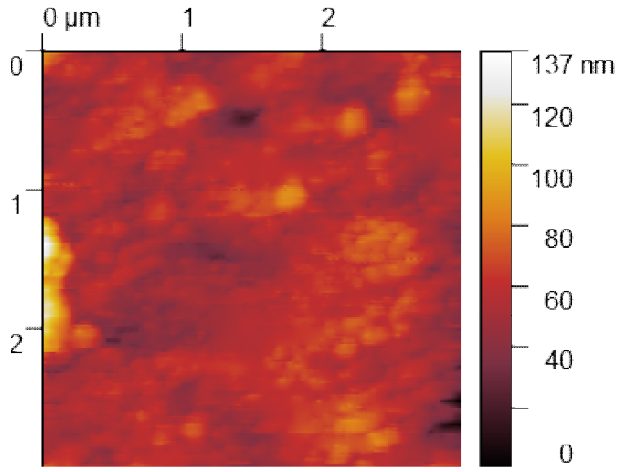


Рис. 4. АСМ изображения поверхности мембраны образца №1

На РЭМ изображениях полученных образцов видно, что на поверхности алюминия образовался упорядоченный пористый оксидный слой, с заметными линиями прокатки фольги. Диаметр полученных пор порядка 100 нм. На изображении, полученном с помощью АСМ видно, что образец №4 был поврежден в результате пробоя оксидного слоя при анодировании, вследствие высокого напряжения (100В). Изображения, полученные при помощи растрового электронного и атомно-силового микроскопа, подтверждают формирование нанопор.

Заключение

В ходе работы успешно проведён синтез мембран пористого анодного оксида алюминия методом электрохимического травления. Получена серия образцов при различных технологических параметрах. Анализ изображений показал наличие развитой пористой наноструктурированной поверхности с размерами пор в пределах 100 нм.

Библиографический список

1. Eessaa A. K., EL-Shamy A. M. Review on fabrication, characterization, and applications of porous anodic aluminum oxide films with tunable pore sizes for emerging technologies // Microelectronic Engineering. – 2023. – Т. 279. – С. 112061. – DOI: 10.1016/j.mee.2023.112061.

2. Manzoor S., Ashraf M. W., Shahzadi T., Tariq M. I., Hossain M. K. Recent Progress of Fabrication, Characterization, and Applications of Anodic Aluminum Oxide (AAO) Membrane: A Review // CMES – Computer Modeling in Engineering and Sciences. – 2023. – Т. 135, № 2. – С. 1007–1052. – DOI: 10.32604/cmes.2022.022093.

3. Соколов А.М., Никитин М.С., Муратова Е.Н. Получение и применение наноструктурированного пористого анодного оксида алюминия // XIII научно- практическая конференция с международным участием «наука настоящего и будущего» для студентов, аспирантов и молодых ученых. Санкт-Петербург.15 – 17 мая 2025, том 3, С185-189

4. Соколов А. М., Муратова Е. Н. Особенности формирования и области применения наноструктурированного пористого анодного оксида алюминия // Научно-практическая конференция «Гириконд Экспо», 6 октября 2025 г. в Санкт-Петербурге

5. Муратова Е.Н., Лучинин В.В., Мошников В.А., и др. Особенности формирования свободных наноразмерных пористых мембран оксида алюминия из фольги и новые области применения // Физика и химия стекла, 2017, Т.43, №2, С. 207-215.

6. Muratova E., Kozodaev D., Tyulagin P. Effect of Aluminum Foil Polishing on the Morphology of Membranes Based on Porous Anodic Aluminum Oxide // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 2025, P.1017-1019.

7. Muratova, E.N., Ponomareva, A.A., Shemukhin, A.A., Balakshin, Y.V., Evseev, A.P., Moshnikov, V.A., Zhilenkov, A.A., Kichigina, O.Y. The Influence of the Structural Parameters of Nanoporous Alumina Matrices on Optical Properties. Metals 2024, 14, 651. https://doi.org/10.3390/met14060651

8. Muratova E., Kozodaev D., Bobkov A., Mesh M., Moshnikov V. Technology of formation and new areas of application of composite metastructures based on aluminum oxide // The 15th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics. META 2025, MALAGA - SPAIN, JULY 22 – 25, 2025, pp. 1110

УДК 544.654.2; ГРНТИ 47.09.37

РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СПЛАВА Ni-W ДЛЯ МЭМС-ТЕХНОЛОГИЙ

Г.П. Гололобов, Р.Р. Бадыкшанова

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина, Российская Федерация, Рязань, gololobov.gennady@yandex.ru, radasovyonok@ya.ru

Аннотация. В работе рассматривается методика электрохимического осаждения покрытий на основе сплава Ni-W. Проведено исследование процесса осаждения из пирофосфатного электролита при различных режимах тока. Изменялись плотность тока и скважность следования импульсов. Изучена морфология поверхности покрытий. Проведен анализ содержания вольфрама в полученных покрытиях.

Ключевые слова: электроосаждение, сплав Ni-W, катодная плотность тока, микроэлектромеханические системы (МЭМС).

DEVELOPMENT OF COATINGS USING NI-W ALLOY FOR MEMS DEVICES

G.P. Gololobov, R.R. Badykshanova

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin, Russia, Ryazan, gololobov.gennady@yandex.ru, radasovyonok@ya.ru

Abstract. This paper discusses the principle of electrochemical deposition of coatings based on the Ni-W alloy. The deposition from a pyrophosphate electrolyte was studied under various current modes. The current density and pulse duty cycle were changed. The surface morphology was investigated. The tungsten content in the obtained coatings was analyzed.

Keywords: electrodeposition, Ni-W alloy, current density, microelectromechanical systems (MEMS).

Сфера применения покрытий сплавом Ni-W весьма обширна. Они используются в водородной энергетике, устройствах электронной техники и др. Покрытия данным сплавом более перспективны, чем хромовые покрытия, так как технология их получения более безопасна и менее энергозатратна. Сплав Ni-W обладает высокой износостойкостью, твердостью, стойкостью к электрической эрозии и хорошими электрофизическими свойствами при обычных и высоких температурах. Благодаря данным характеристикам он может широко применятся в микроэлектромеханических системах и устройствах, но технология его получения недостаточно отработана. Поэтому тема представленного исследования актуальна.

Теоретические сведения

Для получения покрытий сплавом Ni-W обычно используют цитратные электролиты. Но при их применении покрытия содержат углеродсодержащие органические примеси, так же снижается адгезия покрытия и уменьшается стабильность состава электролита. Для получения покрытий тугоплавкими металлами из электролитов на основе неорганических соединений могут быть использованы пирофосфатные электролиты. Преимуществами данных электролитов являются: стабильность, отсутствие анодного окисления лиганда, возможность получения покрытий с низкой шероховатостью, отсутствие примесей углерода в нанесенном покрытии.

В работе [1] указан следующий механизм осаждения сплава:

$$[Ni(P_2O_7)_2]^{6-} + OH^- \rightarrow {P_2O_7}^{4-} + [Ni(OH)(P_2O_7)_2]^{3-}_{\text{адс}} \quad (1)$$

$$[Ni(OH)(P_2O_7)_2]^{3-}_{\text{адс}} + e^- \rightarrow NiOH_{\text{адс}} + {P_2O_7}^{4-} \quad (2)$$

$$NiOH_{\text{адс}} + e^- \rightarrow Ni^0 + OH^- \quad (3)$$

$$NiOH_{\text{адс}} + {WO_4}^{2-} \rightarrow [WO_4(NiOH)]^{2-}_{\text{адс}} \quad (4)$$

$$[WO_4(NiOH)]^{2-}_{\text{адс}} + e^- \rightarrow [WO_4(Ni)]^{2-}_{\text{адс}} + OH^- \quad (5)$$

$$[WO_4(NiOH)]^{2-}_{\text{адс}} + e^- \rightarrow [WO_4(NiOH)]^{3-}_{\text{адс}} \quad (6)$$

$$[WO_4(Ni)]^{2-}_{\text{адс}} + 4H_2O + 6e^- \rightarrow W^0 + OH^- \quad (7)$$

В отсутствии ионов никеля при электроосаждении вольфрам не осаждается из вольфрамат-иона. Никель восстанавливается независимо, по реакциям 1-3. В присутствии вольфрамата часть промежуточных короткоживущих частиц $NiOH_{адс}$ химически взаимодействует с адсорбированными на поверхности ионами WO_4^{2-} с образованием кластерного гетерометаллического соединения с непосредственной связью Ni-W (реакция 4). Таким образом восстановление вольфрама начинается только тогда, когда достигаются условия образования промежуточной короткоживущей частицы восстановления никеля. Далее комплекс, содержащий соединение Ni-W, электрохимически восстанавливается по аналогии со второй реакцией.

Состав электролита и оборудование

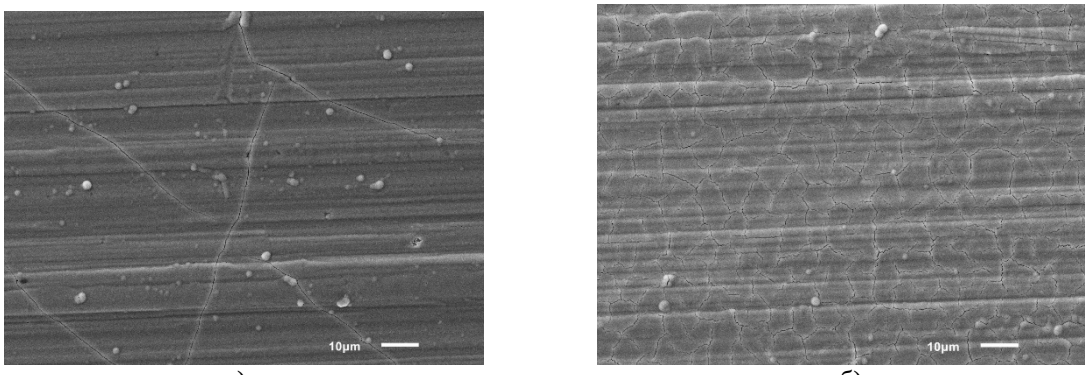
В работе использовался пирофосфатный электролит, содержащий 0,2М $NiSO_4$, 0,2МNa_2WO_4, 0,6М $K_4P_2O_7$, 0,15М $(NH_4)_2SO_4$. pH поддерживался равным 9,5, что обусловлено границами стабильности электролита. Объём электролита в экспериментах составлял 250 мл. Температура составляла 55±1 °C и поддерживалась постоянной с помощью электромагнитной мешалки с нагревом C-MAG HS 7 digital с системой обратной связи через датчик температуры PT 1000.

Получение экспериментальных образцов покрытий проводилось с помощью стандартной двухэлектродной ячейки. В качестве анода выступал платиновый электрод с площадью поверхности 4 см^2, в качестве катода – пластина из бескислородной меди марки Cu-DHP, размерами 1×2 см и толщиной 1 мм. Подложки подготавливались к экспериментам путем механической и химической обработки. Морфология поверхности и химический состав исследовалась с помощью растрового электронного микроскопа JSM-6610LV с рентгенофлуоресцентным энергодисперсионным детектором INCA X-MAX. Микротвердость покрытий исследовалась с помощью ПМТ-3М.

Плотность тока варьировалась в пределах 1-10 А/дм^2 . Период повторения импульсов составлял 100 мс. Исследовался режим постоянного и импульсного тока. Заданные значения параметров тока электроосаждения обеспечивались с помощью потенциостата IPC Pro 3A.

Экспериментальные данные

Типичные РЭМ-изображения, демонстрирующие морфологию поверхности синтезируемого сплава Ni-W в режиме постоянного тока представлены на рисунке 1. Плотность тока для образцов корректировалась в диапазоне от 1 А/дм^2 до 5 А/дм^2 (рисунок1 (а) и 1 (б)).

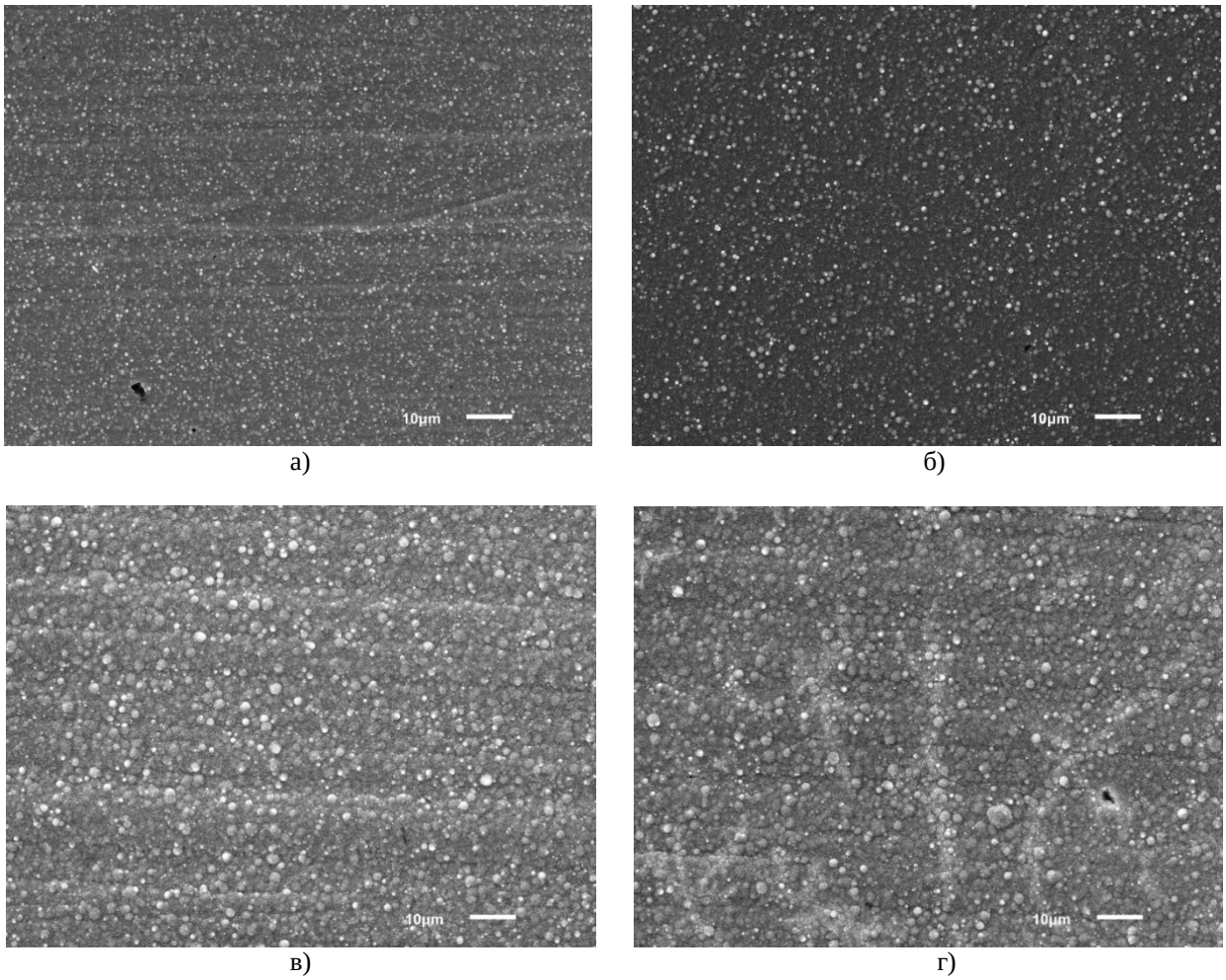


а) б)

Рис. 1. РЭМ - изображения поверхности образцов покрытия сплавом Ni-W, полученных при разных плотностях тока в режиме постоянного электролиза: (а) 1 А/дм^2, (б) 5 А/дм^2

Заметна плотная сеть микротрещин поверхности. Данный дефект может возникнуть от внутренних напряжений или от водородного охрупчивания. При формировании сетка трещин только в некоторых фрагментах совпадает с границами отдельных глобул. С увеличением плотности тока количество трещин увеличивается.

Далее проводилось изучение влияния катодной плотности тока на морфологические особенности поверхности. Изменение поверхностного рельефа при увеличении плотности тока представлено на рисунке 2.



а) б)

в) г)

Рис. 2. РЭМ-изображения поверхности образцов покрытия сплавом Ni-W, полученных в режиме импульсного тока при различной катодной плотности тока: (а) 1 А/дм^2; (б) 2 А/дм^2; (в) 5 А/дм^2; (г) 10 А/дм^2

С увеличением катодной плотности тока происходит увеличение латеральных размеров глобул и некоторое уменьшение их количества, что связано с локальным усилением поля и соответственно плотности тока на поверхности глобул, из-за чего наблюдается более быстрый их рост в областях с большей плотностью катодного тока. Заметное увеличение размеров глобул прекращается после достижения плотности тока значения 5 А/дм^2 (Рисунок 2, в и г).

На рисунке 3 представлена зависимость содержания вольфрама в сплаве при различных токовых режимах.

Более высокая концентрация вольфрама в покрытии обеспечивается в режиме импульсного электролиза (при плотности тока 3-10 А/дм^2) по сравнению с постоянным режимом. Уменьшение скважности приводит к росту концентрации вольфрама, и для данных ус-

ловий эксперимента максимальная его концентрация на уровне 8,2 ат.% обеспечивается при скважности 20% и катодной плотности тока 5А/дм^2.

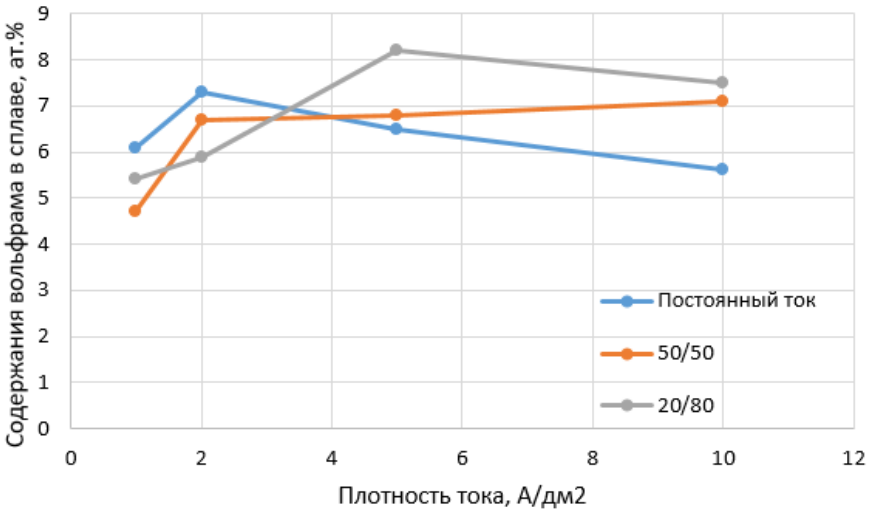


Рис. 3. Зависимость содержания вольфрама в сплаве от катодной плотности тока при различных режимах электролиза

Заключение

Исследования показали, что в процессе электрохимического осаждения бинарного сплава Ni-W из пирофосфатного электролита удается получить качественные покрытия с достаточно однородной и мелкокристалличной структурой сплава (размер кристаллитов 8-10 нм), с отсутствием побочных фаз. Поверхностный микрорельеф покрытий достаточно развит и имеет глобулярную структуру. Увеличение плотности тока с 1 А/дм2 до 5 А/дм2 приводит к увеличению размеров отдельных глобул и некоторому уменьшению их количества. В результате проведенного исследования установлено, что полученные покрытия отличаются равномерным микрорельефом и высокими значениями микротвердости в пределах 550-600 HV. Так же покрытия обладают хорошей электрпроводностью. Благодаря полученным характеристикам покрытия могут быть использованы для изготовления подвижных частей, датчиков и других компонентов микросистемной техники.

Библиографический список

1. Красиков А.В, Красиков В.Л Механизм электроосаждения сплава никель-вольфрам из пирофосфатного электролита. – Санкт-Петербург: Издательство технического университета, 2016. – 12-23 с.

2. N. Eliaz, T.M. Sridhar, E. Gileadi, Synthesis and characterization of nickel tungsten alloys by electrodeposition, Electrochim. Acta 50 (2005) 2893–2904.

3. Суворов Д.В., Гололобов Г.П., Тарабрин Д.Ю., Сливкин Е.В., Серпова М.А., Тыщенко М.С., Исследование электрохимичсеки осажденных покрытий на основе Ni-W – Вестник РГРТУ №66/2018.

4. M.H. Allahyarzadeh, M. Aliofkhazraei, A.R. Rezvanian, V. Torabinejad, A.R. Sabour Rouhaghdam, Ni-W electrodeposited coatings: Characterization, properties and applications, Surf. Coat. Technol. 307 (2016) 978–1010.

УДК 621.315.592; ГРНТИ 47.09.29

ДЕФЕКТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВ В КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ: ПРИРОДА, ВЛИЯНИЕ И СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ

Д.Р. Горячкин, В.Г. Литвинов

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

Аннотация. В работе рассмотрено комплексное воздействие ионизирующей радиации, глубокого вакуума, экстремальных температурных перепадов и микрогравитации приводит к образованию структурных дефектов в кристаллической решетке полупроводников. Также проводится анализ проблемы дефектов полупроводников в космосе. Рассматриваются физические основы возникновения дефектов, их классификация, механизмы воздействия на различные типы электронных компонентов. Особое внимание уделяется стратегиям радиационного упрочнения на уровнях материалов, технологий, проектирования и архитектуры систем. Описаны производственные дефекты и методы борьбы с ними.

Ключевые слова: космическая радиация, дефекты полупроводников, радиационная стойкость, суммарная ионизирующая доза, широкозонные полупроводники

SEMICONDUCTOR DEFECTS IN SPACE: NATURE, IMPACT, AND METHODS FOR ENSURING RELIABILITY

D.R. Goryachkin, V.G. Litvinov

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin, Russian Federation, Ryazan, flet.doo@yandex.ru

Abstract. This paper examines the combined effects of ionizing radiation, high vacuum, extreme temperature changes, and microgravity on the formation of structural defects in the crystal lattice of semiconductors. It also provides a comprehensive analysis of the problem of semiconductor defects in space. The physical basis for defect formation, their classification and the mechanisms by which they affect various types of electronic components are discussed. Particular attention is paid to radiation hardening strategies at the material, technological, design and system architecture levels. Manufacturing defects and methods for combating them are described.

Keywords: cosmic radiation, semiconductor defects, radiation hardness, total ionizing dose, wide-bandgap semiconductors

Введение

Полупроводниковые устройства являются фундаментом всех электронных систем космических аппаратов, обеспечивая навигацию, связь, обработку данных и управление. Однако их работа в космосе происходит в условиях, кардинально отличающихся от земных. Космическое пространство представляет собой динамичную и враждебную среду, где сочетаются несколько экстремальных факторов.

Интенсивная радиация включает галактические космические лучи (высокоэнергетические протоны, альфа-частицы и тяжелые ионы), солнечные космические лучи и частицы, захваченные в радиационных поясах Земли – поясах Ван Аллена [1], является главным источником деградации и отказов. Экстремальные температуры – колебания составляют от -150°C в тени до +120°C на солнце. Термоциклирование вызывает механические напряжения в материалах и соединениях [2]. Глубокий вакуум приводит к явлению газовыделения (аутгазингу) из материалов, что может загрязнять оптические поверхности и менять тепловые свойства [3]. Микрогравитация влияет на процессы, зависящие от конвекции (например, рост кристаллов), но в меньшей степени на работу готовых устройств.

Эти факторы, особенно радиация, вызывают образование дефектов в кристаллической структуре полупроводников. Актуальность проблемы многократно возросла в эпоху коммерциализации космоса (проекты Starlink, OneWeb) и планирования сложных межпланетных миссий (Artemis, исследования Юпитера и Сатурна), где надежность электроники является критическим условием успеха и безопасности [4].

Цель работы – провести системный анализ природы дефектов полупроводников в космосе, механизмов их воздействия на электронику и комплексных стратегий по минимизации связанных рисков.

1. Природа дефектов в полупроводниках

Полупроводники (например, Si, GaAs, SiC) обладают электрической проводимостью между проводниками и диэлектриками. Их ключевая характеристика – наличие запрещенной зоны. Проводимость контролируется легированием – введением примесей, создающих дополнительные энергетические уровни [1, 5].

Дефект – любое нарушение идеальной периодичности кристалла. Дефекты классифицируются по размерности. Точечные (нульмерные) дефекты: вакансии (отсутствие атома), межузельные атомы, примесные атомы являются первичным результатом радиационного воздействия, создают уровни в запрещенной зоне, действуя как центры рекомбинации или генерации носителей заряда [6]. Линейные (одномерные) дефекты – дислокации или сдвиги в кристаллической решетке часто образуются при агломерации точечных дефектов или из-за механических напряжений. Поверхностные (двумерные) дефекты: границы зерен, границы раздела фаз (например, Si/SiO_2) критичны для работы МОП-транзисторов [6]. Объемные (трехмерные) дефекты: скопления вакансий, поры, включения серьезно ухудшают электрические и механические свойства.

В земных условиях дефекты возникают в основном при производстве полкпроводниковых приборов. В космосе их образование ускоряется внешними факторами, прежде всего радиацией.

2. Космическая среда как причина возникновения дефектов

Космическая радиация имеет несколько компонентов. Это галактические космические лучи (ГКЛ): высокоэнергетические ядра атомов (протоны составляют примерно 87%, альфа-частицы ~12%, тяжелые ионы ~1%) источником которых являются, например, сверхновые звезды, обладают не самой высокой проникающей способностью [7, 8]. Также следует рассматривать солнечные космические лучи (СКЛ), состоящие из протонов и электронов, испускаемых Солнцем, особенно во время вспышек. Интенсивность вспышек варьируется с 11-летним циклом. Захваченные частицы от солнечного ветра в пределах околоземного пространства образуют радиационные пояса Ван Аллена. Потоки протонов образуют внутренний пояс, электроны – внешний пояс, создают зоны с экстремально высоким уровнем радиации, особенно на геостационарной и средневысотных орбитах [3, 9].

Радиация воздействует на полупроводники через два основных механизма. Первый механизм связан с ионизационными потерями энергии, когда частица выбивает электроны из атомных оболочек, создавая пары электрон-дырка. В диэлектриках (SiO_2) это приводит к накоплению заряда [10]. Второй механизм связан с неионизационными потерями энергии, когда происходит смещение атомов. В этом случае частица передает энергию ядру атома решетки, выбивая его с позиции. Образуется пара Френкеля (вакансия + межузельный атом), представляющая собой первичный точечный дефект [11].

Радиационные эффекты характеризуются суммарной ионизирующей дозой (Total Ionizing Dose, TID). Воздействие радиации обладает накопительным эффектом от многократных актов ионизации в течение миссии. В МОП-транзисторах возникают пары электрон-дырка в подзатворном диэлектрике. Дырки захватываются на дефекты – глубокие центры, представляющие собой энергетические ловушки, создавая положительный объемный заряд. Одновременно на границе раздела Si/SiO_2 растет плотность состояний. Это приводит к сдвигу порогового напряжения, увеличению токов утечки, снижению подвижности носителей в канале, деградации усиления.

Еще одна важная характеристика – одиночные события (Single Event Effects, SEE), например такие, как мгновенный эффект от прохождения одной высокоэнергетической частицы (тяжелого иона или протона) через чувствительный узел прибора. Основные типы одиночных событий:

1) “Single Event Upset” (SEU) означает "переворот" бита в ячейке памяти или регистре и представляет собой обратимый сбой, исправляемый перезаписью или кодами коррекции ошибок (ECC);

2) “Single Event Latch-up” (SEL) приводит к активации паразитной тиристорной структуры и к короткому замыканию между шинами питания и разрушительному перегреву, вследствие чего требуется отключения питания системы;

3) “Single Event Burnout” (SEB) / “Single Event Gate Rupture” (SEGR) представляют собой катастрофические пробои в силовых приборах MOSFET и IGBT и к необратимому разрушению.

Еще одна характеристика воздействия радиации – это повреждения от смещения атомов (Displacement Damage, DD). При этом происходит увеличение концентрации точечных дефектов (вакансий, межузельных атомов) и их комплексов в результате неионизационных потерь энергии. Выбитые из узлов кристаллической решетки атомы создают глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне, которые действуют как центры рекомбинации, сокращая время жизни неосновных носителей заряда. Такие дефекты наиболее критичны для оптоэлектронных приборов и солнечных батарей, поскольку происходит снижение эффективности фотопреобразования, рост темнового тока, деградация коэффициента усиления биполярных транзисторов, квантового выхода излучения. Подобные явления, например, привели к постепенной деградации КПД солнечных батарей телескопа Hubble на 1-2% в год [11].

Дефекты, индуцированные космической средой, напрямую являются причиной функциональных сбоев и отказов аппаратуры [5, 10, 12]. SEU в цифровых интегральных схемах (микропроцессорах, памяти) приводят к ошибкам в данных и сбоям программ. SEL может вызвать полный отказ узла. TID вызывает утечку мощности и дрейф порогов срабатывания логических элементов. TID и DD в аналоговых и силовых устройствах приводят к дрейфу ключевых параметров усиления, смещения, сопротивления канала, увеличивая погрешности измерений и снижая эффективность. DD является основной причиной постепенного (до 20-30% за миссию) снижения выходной мощности солнечных элементов из-за увеличения рекомбинации в базовой области фотоэлементов. Дефекты в датчиках и оптоэлектронных приборах (ПЗС-матрицах, фотодетекторах) становятся центрами генерации темнового тока, резко увеличивая шум и снижая чувствительность и разрешающую способность.

3. Способы и методы защиты полупроводниковых приборов от повышенного дефектообразования

Борьба с дефектами ведется на всех этапах жизненного цикла космической электроники. Увеличение стойкости к дефектообразованию проводится на уровне материалов и технологии, например за счет использования широкозонных полупроводников SiC и GaN вместо Si. Более высокая энергия связи атомов в решетке повышает стойкость к смещениям (DD). SiC выдерживает дозы на 2 порядка выше кремниях [10, 13].

Также используются специальные технологические процессы, например технология «Кремний на изоляторе (SOI)», в которой изоляция активных транзисторов от подложки устраняет паразитные структуры, резко снижая чувствительность к событиям SEL. Использование тонких оксидов затвора приводит к уменьшению объема для накопления заряда (TID). Специальное легирование окисла путем введения азота или алюминия используется для подавления миграции дырок.

Упрочнение схемотехническим проектированием осуществляется за счет использования избыточности. Тройное модульное резервирование (TMR) используется для логических схем, а коды коррекции ошибок (ECC) применяются для устройств памяти. Специальные схемотехнические решения, такие как DICE-ячейки памяти, повышают стойкость к событиям SEU, схемы детектирования и сброса защелкивания повышают стойкость к событиям SEL. Консервативное проектирование подразумевает работу компонентов с запасом 50% и более по напряжению, току и мощности [14].

Конструктивные методы связаны с использованием экранирования, когда применяются локальные экраны из материалов с высоким атомным номером (тантал, вольфрам) для ослабления потока частиц. Такая мера защиты эффективна в основном против электронов и протонов низких энергий.

Системные методы связаны с осуществлением функционального мониторинга и реконфигурации, когда применяются архитектуры, способные обнаруживать сбои и переключаться на резервные модули.

Программные методы связаны с периодической перезагрузкой, очисткой памяти, алгоритмической коррекцией.

Тестирование и верификация осуществляются при наземном моделировании, когда проводятся испытания на ускорителях протонов, тяжелых ионов для оценки стойкости к событиям SEE и DD, проводится облучение гамма-квантами для тестирования на TID.

Комбинированные испытания поподразумевают совместное воздействие на систему радиации, температуры, вибрации и вакуума.

4. Примеры из практики космических миссий и исследований

Один из первых задокументированных случаев радиационного отказа связан со спутником Telstar 1 в 1962 г. Спутник попал в усиленный радиационный пояс после ядерных испытаний. Накопленная TID привела к деградации кремниевых транзисторов и потере спутника, что подстегнуло развитие радиационной защиты [2, 7].

Эксперименты по росту кристаллов GeSe и GeTe на орбитальной станции Skylab в 1973-1974 гг. показали, что в условиях микрогравитации можно получать материалы с существенно меньшей плотностью дислокаций и более однородным распределением примесей, заложив основы для идеи орбитального производства [15].

Долгосрочные эффекты воздействия радиации проявились в космической обсерватории Hubble Space Telescope, запущенной в космос в 1990 г. Детекторы на основе ПЗС (CCD) и солнечные батареи на GaAs подвергались многолетнему воздействию радиации. Накопленные DD-дефекты привели к устойчивому росту темнового тока в CCD и снижению эффективности солнечных панелей, что потребовало их замены в сервисных миссиях [7, 11].

Экстремальные условия были во время космических путешествий к Юпитеру. Радиационные пояса Юпитера в тысячи раз интенсивнее земных. Миссия Juno столкнулась с проблемами TID-дрейфа и SEE, потребовавшими применения радиационно-стойкого процессора RAD750 и специальных методов защиты. Для Europa Clipper проблема TID в транзисторах стала одной из ключевых инженерных задач, решаемой комбинацией материалов с использованием SiC, схемотехнических решений [8, 16].

На китайском спутнике Shijian-19, запущенном на орбиту Земли в 2024 г. был выполнен эксперимент по тестированию 2D-структур на основе WSe_2, который в кратковременном орбитальном полете показал их высокую стойкость к радиации. Деградация характеристик полевых транзисторов на основе WSe_2 была минимальной, подтвердив высокий потенциал 2D-материалов для космоса [9, 10, 16].

5. Производственные дефекты электронных компонентов и плат для космических аппаратов

Надежность космической электроники определяется не только стойкостью к эксплуатационным воздействиям, но и отсутствием дефектов, закладываемых при производстве [4, 14].

Ключевые типы производственных дефектов:

1) дефекты материалов проявляются при использовании полимеров со склонностью к газовыделению в вакууме, что загрязняет оптику и сенсоры, в виде роста "оловянных усов" из бессвинцовых покрытий, приводящего к коротким замыканиям [4];

2) дефекты кристаллов – дислокации, границы зерен, микропоры в материалах типа SiC, возникающие при выращивании, становятся концентраторами напряжений и центрами ускоренной деградации при радиационном воздействии;

3) дефекты сборки и пайки в виде "холодной" пайки, пустот в паяных соединениях, образования хрупких интерметаллидов приводят к тому, что в условиях термоциклирования в космосе происходит образование трещин и обрыв контактов [11];

4) латентные дефекты выглядят как повреждение от электростатического разряда при сборке, микротрещины в керамических корпусах, проявляются только в условиях эксплуатационных нагрузок.

Для контроля производственных дефектов используется жесткая регламентация материалов в виде запрета на чистое олово, требования к низкому газовыделению, использования сертифицированных припоев и корпусов приборов. Для уменьшения количества производственных дефектов используются специализированные процессы, такие, как вакуумная пайка, рентгеновский контроль паяных соединений.

В конце проводятся термоциклирование в расширенном диапазоне, вибро- и ударные испытания, испытания в термовакуумной камере. Проводится проверка соблюдения требований стандартов высокого класса надежности.

6. Будущие технические решения

Для повышения надежности и радиационной стойкости полупроводниковых приборов будет расширяться использование новые материалов – широкозонных полупроводников (GaN, SiC, Ga_2O_3) и 2D-материалов (MoS_2, WSe_2). Использование квантовых технологий – квантовых компьютеров, сенсоров сдерживается из-за их крайней чувствительности к дефектам, что требует разработки принципиально новых методов защиты от SEE и DD. Орбитальное производство будет представлено в виде выращивания полупроводниковых кристаллов и 3D-печати электронных компонентов на МКС или орбитальных фабриках в условиях микрогравитации для получения структур с минимальным числом дефектов.

Использование машинного обучения для анализа больших данных по радиационным эффектам и искусственного интеллекта позволит точнее моделировать деградацию и прогнозировать отказы.:

Разработка адаптивных и самовосстанавливающихся электронных систем позволит диагностировать повреждения, перестраивать свою архитектуру и даже "залечивать" некоторые типы дефектов с помощью встроенных процедур (например, электрического или термического отжига) [13].

Заключение

Дефекты полупроводников, индуцированные космической средой, остаются одной из центральных проблем надежности космической техники. Понимание физики процессов от эффектов суммарной дозы и одиночных событий, повреждений от смещения атомов лежит в

основе проектирования надежных систем. Борьба с дефектами носит комплексный характер, сочетая технологическое упрочнение, схемотехническое и архитектурное проектирование, а также жесткий производственный контроль. Опыт прошлых миссий и текущие исследования показывают, что, несмотря на растущую сложность электроники и ужесточение условий миссий, арсенал средств защиты продолжает развиваться. Будущее космической электроники связано с переходом к новым материалам, интеллектуальным самовосстанавливающимся архитектурам и, возможно, орбитальному производству, что в совокупности откроет путь к надежному освоению Луны, Марса и дальнего космоса.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2025-0002).

Библиографический список

1. Barnaby, H. J. Total-ionizing-dose effects in modern CMOS technologies // IEEE Transactions on Nuclear Science. V.53. No.6. 2006. P.3103-3121.

2. European Space Agency. Radiation: satellites' unseen enemy. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.esa.int (дата обращения: 20.02.2026).

3. National Academies Press. The Space Radiation Environment and Its Effect on Electronics. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.nationalacademies.org (дата обращения: 20.02.2026).

4. Sinclair D., Dyer J. Radiation Effects and COTS Parts in SmallSats// 27th Annual AIAA//USU Conferense of Small Satellites. 2013. SSC13-IV-3.

5. Johnston A.H. Radiation effects in advanced microelectronics technologies. IEEE Transactions on Nuclear Science, V.57. No.4. 2010. P.1674-1695.

6. Schwank J.R., Shaneyfelt M.R., Fleetwood D.M., Dodd P.E., Paillet P., Felix J.A. Radiation effects in MOS oxides//IEEE Transactions on Nuclear Science. V.55. No.4. 2008. P.1833-1853.

7. NASA Technical Reports Server. (1999). Space Radiation and Its Effects on Electronic Systems. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ntrs.nasa.gov (дата обращения: 20.02.2026).

8. Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory. (n.d.). Harsh Environments: Space Radiation Environment, Effects, and Mitigation. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.jhuapl.edu (дата обращения: 20.02.2026).

9. Jun I., Garrett H., Kim W. et al. A review on radiation environment pathways to impacts: Radiation effects, relevant empirical environment models, and future needs // Advances in Space Research. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.03.079 (дата обращения: 20.02.2026).

10. Aguiar V.A.P., Alberton S.G., Pereira M.S. Radiation-Induced Effects on Semiconductor Devices: A Brief Review on Single-Event Effects, Their Dynamics, and Reliability Impacts// Chips. V.4. No. 12. 2025. P.1-29.

11. Johnston A.H. Radiation Damage of Electronic and Optoelectronic Devices in Space. // 4th International Workshop on Radiation Effects on Semiconductor Devices for Space Application, Tsukuba, Japan, October 11-13, 2000. P.1-9.

12. Yanru Ren, Shengao Wang, Dongyu Xu, Minghui Liu, Xuehui Dai, Min Zhu, Longxian Li. Overview on Radiation Damage Effects and Protection Techniques in Microelectronic Devices. // Science and Technology of Nuclear Installations. 2024. V.1. P.1-17.

13. Sexton F.W. Destructive Single-Event Effects in Semiconductor Devices and ICs // IEEE Transactions on nuclear science. V.50. No.3. 2003. P.603-621.

14. Radiation Test Solutions. Why Radiation Matters in Aerospace [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://radiationtestsolutions.com (дата обращения: 20.02.2026).

15. National Academies Press. The Space Radiation Environment and Its Effect on Electronics. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.nationalacademies.org (дата обращения: 20.02.2026).

16. Kim Horner. Semiconductor expert: How radiation in space affects transistors. October 16, 2024. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://phys.org/news/2024-10-semiconductor-expert-space-affects-transistors.html(дата обращения: 20.02.2026).

УДК 621.315.592; ГРНТИ 47.33.29, 29.03.39

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ БАРЬЕРНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЯХ СМЕЩЕНИЯ

Д.В. Литвинова[1], В.Г. Литвинов[2]

[1]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Российская Федерация, Санкт-Петербург, dv_lit@mail.ru

[2]Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина, Российская Федерация, Рязань, vglit@yandex.ru

Аннотация. В работе рассматривается задача создания макета измерительной установки для получения вольт-фарадной характеристики полупроводниковой диодной структуры при напряжении смещения до 1500 В с использованием стандартных измерительных приборов.
Ключевые слова: полупроводники, высоковольтный диод, вольт-фарадная характеристика.

SETUP FOR MEASURING THE ELECTRIC CAPACITY OF A SEMICONDUCTOR BARRIER STRUCTURE AT HIGH BIAS VOLTAGES

D.V. Litvinova1, V.G. Litvinov2

[1]Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia, St.Petersburg, dv_lit@mail.ru

[2]Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin, Russia, Ryazan, vglit@yandex.ru

The summary. This paper examines the development of a measuring setup for obtaining the capacitance-voltage characteristic of a semiconductor diode structure at bias voltages up to 1500 V using standard measuring instruments.
Keywords: semiconductors, high-voltage diode, C-V characteristic.

Высоковольтные полупроводниковые диоды используются для построения большого количества радиотехнических устройств, систем, применяемым в быту и в электрохозяйстве в целом. К важнейшей характеристике полупроводниковых диодов относится его вольт-фарадная характеристика и ее зависимость от частоты переменных электрических сигналов, температуры. Согласно государственному стандарту [1] рекомендуется использовать следующие способы измерения вольт-фарадной характеристики полупроводникового диода.

1) Метод емкостно-омического делителя – простой в реализации и не требующий использования дорогостоящих приборов метод. К недостаткам можно отнести ограничение по минимальной величине измеряемой электрической емкости около 1 пФ. Для измерения меньших величин емкости необходимо использовать специализированную измерительную ячейку и принимать меры по компенсации паразитных активных и реактивных сопротивлений.

2) Мостовой метод также отличается простотой практической реализации. К недостаткам следует отнести существенные временные затраты без использования автоматизации процесса уравновешивания моста при изменении барьерной емкости вследствие изменения напряжения смещения на диоде. Автоматизация измерений достигается использованием прецизионного измерителя иммитанса.

3) Частотный метод измерения – основан на изменении частоты колебаний резонансного контура при подключении к нему исследуемого диода. Недостатком является использование приближения о независимости электрической барьерной емкости от частоты переменного сигнала.

Наиболее прецизионное измерение частотной и температурной зависимости вольт-фарадных (C-V) характеристик на сегодняшний день осуществляется с помощью RLC-метров, например Е7-20 (МНИПИ), Keysight (Agilent) E4980A, обеспечивающий изменение частоты тестового измерительного сигнала от 20 Гц до 2 МГц. Измеритель Е7-20 позволяет

подсоединять внешний регулируемый источник постоянного напряжения до 120 В, а измеритель E4980A опционально имеет встроенный регулируемый источник от – 40 до +40В. Таким образом, указанные приборы не предназначены для измерения иммитанса высоковольтных электронных приборов.

В настоящее время происходит интенсивное развитие высоковольтной полупроводниковой электронной базы для создания радиоэлектронной аппаратуры с более высокими качественными характеристиками. В связи с этим **актуальной задачей** является разработка новых и совершенствование существующих методик контроля параметров и характеристик полупроводниковых структур и элементов при напряжении до 1 кВ и более.

В данной работе был создан макет установки, позволяющей проводить измерение C-V характеристик полупроводниковых диодов при обратном напряжении смещения до 1500 В. Для предотвращения выхода из строя RLC-метра из-за попадания в его измерительные цепи высокого напряжения была разработана схема подключения исследуемого диода с емкостной развязкой (рис. 1).

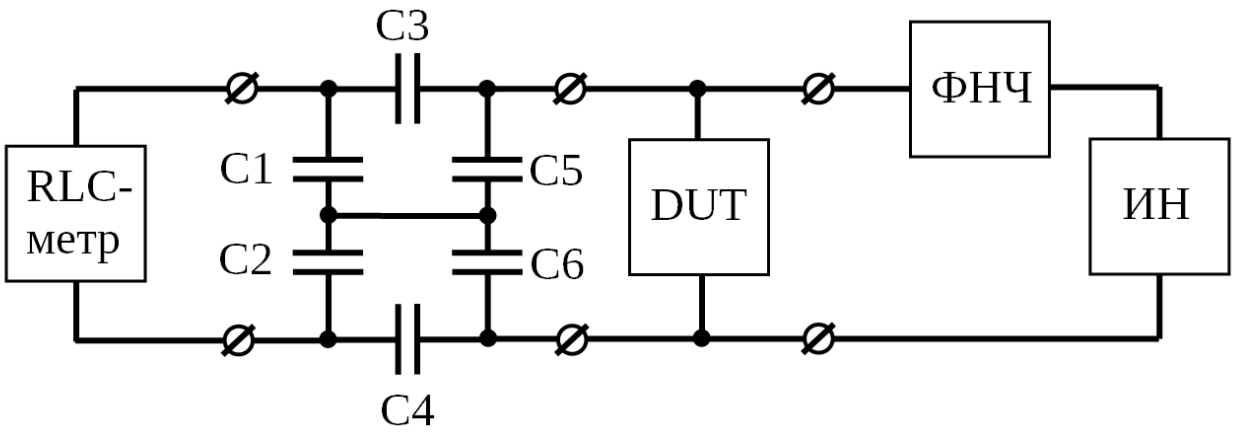


Рис. 1. Схема установки для измерения C-V характеристики высоковольтного полупроводникового диода.

В данной установке в качестве RLC-метра использовался измеритель иммитанса Е7-20, DUT (Device Under Test) – исследуемый диод, ИН – регулируемый источник постоянного напряжения до 1500 В, в качестве которого был использован Измеритель параметров полупроводниковых приборов Л2-56, ФНЧ – фильтр низких частот отсекает тестовый высокочастотный измерительный сигнал от RLC-метра. Конденсаторы $C1$ – $C6$ керамические, высоковольтные, например, К15-У1 подобраны таким образом, что $C1 = C2$, $C3 = C4$, $C5 = C6$. В этом случае RLC-метром измеряется общая емкость C_X. Тогда после преобразований электрическую барьерную емкость $C0$ исследуемого диода можно вычислить из выражения:

$$C0 = \frac{\left(C_X - \frac{C1}{2}\right)\frac{C3+C5}{2} - \frac{C3C5}{4}}{\frac{C1+C3}{2} - C_X}.$$

Измеряемая емкость C_X связана с емкостью $C0$ следующим образом:

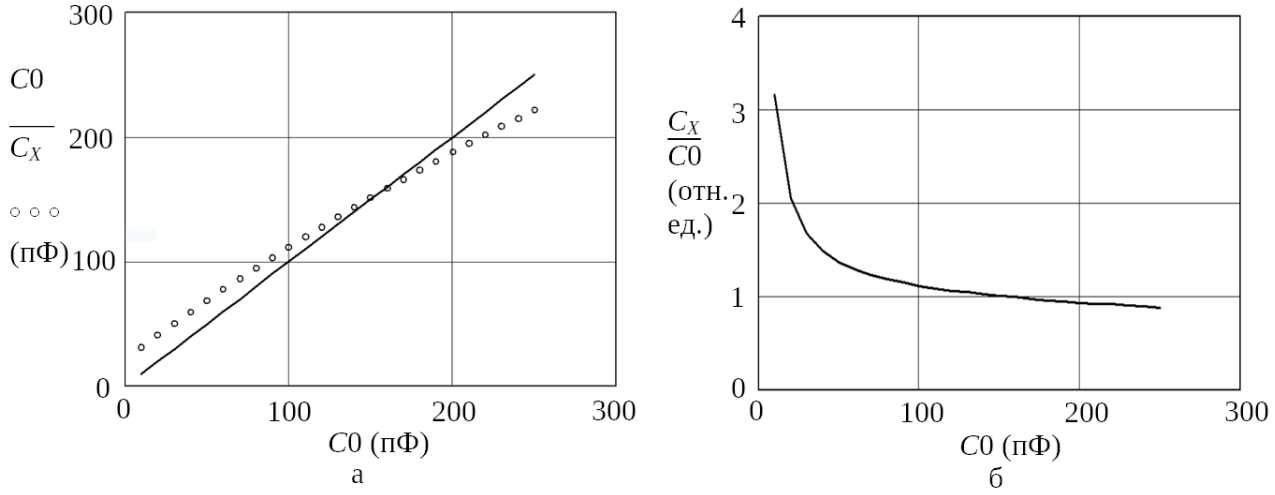
$$C_X = \frac{C1}{2} + \frac{C3\left(C0 + \frac{C5}{2}\right)}{2C0 + C3 + C5}.$$

Можно также использовать четыре одинаковых конденсатора $C1 = C2 = C5 = C6$. Конденсаторы $C1 – C6$ образуют емкостной делитель, который убирает постоянную составляющую напряжения на измеряемом диоде с барьерной емкостью $C0$ с входной измерительной цепи RLC-метра. Приборы также должны иметь гальваническую развязку от сети переменного тока. Основное требование к конденсаторам – минимальная зависимость электрической емкости от частоты f в диапазоне 1 кГц – 2 МГц, которую при необходимости можно учесть в расчетах емкости C_0, измерив зависимость $C(f)$ для каждого используемого в схеме конденсатора. Чтобы величина измеряемой емкости C_X была близка к емкости $C0$ исследуемого диода емкости конденсаторов $C1$, $C2$, $C5$, $C6$ выбираются величиной не более $10 \cdot C0$, а емкость конденсаторов $C3$, $C4$ рекомендуется выбирать не менее $10 \cdot C0$.

Электрическая барьерная емкость полупроводникового диода (диода Шоттки или диода на основе p-n-перехода) зависит от напряжения как [2]:

$$C(U) \approx \frac{const}{\sqrt[n]{U}},$$

где величина n обычно лежит в пределах от 2 до 3 в зависимости от особенностей распределения легирующих примесей в полупроводнике. Барьерная емкость диода может уменьшаться в несколько раз при изменении напряжения смещения от 0 В до максимального обратного напряжения, поэтому для уменьшения погрешности измерений желательно, чтобы измеряемая емкость C_X была близка по порядку величины к емкости исследуемого диода. На рисунке 2 представлены результаты расчета емкости C_X в зависимости от емкости диода C0 в диапазоне от 10 до 250 пФ при $C1 = C2 = C5 = C6 = 22$ пФ и $C3 = C4 = 2200$ пФ.



Рису. 2. Результаты расчетов: а – зависимость измеряемой RLC-метром емкости C_X от емкости диода $C0$; б – зависимость соотношения емкостей $C_X/C0$ от емкости диода $C0$.

На рисунке 2*а* показано, насколько велико отклонение емкостей $C0$ и C_X, а на рисунке 2*б* видно относительное различие данных емкостей. При величине C0 до 100 пФ различие между $C0$ и C_X наиболее велико (рис. 2*б*), что связано с тем, что емкость C0 соизмерима с емкостями конденсаторов $C1$, $C2$, $C5$, $C6$. Это различие можно уменьшить, если уменьшать емкость конденсаторов $C1$, $C2$, $C5$, $C6$, но в этом случае будет возрастать различие $C0$ и C_X в области их бóльших величин.

При проведении измерений следует также учитывать, что реальный полупроводниковый диод имеет паразитное сопротивление базовой области и через него протекает обратный ток утечки при обратном смещении. Кроме этого, доступные RLC-метры используются в

режиме измерения электрической емкости двухполюсника, имеющего схему замещения в виде последовательно или параллельно соединенных конденсатора и резистора.

Таким образом получен макет установки для измерения вольт-фарадной характеристики полупроводниковой диодной структуры при напряжении смещения до 1500 В с использованием стандартного RLC-метра и регулируемого высоковольтного источника постоянного напряжения.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2025-0002) с использованием научного оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета имени В.Ф. Уткина.

Библиографический список

1. ГОСТ 18986.4-73 Диоды полупроводниковые. Методы измерения емкости.
2. S. M. Sze, Kwok K. Ng Physics of Semiconductor Devices. Third edition, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2007. 815 p.

УДК 621.315.592: ГРНТИ 47.33.33

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА КВАНТОВУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Т.А. Баранов, М.В. Зубков
Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, bashaka03@mail.ru

Аннотация. В работе сделан анализ основных факторов, влияющих на квантовую эффективность фотоэлектрических преобразователей. Разобраны физические основы преобразования света и классификация потерь. Предложены конструктивно-технологические меры для повышения квантовой эффективности преобразователей.
Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь, квантовая эфффективность, классификация потерь, ширина запрещенной зоны, p-n- переход, квантовый выход

ANALYSIS OF THE FACTORS INFLUENCING THE QUANTUM EFFICIENCY OF PHOTOVOLTAIC CONVERTERS

T.F. Baranov, M.V. Zubkov
Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkina,
Russian Federation, Ryazan, bashaka03@mail.ru

Abstract. The paper analyzes the main factors influencing the quantum efficiency of photovoltaic converters. The physical foundations of light conversion and the classification of losses are analyzed. Constructive and technological measures are proposed to increase the quantum efficiency of converters.
Keywords: photoelectric converter, quantum efficiency, loss classification, band gap, p-n junction, quantum output

Введение

Фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) являются основой современной солнечной энергетики и оптоэлектроники. Ключевым параметром, характеризующим качество преобразования света в электрический ток, является квантовая эффективность. В отличие от интегрального коэффициента полезного действия, квантовая эффективность представляет собой спектральную характеристику, которая показывает, насколько эффективно устройство преобразует фотоны с определенной длиной волны в электроны, собираемые во внешней цепи. Принято различать два основных понятия: внешняя квантовая эффективность, опреде-

ляемая как отношение количества собранных электронов к количеству фотонов, падающих на поверхность преобразователя, и внутренняя квантовая эффективность, представляющая собой отношение количества собранных электронов к количеству фотонов, поглощенных *p*-*n*-переходом, то есть за вычетом оптических потерь [1]. Понимание факторов, влияющих на квантовую эффективность, критически важно для улучшения характеристик устройств, и целью данной работы является структурированный анализ этих факторов с разделением на фундаментальные материаловедческие и технологические конструктивные аспекты, а также рассмотрение методов минимизации потерь.

Физические основы и классификация потерь

Рассмотрим ФЭП на основе *p*-*n*- перехода как один из самых простых в технологическом отношении вариантов преобразователей. Процесс преобразования света можно разделить на три последовательных этапа: поглощение фотона, генерация неравновесных носителей заряда в виде электронно-дырочных пар и их разделение электрическим полем *p*-*n*-перехода с последующим сбором во внешней цепи. Потери, снижающие квантовую эффективность, происходят на каждом из этих этапов и имеют различную физическую природу [2]. Фундаментальным ограничением является ширина запрещенной зоны полупроводника, поскольку фотон с энергией меньше ширины запрещенной зоны не может породить электронно-дырочную пару – материал для него прозрачен, что объясняет резкий спад внешней квантовой эффективности в длинноволновой инфракрасной области спектра. В случае, когда энергия фотона значительно превышает ширину запрещенной зоны, избыточная энергия тратится на нагрев решетки, что хотя и снижает максимально возможное напряжение, но с точки зрения токовой составляющей квантовой эффективности такой фотон все равно создает одну пару носителей [3]. Все факторы, ухудшающие квантовую эффективность, можно разделить на два основных класса: оптические потери, при которых фотон не доходит до *p*-*n*-перехода из-за отражения, экранирования контактами или пропускания сквозь тонкий слой, и электрические рекомбинационные потери, когда фотон поглощается и пара рождается, но носители рекомбинируют, не достигнув контактов.

Оптические факторы, влияющие на внешнюю квантовую эффективность

Оптические факторы в первую очередь определяют разницу между внешней и внутренней квантовой эффективностью и наиболее сильно влияют на коротковолновую и среднюю области спектра. На границе раздела воздух-полупроводник из-за разницы показателей преломления возникает отражение Френеля, и, например для кремния с показателем преломления 3,5 коэффициент отражения полированной поверхности составляет 30-35 %. Высокое отражение напрямую снижает внешнюю квантовую эффективность во всем рабочем диапазоне спектра, так как значительная часть фотонов просто не попадает внутрь материала [1]. Для борьбы с этим явлением применяется нанесение просветляющих покрытий из четвертьволновых слоев диоксида кремния, нитрида кремния или диоксида титана, причем идеальное просветляющее покрытие позволяет свести отражение к минимуму на конкретной длине волны.

Создание рельефа на поверхности в виде пирамид, инвертированных пирамид или наноструктур, называемое текстурированием, позволяет фотонам отражаться несколько раз, увеличивая шанс на поглощение. Текстурирование также изменяет угол входа луча в полупроводник, увеличивая оптический путь внутри материала, что особенно важно для повышения внешней квантовой эффективности в длинноволновой области, так как свет проходит большее расстояние внутри материала. В традиционных солнечных элементах с фронтальными контактами металлическая сетка из пальцев и шин является непрозрачной, и часть поверхности, обычно составляющая от 5 до 10 %, не участвует в фотогенерации [3]. Внешняя

квантовая эффективность усредняется по площади, поэтому она физически не может достичь 100 % для всех фотонов, даже если внутренняя квантовая эффективность равна 100 %. Решением этой проблемы является переход к более тонким пальцам и использование полностью затопленных контактов, вынесенных на тыльную сторону ФЭП [4].

Если полупроводник слишком тонкий или имеет низкий коэффициент поглощения, как у непрямозонного кремния вблизи края поглощения, длинноволновые фотоны могут проходить сквозь структуру, не поглощаясь, что вызывает спад внешней квантовой эффективности в длинноволновой области. В коротковолновой области, соответствующей синему свету, спад может происходить из-за очень высокого коэффициента поглощения, при котором фотоны поглощаются слишком близко к поверхности в эмиттере, где высока вероятность рекомбинации, что оптически также связано с тем, что свет не доходит до области объемного заряда.

Рекомбинационные факторы, влияющие на внутреннюю квантовую эффективность

Внутренняя квантовая эффективность свидетельствует о чистоте технологического процесса изготовления *p*-*n*-перехода, поскольку если фотон поглотился, но не создал ток, значит, носители были потеряны из-за рекомбинации. На поверхности кристаллической решетки существует огромное количество оборванных связей, которые создают энергетические уровни в запрещенной зоне, и это явление особенно сильно влияет на коротковолновую часть спектра. Синий свет поглощается очень близко к поверхности, на глубине первых десятков нанометров, и если скорость поверхностной рекомбинации высока, все фотогенерированные носители в этой области рекомбинируют, не успев дойти до перехода. На графике внешней квантовой эффективности это проявляется как резкий спад в синей области. Решением является пассивация поверхности путем покрытия тонким слоем диэлектрика, такого как оксид алюминия, диоксид кремния или нитрид кремния, который насыщает оборванные связи [5].

Рекомбинация в объеме, или в объемном слое базы, влияет на длинноволновую часть спектра, поскольку красный и инфракрасный свет проникает глубоко в толщу материала, и носителям нужно пройти длинный путь до *p*-*n*-перехода. Примеси, дислокации и границы зерен в поликристаллических материалах выступают центрами рекомбинации, сокращая время жизни носителей и диффузионную длину, что вызывает спад внутренней квантовой эффективности в длинноволновой области. В самом *p*-*n*-переходе существует сильное электрическое поле, эффективно разделяющее носители, однако если в области объемного заряда есть дефекты, может происходить рекомбинация через эти ловушки, что чаще всего влияет на средние длины волн и общую форму кривой, особенно заметно при низких уровнях инжекции или в материалах с высокой плотностью дефектов. В прямозонных материалах, таких как арсенид галлия или фосфид индия, излучательная рекомбинация высока, но в хороших солнечных элементах излученный фотон может быть перепоглощен, что минимизирует потери. Оже-рекомбинация доминирует при сильном легировании или высокой концентрации носителей, например в концентраторных системах, и представляет собой фундаментальный предел для квантовой эффективности при очень высоких уровнях освещения [4].

Конструктивно-технологические факторы

Конструкция самого элемента определяет эффективность подавления оптических и рекомбинационных потерь. Тонкий и слаболегированный эмиттер благоприятен для синего света, поскольку уменьшает рекомбинацию у поверхности, но увеличивает последовательное сопротивление, тогда как толстый эмиттер может ухудшить синий отклик. Оптимизация эмиттера через создание селективного эмиттера является одним из ключевых подходов к

достижению высокой квантовой эффективности. Для длин волн, близких к краю полосы поглощения, например 1000-1100 нанометров для кремния, материал слабо поглощает свет, и для сбора этих фотонов требуется большая толщина базы. Однако толстая база требует большой диффузионной длины, то есть высокой чистоты материала. Компромисс достигается использованием текстуры и ловушек света, которые позволяют сделать базу тоньше, сохранив поглощение длинных волн. Создание сильнолегированных слоев на тыловой стороне элемента формирует потенциальный барьер, отталкивающий неосновные носители от тыловой поверхности, где скорость рекомбинации высока. Такое тыловое поле критически важно для длинноволновой чувствительности, так как оно отражает носители обратно к *p-n*-переходу [6].

Влияние внешних условий

С ростом температуры ширина запрещенной зоны полупроводника уменьшается, и край фундаментального поглощения сдвигается в длинноволновую область, то есть материал начинает поглощать те фотоны, которые при низкой температуре проходили насквозь. Общее число генерируемых пар может немного возрасти, однако это сопровождается сильным падением напряжения, что для общего коэффициента полезного действия является негативным фактором. В некоторых материалах, особенно в кремнии *p*-типа с бором, под воздействием света происходит образование дефектов в виде бор-кислородных комплексов. Эта деградация, известная как светоиндуцированная деградация, снижает время жизни носителей, что приводит к падению внутренней квантовой эффективности во всем спектре, но особенно в длинноволновой области, где важна диффузионная длина. При работе под концентраторами, когда плотность носителей становится огромной, может произойти насыщение центров рекомбинации, что повышает квантовую эффективность на дефектах, или, наоборот, рост Оже-рекомбинации, приводящий к снижению квантовой эффективности [7].

Методы измерения и анализа

Основным методом анализа является измерение спектральной зависимости внешней квантовой эффективности, также называемой спектральной фоточувствительностью. Процесс измерения заключается в сравнении тока эталонного диода и тока исследуемого образца при монохроматической засветке. Для расчета внутренней квантовой эффективности необходимо измерить полное отражение и пропускание образца, после чего внутренняя квантовая эффективность вычисляется как отношение внешней квантовой эффективности к доле фотонов, реально поглощенных в материале. Анализ формы полученной кривой позволяет диагностировать проблемы: провал в синей области свидетельствует о плохой пассивации поверхности, провал в красной области указывает на малую диффузионную длину, недостаточную толщину слоя или плохой тыловой отражатель, а общее снижение уровня кривой говорит о неэффективном просветляющем покрытии. Для определения параметров ФЭП является исследование квантового выхода. Немаловажной особенностью данной величины является возможность измерения её спектральной дисперсии, показывающей эффективность преобразования излучения отдельных областей спектра и полноту использования солнечной энергии. По определению, квантовый выход Q находится как

$$Q = \frac{N_C}{N_P}, \tag{1}$$

где через N_C и N_P обозначены число носителей заряда и число падающих фотонов соответственно. Если за единицу времени число падающих фотонов и число носителей заряда остают-

ся постоянными, то возможен переход к использованию в вычислениях скоростей изменения этих величин

$$Q = \frac{\frac{dN_C}{dt}}{\frac{dN_P}{dt}}. \quad (2)$$

Интенсивность падающего света можно представить как отношение мощности светового потока, падающего на поверхность ФЭП, к величине ее площади *S*. Пользуясь определением мощности, а также принятым допущением о монохроматическом составе излучения для плотности тока можно записать:

$$j = \frac{I}{S} = \frac{\frac{dq}{dt}}{S} = \frac{d(N_C e)}{Sdt} = \frac{e}{\frac{dN_C}{Sdt}}, \quad (3)$$

где I – ток, q – заряд, e – элементарный заряд, t – время.

Найдя отношение плотности тока и интенсивности света, после преобразований получим:

$$Q = \frac{hcj}{e\lambda\Phi}. \quad (4)$$

где h – постоянная Планка, c – скорость света, λ – длина волны, Ф – световой поток.

Для измерения величины Q используют экспериментальную установку, состоящую из следующих частей:

- стабильный источник белого света;
- монохроматор;
- измеритель мощности светового излучения;
- амперметр с пределом измерения от 10^{-9} до 10^{-11}.

Измерения на HIT структурах на основе α-SiH показывают, что величина Q в диапазоне длин волн 300…1000 может достигать 80%.



Рис. 2. Схема измерительной установки по определению квантового выхода ФЭП [1]

Заключение

Проведенный анализ показывает, что квантовая эффективность фотоэлектрических преобразователей определяется сложным комплексом взаимосвязанных факторов. Оптические потери, связанные с отражением и затенением, могут быть минимизированы с помощью просветляющих покрытий, текстурирования и оптимизации топологии контактов. Рекомбинационные потери, ограничивающие внутреннюю квантовую эффективность, требуют тщательной пассивации поверхности и объема, а также оптимизации диффузионной длины носителей. Современные тенденции повышения квантовой эффективности направлены на создание структур с полностью пассивированными контактами, использование гетеропереходов и наноструктурированных материалов, позволяющих управлять спектральной чувствительностью [7]. Дальнейшее улучшение характеристик фотоэлектрических преобразователей невозможно без глубокого понимания и учета всех рассмотренных факторов в процессе проектирования и изготовления устройств.

Библиографический список

1. Фотоэлектрические преобразователи [Электронный ресурс] // Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета. URL: https://inep.sfedu.ru/wp-content/uploads/ehamt/learn/ip_e/lek_13.pdf (дата обращения: 25.02.2026).

2. Tanaka M., Taguchi M., Matsuyama T. Development of New a-Si/c-Si Heterojunction Solar Cells // Japanese Journal of Applied Physics. V.31. No.11. 1992. P.3518-3522.

3. Holman Z.C., Descoeudres A., De Wolf S. Record Infrared Internal Quantum Efficiency in Silicon Heterojunction Solar Cells // IEEE Journal of Photovoltaics. V.3. No.4. 2013. P. 1243–1249.

4. ASTM E1021–15 Standard Test Method for Spectral Responsivity Measurements of Photovoltaic Devices. 2015.

5. Gueymard C.A. Parameterised transmittance model for spectral irradiance // Solar Energy. V.71. No.5. 2001. P.325-346.

6. Полагин М.В., Мишустин В.Г. Развитие технологии фотоэлектрических преобразователей на основе неупорядоченных полупроводников // В сборнике: Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2025. Сборник трудов VIII Международного научно-технического форума: в 10 т. Т. 2. Рязань, Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2025. С. 164-167.

7. Вихров С.П., Вишняков Н.В., Гудзев В.В., Ермачихин А.В., Жилина Д.В., Литвинов В.Г., Маслов А.Д., Мишустин В.Г., Теруков Е.И., Титов А.С. Исследование глубоких энергетических уровней в солнечном элементе типа HIT // Т.52. №7. 2018. С. 787-791.

УДК 621.315.592: ГРНТИ 29.19.31

ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДОВ В СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

А.А. Иванов, В.Г. Мишустин

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина, Российская Федерация, Рязань, gudlov4000@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрены физические принципы квантово-механического туннелирования, возникновение уровней размерного квантования энергии в многослойных гетероструктурах, типовые конструкция и материалы резонансно-туннельного диода. Описаны физические принципы работы и основные характеристики резонансно-туннельного диода, а также перспективы и ограничения широкого внедрения.

Ключевые слова: квантово-механическое туннелирование, потенциальный барьер, квантовая яма, уровни размерного квантования, гетероструктура, резонансно-туннельный диод.

APPLICATION OF RESONANCE-TUNNEL DIODS IN MODERN ELECTRONICS

A.A. Ivanov, V.G. Mishustin
Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkina,
Russian Federation, Ryazan, gudlov4000@mail.ru

Abstract. The paper discusses the physical principles of quantum mechanical tunneling, the emergence of energy dimensional quantization levels in multilayer heterostructures, and the typical design and materials of a resonant tunneling diode. It describes the physical principles of operation and the main characteristics of a resonant tunneling diode, as well as the prospects and limitations of its widespread implementation.
Keywords: quantum mechanical tunneling, potential barrier, quantum well, size-quantization levels, heterostructure, resonant-tunneling diode.

Введение

Резонансно-туннельный диод является одним из ключевых приборов квантовой наноэлектроники, принцип работы которого основан на явлении квантово-механического туннелирования. В отличие от классического туннельного диода, резонансно-туннельный диод использует квантовую яму, расположенную между двумя потенциальными барьерами, что приводит к возникновению резонансного усиления коэффициента туннелирования. Благодаря этому на ВАХ резонансно-туннельного диода имеется участок отрицательного дифференциального сопротивления, что делает его перспективным для СВЧ электроники и генерации в терагерцовом диапазоне. Развитие эпитаксиальных технологий позволило получать сложные гетероструктуры с заданными параметрами, что придало мощный импульс в развитии данного направления наноэлектроники.

Целью данной работы является рассмотрение физических принципов работы резонансно-туннельных диодов, применяемых материалов и конструкций при их изготовлении, а также обзор перспектив и ограничений в развитии данной технологии.

Физические основы резонансного туннелирования

Фундаментальное описание туннельного эффекта базируется на стационарном уравнении Шредингера:

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\psi = 0, \quad (1)$$

где ψ – волновая функция, описывающая состояние частицы;

$\Delta\psi$ – оператор Лапласа;

m – эффективная масса микрочастицы;

- постоянная Дирака;

E – полная энергия микрочастицы;

U – потенциальная энергия микрочастицы в силовом поле, в котором происходит ее движение [1].

Решение этого уравнения для прямоугольного потенциального барьера показывает, что волновая функция экспоненциально затухает внутри области, где выполняется условие $U > E$, но не обращается в ноль. Это означает наличие конечной вероятности прохождения частицы через барьер.

Туннелирование является вероятностным процессом. Он зависит от энергии частицы, формы барьера, а также эффективной массы частицы. Решение уравнения (1) позволяет определить коэффициент прозрачности барьера:

$$D = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{2a}{\hbar} \cdot \sqrt{2m(U_0 - E)}\right), \quad (2)$$

где U_0 – высота потенциального барьера, a – его ширина (рисунок 1).

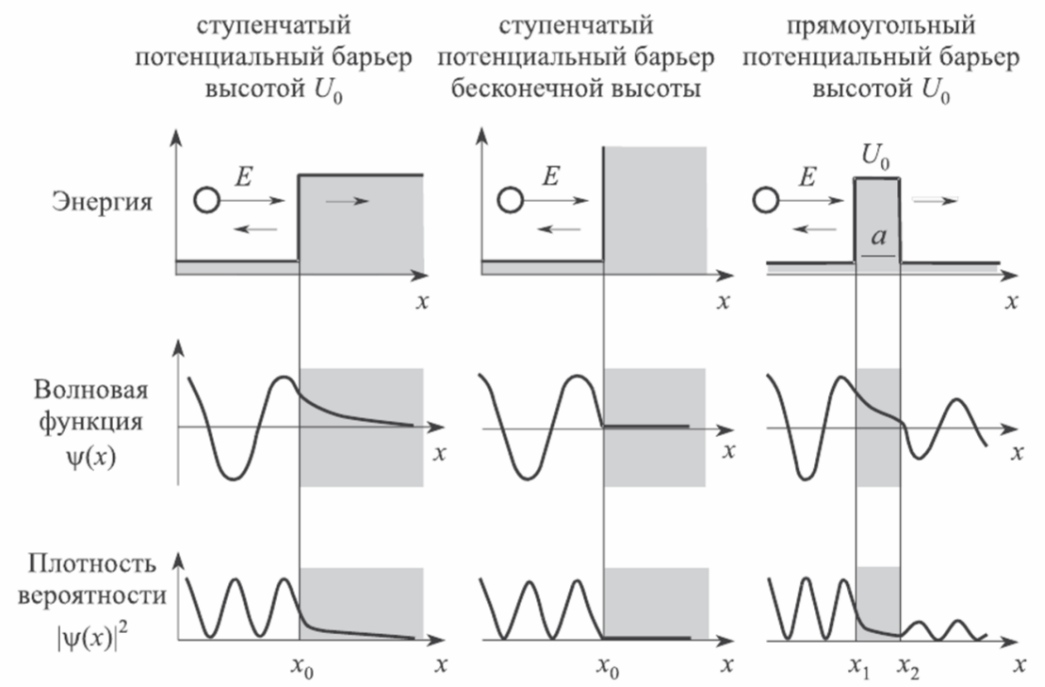


Рис. 3. Туннелирование микрочастицы через потенциальные барьеры различной формы [2]

Резонансно-туннельный диод представляет собой структуру с двумя или более потенциальными барьерами, в котором реализуются условия для резонансного туннелирования. Физический принцип работы резонансно-туннельного диода состоит в том, что электронная волна проникающего через первый барьер электрона попадает в потенциальную яму, в которой она практически полностью «отражается» от стенок и интерферирует с волной продолжающего туннелировать электрона [2]. В случае если фазы падающей и дважды отраженной от стенок волн совпадают, то амплитуда волны в яме резко возрастает. Это приводит к резкому резонансному возрастанию тока, протекающего через структуру. Условием возникновения резонанса является совпадение энергии туннелирующего электрона с уровнем энергии в квантовой яме.

Конструкция и материалы резонансно-туннельных диодов

Наибольшее распространение при изготовлении резонансно-туннельных диодов получили системы на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs [3]. Структура резонансно-туннельного диода схематически показана на рисунке 2. Слои *1* и *5* из сильнолегированного n^+-GaAs составляют эмиттер и коллектор. Слой *3* из слаболегированного n-GaAs образует квантовую яму толщиной 3...10 нм. Слои *2* и *4* из $Al_xGa_{1-x}As$ толщиной 2...5 нм образуют потенциальные барьеры. Высота барьеров *2* и *4* зависит от стехиометрического состава полупроводникового материала, в данном случае от концентрации алюминия в сплаве с арсенидом галлия. Высоту барьера *3* и ширину потенциальной ямы d_3 подбирают таким образом, чтобы в яме образовался только один уровень размерного квантования E_1 (рисунок 3, *а*) [4].

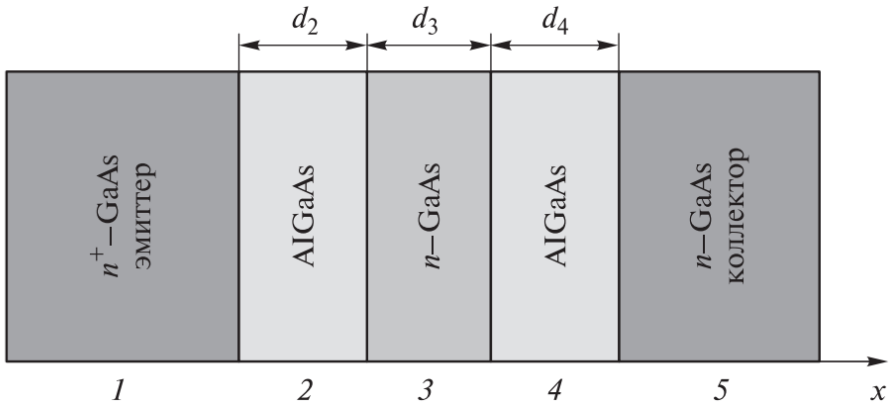


Рис. 2. Структура туннельно-резонансного диода: *1, 5* – области эмиттера и коллектора; *2, 4* – барьеры, *3* – квантовая яма; d_2, d_3 и d_3 – ширина барьеров *2, 3* и квантовой ямы *3* [3]

Изготовление многослойных гетероструктур для резонансно-туннельных диодов осуществляется методами газофазной или молекулярно-лучевой эпитаксии. Основное требование к технологическому оборудованию – это возможность обеспечить контроль толщины на уровне монослоев, поскольку даже незначительное изменение толщины барьера может существенно сместить положение резонансного уровня и необратимо поменять характеристики конечной структуры. Современные резонансно-туннельные диоды представляют собой совокупность большого количества слоев полупроводников, отличающихся химическим составом и физическими свойствами.

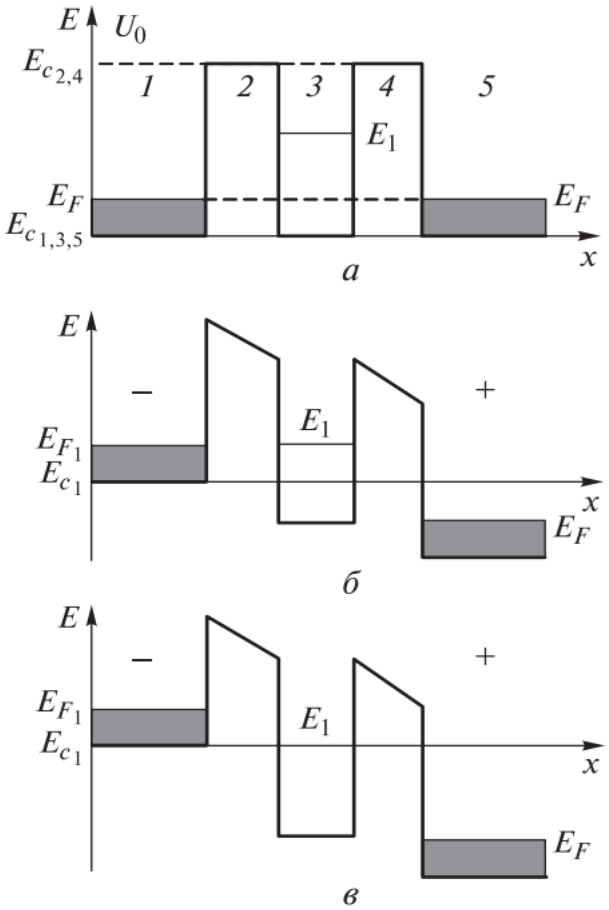


Рис. 3. Зонные диаграммы туннельно-резонансной структуры [4]:
а – равновесное состояние (внешнее напряжение отсутствует); б – $U < U_1$; в – $U_1 < U < U_2$

Механизм протекания тока в резонансно-туннельной структуре

При приложении внешнего электрического поля к двух- или многобарьерной периодической структуре, где область между барьерами представляет собой потенциальную яму с дискретными энергетическими уровнями, начинается резонансное туннелирование электронов. При этом условии электроны проходят через потенциальный барьер с существенно повышенной вероятностью при совпадении их энергии с дискретными уровнями квантовой системы, образованной внутри барьера.

Перечисленные квантовые эффекты проявляются в виде характерной N-образной ВАХ, которая показана на рисунке 4. В равновесном состоянии напряжение между эмиттером и коллектором $U = 0$ (рисунок 3, *а*), при этом ток в структуре отсутствует. При повышении напряжение на структуре через нее пойдет небольшой ток, обусловленный обычными процессами туннелирования электронов через потенциальный барьер 2 (участок $0 - U_1$ на рисунке 4). При этом энергетические уровни эмиттера будут подниматься относительно уровней коллектора. При напряжении U_1, когда уровень E_{F1} сравняется с уровнем E_1, ток через структуру значительно увеличится, что объясняется процессом резонансного туннелирования (рисунок 3, *б*). При дальнейшем увеличении напряжения на структуре, когда выполняется условие $U_1 < U < U_2$ (участок $U_1 – U_2$ на рисунке 4), ток резко возрастает до тех пор, пока с уровнем E_1 потенциальной ямы не сравняется дно зоны проводимости E_{C1}. При дальнейшем увеличении напряжения, когда $U > U_2$, уровень E_1 опускается ниже дна зоны проводимости в запрещенную зону, и ток резко падает (рисунок 3, *в*). Это приводит к появлению на ВАХ участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением (участок $U > U_2$ на рисунке 4).

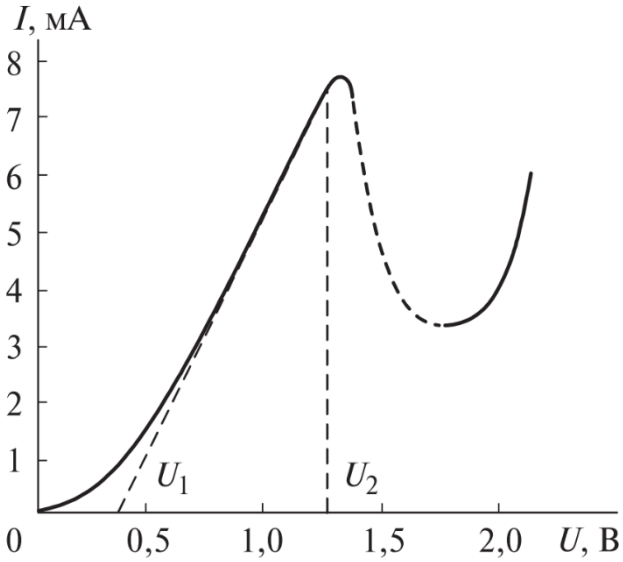


Рис. 4. ВАХ туннельно-резонансного диода [4]

Применение и перспективы туннельно-резонансных диодов

Наличие на ВАХ участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением (рисунок 4) позволяет использовать резонансно-туннельный диод для генерации СВЧ-колебаний с частотами до 700 ГГц, что более чем на порядок превышает частотных характеристики обычных туннельных диодов. Физическими факторами, ограничивающими быстродействие резонансно-туннельных структур, являются время жизни электронного состояния в квантовой яме и время пролета электроном обедненного слоя.

Отрицательное дифференциальное сопротивление в резонансно-туннельном диоде сохраняется по крайней мере до частоты ~2,5 ТГц [4]. Более высокое быстродействие можно достичь за счет улучшения условий для туннельного прохождения барьера и меньшей емкостью структуры. Обычные туннельные диоды работают при плотности тока $10^2...10^3$ А/см^2, которая ограничена относительно невысокой прозрачностью туннельного барьера, а в резонансно-туннельных диодах из-за практически 100%-ного прохождения барьера электронами в определенном интервале энергий плотность тока может достигать $4 \cdot 10^5$ А/см^2. При этом удельная барьерная емкость в резонансно-туннельных диодах из-за наличия истощенного слоя в несколько раз меньше, чем в обычных туннельных диодах.

Резонансно-туннельный диод может выполнять функцию транзистора, если к слою потенциальной ямы структуры подвести электрод, регулирующий положение уровня размерного квантования E_1 с помощью электрического поля. На основе резонансно-туннельных диодов разработаны аналого-цифровые преобразователи, логические элементы, запоминающие устройства, работающие на частотах в несколько гигагерц, которые можно использовать в процессорах и других цифровых устройствах для быстродействующей электроники.

Заключение

Резонансно-туннельный диод является одним из наиболее ярких примеров практической реализации квантово-механических эффектов в наноэлектронике. Благодаря наличию на ВАХ участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением резонансно-туннельный диод является перспективным для генерации в терагерцовом диапазоне, сверхбыстрой логики и специализированных нелинейных систем.

Несмотря на указанные достоинства, широкое внедрение резонансно-туннельных диодов ограничено следующими факторами: высокой стоимостью гетероструктур на основе материалов системы $A^{III}B^{V}$; чувствительностью к толщине барьеров; сложностью интеграции с кремниевой КМОП-технологией; тепловой нестабильностью и разбросом параметров и др. По данным работы [5] широкое промышленное внедрение резонансно-туннельных диодов сдерживается именно технологической сложностью и невысокой воспроизводимостью электрофизических параметров.

Тем не менее, резонансно-туннельные диоды заняли свою нишу как в уже существующей, так и перспективной элементной базе микро- и наноэлектроники. Ключевым направлением дальнейших исследований остается усовершенствование методов моделирования квантово-транспортных явлений и повышение уровня технологии массового производства многослойных гетероструктур.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2025-0002) с использованием научного оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета имени В.Ф. Уткина.

Библиографический список

1. Орешкин П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков: учеб. пособие. М.: "Высш. школа". 1977. 448 с.

2. Файловый архив для студентов studfile.net [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://studfile.net/preview/15642893/ (дата обращения: 24.02.2026).

3. Образовательный портал НОУ ИНТУИТ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://intuit.ru/studies/professional_skill_improvements/12183/courses/1173/lecture/19622?page=5&utm_medium=organic&utm_source=yasmartcamera (дата обращения: 25.02.2026).

4. Электронная образовательная система МГТУ им. Н.Э. Баумана [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://e-learning.bmstu.ru/iu4/pluginfile.php/370/mod_resource/conent/1/pribor_tom_03_itog_1%20.16.%20ТУННЕЛЬНЫЕ%20ЭФФЕКТЫ%20И%20ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ%20СВЕРХРЕШЕТКИ.pdf (дата обращения: 25.02.2026).

5. Brown E.R. Fundamental limits of THz generation using resonant tunneling diodes / E.R. Brown // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2012. Vol. 2, № 1. P. 1 – 9.

УДК 621.382.2/.3; ГРНТИ 47.09.29

МЕТОДЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

Ю.Н. Манцева

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

Аннотация. В данной статье рассматриваются особенности методов численного моделирования многослойных полупроводниковых гетероструктур. Описаны теоретические основы полупроводниковых структур с несколькими гетеропереходами, основные современные методы численного моделирования полупроводниковых гетероструктур, их возможности, преимущества и недостатки.

Ключевые слова: полупроводник, гетероструктура, моделирование, метод Монте-Карло (ММК), метод конечных элементов (МКЭ), метод конечных разностей (МКР).

METHODS OF NUMERAL MODELING OF MULTILAYER SEMICONDUCTOR HETEROSTRUCTURES

J.N. Mantseva

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

Annotation. This article discusses the features of numerical modeling methods for multilayer semiconductor heterostructures. The theoretical foundations of semiconductor structures with multiple heterojunctions, the main modern methods of numerical modeling of semiconductor heterostructures, their capabilities, advantages and disadvantages are described.

Keywords: semiconductor, heterostructure, modeling, Monte Carlo Simulation (MCS), finite element method (FEM), finite difference method (FDM).

Введение

В последние десятилетия многослойные полупроводниковые гетероструктуры стали предметом активного изучения благодаря их уникальным электрическим и оптическим свойствам. В наноразмерных системах из за ограничения движения носителей заряда в одном или нескольких направлениях наблюдаются значительные изменения в энергетическом спектре носителей заряда и фононов, что порождает множество новых физических явлений, которые открывают возможности для разработки материалов и устройств с уникальными свойствами и функциональными возможностями [1], в т.ч. высокоэффективные оптоэлектронные компоненты, лазерные системы с низкой пороговой мощностью генерации, фотодетекторы с повышенной чувствительностью, а также транзисторы с оптимизированными электрофизическими характеристиками.

С развитием технологий и ростом требований к производительности устройств становится необходимым глубокое понимание физики процессов, происходящих в гетероструктурах. Численное моделирование представляет собой мощный инструмент, позволяющий исследовать и оптимизировать характеристики полупроводниковых структур без необходимости в дорогостоящих экспериментальных установках.

В данной статье рассматриваются основные современные методы численного моделирования многослойных полупроводниковых гетероструктур и их особенности. Каждый из этих методов обладает своими преимуществами и применим в различных областях исследования.

Теоретические основы

Гетероструктура представляет собой выращенную на подложке структуру, которая состоит из слоёв различных материалов (полупроводников, диэлектриков), различающихся шириной запрещённой зоны и/или сродством к электрону [2].

Между двумя различными материалами формируется гетеропереход, в котором возможна повышенная концентрация носителей заряда, что приводит к образованию вырожденного двумерного электронного газа. В отличие от гомоструктур, гетероструктура обладает большой свободой выбора в конструировании нужных профилей зоны проводимости и валентной зоны [3]. Гетероструктуры дают возможность управления фундаментальными параметрами в полупроводниковых кристаллах и приборах: шириной запрещенной зоны, эффективными массами носителей и их подвижностями, показателем преломления, электронным энергетическим спектром и т.д. [1].

Основными методами синтеза гетероструктур выступают молекулярно лучевая эпитаксия и осаждение из газообразной фазы MOCVD [4, 5].

Методы численного моделирования полупроводниковых гетероструктур

Современные аспекты исследования многослойных полупроводниковых гетероструктур включают в себя различные методы численного моделирования. Рассмотрим некоторые из них.

Метод Монте-Карло

Метод Монте-Карло (ММК) – термин, означающий группу численных методов для изучения случайных процессов. Суть метода заключается в замене сложных вычислений уравнений высокой размерности множеством случайных экспериментов. В результате получается не один конкретный ответ, а распределение вероятностей различных исходов, что является более информативным для принятия решений, чем один «средний» вариант. Чем больше случайных попыток, тем точнее будет решение задачи.

Метод Монте-Карло эффективно применяется для моделирования различных физических процессов, которые определяют электрофизические свойства полупроводниковых гетероструктур:

1) перенос электронов и дырок в электрическом поле;
2) процессы рассеяния носителей на фононах (акустических, оптических), примесях, дефектах и гетерограницах;
3) формирование двумерного электронного газа (2DEG) на границах раздела материалов;
4) зависимости средней дрейфовой скорости носителей от напряжённости электрического поля;
5) энергетические распределения носителей и их подвижность в различных слоях гетероструктуры;
6) эффекты разогрева носителей в сильных электрических полях;
7) междолинный перенос (например, переходы между Г-, L- и X-долинами в материалах A_3B_5);
8) квантовые эффекты в структурах с квантовыми ямами, сверхрешётками и нановостровками.

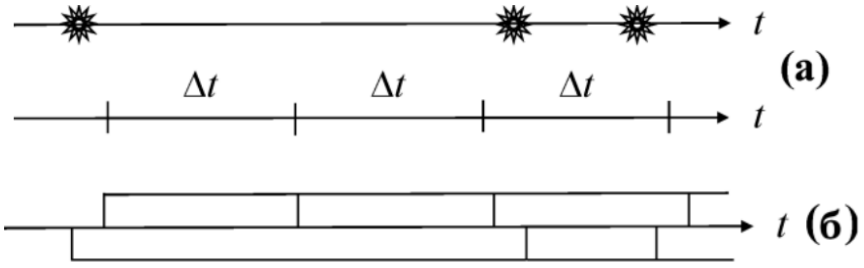


Рис. 2. Временная диаграмма поведения электрона (а) и работы алгоритма моделирования (б) [6]

Метод Монте Карло обеспечивает высокую точность прогнозирования электрофизических характеристик гетероструктур при варьировании внешних условий (температуры, напряжения) [7], превосходя упрощённые подходы метода конечных разностей и метода конечных элементов. В отличие от других методов, оперирующих усреднёнными макропараметрами, метод Монте Карло отслеживает индивидуальные траектории носителей заряда с учётом конкретных механизмов рассеяния (фононного, примесного, на дефектах и гетерограницах). Метод применим к сложным многослойным структурам с квантовыми ямами, точками, сверхрешётками и произвольными профилями легирования без усложнения алгоритма, тонкой настройки сетки и граничных условий.

Ограничения метода ММК составляют высокие требования к вычислительным ресурсам (особенно для 3D моделирования), необходимость точных входных данных (параметры зонной структуры, вероятности рассеяния [8]), сложность учёта коррелированных эффектов (коллективных явлений, кулоновских взаимодействий) и статистические флуктуации при недостаточном числе модельных частиц.

Таким образом, метод Монте Карло является эффективным инструментом для детального анализа электронного транспорта в многослойных гетероструктурах. Его применение позволяет прогнозировать характеристики перспективных полупроводниковых приборов (HEMT транзисторов, лазеров, фотодетекторов) и оптимизировать их конструкцию на этапе проектирования. Сочетание ММК с другими методами даёт возможность создавать комплексные самосогласованные модели гетероструктур.

Метод конечных элементов

Метод конечных элементов (МКЭ) представляет собой универсальный численный метод, применяемый для решения широкого спектра задач прикладной физики, включающих дифференциальные и интегральные уравнения. Его основной принцип состоит в разбиении исследуемой области на конечные элементы, каждый из которых характеризуется своей собственной аппроксимационной функцией. Эта процедура значительно упрощает процесс нахождения решений сложных физических моделей, позволяя свести исходную проблему к решению линейных алгебраических уравнений.

Метод конечных элементов используется для исследования многослойных полупроводниковых гетероструктур [9, 10]. Этот метод позволяет учитывать сложную геометрию, неоднородности материала и физические эффекты, характерные для микро- и наноструктур. МКЭ заключается в разбиении непрерывной среды на конечное число элементов с простыми геометрическими формами, для каждого из которых определяется аппроксимация искомых полей. Для моделирования многослойных структур используют объёмные элементы (3D) для учёта трёхмерного распределения напряжений и деформаций, пластинчатые и оболочечные элементы для моделирования тонких структур с большой площадью и малой толщиной. В качестве программного обеспечения используют ANSYS, Abaqus и COMSOL Multiphysics.

Современные методы анализа, такие как вторично-ионная масс-спектрометрия (ВИМС) и измерение вольт-фарадных характеристик (ВФХ), хотя и эффективны, имеют ряд ограничений, обусловленных технологическими особенностями процесса изготовления гетероструктур. Использование метода конечных элементов позволяет преодолеть некоторые из этих трудностей. Благодаря возможности точного расчета полей, потоков зарядов и механических деформаций внутри каждого слоя, этот метод обеспечивает высокую точность оценки свойств гетероструктур. Например, при изучении процессов диффузии примесей или поведения носителей заряда в квазипериодических гетероструктурах методика позволяет рассчитывать поля потенциалов и плотности тока, учитывая эффекты поверхностных состояний и межфазных границ.

Преимущества МКЭ включают:

1) универсальность подхода, позволяющего применять одну и ту же вычислительную схему для разных типов гетероструктур и материалов;

2) возможность учета анизотропии свойств материалов и неоднородности слоев;

3) высокую степень автоматизации расчетов благодаря развитию специализированных пакетов программного обеспечения.

Эти преимущества делают метод конечных элементов незаменимым инструментом в исследованиях новых материалов и технологий, направленных на создание сверхбыстродействующих и энергоэффективных электронных устройств.

Недостатки метода конечных элементов для исследования многослойных полупроводниковых гетероструктур включают ограниченность расчетной области, сложность дискретизации, высокую ресурсоемкость и погрешности округления. Выбор размера и формы конечных элементов оказывает существенное влияние на точность результатов. Неправильное разбиение области на элементы может привести к значительным ошибкам в расчетах [9]. Особенно это касается областей с большими градиентами напряжения, где требуется мелкая сетка элементов.

Таким образом, несмотря на универсальность и эффективность МКЭ, его применение для исследования многослойных полупроводниковых гетероструктур сопряжено с рядом трудностей, которые требуют особого внимания и осторожности при интерпретации результатов.

Метод конечных разностей

Методом конечных разностей (МКР) называют численный метод решения дифференциальных уравнений, основанный на замене производных разностными схемами. Этот метод позволяет разбивать геометрию структуры на сетку узлов и решать уравнения в каждом узле отдельно. Ключевое преимущество МКР заключается в простоте реализации и эффективности для многих практических задач.

Метод конечных разностей используется для исследования многослойных полупроводниковых гетероструктур в численном моделировании задач, связанных с решением дифференциальных уравнений, описывающих поведение носителей в полупроводнике под влиянием внешних полей.

МКР применяется для решения задач:

1) расчёт характеристик диодов Шоттки на основе полупроводниковых гетероструктур с квантовыми ямами и квантовыми точками. Метод позволяет численно решить одномерные уравнения Шрёдингера для огибающей волновой функции с учётом, что эффективная масса электрона – функция координаты (рис. 2);

2) расчёт частотного спектра, модового усиления и профилей поля резонаторных мод в лазерных резонаторах с многослойной полупроводниковой структурой;

3) расчёт вольт-фарадных характеристик (CV) и зависимостей нормированной ёмкости от напряжения с учётом ширины области пространственного заряда (NCV W) для

диодов Шоттки на основе полупроводниковых гетероструктур n-типа проводимости, содержащих одиночную квантовую яму;

4) крупномасштабное моделирование зонной структуры с применением многополосной k p модели на базе эрмитовой схемы прямой и обратной разности (Hermitian Forward and Backward Difference, HFBD) в рамках МКР, обеспечивающей устранение разностной нестабильности численного решения.

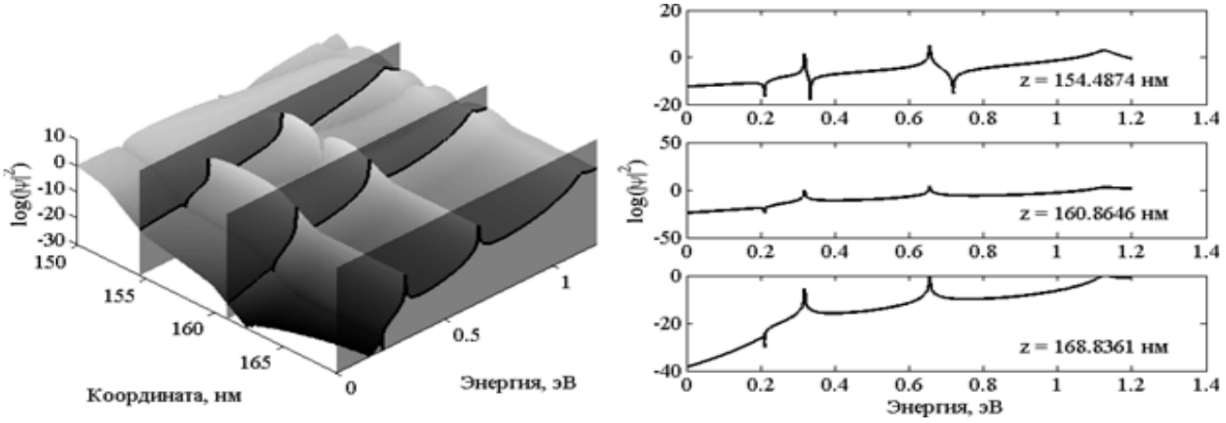


Рис. 2. Пример применения метода конечных разностей для решения уравнения Фика. Натуральный логарифм квадрата модуля волновой функции электронов из истока для фиксированных значений координаты [10]

Решение задачи методом конечных разностей включает три основных этапа.

1. Построение сетки узловых значений искомой функции в области решения. Исходными данными являются граничные значения независимых переменных модели и необходимая точность решения, заданная шагом по каждой из координат.

2. Построение системы конечно-разностных уравнений на основе исходного дифференциального уравнения. Учитываются функциональные связи между соседними узлами сетки.

3. Решение системы из конечно-разностных уравнений одним из численных методов. Число неизвестных (или порядок решений системы) соответствует числу узловых значений, в которых определяется значение искомой функции.

Для решения нестационарных задач, когда процесс изменяется во времени, используется итерационный процесс – на каждой итерации находят решение на новом временном слое. Для решения таких задач применяются явные, неявные схемы и схемы предиктор-корректор.

Преимущества МКР заключаются в простоте реализации, высокой скорости решения при наличии простых граничных условий, возможности адаптации к задачам с многослойной структурой, что важно для анализа сложных наноструктур. Для моделирования квантовых ям, квантовых нитей и других одномерных структур МКР также часто является оптимальным выбором. МКР легко интегрируется в итерационные схемы для решения связанных систем уравнений (например, самосогласованного решения Шрёдингера и Пуассона).

МКР плохо адаптируется к сложным геометрическим формам, что затрудняет его применение для трёхмерных или сильно искривлённых структур. В условиях неравномерной сетки, сложных граничных условий или при неправильном выборе шага сетки точность расчётов снижается. При решении уравнений с высокими производными (например, в задачах с резкими изменениями потенциала) могут возникать значительные погрешности, искажающие результаты. Без специальных модификаций МКР может не учитывать такие явления, как

спин-орбитальное взаимодействие, пьезоэлектрические эффекты, деформации материала и неоднородности внутри структуры.

Таким образом, МКР является инструментом для моделирования полупроводниковых гетероструктур с хорошей вычислительной эффективностью, но его применение требует учёта ограничений и выбора подходящих модификаций метода в зависимости от конкретной задачи.

Выводы

Численные методы моделирования полупроводниковых гетероструктур являются высокоэффективным подходом для улучшения оптических и электронных характеристик материалов, разработки новых полупроводниковых композиций и инновационных устройств с учетом квантовых эффектов. Данные методы позволяют предсказывать характеристики и улучшать процессы синтеза, что способствует созданию материалов, устойчивых к различным воздействиям. Кроме того, моделирование эффективно интегрируется с новыми технологиями, обеспечивая углубленное понимание взаимодействий на наноуровне и позволяя минимизировать затраты на экспериментальные исследования. Таким образом, дальнейшее развитие численных методов в области полупроводников способствует значительному прогрессу в микро-и наноэлектронике, материаловедении, фотонике и других сопредельных областях высоких технологий.

Библиографический список

1. Ж.И. Алферов История и будущее полупроводниковых гетероструктур // Физика и техника полупроводников. 1998. Т. 32, №1. С. 321–345.
2. Ю.Н Денисова Особенности моделирования многослойных полупроводниковых гетероструктур // СТНО-2024 [текст]: сб. тр. VII междунар. науч.-техн. форума в 10 т. Т.2. / под общ. Ред. О.В. Миловзорова – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2024. С 6.
3. Л.В. Спивак, Н.Е. Щепина Физико-химические основы процессов микро- и нанотехнологии // Электрон. дан. Пермь. 2019. Ч. 2. С 185.
4. Под ред. Л. Ченга, К. Плога. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры.: Пер. с англ.// М: Мир. 1989. С. 584.
5. Chow P. P. Molecular beam epitaxy / Kern W., Vossen J. L. // Thin Film Processes II. Academic Press, Inc., (USA), 1991. P. 133 – 175.
6. Д.С. Сперанский, В.М. Борздов Моделирование полупроводниковых приборных структур методом Монте-Карло. Подход с использованием технологии объектно-ориентированного программирования // Доклады БГУИР. 2008. № 4 (34). С. 93–96.
7. Т.Б. Попова, Л.А. Бакалейников, М.В. Заморянская, Е.Ю. Флегонтова Рентгеноспектральный микроанализ полупроводниковых эпитаксиальных гетероструктур на основе моделирования транспорта электронов методом Монте-Карло // Физика и техника полупроводников. 2008. Т.42, №6. С. 686–691.
8. Д.С. Сперанский, В.М. Борздов, Д.В. Поздняков Моделирование рассеяния электронов на ионизированной примеси в полупроводниках и полупроводниковых структурах методом Монте-Карло // Доклады БГУИР. 2011. № 2 (56). С. 33–39.
9. К.К. Абгарян, Д.Л. Ревизников Численные методы в моделировании электронных свойств наноразмерных гетероструктур // Учебное пособие // Москва: МАКС Пресс, 2017. – С. 108.
10. Н.А. Ветрова, Е.В. Куимов, С.А. Мешков, В.Д. Шашурин К вопросу о моделировании кинетики ВАХ AlGaAs-гетероструктур // РЭНСИТ. 2019. С. 299-306.

УДК 621.373.826; ГРНТИ 47.35.31

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ИНЖЕКЦИОННОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА НА ОСНОВЕ ДВОЙНОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ АРСЕНИД АЛЮМИНИЯ-ГАЛЛИЯ/ФОСФИД ИНДИЯ

Е.А. Сердюков

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина, Российская Федерация, Рязань, yegor-serdyukov@mail.ru

Аннотация. В работе рассматриваются история появления и принцип работы инжекционных полупроводниковых лазеров на основе двойной гетероструктуры. В практической части работы исследуется спектральная характеристика излучения полупроводникового лазера оптического модуля. В качестве лабораторного образца для практической части работы используется передающий оптический модуль ПОМ-155.

Ключевые слова: полупроводниковый инжекционный лазер, двойная гетероструктура, гетеропереход, спектральная характеристика излучения.

INVESTIGATION OF THE SPECTRAL CHARACTERISTICS OF EMISSION FROM AN INJECTION SEMICONDUCTOR LASER BASED ON A DOUBLE HETEROSTRUCTURE ALUMINUM-GALLIUM ARSENIDE/INDIUM PHOSPHIDE

E.A. Serdyukov

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin, Russian Federation, Ryazan, yegor-serdyukov@mail.ru

The summary. The paper examines the history of the appearance and the principle of operation of injection semiconductor lasers based on a double heterostructure. In the practical part of the work, the spectral characteristic of the emission of a semiconductor laser of an optical module is investigated. The POM-155 transmitting optical module is used as a laboratory sample for the practical part of the work.

Keywords: semiconductor injection laser, double heterostructure, heterojunction, spectral characteristic of emission.

Введение

В начале 60-х годов прошлого века отечественная радиоэлектронная промышленность совершила стремительный рывок в области создания оптоэлектронных приборов. В 1963 сотрудники Ленинградского физико-технического института Жорес Алфёров и Рудольф Казаринов сформулировали и запатентовали концепцию полупроводниковых инжекционных лазеров на основе двойной гетероструктуры [1]. Несмотря на то, что с момента изобретения такой структуры прошло уже более полувека, данная технология считается классической для создания полупроводниковых лазеров и активно используется до сих пор. Такие лазеры обладают рядом преимуществ по сравнению с гомопереходными лазерами и используются во многих областях техники. Одной из таких областей являются телекоммуникационные системы, в частности волоконно-оптические линии систем связи. В данной работе проводится исследование спектральной характеристики излучения лазерного инфракрасного диода передающего оптического модуля ПОМ-155 входящего в состав лабораторного макета волоконно-оптической линии передачи цифровой информации [2].

Структура полупроводникового лазера

В конструкции оптического модуля присутствует телекоммуникационный полупроводниковый лазер инфракрасного диапазона длин волн. Исследуемый лазерный полупроводниковый диод представляет собой двойную гетероструктуру на основе соединений арсенида алюминия-галлия и фосфида индия – AlGaAs/InP. Двойная гетероструктура, иногда назы-

ваемая двойным гетеропереходом – многослойная эпитаксиальная полупроводниковая структура, в которой активный слой полупроводника (рисунок 1, обозначение 1) с меньшей шириной запрещённой зоны как-бы «зажат» между двумя барьерными слоями с большей шириной запрещённой зоны (рисунок 1, обозначение 2,3). Такая структура позволяет сформировать полосковый оптический волновод, в котором концентрируется оптическое излучение [3].

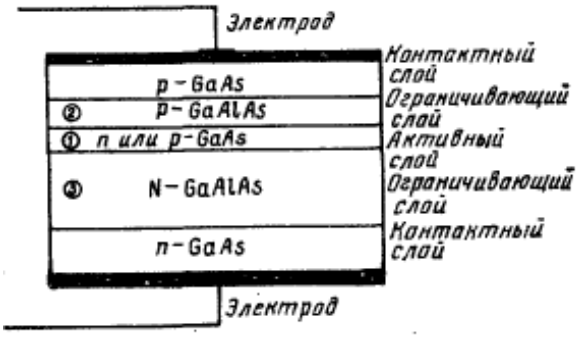


Рис. 1. Типовая полупроводниковая структура с двойным гетеропереходом

Для того чтобы такая структура была не просто источником узконаправленного оптического излучения, а стала ещё и усилителем оптического сигнала, необходимо сформировать резонатор по краям волновода. Самым распространённым видом оптических резонаторов является резонатор Фабри-Перо, названный в честь французских физиков Шарля Фабри и Альфреда Перо, которые в 1899 году предложили новую схему построения многолучевого интерферометра. Резонатор представляет собой конструкцию из двух соосных, параллельно расположенных и обращённых друг к другу зеркала (рисунок 2).

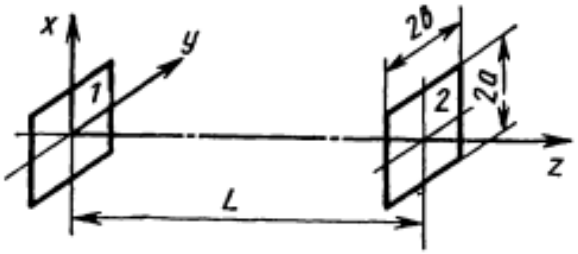


Рис. 2. Резонатор Фабри-Перо из двух параллельных, соосных зеркал с размерами 2a×2b на расстоянии L друг от друга в трёхмерной декартовой системе координат

Применительно к полупроводниковым лазерам для формирования двух плоских зеркал, кристалл полупроводника скалывается под углом близким или равным 90 градусов относительно горизонтальной оси проходящей вдоль волновода. После этого торец кристалла в месте скола полируется до получения зеркального блеска поверхности.

При подаче напряжения смещения на p-n-переход лазерного диода в активном слое формируются пары электрон-дырка, которые впоследствии рекомбинируют испуская фотоны. Последние многократно отражаясь между зеркалами резонатора, существенно усиливают эффект вынужденного излучения. На языке электродинамики и оптики, между светом циркулирующем в оптическом резонаторе и светом, излучаемым в резонатор, возникает интерференция, когда два луча совпадают по фазе, что приводит к резонансному усилению света. Зеркало резонатора, которое стоит на выходе активного слоя полупроводника делают полупрозрачным. Это сделано для того чтобы часть излучения могла вернуться обратно в об-

ласть усиления и замкнуть петлю положительной обратной связи, превращая полупроводниковую структуру в квантовый генератор [3].

Ввод излучения в оптическое волокно

При производстве передающих оптических модулей торец оптического волокна склеивают с кристаллом полупроводника при помощи эпоксидной смолы, благодаря этому оптическое излучение из активного слоя лазерного диода непосредственно вводится в оптоволокно (рисунок 3) [3].

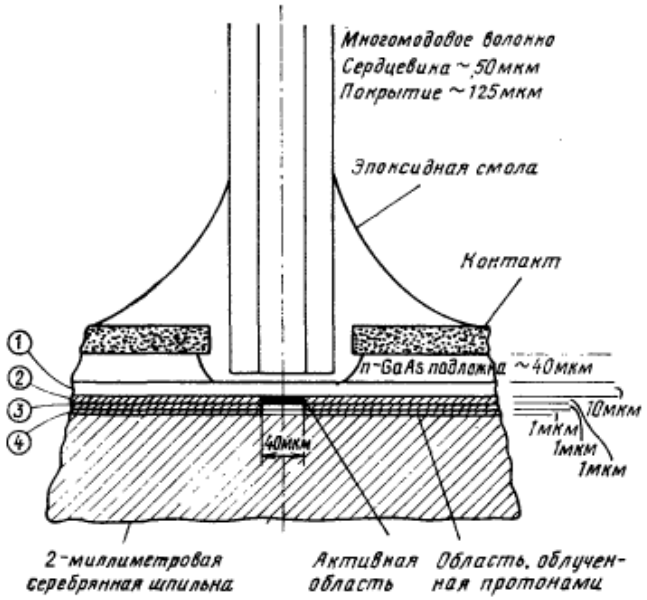
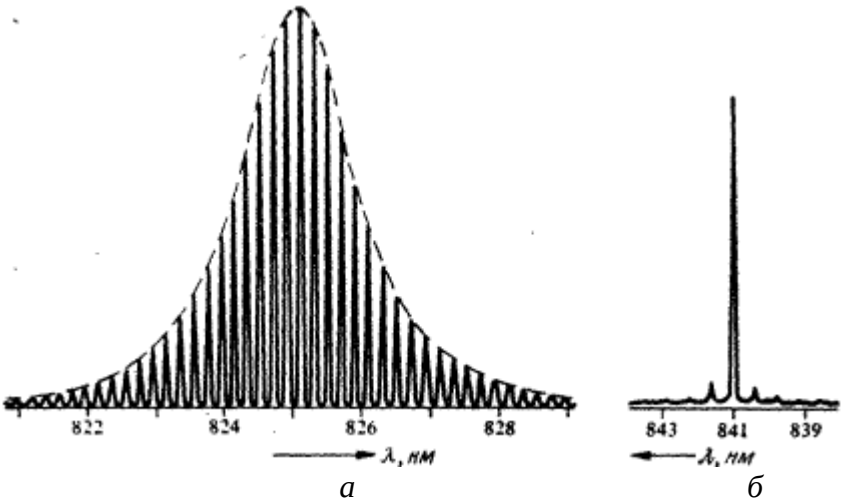


Рис. 3. Торцевое соединение оптического волокна с кристаллом полупроводника

Спектральная характеристика лазера

На вид спектральной характеристики лазера главным образом влияет количество продольных возбуждённых мод. В полосковых лазерах с волноводным усилением обычно возбуждается сразу несколько мод и наблюдается довольно широкая линия генерации оптического излучения (рисунок 4, *а*). Для создания одномодовых лазеров с узкой линией генерации излучения (рисунок 4, *б*) используют распределённый отражатель на основе решётки Брэгга [3].



а *б*

Рис. 4. Спектр излучения многомодового (*а*) и одномодового (*б*) лазера

Исследование характеристики излучения лазерного диода модуля ПОМ-155

Спектральная характеристика излучения лазерного диода передающего оптического модуля снималась в лабораторных условиях при помощи цифрового оптического спектрометра (рисунок 5).

Полученные со спектрометра данные использовались для построения спектра излучения (рисунок 6) в среде MATLAB.

По виду спектральной характеристики излучения можно понять, что исследуемый лазер является многомодовым лазером с резонатором Фабри-Перо. Пик излучения приходится на длину волны 1534 нм. Мощность излучения равна 7,64 дБм. При помощи дополнительных построений на графике спектра (рисунок 7) можно определить ширину линии генерации оптического излучения лазера, а также ширину спектральной линии главной моды.

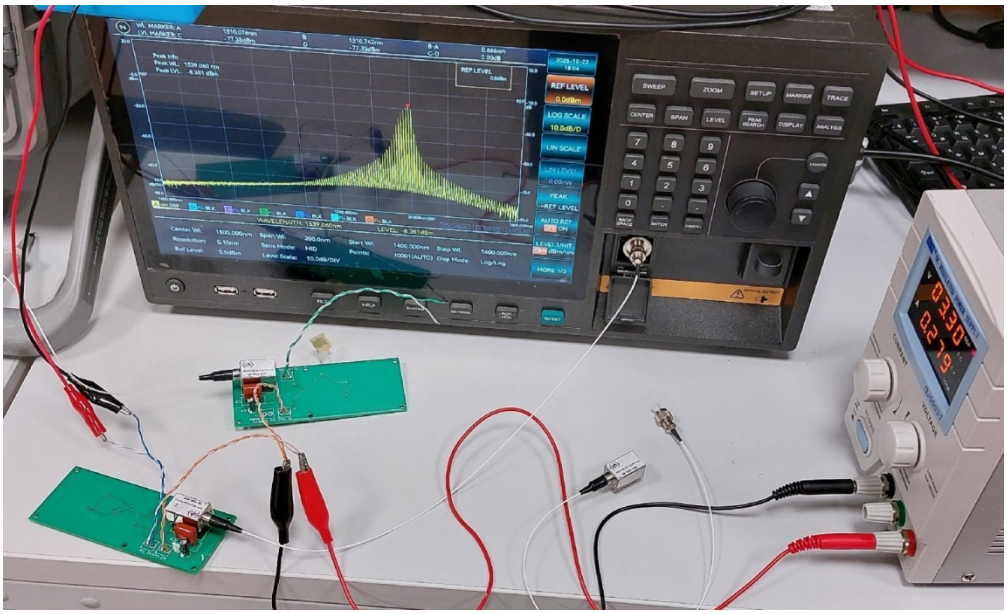


Рис. 5. Исследование спектра излучения полупроводникового лазера



Рис. 6. Спектр излучения полупроводникового лазера
при температуре корпуса оптического модуля 30 градусов Цельсия

Ширина линии генерации может быть определена как полуширина на полувысоте. Полуширина на полувысоте (англ. full width at half maximum, FWHM) – разница между максимальным и минимальным значениями аргумента функции, взятыми на уровне, равном половине её максимального значения. Ширина спектральной линии главной моды излучения определяется также на уровне 0,5 от максимума излучения. При температуре корпуса оптического модуля 30 °C ширина линии генерации равна 18 нм, а ширина спектральной линии главной моды 0,5 нм.

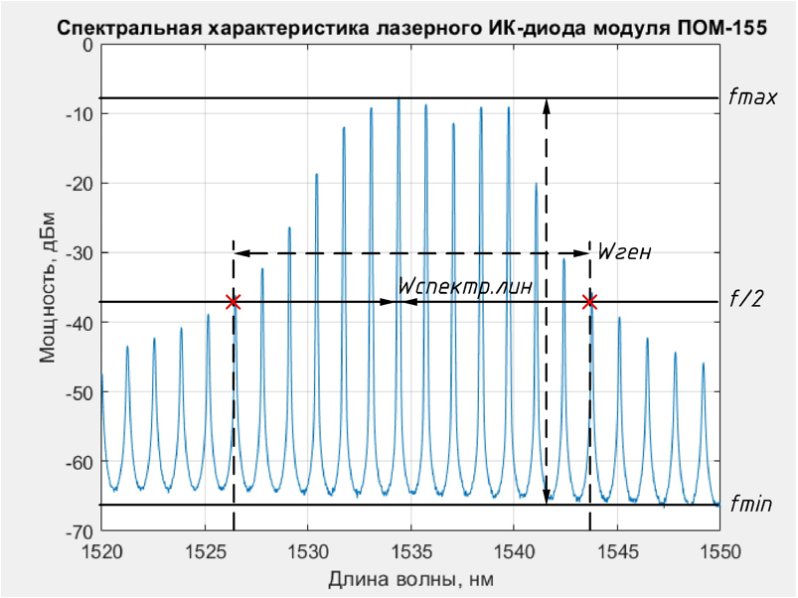


Рис. 7. Определение ширины линии генерации лазера

Паяльным феном был произведён дополнительный подогрев оптического модуля с контролем температуры при помощи термопары, прикреплённой к корпусу самого модуля (рисунок 8).

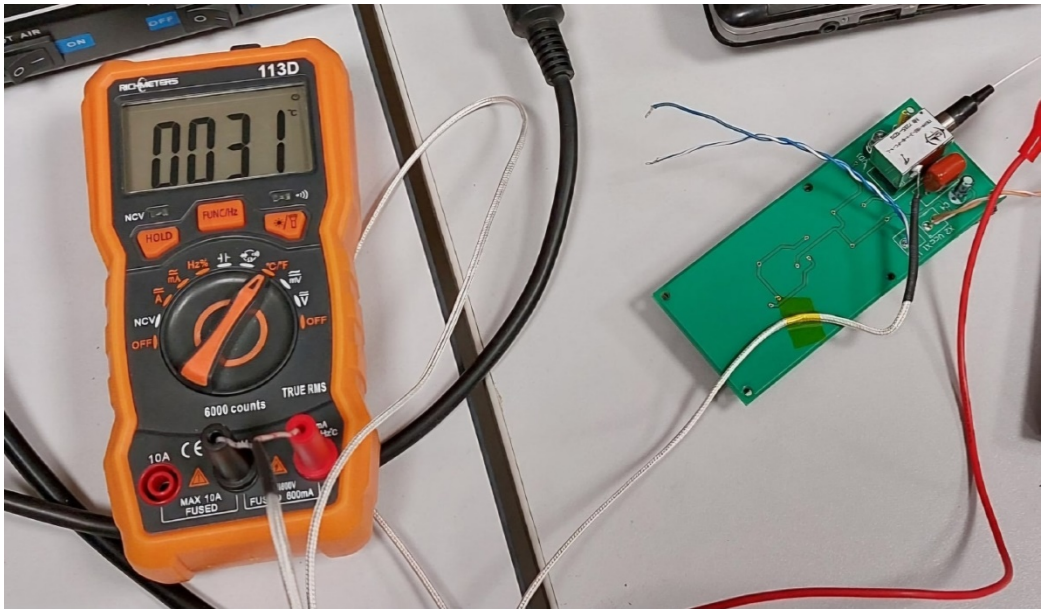


Рис. 8. Измерение температуры корпуса оптического модуля ПОМ-155

После подогрева были получены спектральные характеристики при температуре корпуса 35 и 40 °С соответственно (рисунок 9, 10).

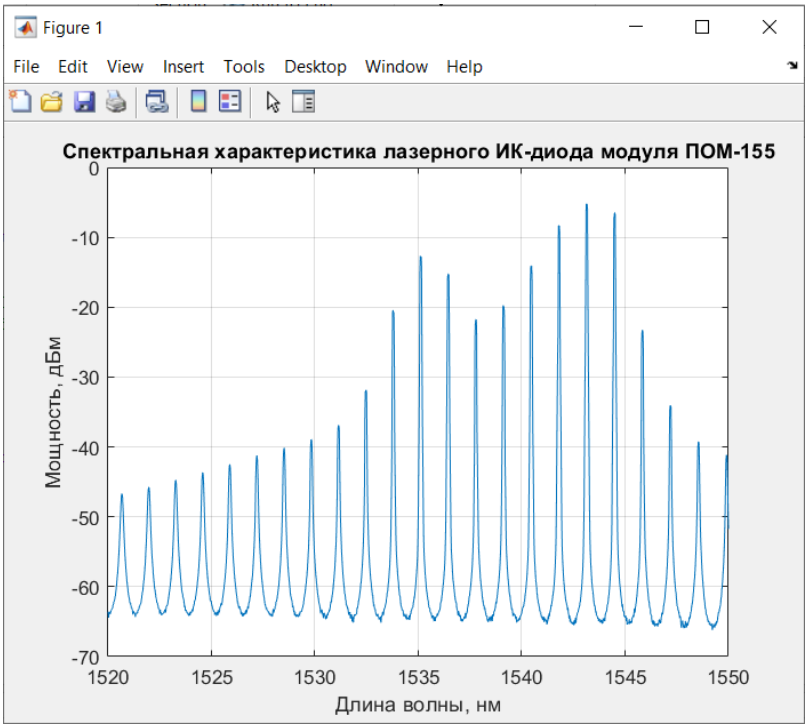


Рис. 9. Спектр излучения полупроводникового лазера при температуре корпуса оптического модуля 35°С

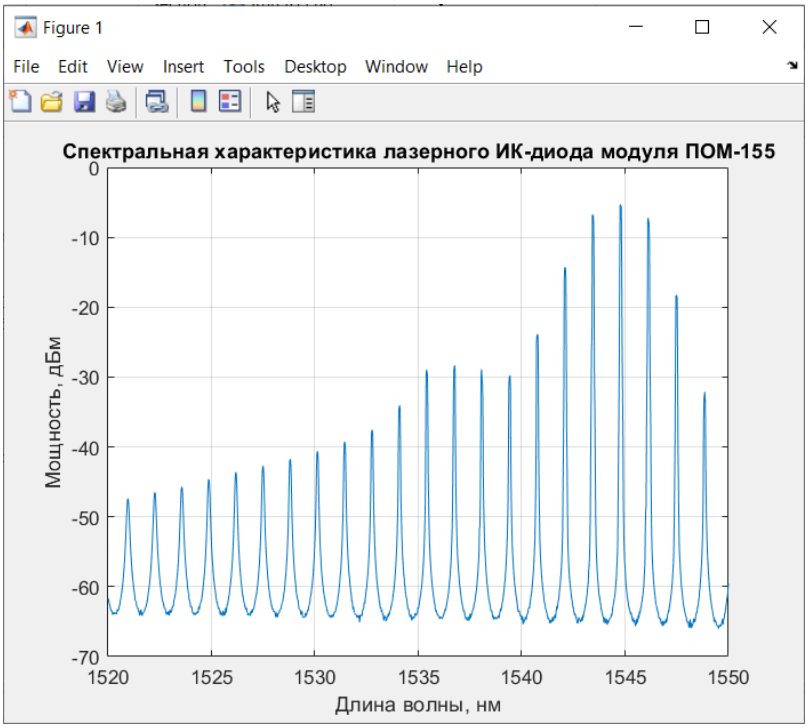


Рис. 10. Спектр излучения полупроводникового лазера при температуре корпуса оптического модуля 40°С

Дальнейший нагрев корпуса оптического модуля не производился, поскольку при таком, достаточно грубом методе нагрева лабораторного образца очень велик риск вывода полупроводникового лазера из строя. Перегрев кристалла лазерного диода приводит к некон-

тролируемому росту тока накачки полупроводникового лазера, что может привести к физическому разрушению самого кристалла.

Ширина линии генерации лазера для спектров при температуре модуля 35 и 40 °С найдена таким же способом, как и для спектра при температуре модуля 30 °С. Полученные данные были сведены в таблицу для анализа зависимости ширины линии генерации от температуры.

Таблица. Температурная зависимость параметров лазера

Температура, °С /параметр лазера	30	35	40
Длина волны главной моды, нм	1534	1544	1545
Мощность излучения, дБм	-7,64	-4,6	-4,1
Ширина линии генерации, нм	18	16	15

Из таблицы видно, что с увеличением температуры происходит смещение длины волны основной линии генерации. Это связано с тем, что при увеличении температуры ширина запрещённой зоны полупроводника уменьшается, следовательно, уменьшается и энергия, которая требуется электрону, чтобы из валентной зоны попасть в зону проводимости. Электрон с меньшей энергией перехода при рекомбинации с дыркой излучает фотон с меньшей энергией и большей длиной волны соответственно.

Уменьшение ширины запрещённой зоны полупроводника приводит к сокращению возможных энергий переходов электронов из валентной зоны в зону проводимости и уменьшает количество излучаемых мод лазера. Из-за этого ширина линии генерации лазера становиться меньше.

Кроме того увеличение температуры провоцирует рост порогового тока работы лазера из-за чего уменьшается мощность его излучения.

Заключение

В ходе работы были исследованы основные характеристики полупроводникового лазера передающего оптического модуля ПОМ-155. Понимание структуры и принципа работы такого лазерного диода, а также изучение его спектральной характеристики излучения помогут в будущем улучшить конструкцию макета волоконно-оптической линии передачи. Кроме того полученные в текущей работе данные, помогут сделать более точными результаты исследования каких-либо процессов в оптическом волокне с использованием данного лабораторного макета.

Библиографический список

1. Авторское свидетельство 27448 СССР, МПК H 03b 3/09. Двойной гетероструктурный лазер / Алфёров Ж.И., Казаринов Р.Ф. (СССР). – 950840/26-25; заявлено 30.03.65; опубликовано 15.04.75, бюллетень №14.

2. Сердюков Е.А. Разработка макета приёмного и передающего устройств с оптическим каналом связи. С. 153-158 // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2025 [текст]: сб. тр. VIII междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.1./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2025.

3. Гауэр Дж. Оптические системы связи: Пер. с англ. М.: Радио и связь. 1989. 504 с.

УДК 621.315.592 ГРНТИ 29.19.31

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЫРАЩИВАНИЯ НА СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

А.В. Слугин

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина, Российская Федерация, Рязань, s.anton03.2002@yndex.ru

Аннотация. В работе рассматривается применение метода двумерного флуктуационного анализа с исключенным трендом для исследования свойств поверхности пористого кремния. Кратко приводятся теоретические основы метода. Представлены результаты анализа корреляционных свойств поверхностей пленок пористого кремния, полученных при различных условиях.

Ключевые слова: флуктуационный анализ, поверхность, пористый кремний, корреляционные характеристики.

AN INTEGRATED APPROACH TO THE STUDY OF STRUCTURAL PROPERTIES OF SURFACES OF SOLID-STATE MATERIALS

A.V. Slugin

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin, Russian Federation, Ryazan, s.anton03.2002@yndex.ru

Annotation. The paper considers the application of the two-dimensional fluctuation analysis method with an excluded trend to study the surface properties of porous silicon. The theoretical foundations of the method are briefly described. The results of the analysis of the correlation properties of the surfaces of porous silicon films obtained under various conditions are presented.

Keywords: fluctuation analysis, surface, porous silicon, correlation characteristics.

Введение

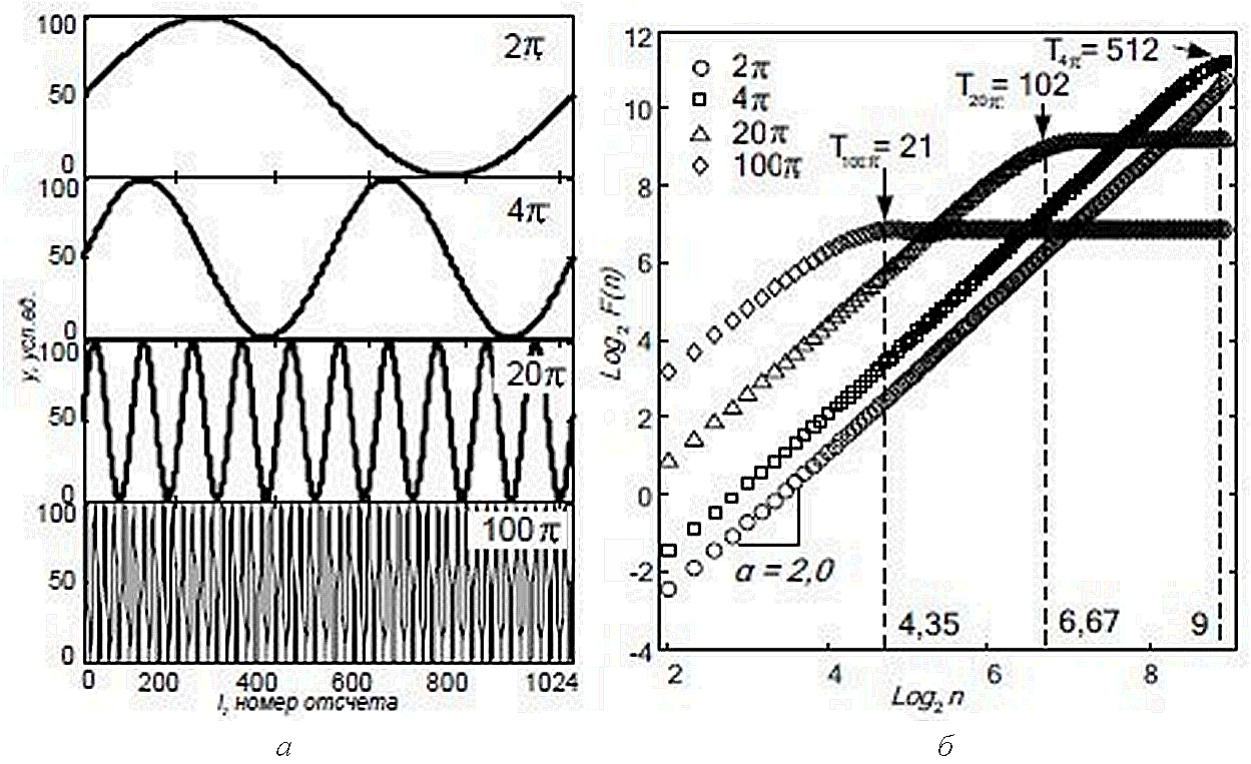
Современное материаловедение требует всестороннего анализа структуры синтезируемых материалов. Значительную роль в развитии данного направления играет совершенствование методов исследования структуры поверхности и анализа её характеристик. Существует множество методов анализа поверхности, в числе которых двумерный флуктуационный анализ с исключенным трендом (2D DFA).

Основы метода 2D-DFA

Поверхность твердых тел является сложной системой и включает в себя детерминированные и случайные факторы. Характерные временные и пространственные масштабы этих систем обычно варьируются в довольно широком диапазоне значений, а это приводит к неэкспоненциальному спаду автокорреляционной функции [1]. Первичная цель флуктуационного анализа – преобразовать спадающую автокорреляционную функцию (АКФ) в некоторую возрастающую функцию, которая будет менее чувствительна к статистическим ошибкам [2]. Данный метод позволяет выявлять длительные корреляции в исследуемом процессе.

Наиболее распространен метод флуктуационного анализа с исключенным трендом. Как пример, можно привести научную публикацию [2]. В данной работе метод использовался для определения структурной сложности поверхности кремния, имплантированного ионами Ag+. Таким образом, были получены значения векторов корреляции *d*, которые отражают значения периодов гармонических составляющих в структуре. Типичный вид флуктуационных функций $F(n)$ представлен на рисунке 1.

Метод 2D DFA позволяет рассчитывать скейлинговый показатель, характеризующий тип корреляций в структуре, и корреляционный вектор, показывающий масштаб проявления этих корреляций [3].



а *б*

Рис. 1. Иллюстрация эффекта кроссовера флуктуационной функции по методу DFA на примере реализаций синусоидальной формы: *а* - реализации синусоиды с различным числом периодов; *б* - зависимость флуктуационной функции от масштаба [2]

В качестве подложки использовалась пластина КЭФ-4,5: кремний монокристаллический, n-типа проводимости (легирован фосфором) удельное сопротивление 4,5 Ом·см, ориентация поверхности (100). На поверхности пластины формировалась пленка пористого кремния (por-Si) методом анодного электрохимического травления в гальваностатическом режиме. Использовался электролит, состоящий из HF и C_2H_5OH в соотношении 1:1. Технологические параметры процессов формирования образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры формирования образцов

Образец	Тип проводимости подложки	ρ (Ом·см)	Примесь	Время травления* (Мин)	Сформирован p-n переход	Облучённая лазером область
1.1	n	4.5	фосфор	12	-	+
1.2	n	4.5	фосфор	12	-	-
2.1	n	4.5	фосфор	5	-	+
2.2	n	4.5	фосфор	5	-	-
3	n	4.5	фосфор	10	+	+
4.1	p	1	-	15**	-	+
4.2	p	1	-	15**	-	-
5.1	p	1	-	10	-	+
5.2	p	1	-	10	-	-

* Плотность тока при травлении у образцов 1,2,3,5 = 20мА/см2.

** Для образца 4 плёнка por-Si формировалась методом металл-стимулированного травления. Для остальных образцов – методом анодного электрохимического травления в гальваностатическом режиме.

Пленки por-Si всех образцов облучались импульсным лазером LS-2147A (Nd:YAG) с генератором гармоник. Облучение производилось однократным импульсом длительностью

18 нс на длине волны 355 нм, плотность энергии составляла 0,44 - 0,6 Дж/см^2. Изображения поверхностей образцов были получены методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе JEOL JSM6610LV в режиме вторичных электронов и напряжении на катоде 30 кВ

Анализ результатов, полученных методом 2D-DFA

В таблице 2 приведены расчетные числовые характеристики образцов – корреляционные векторы и скейлинговый показатель.

Таблица 2. Корреляционные векторы и скейлинговый показатель образцов

Образец	d, ±0.1 мкм	α
1.1	0.752; 0.873; 1.242; 1.581; 2.518;	0.905
1.2	1.009; 1.611; 2.518; 4.149	0.648
2.1	0.292; 0.473; 0.661; 0.873; 2.76	0.887
2.2	0.724; 1.052; 1.312; 2.76;	0.676
3	0.629; 0.734; 1.112; 1.294; 1.486; 1.762; 2.323	0.73
4.1	0.508; 0.601; 0.982; 1.256; 1.991	0.833
4.2	0.625; 1.197; 1.836; 2.518	0.687
5.1	0.906; 1.799; 2.612	0.667
5.2	1.734	0.651

Анализируя данные таблицы 2 можно сделать следующие выводы.

Скейлинговый показатель образцов 1.2 и 2.2 ниже чем у облучённых лазером поверхностей и наиболее близок к показателю шума (для шума α=0.5). В образцах 2.1 и 2.2 скейлинговый показатель вырос, что говорит о росте упорядоченности структур. Также для облучённых лазером образцов выросло количество корреляционных векторов.

Наиболее часто встречающиеся корреляционные векторы:

1) 0.7 и 2.6 мкм (в 6/9 образцов);

2) 1 и 1.8 мкм (в 4/9 образцов);

3) 1.3 и 1.5 мкм (в 3/9 образцов).

Для образца 3 скейлинговый показатель несколько ниже, что говорит о меньшей упорядоченности его структуры. (Образец 3 взят только в области, облученной лазером.) Для образцов 4.X сохраняется тенденция на рост скейлингового показателя при облучении области лазером. Для образцов 5.X в отличие от остальных, скейлинговый показатель для облученной и необлученной областей не изменился. Хотя появились новые корреляционные векторы.

Заключение

В результате применения метода флуктуационного анализа были получены корреляционные векторы и скейлинговые показатели рассмотренных образцов пленок por-Si. Проведён анализ полученных данных и найдены общие корреляционные векторы среди групп образцов. Показано, что воздействие лазерного излучения на структуру поверхности пористого кремния приводит к росту ее упорядоченности.

Работа выполнена с использованием научного оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета имени В.Ф. Уткина.

Библиографический список

1. Рыбина Н.В., Алпатов А.В., Рыбин Н.Б., Маслов А.А. Определение структурной сложности поверхности твердотельных материалов – Рязань: РГРТУ, 2022 - 8 с
2. Рыбина Н.В., Рыбин Н.Б. управление свойствами наноматериалов и наноструктур: учеб. пособие. Рязань: РГРТУ,2022. - 160 с.
3. Самоорганизующиеся структуры в электронике: монография / С.П. Вихров, Н.В. Рыбина, Н.В. Бодягин, Н.Б. Рыбин, А.В. Алпатов; Рязань: ИП Жуков В.Ю., 2017. 168 с.

УДК 621.383 ГРНТИ 47.33.33

ФОТОПРИЕМНИКИ ДАЛЬНЕГО ИК ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУР

С.Д. Трунин, В.Г. Мишустин

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина, Российская Федерация, Рязань, gudlov4000@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрены физические принципы работы фотоприемника дальнего ИК диапазона на основе квантово-размерных структур, конструкция и используемые материалы. Описаны основные характеристики фотоприемника на основе системы GaAs/AlGaAs, а также их зависимость от параметров гетероструктуры и внешних факторов.
Ключевые слова: оптическое поглощение, фотоприемник, дальний ИК диапазон, квантовая яма, уровни размерного квантования, квантово-размерная структура, электрооптические характеристики.

LONG-WAVE IR PHOTOSENSORS BASED ON SEMICONDUCTOR NANOSTRUCTURES

S.D. Trunin, V.G. Mishustin

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkina, Russian Federation, Ryazan, gudlov4000@mail.ru

Abstract. The paper discusses the physical principles of operation of a far-infrared photodetector based on quantum-dimensional structures, as well as its design and materials. The paper describes the main characteristics of a photodetector based on the GaAs/AlGaAs system, as well as their dependence on the parameters of the heterostructure and external factors.
Keywords: optical absorption, photodetector, far-IR range, quantum well, dimensional quantization levels, quantum-dimensional structure, electro-optical characteristics.

Введение

Дальний инфракрасный или длинноволновый диапазон относится к определенному участку инфракрасного спектра электромагнитного излучения. Интерес к нему обусловлен фундаментальной физикой: в диапазоне 8 – 14 мкм лежит максимум теплового излучения тел с температурой около 300 К, что соответствует температуре большинства объектов на Земле. При этом на данный диапазон приходится одно из ключевых "окон прозрачности" атмосферы [1].

Поскольку в дальнем ИК диапазоне регистрируется не отраженный свет, а собственное излучение объектов, это означает возможность "видеть" в любое время суток, при наличии тумана, задымления, пыли и т.д. Это означает, что данный диапазон очень важен для навигации и обеспечения безопасности движения, поисково-спасательных и специальных операций, систем безопасности и обороны, дистанционного зондирования земли, контроля промышленных объектов и энергетики, систем связи, медицины, астрономии и многих других областей науки и техники.

Целью данной работы является рассмотрение физической природы оптического поглощения в полупроводниковых квантово-размерных структурах, применяемых материалов

и конструкций фотоприемников дальнего ИК диапазона, а также их основных электрооптических характеристик.

Физическая природа оптического поглощения в полупроводниковых материалах и в квантово-размерных структурах на их основе

В полупроводниках различают несколько видов оптического поглощения (рисунок 1): собственное (фундаментальное) поглощение; примесное поглощение; экситонное поглощение; поглощение свободными носителями заряда; поглощение света кристаллической решеткой.

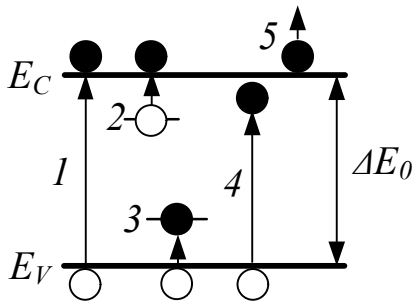


Рис. 4. Механизмы оптического поглощения в полупроводниках [2]

Собственное поглощение (*1*) обусловлено переходами электронов из валентной зоны в зону проводимости, т.е. энергия квантов света идет на ионизацию атомов полупроводника. Собственное поглощение возможно, если энергия фотонов превышает ширину запрещенной зоны $h\nu > \Delta E_0$. В зависимости от ширины запрещенной зоны оно проявляется в видимой или ближней инфракрасной области спектра. Оптические переходы электронов из одной энергетической зоны в другую могут быть прямыми и непрямыми.

Примесное поглощение света (*2*, *3*) обусловлено ионизацией примесных атомов в кристаллической решетке. Энергия фотонов расходуется на переход электронов с донорных уровней в зону проводимости и/или на переход электронов из валентной зоны на акцепторные уровни.

Экситонное поглощение (*4*) представляет собой поглощение энергии кванта, которое не приводит к возникновению свободных носителей заряда. При этом возбужденный электрон не разрывает связи с дыркой, возникающей в валентной зоне, и образует с ней единую связанную систему.

Поглощение свободными носителями заряда (*5*) обусловлено переходами электронов и дырок с одного уровня на другой внутри энергетических зон под действием квантов света. Электроны (дырки) совершают колебательные движения под действием электрического поля световой волны. Энергия электрического поля переходит в кинетическую энергию носителей, и при их столкновениях с узлами кристаллической решетки – в тепловую энергию решетки.

Поглощение света кристаллической решеткой происходит в результате взаимодействия электромагнитного поля с колеблющимися узлами решетки. Этот вид поглощения связан с изменением колебательной энергии атомов. Оно проявляется в далекой инфракрасной области спектра и накладывается на примесное поглощение и поглощение носителями заряда.

Таким образом, собственное и примесное поглощение приводит к появлению дополнительных свободных носителей заряда и возникновению фотопроводимости, а экситонное, фононное и поглощение на свободных носителях приводят лишь к разогреву кристалла [3].

В отличие от объемных материалов, оптическое поглощение в квантово-размерных структурах связано с дискретным энергетическим спектром и целым набором специфических эффектов. Поглощение в дальнем ИК диапазоне обычно обусловлено не межзонными, а

внутризонными переходами. Это переходы носителей заряда (электронов или дырок) происходят между дискретными уровнями размерного квантования в пределах одной разрешенной зоны – зоны проводимости или валентной зоны (рисунок 2). При этом энергия перехода определяется не шириной запрещенной зоны материала, а геометрией структуры, т.е. шириной квантовой ямы. Варьируя размеры, можно "настраивать" структуру на нужную длину волны в дальнем ИК диапазоне [3]. Кроме того, в квантовых ямах поглощение для переходов внутри подзоны возможно только для света, поляризованного перпендикулярно плоскости слоев. Соответственно для эффективного поглощения требуется применять специальные схемы ввода излучения [4].

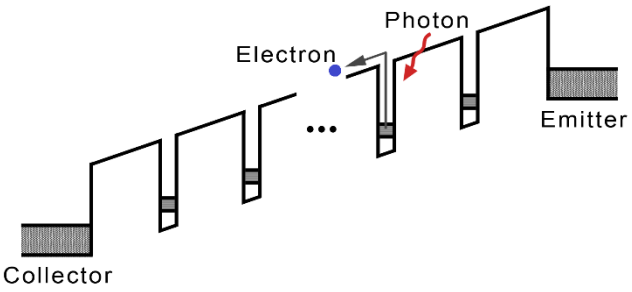


Рис. 2. Механизм фотопроводимости в идеализированной квантово-размерной структуре

При теоретическом описании физических процессов в квантово-размерных структурах часто используют идеализированную прямоугольную форму квантовой ямы. Однако на практике, из-за особенностей эпитаксиального роста, профиль может быть непрямоугольным и асимметричным. Это приводит к изменению энергетического спектра и, соответственно, спектра поглощения. В результате энергия переходов немного "плавает" по структуре, что приводит к уширению пика поглощения. Вклад в уширение от неровностей границ особенно значим именно для дальнего ИК диапазона [5].

Также фотоэлектрические характеристики квантово-размерных структур кроме особенностей оптического поглощения в значительной степени зависят от механизмов транспорта и рекомбинации фотогенерированных носителей, что объясняется их локализацией в квантовой яме [6].

Материалы и конструкции фотоприемников дальнего ИК излучения на основе квантово-размерных структур

Среди полупроводниковых материалов, используемых для фотоприемников дальнего ИК диапазона, наибольшее распространение получил тройной сплав HgCdTe. Изменяя соотношение Cd/Hg, можно добиться достаточно высокой чувствительности этого материала в длинноволновый ИК области (8 – 12 мкм и дальше), однако для его работы требуется криогенное охлаждение. Квантовая эффективность этого соединения составляет порядка 70 – 80% [7].

Также перспективным материалом для фотонных фотоприемников дальнего ИК диапазона является PbSnTe:In. Благодаря эффекту концентрационной гигантской примеси индия, детекторы на его основе обладают уникально высоким сопротивлением и чувствительностью, хотя и требуют глубокого охлаждения [8].

Однако наиболее важным материалом для фотоприемников дальнего ИК диапазона следует считать системы $A^{III}B^{V}$, например, арсенид галлия – арсенид галлия-алюминия (GaAs/AlGaAs), арсенид индия (InAs), антимонид галлия (GaSb) и др. Фотоприемники на основе этих материалов имеют относительно низкую квантовую эффективность и тоже требуют охлаждения, тем не менее они очень технологичны (используется стандартная технология GaAs) и идеально подходят для сложных архитектур, таких как сверхрешетки.

Конструкция фотоприемников на основе GaAs/AlGaAs состоит из чередующихся слоев GaAs толщиной порядка 5 нм, которые представляют собой квантовую яму для электронов, и слоев более широкозонного материала AlGaAs толщиной 30 – 50 нм, которые создает стенки для ямы (рисунок 3). Количество таких повторяющихся слоев может достигать нескольких десятков для увеличения чувствительности фотоприемника. Чередующиеся слои GaAs и AlGaAs выращиваются на полуизолирующей подложке GaAs методами газофазной или молекулярно-лучевой эпитаксии. Снизу и сверху структуры формируются сильно легированные слои n-GaAs для обеспечения хорошего электрического контакта.

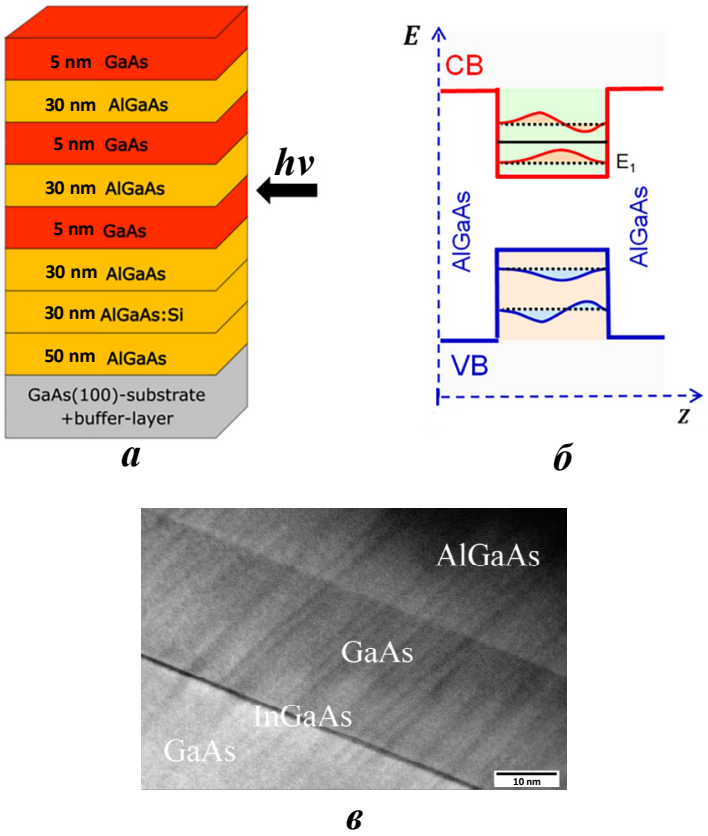


Рис. 3. Фотоприемник дальнего ИК диапазона на основе квантово-размерной структуры GaAs/AlGaAs: *а* – структура фотоприемника; *б* – фрагмент зонной диаграммы активной области; *в* – РЭМ изображение структуры

Поскольку квантово-размерные системы восприимчивы только к свету, поляризованному перпендикулярно плоскости слоев, для эффективной работы фотоприемника необходимо использовать специальные схемы ввода излучения. Классическим решением является вытравливание двумерной дифракционной решетки на поверхности фоточувствительного элемента [8]. Решетка "разворачивает" падающий на поверхность свет, преобразуя его в дифракционные моды, которые уже имеют компоненту электрического поля, перпендикулярную слоям. Кроме того, оптимизация параметров решетки (период, глубина) под конкретную длину волны падающего излучения позволяет добиться эффективности ввода излучения порядка 95% [9].

Основные характеристики фотоприемников дальнего ИК излучения

Для сравнения фотоприемников дальнего ИК-диапазона на основе квантово-размерных структур GaAs/AlGaAs используется набор определенных параметров, позволяющих оценить пригодность фотоприемника для решения конкретной задачи.

1. Интегральные и пороговые характеристики – характеризуют способность фотоприемника регистрировать слабые сигналы, т.е. их чувствительность.

Обнаружительная способность D – показывает соотношение сигнал/шум, нормированное на площадь детектора и полосу частот. Чем выше D, тем более слабый сигнал способен зарегистрировать фотоприемник. Для систем GaAs/AlGaAs в диапазоне 8 – 9 мкм при температуре 65 – 70 К типичные значения составляют $1{\cdot}10^{10} – 4{\cdot}10^{10}$ см·Гц$^{1/2}$/Вт.

Вольт-ваттная (токовая) чувствительность R_V (R_I) показывает, насколько большой электрический сигнал (напряжение или ток) выдает детектор в ответ на падающую оптическую мощность, т.е. определяет коэффициент преобразования света в электричество. Для систем GaAs/AlGaAs типичное значение токовой чувствительности R_I составляет 0. 1– 0.5 А/Вт в зависимости от приложенного смещения и длины волны.

Эквивалентная шуму разность температур (ЭШРТ) – это ключевая характеристика для тепловизионных матриц, которая показывает, какое минимальное различие в температуре объектов способна увидеть камера. Чем меньше этот параметр, тем более контрастным будет тепловизионное изображение. Для современных матриц на GaAs/AlGaAs хорошим показателем считается значение менее 30 – 40 мК. На рисунке 4 представлена температурная зависимость ЭШРТ для двух образцов, отличающихся составом и толщиной слоев GaAs/AlGaAs [9].

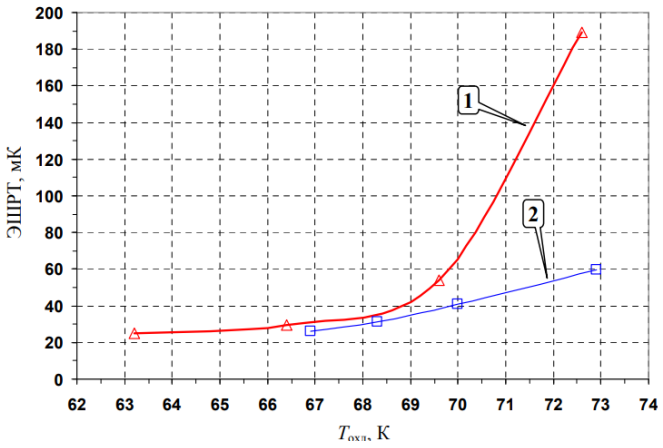


Рис. 4. Температурная зависимость ЭШРТ тепловизионной матрицы на основе квантово-размерной структуры GaAs/AlGaAs: пластина М1856 (кривая 1) и пластина М1913 (пластина 2) [9]

2. Спектральные характеристики описывают, на какую длину волны реагирует фотоприемник.

Спектральный диапазон чувствительности ($\Delta\lambda$) – это интервал длин волн, в котором фотоприемник эффективно работает. Для систем GaAs/AlGaAs он определяется глубиной квантовой ямы, т.е. концентрацией Al в барьерах AlGaAs, и шириной самой ямы, т.е. слоя GaAs. Типичные значения составляют несколько микрон, например, 7,5 – 10 мкм. На рисунке 5 показаны характеристики относительной спектральной чувствительности для двух образцов, отличающихся составом и толщиной слоев GaAs/AlGaAs [9].

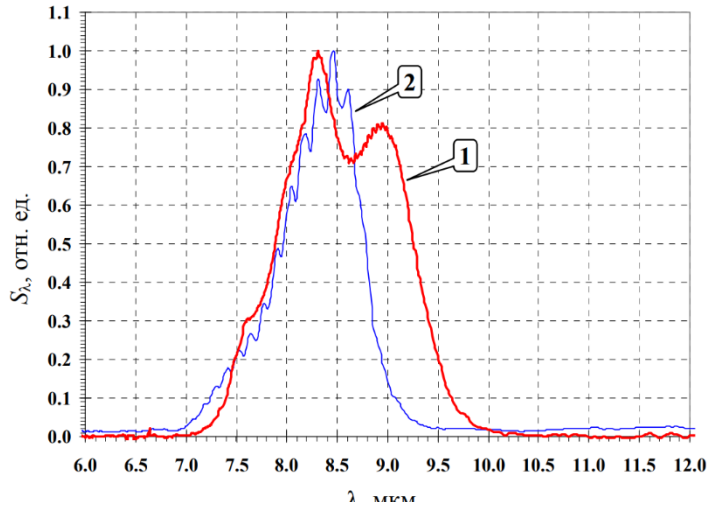


Рис. 5. Характеристики относительной спектральной чувствительности тепловизионной матрицы на основе квантово-размерной структуры GaAs/AlGaAs: пластина М1856 (кривая 1) и пластина М1913 (пластина 2) [9]

Длина волны максимума чувствительности – это длина волны, на которой чувствительность фотоприемника наивысшая. Для дальнего ИК-диапазона это обычно 8 – 12 мкм, что соответствует "окну прозрачности" атмосферы.

Квантовая эффективность (η) – показывает, какая доля падающих фотонов преобразуется в собираемые носители заряда. Для систем GaAs/AlGaAs квантовая эффективность обычно невысока и составляет несколько процентов. Для ее повышения применяют сложные конструкции ввода излучения (дифракционные решетки и другие решения), с помощью которых можно достичь эффективности поглощения света до 95%.

3. Темновые и шумовые характеристики – эти параметры определяют пределы чувствительности и рабочие условия.

Темновой ток – это ток, протекающий через структуру в отсутствие оптического сигнала, т.е. в полной темноте. Это основной источник шума в фотонных детекторах. Темновой ток экспоненциально зависит от температуры. Для систем GaAS/AlGaAs при температурах выше 70 К темновой ток становится настолько большим, что "забивает" полезный сигнал. Из-за этого тепловизионные матрицы приходится охлаждать.

Рабочая температура, т.е. температура, при которой фотоприемник обеспечивает свои заявленные характеристики – это важнейший эксплуатационный параметр, определяющий сложность и стоимость системы охлаждения. Системы GaAs/AlGaAs обычно работают при температурах 65-75 К, которые достигаются с помощью микрокриогенных систем охлаждения.

4. Быстродействие фотоприемника определяется постоянное времени (τ), которое характеризует инерционность устройства, т.е. как быстро он реагирует на изменение светового потока. Для системы GaAs/AlGaAs время отклика в первую очередь зависит от времени пролета электронов через структуру или времени их захвата в яму. Для них τ составляет порядка пико- или наносекунд, поэтому они обеспечивают высокую скорость съемки и хорошо подходят для регистрации коротких импульсов.

В таблице 1 приведены некоторые технические характеристики фотоприемников дальнего ИК-диапазона, производимые в Российской Федерации [8, 9].

Таблица 1. Некоторые технические характеристики фотоприемников дальнего ИК диапазона [8, 9]

Разработчик/Модель	Спектральный диапазон	Рабочая температура	Примечания
ИФП СО РАН, РФ	7.5 –1 0 мкм (пик 9.2 – 9.3 мкм)	67 – 68 K	Матрица 320×256. Использована двумерная дифракционная решетка. Температурное разрешение 29-39 мК.
НПО "Орион", РФ	Дальний ИК	65 K	Матрица 128×128. Температурное разрешение 67 мК.
ОКБ "Астрон", РФ Серийный модуль "АСТРОН-640КЯ20А89"	8.3 – 8.7 мкм	70 –74 K	Матрица 640×512. Интегрирован с микрокриогенной системой охлаждения.

Заключение

Фотоприемники на основе квантово-размерных структур за счет внутризонных оптических переходов в квантовых ямах могут эффективно детектировать оптическое излучение дальней ИК области спектра. За счет изменения геометрии и химического состава слоев в системе GaAs/AlGaAs возможно обеспечить высокую избирательность в диапазоне 8 – 12 мкм, что соответствует основному "окну прозрачности" атмосферы.

Анализ электрооптических характеристик фотоприемников подтверждает, что несмотря на необходимость криогенного охлаждения (65 – 75 K) и относительно невысокую квантовую эффективность фотоприемники на основе системы GaAs/AlGaAs занимают важное место в системах тепловидения, а их высокая технологичность и воспроизводимость эпитаксиальных структур позволяют создавать крупноформатные матрицы (вплоть до 640×512 элементов) с температурным разрешением до 30 мК.

Дальнейшее развитие фотоприемников дальнего ИК диапазона на основе квантово-размерных структур связано с оптимизацией эпитаксиальных технологий для снижения влияния флуктуаций гетерограниц, а также с совершенствованием методов ввода излучения в структуру. Это позволит повысить рабочую температуру и чувствительность устройств, расширяя их применение в различных областях.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2025-0002) с использованием научного оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета имени В.Ф. Уткина.

Библиографический список

1. Научно-образовательный портал Science in Poland. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://scienceinpoland.pl/en/news/news%2C103629%2Cwork-underway-polish-far-infrared-detector-array.html (дата обращения: 25.02.2026).

2. В.Г. Литвинов, В.Г. Мишустин, Т.А. Холомина Исследование зависимости электропроводности полупроводников от освещенности и температуры // Методические указания к лабораторной работе / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. Рязань, 2020. 16 с.

3. Образовательный портал Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова [Электронный ресурс]. – Режим доступа http://physelec.phys.msu.ru/files/practice/optics.pdf (дата обращения: 26.02.2026).

4. Файловый архив для студентов studfile.net [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://studfile.net/preview/8236773/page:4/#6 (дата обращения: 26.02.2026).

5. Васько Ф.Т. Уширение пика межподзонного поглощения из-за неэкранируемой неоднородности уровней // ЖЭТФ, 2001, Т. 120, Вып. 6 (12), С. 1468 – 1477.

6. М.Я. Винниченко, И.С. Махов, Н.Ю. Харин и др. Фотопроводимость и поглощение инфракрасного излучения в квантовых ямах p-GaAs/AlGaAs // Физика и техника полупроводников, 2021, Т. 55, Вып. 8. С. 629 – 636.

7. Rogalski A. Progress in focal plane array technologies // Progress in Quantum Electronics. 2012. V.36. P. 342 – 473.

8. Акимов А.Н., Климов А.Э., Неизвестный И.Г. и др. Матричные приемники дальнего ИК и терагерцового диапазонов – основа одного из перспективных направлений развития радиолокационных систем // Вестник СибГУТИ. 2015. Вып. 2. С. 37 – 50.

9. К.О. Болтарь, И.Д. Бурлаков, П.В. Власов и др. Матричные фотоприемные устройства длинноволнового ИК-диапазона на основе кванторазмерной структуры AlGaAs/GaAs формата 384×288 // Прикладная физика, 2016, № 6. С. 37 – 41.

УДК 621.315.592; ГРНТИ 29.19.31

ВЛИЯНИЕ ГЛУБОКИХ ЦЕНТРОВ НА ПАРАМЕТРЫ КРЕМНИЕВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

Н.А. Чуваков, В.В. Гудзев

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

Аннотация. В работе рассматривается влияние дефектов и глубоких уровней (ГУ) на параметры полупроводниковых приборов. Современная тенденция к уменьшению элементов схем повысило актуальность данной проблемы. Изучалось влияние глубоких уровней на параметры диодов Шоттки и планарных кремниевых транзисторов с использованием релаксационной спектроскопии глубоких уровней. Установлена зависимость, что применение различных технологических операций напрямую влияет на концентрацию глубоких уровней и, как следствие, на электрические параметры полупроводниковых приборов.

Ключевые слова: дефекты, глубокие уровни (ГУ), диод Шоттки, транзистор, релаксационная спектроскопия глубоких уровней.

INFLUENCE OF DEEP CENTERS ON PARAMETERS OF SILICON SEMICONDUCTOR STRUCTURES

N.A. Chuvakov, V.V. Gudzev

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

Abstract. The paper considers the influence of defects and deep levels (DL) on the parameters of semiconductor devices. The current trend towards miniaturization has increased the relevance of this problem. The influence of deep levels on the parameters of Schottky diodes and planar silicon transistors was studied using deep-level relaxation spectroscopy. It was found that the use of various technological operations directly affects the concentration of deep levels and, consequently, the electrical parameters of semiconductor devices.

Keywords: defects, deep levels (DL), Schottky diode, transistor, deep-level relaxation spectroscopy.

Введение

Одна из важнейших задач физики полупроводников является поиск решения проблемы со стабильностью параметров полупроводниковых приборов и интегральных схем. Данная проблема в основном обусловлена возникновением в процессе изготовления или эксплуатации различных дефектов и примесей, которые создают глубокие центры в полупроводниковых структурах. В настоящий момент практически вся электроника имеет общую тенденцию к уменьшению своих размеров, что в свою очередь увеличивает влияние дефектов и примесей на параметры структур.

Дефекты и их классификация

Дефекты барьерной структуры могут быть собственными, обусловленными особенностями получения материала, и наведенными, т.е. созданными под влиянием различных тех-

нологических факторов в процессе их изготовления. Дефекты создают локализованные состояния или глубокие центры, которым в зависимости от их заряда, до и после взаимодействия с электроном, приписывается донорный или акцепторный тип. Такие дефекты сильно влияют на полупроводниковые структуры, например увеличение концентрации глубоких центров приводит к уменьшению времени жизни носителей заряда, что в свою очередь с одной стороны увеличивает быстродействие, но с другой стороны ухудшает электрические параметры структуры, например снижает пробивное напряжение или увеличивает генерационно-рекомбинационную составляющую тока и так далее.

Причины образования дефектов:

а) наличие постороннего атома, отличающегося от остальных атомов вещества (примесь замещения или внедрения);

б) отсутствие одного или более атомов в узлах (вакансии, дивакансии и т.д.);

в) смещение одного или более атомов из регулярного положения равновесия в решетке (междоузельные атомы, краевые или винтовые дислокации – сдвиг или обрыв атомных плоскостей);

г) «обрыв» кристалла на его внутренних или внешних границах.

Влияние дефектов структуры на свойства кремния

Исходя из таблицы 1, следует, что для существующих технологических процессов получения монокристаллов кремния требуется достигнуть ряд требований. Качество и соответственно надежность полупроводниковых приборов, их характеристики, зависят от электронных свойств глубоких уровней. Сами причины деградации характеристик из-за кристаллографических дефектов на данный момент мало изучены и сложны.

Таблица 1. Структурно-примесные характеристики монокристаллов и подложек кремния [1]

Контролируемые характеристики кремния	Способ получения монокристаллов кремния		Современные требования, предъявляемые к кремнию
	Метод Чохральского	Бестигельная зонная плавка	
Время жизни носителей, мкс	30-300	50-500	300-1000
Концентрация кислорода, $см^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{17}$-$2 \cdot 10^{18}$	Не обнаружен	Однородность распределения по длине и площади сечения
Концентрация углерода, $см^{-3}$	$5 \cdot 10^{16}$-$2,5 \cdot 10^{17}$	$5 \cdot 10^{15}$-$5 \cdot 10^{16}$	$5 \cdot 10^{15}$
Концентрация примесей тяжелых металлов, $см^{-3}$	$\leq 5 \cdot 10^{13}$	$\leq 5 \cdot 10^{11}$	$\leq 5 \cdot 10^{10}$
Плотность дислокаций в исходном кремнии, $см^{-2}$	500 (как правило, <1)	500 (как правило, <1)	1
Плотность дислокаций в кремнии после термической обработки (1373 К), $см^{-2}$	Петли дислокаций (10^2-10^4)	Присутствуют частичные дислокации, окаймляющие ДУ	Дислокаций и ДУ на поверхности подложек не должно быть
Плотность дислокаций в эпитаксиальном слое, $см^{-2}$	≤500	≤500	≤1
Контроль обратной стороны подложки	Не контролируется	Не контролируется	Контролируется

Глубокие уровни в кремниевых барьерных структурах (диоды Шоттки)

Для исследования влияния глубоких уровней были взяты диоды Шоттки и изучено образование дефектов с глубокими уровнями в базе, формируемых с использованием операций жидкостного химического травления (ЖХТ) и плазмохимического травления (ПХТ).

Для изучения глубоких уровней был использован метод релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ). Преимущества данного метода заключаются в высокой чувствительности по концентрации дефектов с ГУ и является неразрушающим методом.

Для диодов Шоттки, изготовленных с использованием ЖХТ и ПХТ характерно наличие одного ГУ (E5). Для диодов Шоттки, изготовленных с использованием ПХТ, можно увидеть большее количество глубоких уровней.

Можно заключить, что уровни E1, E2, E3 и E4 связаны с образованием дефектов в процессе ПХТ. Уровень E5, который присутствует во всех образцах, может быть связан с процессом выращивания эпитаксиальной плёнки и является общим для всех случаев.

Термообработка устраняет глубокие центры E1, E2, E3, а концентрация глубоких центров E4 и E5 снижается. Введение операции отжига после ПХТ уменьшает обратный ток и увеличивает высоту барьера диодов Шоттки по сравнению с образцами, не подвергавшимися термообработке. Наименьшими токами утечки и наибольшей высотой потенциального барьера, судя по ВАХ, обладали образцы, полученные с использованием ЖХТ в сочетании с термообработкой.

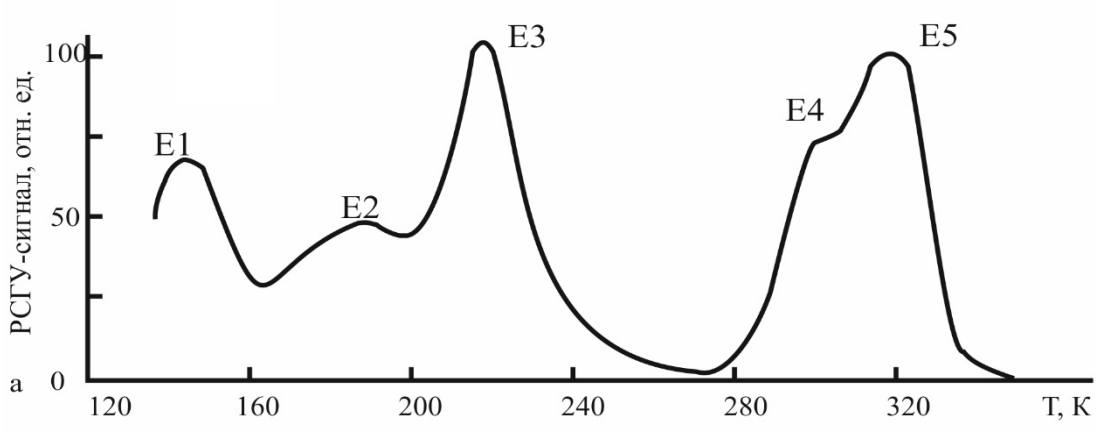


Рис. 1. РСГУ спектр для диода сформированного методом ПХТ без последующей термообработки.

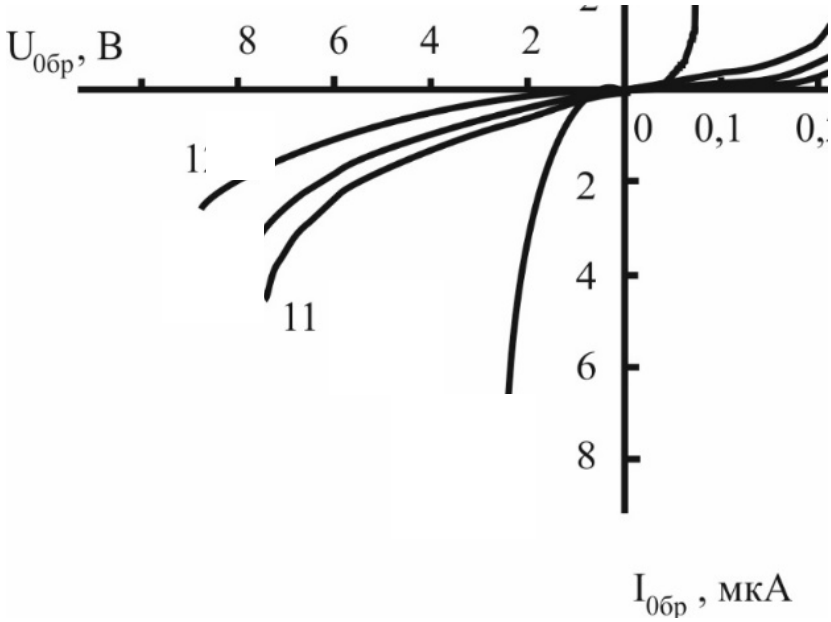


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики диодов для (сверху вниз):
1-я ветвь – диод сформированный методом ЖХТ с последующей термообработкой;
2-я ветвь – метод ЖХТ без термообработки;
3-я ветвь – метод ПХТ с последующей термообработкой;
4-я ветвь - метод ПХТ без последующей термообработки.

Исследование энергетического спектра ГУ в кремниевых планарных транзисторах

Исходя из приведённый исследований [2], можно заключить, что максимальное влияние глубоких уровней приходится на область активной базы транзистора, поэтому обьектом исследования был выбран эмиттерный переход. При снятии РСГУ-спектр мы изменяли напряжение на эмиттерном *n-p*- переходе от некоторого прямого смещения (+0,3В) до обратного (-5В). Такие режимы позволяют нам измерить спектр глубоких уровней в базе [3].

Для изучения влияния глубоких уровней на кремниевый планарный транзистор были исследованы три группы образцов, в которых используются различные технологические операции во время формирования базовой области. Для первой группы образцов была выбрана технологическая операция стравливания боросиликатного стекла (БСС), для второй группы образцов стравливания БСС и окисной плёнки SiO_2 до толщины 0,07 микрометров и для третьей группы образцов полное стравливание БСС и SiO_2 до кремния. В течении одного часа образцы были отожжены при температуре 900 ^oC.

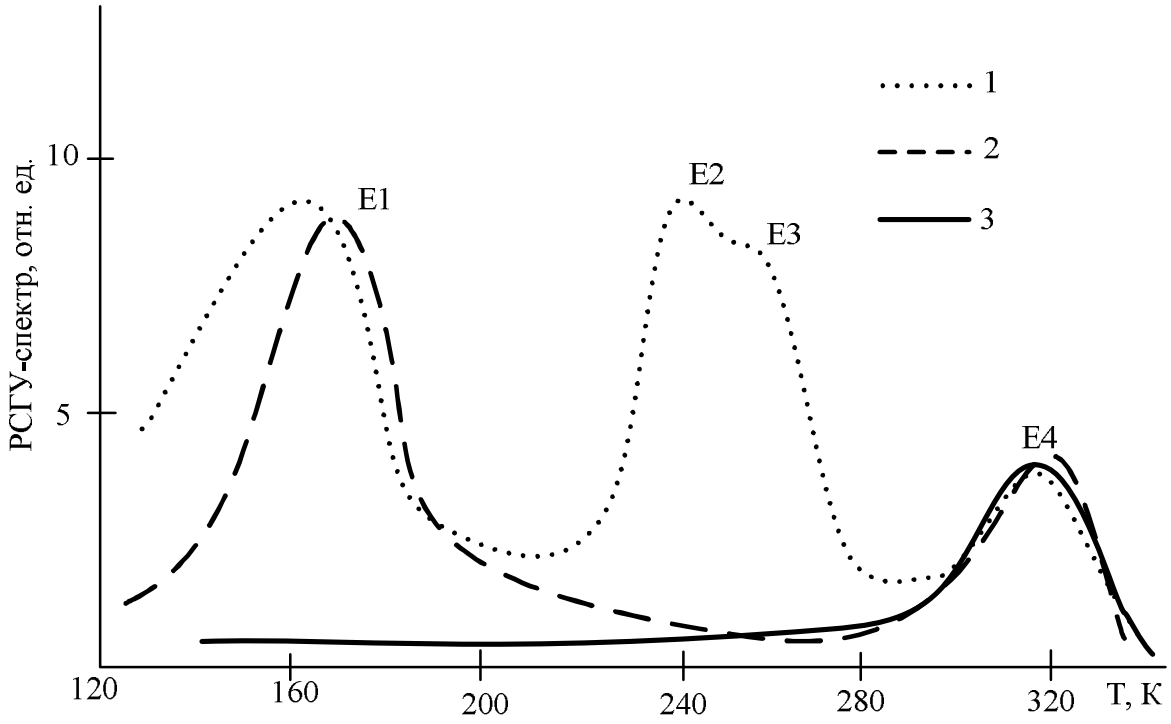


Рис. 3. Спектры глубоких уровней в транзисторной структуре:
1-я группа обрацов отмечена пунктирной линией, 2-я штриховой линией и 3-я сплошной

В первой группе образцов со стравленным БСС (кривая 1) можно наблюдать 4-е глубоких уровня: E1; E2; E3; E4. На всех спектрах присутствовали ГУ E4, который рассматривался ранее.

Можно предположить, что глубокие уровни E1, E2 и E3 связаны с проникновением примесей из пленки SiO_2 в базу.

Во второй группе образцов при удалении БСС и окисла до толщины 0,07 мкм можно наблюдать исчезновение глубоких уровней E2 и E3, а при полном удалении плёнки (3-я группа образцов) ГУ E1 также исчезал.

Таблица 2. Концентрации глубоких центров в транзисторной структуре

Nобр	Техн.базы	Концентрация глубоких центров N_t ,см$^{-3}$				
		E1	E2	E3	E4	Суммарная N_t
1	БСС	$1{,}2\cdot10^{12}$	$1{,}8\cdot10^{12}$	$2{,}9\cdot10^{12}$	$5\cdot10^{11}$	$6{,}4\cdot10^{12}$
2	0,07 мкм SiO_2	$1{,}1\cdot10^{12}$	—	—	$5{,}3\cdot10^{11}$	$1{,}6\cdot10^{12}$
3	SiO_2	—	—	—	$5{,}1\cdot10^{11}$	$5{,}1\cdot10^{11}$
Et эВ		0,30	0,41	0,44	0,55	

Уменьшение коэффициента усиления по току транзистора связано с тем, что глубокие уровни по сути являются центрами рекомбинации для электронов, которые инжектируются из эмиттера в базу.

Заключение

Подводя итог, можно сказать, что глубокие уровни определяются в основном технологическими особенностями изготовления полупроводниковых приборов. Дефекты напрямую влияют на их характеристики. Например, как мы выяснили, они в частности приводят к увеличению обратных токов и вызывают снижение коэффициента передачи по току, что мо-

жет влиять на стабильность работы прибора. Поэтому при изготовлении полупроводниковых приборов нужно контролировать все технологические операции, а по возможности и включать дополнительные, чтобы исключить повышения количества глубоких центров.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2025-0002) с использованием научного оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета имени В.Ф. Уткина

Библиографический список

1. Monkowski J.R. Gettering processes for defect control //Solid-State Technology. 1981. № 7. P. 44-51.
2. Гудзев В.В. Спектр глубоких уровней в npn транзисторе на основе кремния / В.В. Гудзев, М.В. Зубков // Сборник межвуз. научн. трудов Микроэлектроника. Рязань: РГРТА, 2003. С. 14–19.
3. 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.

УДК 621.315.592; ГРНТИ 47.33.33

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБЛУЧЕННЫХ ПРОТОНАМИ КРЕМНИЕВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

И.А. Яцемирский, В.Г. Литвинов, А.В. Ермачихин
Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина, Российская Федерация, Рязань, yailusha03@gmail.com

Аннотация. В работе представлены результаты исследования облученных протонами кремниевых гетероструктурных фотоэлектрических преобразователей. Были проведены исследования температурной и частотной зависимости вольт-фарадных характеристик фотоэлектрических преобразователей в диапазоне температур 40 – 360 К. Показано, что при температурах ниже 150 К появляется низкочастотная составляющая электрической барьерной емкости структуры.
Ключевые слова: кремниевый гетероструктурный фотоэлектрический преобразователь, облучение протонами, вольт-фарадная характеристика.

STUDY OF ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF PROTON-IRRADIATED SILICON HETEROSTRUCTURAL PHOTOVOLTAIC CONVERTERS

I.A. Yatsemirsky, V.G. Litvinov, A.V. Ermachikhin
Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin, Russia, Ryazan, yailusha03@gmail.com

The summary. This paper presents the results of a study of proton-irradiated silicon heterostructure photovoltaic converters. The temperature and frequency dependences of the photovoltaic converters' capacitance-voltage characteristics were studied in the temperature range of 40–360 K. It was shown that at temperatures below 150 K a low-frequency component of the structure's electrical barrier capacitance appears.
Keywords: silicon heterostructure photovoltaic converter, proton irradiation, capacitance-voltage characteristic.

Введение

Кремниевые гетероструктурные фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) являются перспективной элементной базой для создания эффективных энергетических установок. ФЭП на основе тонких слоев аморфного гидрогенизированного кремния в гетероструктур-

ной технологии известно также под аббревиатурой «SHJ» (Silicon heterojunction technology) [1]. Изучение радиационной стойкости кремниевых гетероструктурных фотоэлектрических преобразователей является важной задачей для исследователей, конструкторов и технологов. Ее решение направлено на будущее использование кремниевых ФЭП в конструкции космических аппаратов на околоземной орбите. На данной орбите космические аппараты подвержены воздействию потоков протонов, электронов и других частиц, составляющих солнечный ветер. При воздействии облучения протонами в структуре ФЭП должны образовываться различные дефекты, которые будут ухудшать их параметры. Представляется актуальным проведение исследований влияния облучения ФЭП на эго электрофизические характеристики.

Результаты эксперимента

В данной работе представлены результаты исследования ФЭП на основе структуры n-a-Si:H-(p)c-Si:Ga-p-a-Si:H. Образцы ФЭП были вырезаны из пластины, имели площадь 5×5 мм^2, контактную сетку из серебра, были подвергнуты облучению протонами с энергией 10 МэВ и с разными флюенсами: $1\cdot10^{10}$ см$^{-2}$ (образец №1); $5\cdot10^{10}$ см$^{-2}$ (образец №2); $3\cdot10^{11}$ см$^{-2}$ (образец №3); $2\cdot10^{12}$ см$^{-2}$(образец №4).

Образцы помещались в гелиевый криостат замкнутого цикла Janis CCS-400/204N для измерения температурной зависимости вольт-фарадных (C-V-f-T) характеристик при разной частоте тестового сигнала. C-V характеристики измерялись с помощью RLC-метра Agilent E4980A в диапазоне температур 40 – 360 K, в диапазоне обратных напряжений смещения от 0 до –2,5 В с шагом 0,1 В. Уровень тестового сигнала составлял 30 мВ, а его частота 1, 2, 5 и 10 кГц. Использование более низкой частоты затруднительно вследствие значительного уровня низкочастотного шума, а при более высоких частотах начинают сказываться эффекты в аморфных слоях кремния и на гетерограницах, когда электронные состояния не успевают перезаряжаться вслед за изменением переменной составляющей электрического поля измерительного тестового сигнала. На рисунках 1 – 4 представлены результаты измерения температурной зависимости C-V характеристик образцов №№1 – 4.

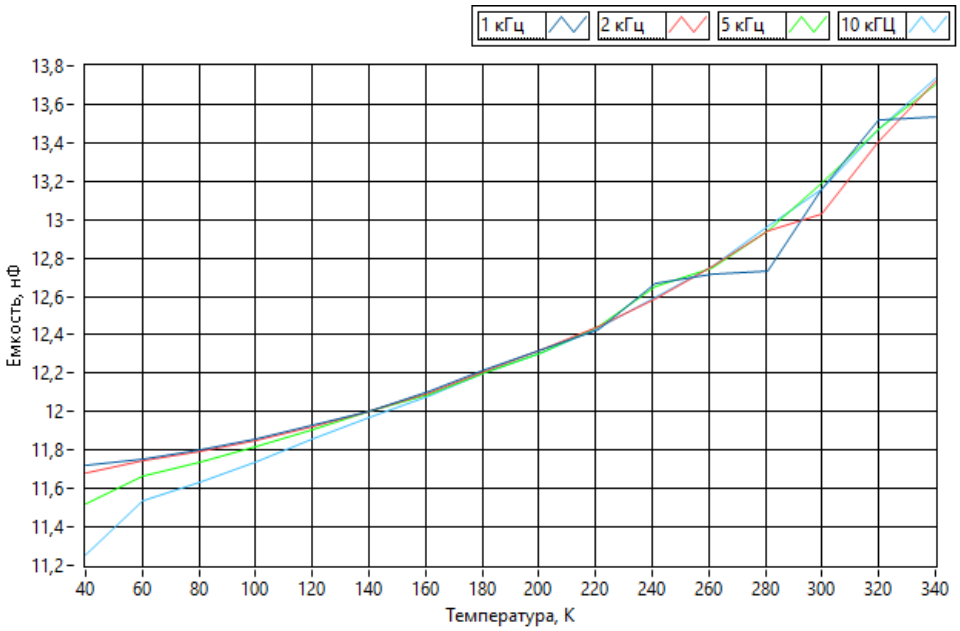


Рис. 1. C-V характеристика образца №1. Четыре кривые разных цветов соответствуют разным частотам тестового сигнала. Частота 1 кГц соответствует кривой синего цвета, частота 2 кГц – кривой красного цвета, частота 5 кГц – кривой зеленого цвета, частота 10 кГц – кривой голубого цвета

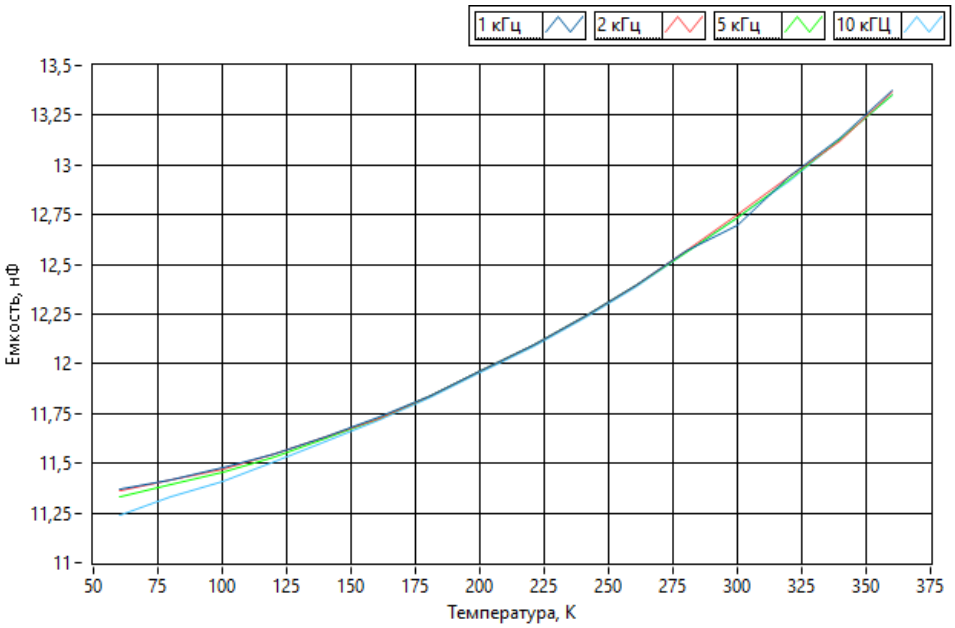


Рис. 2. C-V характеристика образца №2. Четыре кривые разных цветов соответствуют разным частотам тестового сигнала. Частота 1 кГц соответствует кривой синего цвета, частота 2 кГц – кривой красного цвета, частота 5 кГц – кривой зеленого цвета, частота 10 кГц – кривой голубого цвета

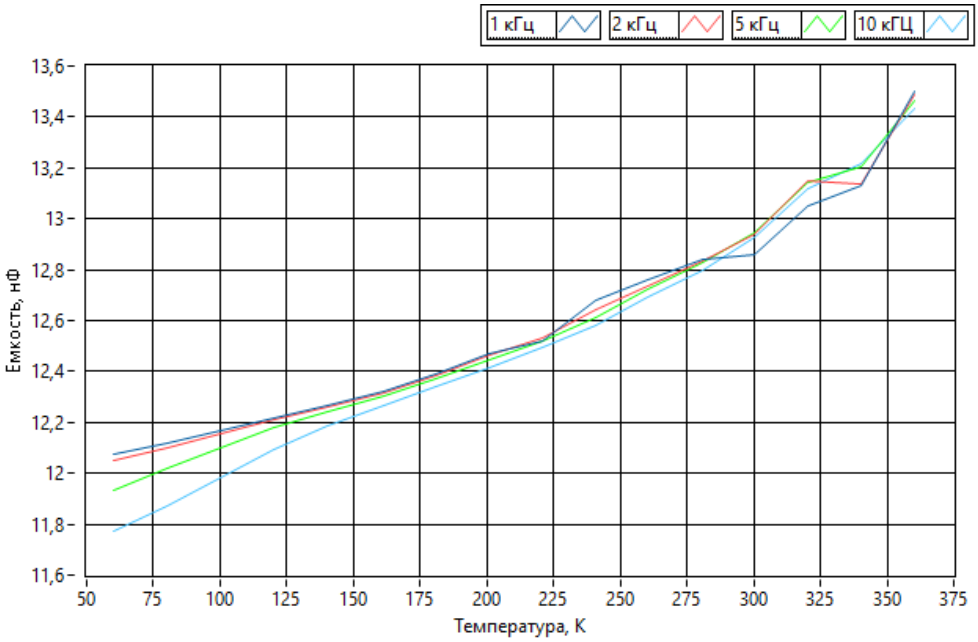


Рис. 3. C-V характеристика образца №3. Четыре кривые разных цветов соответствуют разным частотам тестового сигнала. Частота 1 кГц соответствует кривой синего цвета, частота 2 кГц – кривой красного цвета, частота 5 кГц – кривой зеленого цвета, частота 10 кГц – кривой голубого цвета

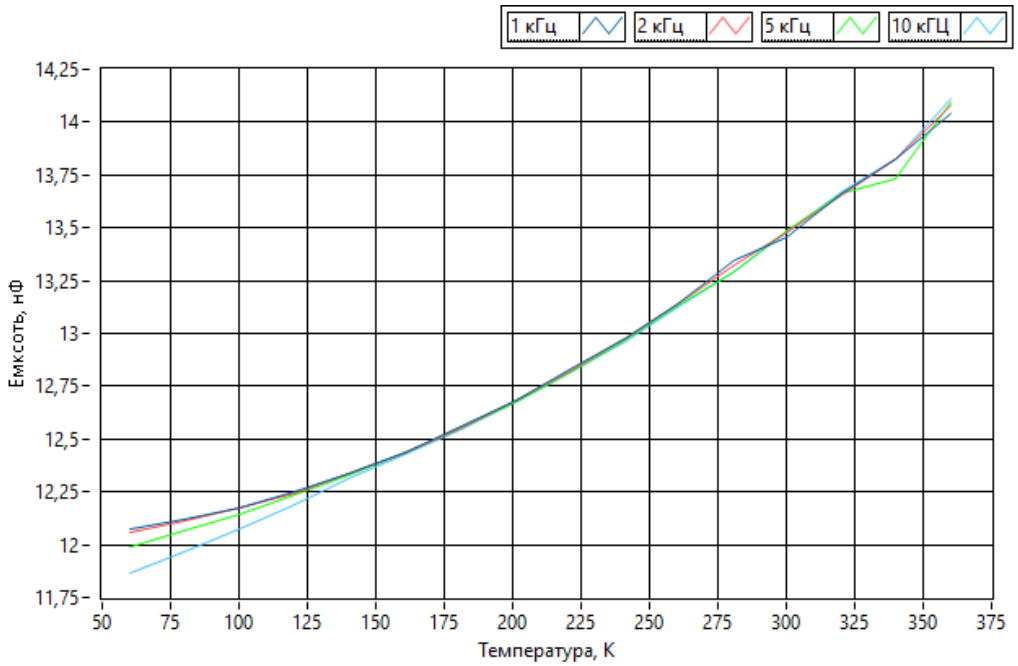


Рис. 4. C-V характеристика образца №4. Четыре кривые разных цветов соответствуют разным частотам тестового сигнала. Частота 1 кГц соответствует кривой синего цвета, частота 2 кГц – кривой красного цвета, частота 5 кГц – кривой зеленого цвета, частота 10 кГц – кривой голубого цвета

Общей характерной чертой всех C-V характеристик является наличие частотной зависимости электрической барьерной емкости ФЭП при низких температурах (ниже 150 – 200 К). Данное явление можно объяснить тем, что при низких температурах на низких частотах проявляется больший вклад медленных энергетических состояний в слоях аморфного кремния в общую электрическую барьерную емкость.

На рисунке 5 для сравнения частотной зависимости C-V характеристик представлены данные для образцов №2 и №4 для двух частот.

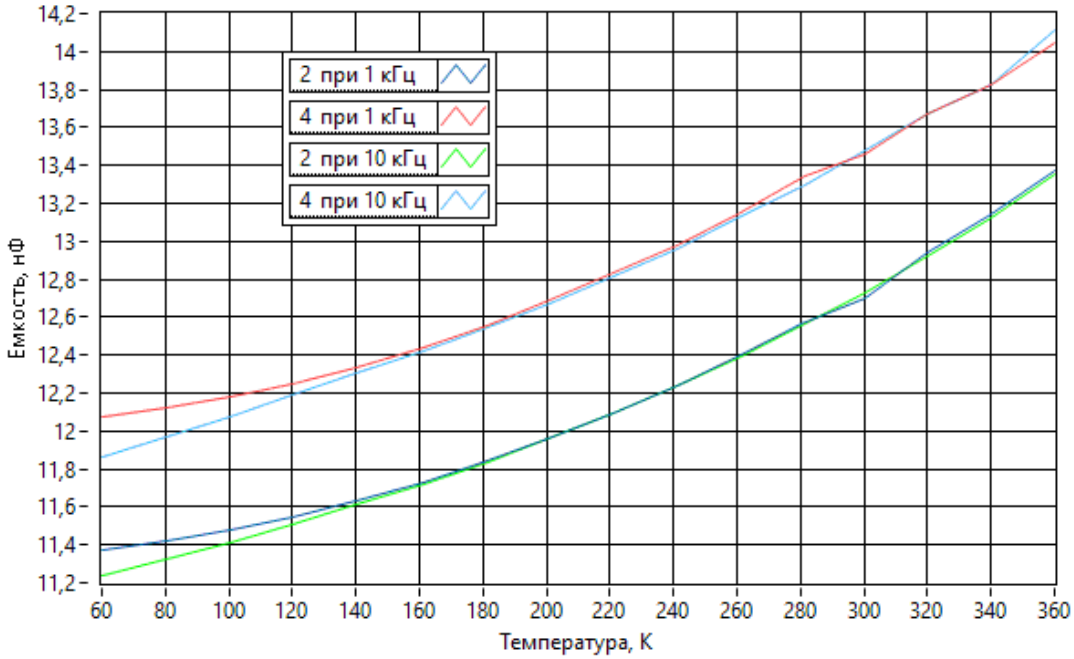


Рис. 5. C-V характеристика образцов №2 (две нижние кривые) и №4 (две верхние кривые)

Различие величины емкости по абсолютному значению для различных образцов, по всей видимости, не связано с параметрами облучения протонами, может быть обусловлено некоторым различием в расположении контактов на фронтальной и обратной сторонах ФЭП, сформированных в виде тонких полосок из серебра.

Из представленных измерений видно, что облучение протонами с энергией 10 МэВ в диапазоне флюенсов $1 \cdot 10^{10}$ см$^{-2}$ – $2 \cdot 10^{12}$ см$^{-2}$ кремниевых гетероструктурных ФЭП не приводит к качественному изменению вольт-фарадных характеристик. Предыдущие исследования подобных ФЭП показали сильную зависимость коэффициента полезного действия (КПД) в сторону снижения от внешнего радиационного облучения – воздействия потоком электронов [2]. КПД относится к важнейшей характеристике ФЭП, и его снижение связано с образованием радиационных дефектов в ФЭП. Даже незначительное увеличение концентрации дефектов ухудшает качественные характеристики ФЭП [3]. Метод C-V характеристик обладает относительно невысокой чувствительностью по концентрации электрически активных дефектов, поэтому для дальнейших исследований влияния облучения протонами на кремниевые гетероструктурные ФЭП представляется перспективным использование более чевствительного метода исследования дефектов – метод релаксационной спектроскопии глубоких уровней и метод измерения спектральной зависимости квантовой эффективности ФЭП.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2025-0002) с использованием научного оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета имени В.Ф. Уткина

Библиографический список

1. A.S. Abramov, D.A. Andronikov, S.N. Abolmasov, E.I. Terukov in: V. Petrova-Koch, R. Hezel, A. Goetzberger (Eds.), High-Efficient Low-Cost Photovoltaics Recent Dev, Springer International Publishing, Cham, 113–132 (2020).

2. В.Г. Литвинов, А.В. Ермачихин, Н.В. Вишняков. Исследование облученных кремниевых гетероструктурных фотоэлектрических преобразователей //Тезисы докладов XXVII Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью» (ВИП-2025). 25-29 августа. Рязань. 2025. С. 278-281.

3. S. M. Sze, Kwok K. Ng Physics of Semiconductor Devices. Third edition, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2007. 815 p.

УДК 539.232; ГРНТИ 47.09.29

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ ОКСИДА ЦИНКА МЕТОДОМ ЛОКАЛЬНОГО АНОДНОГО ОКИСЛЕНИЯ

А.А. Уласень*, В.А. Мошников**

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина),

*Российская Федерация, Санкт-Петербург, *alexandr.ulasen@gmail.com, **vamoshnikov@mail.ru*

Аннотация. В данной работе изучается процесс формирования функциональных нанообъектов на основе оксида цинка, выращенных с помощью метода локального анодного окисления, а также подбираются наилучшие условия для их формирования.

FEATURES OF FORMATION OF NANOSTRUCTURES BASED ON ZINC OXIDE BY LOCAL ANODIC OXIDATION

A.A. Ulasen*, V.A. Moshnikov**

*Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin), Russian Federation, Saint Petersburg, *alexandr.ulasen@gmail.com, **vamoshnikov@mail.ru*

The summary. This work studies the process of forming functional nanostructures based on zinc oxide grown using the local anodic oxidation method, and selects the best conditions for their formation.

Современное развитие науки и техники характеризуется переходом от эпохи нанотехнологий к этапу наноархитектоники. Основное отличие этих этапов заключается в том, что в наноархитектонике возможно объединение достоинств нанообъектов, имеющих общий интерфейс. В связи с этим развилось направление, называемое атомно-молекулярным дизайном и наноархитектоникой

В данном направлении за последнее время популярными материалами стали квазикристаллы [1]. Инструментальные методы для диагностики и технологии таких элементов основаны на сканирующих зондовых приборах, в частности, атомно-силовой микроскопии. Актуальной задачей для апериодических структур является развитие методик сканирующей зондовой микроскопии, обеспечивающей возможность их создания и диагностики нанообъекта.

Постановка задачи и метод её решения

Цель данной работы связана с разработкой и применением проводящей атомно-силовой микроскопии для формирования функциональных слоёв на основе кластеров из ограненных нанокристаллов оксида цинка, путей управления ростом нанокристаллических стержней на зародышах оксида кремния , созданных методом локального анодного окисления кремния при различных условиях влажности и вариации электрического потенциала зонда.

Принцип работы заключается в следующем (см. рисунок 1) на образец, в зазор между иглой кантилевера и поверхностью кремния подаётся разность потенциалов. Из-за малых размеров зазора напряженность электрического поля может достигать значений, превышающих диссоциацию водв напряжение. Катодом выступает игла зонда, а анодом – исследуемый образец. На катоде выделяется положительно заряженный ион водорода, а отрицательно заряженная гидроксильная группа обеспечивает образование оксида кремния [2-5].

С ростом толщины оксида процесс локального анодного окисления самоограничивается из-за перераспределении напряжения между оксидом и водяным зазором (уменьшение напряженности электрического поля в водяном зазоре до значений, меньших необходимых для диссоциациии воды, процесс прекращается).

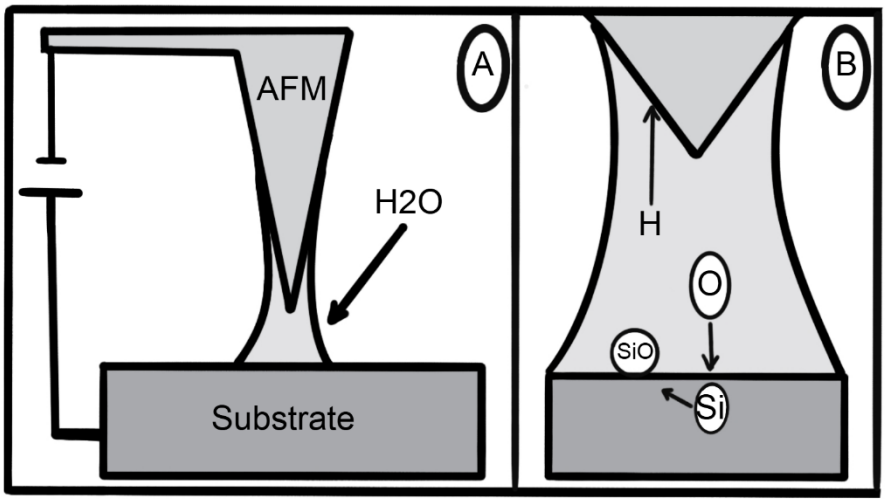


Рис. 1. Схематически представленный принцип работы ЛАО

Для эксперимента использовались образцы монокристаллического кремния марки КЭФ-4,5 (111).

Прежде чем приступить к окислению поверхности с заданным рисунком, её нужно очистить от природного окисла, а также от разного рода загрязнений, образовавшихся на поверхности.

Для этого образцы помещают в ультразвуковую ванну при значениях температуры 50-60 ˚С и мощности 90 %. Ванна наполнялась дистиллированной водой до уровня, слегка покрывающего сетку, на которую ставятся мерные стаканы с исследуемыми образцами. Они промываются сначала в дистиллированной воде, затем в ацетоне, а затем в изопропиловом спирте. Для каждой из жидкостей время работы ультразвуковой ванны составляло 15 минут.

Удаление оксида проводили с помощью 25% раствора плавиковой кислоты в течение 5 минут. После этого образец помещался на 5 минут в изопропиловый спирт, затем 15 минут обрабатывался в дистиллированной воде. Для данного эксперимента использовались зонды марки CSG10 имеющие покрытие на основе нитрида титана TiN (рисунок 2).

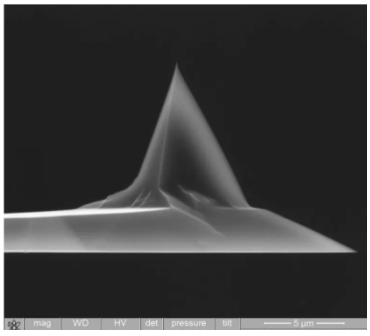


Рис. 2. Внешний вид зонда CSG10/TiN

Для этого зонда резонансная частота – 22кГц, типичное значение силовой частоты – 22 кГц. Ширина балки составляет 30 мкм, длина – 225 мкм. Кантилевер имеет отражающие покрытие на основе золота Au для увеличения сигнала лазера.

Образец закреплялся с помощью проводящей лапки на специальной поликоровой подложке, которую в процессе эксперимента последствии устанавливали на столик атомно-силового микроскопа и накрывали колпаком, под которым нагнетался требуемый уровень влажности (от 60% до 90%).

Далее, нам было необходимо подобрать параметры локального анодного окисления, при котором рисунок получится чётким. Для этого мы нанесли на поверхность линии, которые рисовались при следующих параметрах: разная скорость и одно напряжение, разное напряжение и одна скорость, а также варьировали значения относительной влажности [3-5].

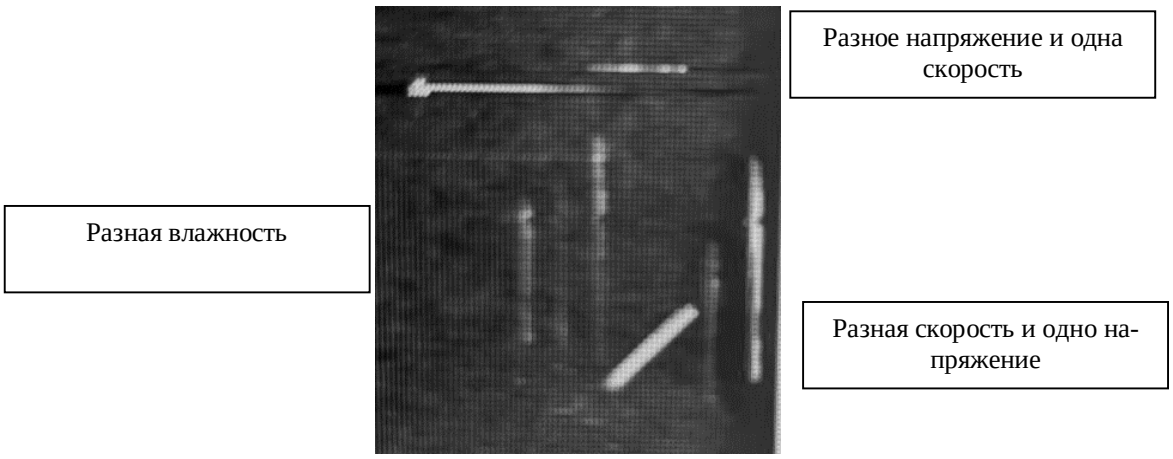


Рис. 3. Примеры создания линий оксида кремния

Было установлено, что удовлетворительными параметрами для процесса локального анодного окисления являются следующие:

1. Влажность >60%. При меньших значениях окисляемый рисунок получается не чётким и весьма тусклым. Чем выше значение относительной влажности, тем толще оксид, так как при росте влажности, увеличивается диаметр водного мениска;

2. Напряжение – 7,5-9 вольт. При более малых значениях данного параметра геометрические размеры образуемого оксида уменьшаются, что негативно сказывается на эксперименте. При напряжении от 7,5 до 9 вольт плотность потока ионов кислорода к области протекания реакции увеличивается вместе с увеличением напряженности электрического поля в зазоре между зондом и подложкой;

3. Длительность импульса напряжения 0.1с При изменении длительности импульса особых изменений в итоговом изображений не наблюдалось. Поэтому, чтобы ускорить процесс литографии, было установлено значение 0,1с;

4. Скорость зонда. Экспериментально было установлено, что оптимальными значениями для метода локального анодного окисления является диапазон от 0,2 мкм/с до 0,5 мкм/с. При более высоких значениях изображение становится менее чётким и прерывистым.

На рисунках видно, что высота и диаметр образовавшихся структур выше при низкой скорости окисления. Это связано с тем, что при высоких скоростях обратная связь не успевает реагировать, из-за чего некоторые области, которые необходимо окислить, могут быть пропущены.

Результаты исследований

В данной работе были созданы на поверхности кремния мозаики Пенроуза, состоящие из дельтоидов, (четырехугольников, в которых есть две пары смежных равных сторон) (рис. 4). Мозаика строится из плиток двух видов: выпуклого и вогнутого дельтоидов (выпуклый дельтоид имеет один угол равный 144° и три угла по 72°). Общий вид картины загружается в память сканирующего зондового микроскопа.

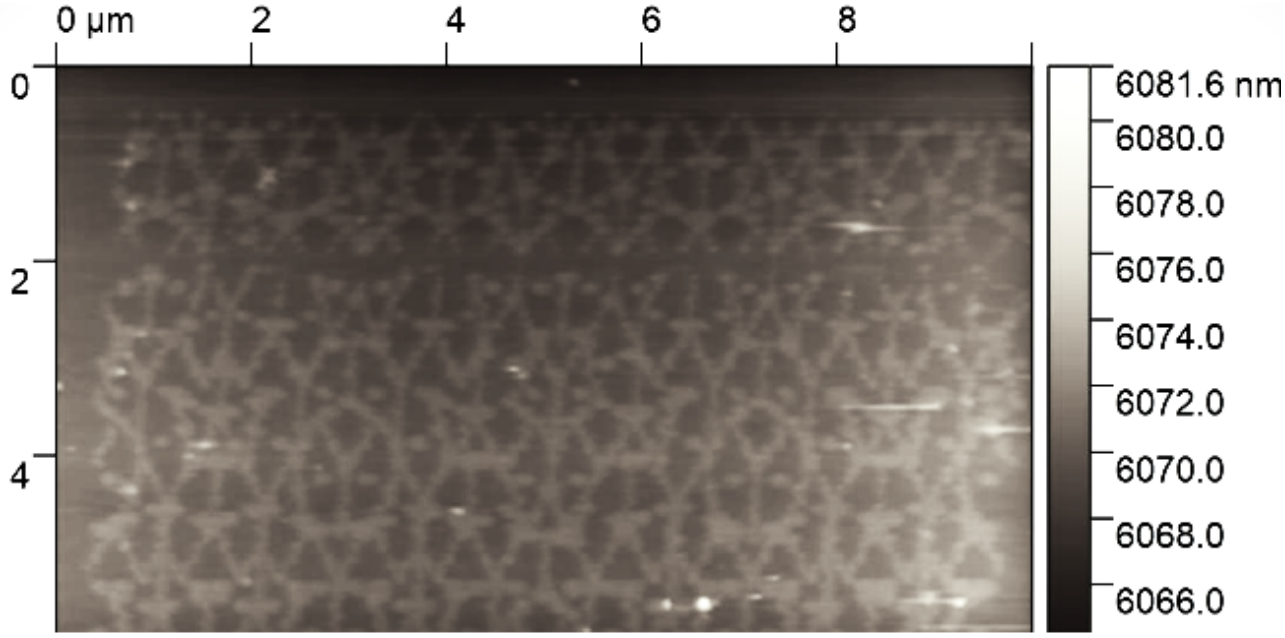


Рис. 4. Мозаика Пенроуза на поверхности кремния

Из рисунка 4 видно, что рельеф оксида составляет единицы нанометров. А для практического использования в оптоэлектронике необходимы значительно большие высоты рельефа[6-7]

В настоящее время мы проводим эксперименты по формированию структур из ограненных наностержней оксида цинка на рисунке мозаики Пенроуза.

Наша технология создания нанолитографических структур на рисунках простой геометрии ранее была рассмотрена в [8] (рис 5).

Отметим,что при выращивании стержней из ZnO на мозаике Пенроуза, они формируют гетероструктуры n-типа, которые хорошо поглощают свет и разделяют носители заряда в солнечных элементах, так как стержни имеют высокую подвижность электронов и широкую запрещенную зону. Также, оксид цинка обладает высокой фотокаталитической активностью, имеет гексагональную вюрцитовую структуру, обеспечивающую высокую анизотропию.

Но при формировании апериодических рисунков ограненными наностержнями оксида цинка мы столкнулись с трудностями воспроизведения рисунков.

Основные технологические трудности заключаются в оптимизации состава прекурсоров, выборе температурно-временных режимов и определении особенностей создания зародышевого слоя. При отклонении от оптимальных режимов упорядоченное распределение наностержней становится хаотичным, теряется информация об апериодическом рисунке , стержни растут по всей поверхности.

Результаты этих исследований будут рассмотрены в последующих публикациях.

Таким образом, приведены результаты получения апериодических двумерных рисунков оксида кремния на кремниевых подложках и развития технологии выращивания на рисунках оксида кремния локальных структур оксида цинка

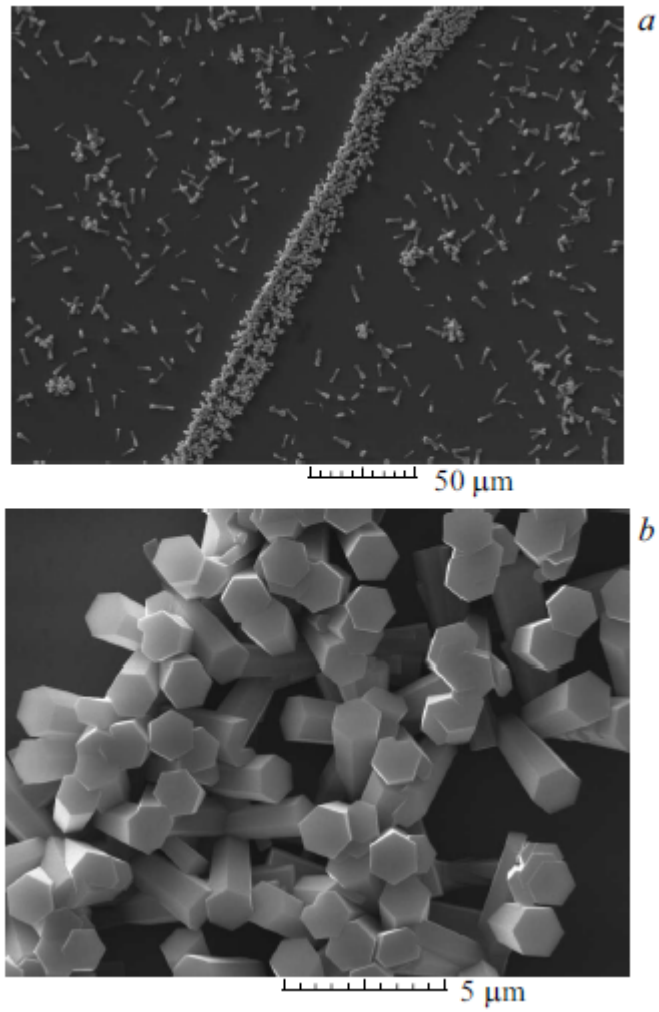


Рис. 5. Формирование литографических рисунков простой геометрии ограненными стержнями оксида цинка на кремниевой подложке (приведены изображения в разных масштабах) [8]

Библиографический список

1. Мадисон А.Е., Мадисон П.А., Мошников В.А. Концепция элементарных ячеек в теории квазикристаллов / Журнал технической физики. 2024. Т. 94. № 4. С. 561-574.

2. Maksimov A.I., Moshnikov V.A., Pshchelko N.S., Startseva A.V., Suchanek G., Moshkalev S.A. Formation of titanium oxide semiconductor structures by the local anodic oxidation / Smart Nanocomposites. 2013. Т. 4. № 1. С. 107-108.

3. Мошников В.А., Спивак Ю.М. Атомно-силовая микроскопия для нанотехнологии и диагностики: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. 80 с.

4. В. А. Мошников, Ю.М. Спивак, П.А. Алексеев, Н.В. Пермяков Атомно силовая микроскопия для исследования наноструктурированных материалов и приборных структур: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 144 с.

5. Мошников В.А., Федотов А.А., Румянцева А.И. Методы сканирующей зондовой микроскопии в микро- и наноэлектронике: учеб. пособие. СПб.: Изд во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003. 84 с.

6. Мадисон А.Е., Козодаев Д.А., Казанков А.Н., Мадисон П.А., Мошников В.А. Апериодическая дифракционная решетка, основанная на связи между простыми числами и нулями дзета-функции Римана / Журнал технической физики. 2024. Т. 94. № 4. С. 658-663.

7. Мадисон А.Е., Мадисон П.А., Козодаев Д.А., Казанков А.Н., Мошников В.А. Апериодическая дифракционная решетка на основе распределения нулей ζ-функции Римана / В сборнике: HOLOEXPO 2023. тезисы докладов 20-й международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям. Санкт-Петербург, 2023. С. 69-73

8. Бобков А.А., Пронин И.А., Мошников В.А., Якушова Н.Д., Карманов А.А., Аверин И.А., Сомов П.А., Теруков Е.И. Формирование литографических рисунков ограненными микрочастицами оксида цинка на кремниевой подложке / Письма в Журнал технической физики. 2018. Т. 44. № 15. С. 87-92.

СЕКЦИЯ «ПРОМЫШЛЕННАЯ СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ»

УДК 620.9.001.5; ГРНТИ 44.01.77

ФОРМИРОВАНИЕ НАБЛЮДАТЕЛЯ СОСТОЯНИЯ В СЕРВОПРИВОДЕ С БЕСКОНТАКТНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

О.А. Киселёва, Д.Д. Баранникова, А.Д. Киселёва, Д.А. Баранников
Воронежский государственный технический университет,
Российская Федерация, Воронеж, kis.ola@mail.ru

Аннотация. В работе рассматривается вопрос формирования наблюдателя состояния в сервоприводе на базе бесконтактного двигателя постоянного тока. Показано, что на работу наблюдателя состояния влияют не только взаимные индуктивности между фазами двигателя, но и эффект взаимной фазовой емкости.
Ключевые слова: сервопривод, бесконтактный двигатель постоянного тока, наблюдатель состояния

FORMATION OF A STATE OBSERVER IN A SERVO DRIVE WITH A CONTACTLESS DC MOTOR

O.A. Kiseleva, D.D. Barannikova, A.D. Kiseleva, D.A. Barannikov
Voronezh State Technical University,
Russian Federation, Voronezh, kis.ola@mail.ru

Abstract. This paper discusses the formation of a state observer in a servo drive based on a contactless DC motor. It is shown that the accuracy of the state observer is affected not only by the mutual inductances between the motor phases, but also by the effect of mutual phase capacitance.
Keywords: servo drive, contactless DC motor, state observer

Введение

Сервоприводы с бесконтактными двигателями постоянного тока (БДПТ) в настоящее время очень востребованы в различных технологических процессах. Они надежны, обладают свойствами, которые позволяют применять их даже при работе устройств, работающих в опасных условиях. Электромеханические датчики скорости и угла поворота снижают надежность сервоприводов с БДПТ, поэтому вопрос создания систем управления без таких электромеханических датчиков актуален [1, 2].

Отсутствие электромеханических датчиков уменьшает вероятность отказов, связанных с их неисправностью, снижает риск механических поломок, сокращает расходы на их приобретение, установку и обслуживание, что делает сервопривод более экономичным. Уменьшается вес и габариты системы управления, что особенно важно для систем с ограниченными размерами и строгими требованиями к весу сервопривода.

В таких системах необходимо использовать косвенные измерения и по ним восстановить требуемые координаты. Все измерители (датчики) должны находиться пространственно в корпусе преобразователя частоты, не имея дополнительных соединительных проводов вне корпуса. При этом необходимо учитывать, что имеющаяся информация, которая есть в самом преобразователе частоты, достаточна и позволит восстановить требуемую информацию о скорости и положении ротора в пространстве [3, 4].

Целью настоящей работы является исследование влияния взаимных индуктивностей и емкостей на точность работы косвенных измерителей координат и набдюдателей состояния в электроприводе на базе БДПТ без электромеханических датчиков скорости и угла поворота.

Математическая модель процесса восстановления выходной координаты с помощью наблюдателя состояния

Будем считать устройство, которое восстанавливает требуемую информацию о выходной координате – наблюдателем состояния в системе управления электроприводом с БДПТ [5, 6]. Рассмотрим один из методов создания наблюдателя состояния, который базируется на определении требуемой информации по сигналам противо-ЭДС, которая наводится в обмотках двигателя. Для этого рассмотрим схему, приведенную на рисунке 1.

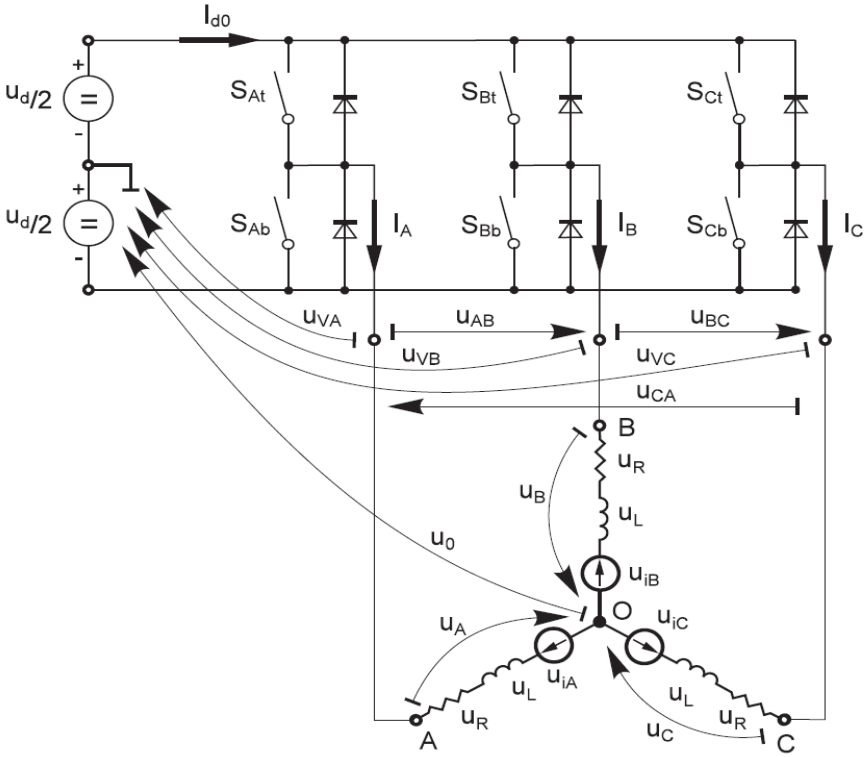


Рис. 1. Силовой каскад сервопривода с БДПТ

Запишем уравнения для схемы, представленной на рисунке 1 в виде

$$U_A = \frac{1}{3}(2u_{VA} - u_{VB} - u_{VC} + \sum_{x=A}^{C} u_{ix}) ; \quad (1)$$

$$U_B = \frac{1}{3}(2u_{VB} - u_{VC} - u_{VA} + \sum_{x=A}^{C} u_{ix}) ; \quad (2)$$

$$U_C = \frac{1}{3}(2u_{VC} - u_{VA} - u_{VB} + \sum_{x=A}^{C} u_{ix}) ; \quad (3)$$

$$U_0 = \frac{1}{3}(\sum_{x=A}^{C} u_{Vx} - \sum_{x=A}^{C} u_{ix}) ; \quad (4)$$

$$0 = i_A + i_B + i_C , \quad (5)$$

где u_{VA} ... u_{VC} – напряжения между выходом одного силового каскада и его виртуальным нулем;

u_A ... u_C – напряжения фазных обмоток двигателя;

u_{iA} ... u_{iC} – представляют собой напряжения обратной ЭДС фазы, вызванные в обмотке статора;

u_0 – напряжение между центральной точкой звезды обмотки двигателя и естественным нулем силового каскада;

i_A ... i_C – фазные токи.

В рассматриваемой математической модели считаем, что фазы двигателя симметричны. Предположим, что только две фазы двигателя находятся под напряжением, а третья отключена. Величина напряжения будет равна половине напряжения постоянного тока, подключенного к инвертору.

$$\left.\begin{aligned} u_N &= U_{DCB} - Ri_b - L\frac{di_b}{dt} - e_b \\ u_N &= Ri_a + L\frac{di_a}{dt} - e_a \end{aligned}\right\} \underset{i_a=i_b}{\Longrightarrow} u_N = \frac{U_{DCB}}{2} - \frac{e_b+e_a}{2}\,. \tag{6}$$

Для симметричного трехфазного синхронного двигателя с постоянными магнитами сумма всех напряжений равна нулю

$$e_a + e_b + e_c = 0 \rightarrow e_c = -(e_b + e_a)\,. \tag{7}$$

По одной из фаз ток не течет, тогда уравнение для напряжения

$$u_N = u_C + e_c\ . \tag{8}$$

Фазное напряжение на обесточенной фазе можно получить из уравнений (1) – (8)

$$u_C = \frac{U_{DCB}}{2} + \frac{3}{2}e_c\ . \tag{9}$$

Исходя из уравнения (9) можно искать момент перехода противо-ЭДС через ноль напряжение (в рассматриваемом случае ЭДС e_c). Отсюда следует, что измеряя напряжение на обесточенной фазе (e_c) и сравнивая его с половиной напряжения постоянного тока, подключенного к инвертору, можно определить переход противо-ЭДС через ноль.

Эту функции выполняет АЦП, достоверность информации с этого преобразователя будем определять следующими условиями:

- верхний и нижний силовые транзисторы (по диагонали) управляются одним и тем же сигналом широтно-импульсного модулятора;
- ток не проходит через не подключенную фазу, которую используют измерения противо-ЭДС.

Наблюдатель состояния, построенный по этому принципу, является частным случаем.

Для запуска и начала работы сервопривода с БДПТ с наблюдателем состояния необходим алгоритм управления, который обеспечивает процессы:

- останова;
- выравнивания;
- работы.

Сначала ротор БДПТ выставляется в известном положении без позиционной обратной связи, когда ротор движется, противо-ЭДС индуцируется на неподключенной фазе, и можно уже использовать определение положения без датчика. В результате положение ротора БДПТ известно и можно рассчитать скорость и положение поля ротора относительно поля статора. Значит, можно получить информацию без электромеханических датчиков скорости и положения ротора.

Рассмотрим влияние взаимной индуктивности на точность определения противо-ЭДС.

Эффект взаимной индукции – это явление, при котором изменение тока в одной обмотке электрической машины вызывает наведение электродвижущей силы в другой обмотке за счет магнитной связи между ними. Такой эффект можно наблюдать не только в синхронных машинах, но и в асинхронных двигателях и трансформаторах.

Взаимные индуктивности играют здесь важную роль. Разница взаимных индуктивностей между обмотками, по которым протекает фазный ток, и обмоткой, в которой не протекает ток, используется для обнаружения противо-ЭДС. Это приводит к тому, что импульсы ШИМ накладываются на обнаруженное напряжение противо-ЭДС, это создается за счет высокой скоростью изменения фазного тока, передаваемого в фазу, где ток не протекает от источника, через связь взаимной индуктивности.

Отрицательный эффект взаимной индуктивности – не единственный, который нарушает измерение обратной ЭДС. До сих пор взаимная емкость фазных обмоток двигателя не учитывалась в модели двигателя, поскольку она не влияет ни на фазные токи, ни на генерируемый крутящий момент. Обычно взаимная емкость очень мала. Ее влияние существенно только во время переключения ШИМ, когда система испытывает очень высокое du/dt.

Рассмотрим случай, когда фаза двигателя A переключается с отрицательной шины постоянного тока на положительную, а фаза B переключается с положительной на отрицательную. Это описывается условиями [7]

$$S_{Ab}, S_{Bt} \leftarrow PWM\ ;$$
$$u_{VA} = -\frac{1}{2}u_d \rightarrow \frac{1}{2}u_d, u_{VB} = \frac{1}{2}u_d \rightarrow -\frac{1}{2}u_d\ ; \qquad (10)$$
$$i_{Cac} = i_{Ccb} = i_C\ .$$

Влияние взаимной емкости можно изучить с помощью модели, показанной на рисунке 2.

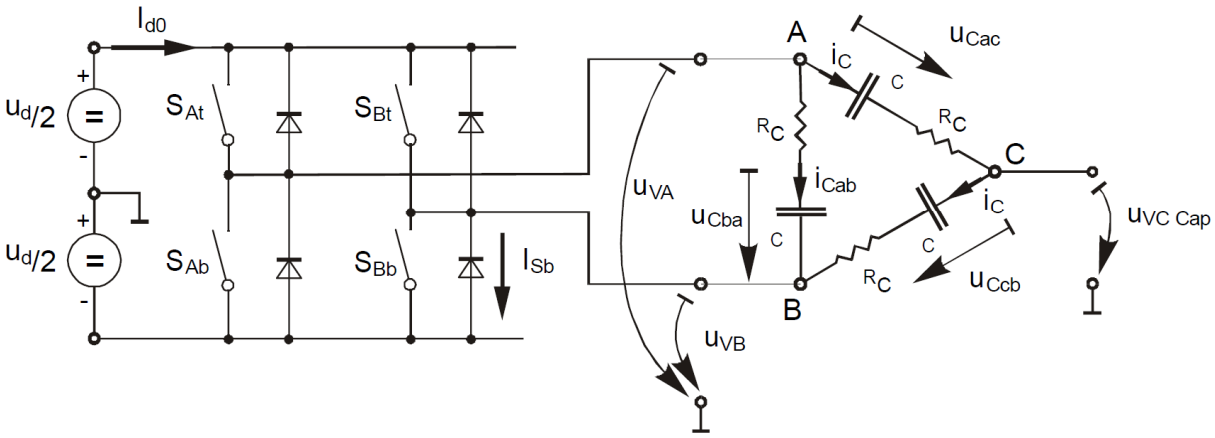


Рис. 2. Модель взаимной емкости

Рассмотрим случай, когда фаза двигателя A переключается с отрицательной шины постоянного тока на положительную, а фаза B переключается с положительной на отрицательную. Это описывается условиями

$$S_{Ab}, S_{Bt} \leftarrow PWM\ ;$$
$$u_{VA} = -\frac{1}{2}u_d \rightarrow \frac{1}{2}u_d, u_{VB} = \frac{1}{2}u_d \rightarrow -\frac{1}{2}u_d\ ; \qquad (10)$$
$$i_{Cac} = i_{Ccb} = i_C\ .$$

Напряжение, которое нарушает измерение противо-ЭДС, используя свободную (не питаемую) фазу двигателя C, можно рассчитать на основе уравнения

$$u_{VC\ Cap} = \frac{1}{2}(u_{Ccb} + u_{Cac} + 2R_C) - (u_{Ccb} + R_C) = \frac{1}{2}(u_{Cac} - u_{Ccb})\ . \qquad (11)$$

Окончательное выражение для мешающего напряжения можно найти следующим образом

$$u_{VC\,Cap} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{C_{ac}} - \frac{1}{C_{cb}}\right)\int i_C\,dt = \frac{1}{2}\left(\frac{C_{cb}-C_{ac}}{C_{cb}\cdot C_{ac}}\right)\int i_C\,dt\ . \quad (12)$$

Уравнение (12) выражает тот факт, что только дисбаланс взаимной емкости (а не сама емкость) нарушает измерение противо-ЭДС. Когда обе емкости равны, помехи исчезают.

Заключение

В ранее разработанных наблюдателях состояния не учитывались влияния взаимных индуктивностей и емкостей. Схемы, предложенные для анализа этих процессов, показывают необходимость их учета при построении наблюдателя состояния. Полученное математическое описание обеспечит возможность для создания новых решений и принципов построения устройств для косвенных измерений таких параметров электропривода, по которым можно достоверно восстановить требуемую выходную координату без применения электромеханических датчиков, что позволит не только уменьшить вес, габариты, надежность, но и повысить точность статических и динамических характеристик системы.

Библиографический список

1. Калачев Ю.Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе. М.: ЭФО, 2015. – 80 с.

2. Киселёва О.А., Баранникова Д.Д., Баранников Д.А. Активизация базового вектора внутри периода модуляции в электроприводе на базе бесконтактного двигателя постоянного тока. Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2025 [текст]: сб. тр. VIII междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.2./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2025. С.178-182

3. Киселёва, О.А., Винокуров, С.А., Киселёва, Д.Д. Позиционно-следящая система с наблюдателем состояния на базе бесконтактного двигателя постоянного тока/ В сборнике: Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2022. Сборник трудов V Международного научно-технического форума. В 10-ти томах. Под общей редакцией О.В. Миловзорова. Рязань, 2022. С. 140-143.

4. Киселёва, О.А., Винокуров, С.А., Киселёва, Д.Д. Локально-оптимальное управление в электромеханической системе с бесконтактным двигателем постоянного тока. Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2021;9(1). Доступно по: https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=xxx DOI: 10.26102/2310-6018/2021.32.1.xxx

5. Баранникова Д.Д., Киселёва А.Д., Бурковский В.Л. Алгоритмизация управления электроприводами специального назначения. Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий (ПМТУКТ-2025): сборник трудов Международной научной конференции, Воронеж, 03-05 декабря 2025 г. / под ред. В.В. Провоторова. – Воронеж: Издательство «Научная книга», 2025. С.16-17.

6. Киселёва О.А., Силенко В.В., Лебедева А.В., Киселёва Д.Д. Наблюдатели состояния в электроприводах с бесконтактными двигателями постоянного тока. В сборнике: Фундаментальные и прикладные науки сегодня. Материалы XXXI международной научно-практической конференции. Bengaluru, 2023. С. 145-147.

7. Киселёва О.А., Попова Т.В., Киселёва Д.Д., Тузиков И.Г., Саввин М.С. Влияние квантований по уровню и времени на основные показатели позиционно - следящей системы с бесконтактным двигателем постоянного тока. В сборнике: Фундаментальная наука и технологии - перспективные разработки. Материалы XXVмеждународной научно-практической конференции Фундаментальная наука и технологии - перспективные разработки . Morrisville, NC, USA, 2021. С. 90-93.

УДК 621.313.8; ГРНТИ 45.41

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД НАСОСОВ НА БАЗЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

В.А. Фёдоров, Д.М. Глухов
Воронежский государственный технический университет,
Российская Федерация, Воронеж, mitbor@rambler.ru

Аннотация. В работе рассматривается проблематика повышения энергоэффективности электроприводов в производственной сфере путём замены асинхронных двигателей на синхронные машины с постоянными магнитами на примере приводов насосного оборудования. Приведены расчёты сроков окупаемости замены оборудования.
Ключевые слова: синхронный двигатель с постоянными магнитами, электропривод, энергоэффективность.

ENERGY-EFFICIENT ELECTRIC DRIVE FOR PUMPS BASED ON A PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

V.A. Fyodorov, D.M. Glukhov
Voronezh State Technic University,
Russia, Voronezh, mitbor@rambler.ru

The summary. The paper addresses the issue of improving the energy efficiency of electric drives in industial applications by replacing asynchronous motors with permanent magnet synchronous machines, using pump drives as a case study. The work includes calculations of the payback period for the equipment replacement.
Keywords: permanent magnet synchronous motor, electric drive, energy efficiency.

Вопросы энергосбережения крайне актуальны для сферы жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ) в любом регионе страны, а в энергодефицитных особенно. В частности, для установок с постоянным, но неравномерным режимом работы, таких как канализационно-насосные станции (КНС), водонасосные станции, компрессорные установки и т.п. при использовании в них нерегулируемых электроприводов (ЭП) неэффективный расход электроэнергии может быть настолько велик, что достижение реальной прибыли в этой сфере становится весьма затруднительным.

Использование регулируемого ЭП в вышеназванных системах позволяет существенно сгладить пульсации давления рабочих сред, что ощутимо повышает надёжность системы, а это особенно актуально для системы жизнеобеспечения города – функционирование КНС не менее важно бесперебойной подачи воды в дома горожан.

Одним из элементов системы ЭП является электродвигатель. Как правило, в системе ЖКХ применяются трёхфазные асинхронные двигатели (АД). Работа энергоэффективного насоса на базе асинхронного двигателя под управлением преобразователя частоты (ПЧ) существенно отличается от традиционной схемы с фиксированными оборотами двигателя. Это связано с возможностью гибкого регулирования параметров работы насоса в соответствии с текущими потребностями системы, что приводит к значительной экономии энергии и повышению надёжности оборудования. ПЧ изменяет частоту и амплитуду питающего напряжения электродвигателя, что позволяет плавно регулировать скорость вращения ротора в диапазоне от нуля до максимальной скорости. Это, в свою очередь, изменяет производительность насоса (расход жидкости) и напор. Таким образом, использование АД с ПЧ позволяет значительно повысить энергоэффективность насосной системы, продлить срок службы оборудования и улучшить качество работы.

Дальнейшее повышение энергоэффективности работы ЭП системе ЖКХ требует использование других типов двигателей, таких как синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ). Эти двигатели обладают рядом преимуществ перед асинхронными машинами:

- ротор вращается синхронно с полем статора – нет потерь на скольжение;

- на 40% короче и 40% легче асинхронного при одинаковой мощности;
- на 10-15% меньшее энергопотребление;
- на 20% снижается ток двигателя и на 20% увеличивается КПД и cos φ;
- низкие электрические потери; ротор с постоянными магнитами не нагревается от токов, что упрощает систему охлаждения [1].

В последние годы наблюдается увеличение процентного соотношения частотного электропривода с синхронным двигателем с постоянными магнитами (СДПМ) по сравнению с остальными электроприводами переменного тока, имеющими ПЧ в своем составе. В вентильном электроприводе с векторным управлением, обеспечивающим постоянство электромагнитного момента и управление положением ротора в пространстве, достигнуто существенное снижение потерь энергии за счет того, что ПЧ обеспечивает синусоидальную форму тока [1]. Наиболее часто используемым методом формирования токов в фазах современных преобразователей частоты является широтно-импульсная модуляция (ШИМ).

Благодаря серьезным успехам, достигнутым в современной теории автоматического управления, появилась возможность разработки бездатчикового электропривода. В них датчик положения ротора (ДПР) не используется как элемент оценки скорости и положения ротора, а требуемые данные о состоянии системы, необходимые для работы алгоритма управления рассчитываются аналитически. Основные алгоритмы бездатчикового управления основываются на математическом моделировании электромагнитных процессов двигателя переменного тока. При таком подходе оценка скорости вращения совмещается с вычислением углового положения и модуля ЭДС ротора.

На рисунке 1 представлена обобщенная схема электропривода с преобразователем частоты, выполненным по схеме «неуправляемый выпрямитель – автономный инвертор напряжения» [2].

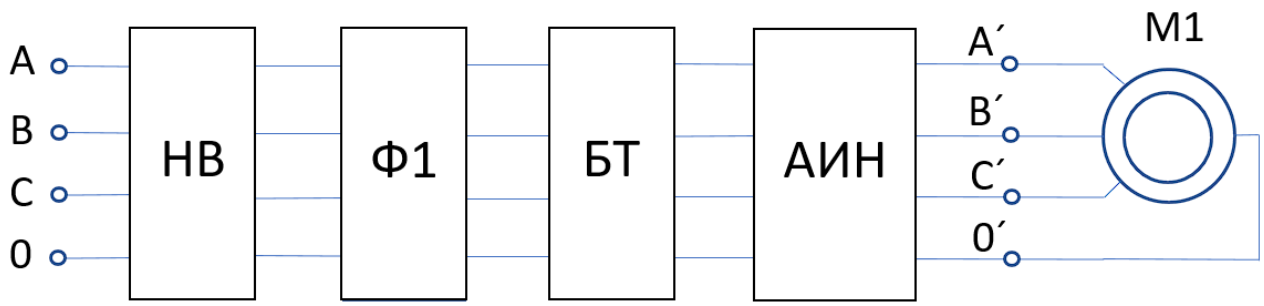


Рис. 1. Обобщенная схема электропривода

Всё, что расположено левее двигателя М1 (НВ – неуправляемый выпрямитель; Ф1 – фильтр; БТ – блок торможения; АИН – автономный инвертор напряжения), фактически размещено в одном корпусе ПЧ. СДПМ обычно применяются в системах с обратной связью по скорости ротора двигателя. Но фактического полезного эффекта от применения СДПМ + датчик скорости в системе поддержания давления (ПИД-регулирование) не будет. Такие решения ведут только к удорожанию, экономического смысла не имеют, поэтому на практике не встречаются.

На сегодняшний день на рынке достаточно предложений недорогих ПЧ как общепромышленного исполнения, так и специализированных. Для насосного оборудования достаточно использовать современные векторные ПЧ российского производства СИРИУС-С8 общепромышленного назначения с повышенным пусковым моментом и повышенной перегру-

зочной способностью, подходящие для решения любой задачи по управлению электроприводом как в разомкнутых, так и в замкнутых по скорости электродвигателя системах.

В качестве приводного двигателя предлагается применить синхронный двигатель с постоянными магнитами TYCP2-132S2-8-30 от бренда WanNan Motor (WNM), характеризующийся выдающимися показателями энергоэффективности и удельной мощности с компактными габаритами и очень низкими значениями шума и вибрации. Двигатель такого типа является идеально подходящим вариантом привода оборудования, работающего в непрерывном режиме (вентиляторы, насосы, станки, транспортеры и т. д.).

Любая модернизация преследует своей целью повысить эффективность производства, т.е. неотъемлемой частью замены оборудования является экономическая целесообразность затрат. Отношение общих затрат на оборудование к сумме годовой экономии расходов на портеблённую электроэнергию представляет срок окупаемости.

Для расчетов срока окупаемости использовались характеристики одной из насосных систем городской КНС с приводным АД, мощностью 15 кВт. Регулирование расхода – дросселированием. Годовое время работы оборудования установки принято 6000 часов. Тариф на электроэнергию в текущем году принят в 12,48 руб. [3]. Стоимость преобразователя частоты СИРИУС-С8-15/18.5-3Ф380 составляет 64 848 руб. [4]. Стоимость синхронного двигателя с постоянными магнитами типа TYCP2-132S2-8-30 в пересчёте по курсу Центрального банка с поставкой в РФ – 85 258,14 руб. [5].

Представим характеристики сравниваемых электродвигателей, необходимые для расчёта срока окупаемости в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики электродвигателей для насосных установок.

Показатели	P_2, кВт	$I_н$, А	η, %
Асинхронный двигатель серии АИР 132	15	28,6	89,4
Синхронный двигатель с постоянными магнитами типа TYCP2-132S2-8-30	15	25,17	95,3

Произведем расчет окупаемости модернизации насосной установку при замене АД на синхронный двигатель с постоянными магнитами при условии одинаковых режимом работы.

Потребляемая мощность АД, Вт:

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{15000}{0,894} = 16778,5$$

Расход электроэнергии в год, кВт·ч:

$$W_{АД} = P_1 \cdot t = 16778,5 \cdot 6000 = 100671$$

Потребляемая мощность СДПМ, Вт

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{15000}{0,953} = 15739,8$$

Расход электроэнергии в год, кВт·ч:

$$W_{СДПМ} = P_1 \cdot t = 15739,8 \cdot 6000 = 94438,8$$

Экономия электроэнергии потребляемой СДПМ, кВт·ч:

$$\Delta W = W_{АД} - W_{СДПМ} = 100671 - 94438,8 = 6232,2$$

Экономия на оплату израсходованной электроэнергии, руб.:

$$C_{ЭЭ} = \Delta W \cdot P = 6232,2 \cdot 12,48 = 77777,85$$

Затраты на закупку СДПМ и преобразователя частоты, руб.:

$$K=C_{СДПМ}+C_{ПЧ}=85258,14+64848=150106,14$$

Срок окупаемости затрат на оборудование, лет:

$$T_{ОК}=\frac{K}{\Delta W}=\frac{150106,14}{77777,85}=1,93$$

Анализ экономических результатов модернизации электроприводов насосного оборудования позволяет сделать заключение в том, что капитальные затраты при замене приводных двигателей более совершенными, обладающими большей энергоэффективностью, позволяют в течение нескольких лет окупать эти вложения. При этом следует учитывать тот факт, что с течением времени скорость окупаемости будет увеличиваться из-за регулярного повышения тарифов на электроэнергию, так как расходы на замену оборудования были зафиксированы в момент реконструкции.

Библиографический список

1. Воеков В.Н., Частотный электропривод на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами с релейным управлением для насосов нефтегахзовой отрасли. Диссертация на соискание ученой степени кандидата техничсеких наук. – Липецк, 2019.

2. Ревнёв С.С., Частотный электропривод малой мощности с бестрансформаторными преобразователями частоты. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата техничсеких наук. – Изд-во Воронежского государственного техничсекого университета. – Воронеж, 2003.

3. Приказ МТР ВО №69/12 от 26.12.2025 «Об установлении тарифов на электрическую энергию (мощность), дифференцированных по объёмам потребления электричсекой энергии (мощности) и группам (подгруппам) населения и приравненных к нему категорий потребителей, по Воронежской области на 2026 год».

4. https://vrn-privod.ru/catalog/preobrazovateli_chastoty.

5. https://wnm.vecgroup.com/products/sinxronnyie-elektrodvigateli/seriya-tycp2/tycp2-132s2-8-30-6481.

УДК 621.311; ГРНТИ 44.29.29.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 0,4 КВ

Д.С. Самохина, Е.В. Сливкин

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

Аннотация. В работе рассматривается современные технологии электроснабжения в сети 0,4 кВ.

Ключевые слова: микропроцессорная релейная защита, быстродействующий АВР.

MODERN TECHNOLOGIES IN 0.4 kV NETWORKS

D.S. Samokhina, E.V. Slivkin

Ryazan State Radiotechnical University named after V.F. Utkin, Russian Federation, Ryazan, dasha.schestavina@yandex.ru

Abstract. This paper examines modern power supply technologies in 0.4 kV networks.

Keywords: microprocessor-based relay protection, high-speed automatic transfer switch.

Сети 0,4 кВ относятся к классу низковольтных распредельных сетей, максимально приближенных к электроустановкам потребителя.

Данные сети обеспечивают передачу электрической энергии от различных типов трансформаторных подстанций (ТП, КТП, РТП, ЗТП, МТП) к жилым домам, коммерческим и промышленным объектам, освещению.

Сети 0,4 кВ выполняются с глухозаземленной нейтралью, соответственно сопровождаются большими токами короткого замыкания, но при таком напряжении проводники име-

ют большое сопротивление, это негативно сказывается на чувствительности защитных аппаратов и может привести к серьезным повреждениям и опасности для людей.

Микропроцессорные защиты

Микропроцессорные защиты приходят на замену автоматическим выключателям, имеющим грубую настройку, или вовсе не имеющей ее, из-за чего при изменении нагрузки или конфигурации сети возникает необходимость к замене всего защитного устройства, а не определенных его параметров.

Устройством РЗА называется аппарат, терминал или блок, выполняющий функцию релейной защиты [1].

На данный момент микропроцессорные защиты ряда производителей выполняются для основного (рабочего) ввода, аварийного ввода, секционного выключателя, автоматики включения резерва, защиты электродвигателя.

Рассмотрим функционал устройств микропроцессорной защиты на примере терминалов производства ООО «Релематика» серии ТОР 200.

Данные терминалы являются универсальными контроллерами присоединений, обладающими функциями релейной защиты, предаварийной автоматики и сигнализации.

Внешний вид данного класса устройств показан на рисунке 1.



Рис. 1. ТОР 200 НКУ

Рассмотрим функционал каждого типа терминалов.

ТОР 200 0,4 кВ ВВН – рабочий ввод

Функциональность защит:

- 2 ступени максимальной токовой защиты;
- блокировка при пуске двигателей (вольт-метровая блокировка);
- токовая защита нулевой последовательности;
- резервирование при отказе защит;
- отключение секционного выключателя;
- отключение трансформатора;

- по напряжению обратной последовательности;
- контроль напряжения на секции шин и вводе.

Функциональность автоматики и сигнализации, измерений:

- автоматика управления выключателем;
- сигнализация;
- прием команды на отключение от АВР;
- отдача команды на включение секционного выключателя от АВР;
- восстановление нормального режима;
- контроль синхронизма;
- измерение тока и напряжения;
- измерение активной и реактивной мощности;
- измерение коэффициента мощности;
- измерение частоты.

ТОР 200 0,4 кВ ВВН – аварийный ввод

Функциональность защит:

- 2 ступени максимальной токовой защиты;
- блокировка при пуске двигателей (вольт-метровая блокировка);
- токовая защита нулевой последовательности;
- резервирование при отказе защит;
- отключение секционного выключателя;
- по напряжению обратной последовательности;
- контроль напряжения на секции шин и вводе.

Функциональность автоматики и сигнализации, измерений:

- отдача команды на отключение вводного выключателя;
- включение аварийного ввода;
- пуск АДЭС;
- отключение ВАВ или остановка АДЭС по ВНР;
- измерение тока и напряжения:
- измерение активной и реактивной мощности;
- измерение коэффициента мощности;
- измерение частоты.

ТОР 200 0,4 кВ СВН – секционного выключателя

Функциональность автоматики и сигнализации, измерений:

- сигнализация;
- восстановление нормального режима (ВНР);
- контроль синхронизма;
- измерение активной и реактивной мощности;
- включение СВ по АВР от рабочего ввода;
- включение СВ по АВР от аварийного ввода;
- включение СВ от АВР рабочего ввода;
- включение СВ от АВР аварийного ввода;
- измерение тока и напряжения.

ТОР 200 0,4 кВ НКУ – защиты двигателя

Функциональность защит:

- токовая защита нулевой последовательности;
- защита по напряжению обратной последовательности.

Функциональность автоматики и сигнализации, измерений:

- автоматика управления выключателем;
- сигнализация;
- прием команды на отключение от АВР;
- отдача команды на включение секционного выключателя от АВР;
- восстановление нормального режима;
- контроль синхронизма;
- включение СВ по АВР от рабочего ввода;
- включение СВ от АВР рабочего ввода [2].

Быстродействующая автоматика включения резерва.

Это комплекс автоматики, предназначенный для быстрого ввода резервного питания при аварии на основном источнике.

БАВР применяется, когда осуществляется электропитание ответственных потребителей, чей перерыв в электроснабжении может привести к расстройству сложного технологического процесса, массовому простою, а также опасности для жизни человека.

Устройства БАВР сочетают в себе взаимодействие по специфическим алгоритмами, моментально отключая поврежденный ввод и включая резервный ввод или секционный выключатель.

Комплекс БАВР управляются при помощи микропроцессорного терминала серии «МИР БАВР» производства ООО «АПС». Внешний вид шкафа показан на рисунке 2.



Рис. 2. Шкаф БАВР

В качестве силового органа используются быстродействующие силовые вакуумные выключатели компании ООО «Таврида Электрик» серии TER_VCB15_ShellFT2_F и TER_VCB15_HDFT1_F [3]. TER_VCB15_HDFT1_F показан на рисунке 3.



Рис. 3. TER_VCB15_HDFT1_F

К преимуществам комплексов БАВР относят:

- минимизация количества отключений электродвигателей;
- обеспечение успешного самозапуска;
- повышение ресурса насосов, двигателей, трансформаторов;
- полное время переключения 35-40 мс [4]

Вывод

Направление 0,4 кВ активно развивается и получает большое количество современных технологий. Применение микропроцессорных устройств позволит выполнить релейную защиту более чувствительной, а аварийные воздействия менее разрушительными. Работа в направлении быстродействующей автоматики позволит максимально обезопасить дорогостоящее оборудование и сохранить в работе сложный технологический процесс.

Библиографический список:

1. «Микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики. Методические указания по расчету надежности. СТО ПАО «Россети», СТО 34.01-4.1-008-2018
2. УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ КОМПЛЕКТНЫЕ ТОР 200 Руководство по эксплуатации. Общие технические требования АИПБ.656122.025 РЭ1
3. Микропроцессорное устройство защиты «Мир». АПДЛ.656121 РЭ1 ред.1.
4. Электронный модуль управления СМ_1501_01(4) для коммутационных модулей ISM15_Shell_FT2 ТШАГ.468332.019 РЭ.

УДК 621.9.04:534.1; ГРНТИ 55.29.39

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА СБОРКИ КОНСТРУКЦИЙ FDM-ПРИНТЕРОВ НА РЕЗОНАНСНЫЕ ЧАСТОТЫ

А.О. Королев, В.В. Климаков, Н.О. Логунов

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина, Российская Федерация, Рязань, alexey127200@mail.ru, nikita171000@gmail.com, v.klimakov@mail.ru

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния качества сборки трёх FDM 3D-принтеров (Voron 2.4, Ender 3 NG, Duender) с кинематикой CoreXY на спектральную плотность мощности (PSD), получаемую в ходе штатного теста резонансов Klipper. Во всех случаях использована идентичная печатная головка StealthBurner с акселерометром ADXL345. В ходе экспериментов варьировались натяжение ремней и момент затяжки винтов портала XY. Показано, что PSD-анализ позволяет не только настраивать Input Shaper, но и выявлять дефекты сборки 3D-принтера. Установлено, что изменение натяжения ремней приводит к сдвигу резонансной частоты и уменьшению максимально допустимых ускорений печати, а ослабление винтов портала вызывает уширение резонансных пиков и появление дополнительных резонансных мод. В заключении даны выводы о возможности экспресс-диагностики состояния механики принтера на основе встроенных средств Klipper и данных от измерений акселерометра.

Ключевые слова: 3D-печать, FDM 3D-принтер, кинематика CoreXY, акселерометр ADXL345, Klipper, Input Shaper, спектральная плотность мощности (PSD), диагностика качества сборки, вибрации, резонанс.

INVESTIGATING THE IMPACT OF STRUCTURAL ASSEMBLY QUALITY ON THE RESONANCE FREQUENCIES OF FDM PRINTERS

A.O. Korolev, V.V. Klimakov, N.O. Logynov

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin, Russia, Ryazan, alexey127200@mail.ru, nikita171000@gmail.com, v.klimakov@mail.ru

Abstract. This article presents the results of experiments on the impact of structural assembly quality on the power spectral density (PSD) obtained during the standard Klipper resonance test. The test was conducted on three FDM 3D printers with CoreXY kinematics: Voron 2.4, Ender 3 NG, and Duender. All printers used the same StealthBurner printhead equipped with an ADXL345 accelerometer. During the experiments, belt tension and the tightening torque of the XY gantry screws were varied. The results show that PSD analysis is useful not only for tuning Input Shaper but also for identifying assembly defects. Changing belt tension shifted the resonant frequency and reduced the maximum allowable printing accelerations. Loosening the gantry screws widened the resonance peaks and introduced additional resonance modes. The study concludes that Klipper's built-in tools and accelerometer measurement data can be used for rapid diagnostics of a printer's mechanical condition.

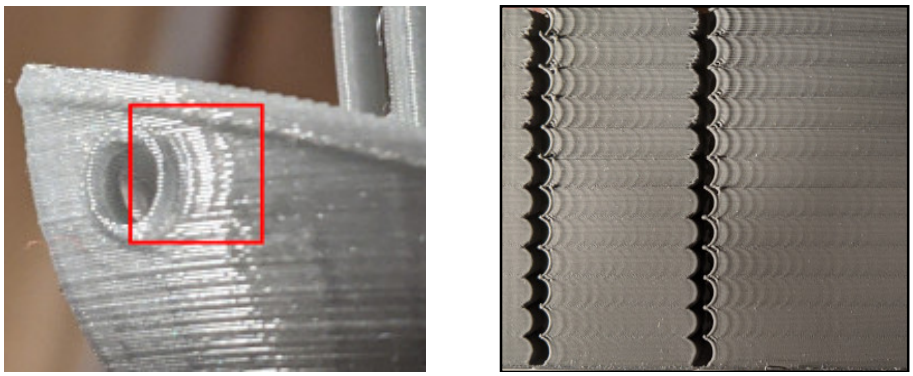
Keywords: 3D-printing, FDM 3D-printer, CoreXY kinematics, ADXL345 accelerometer, Klipper, Input Shaper, power spectral density (PSD), structural assembly quality diagnostics, vibrations, resonance.

Качество 3D-печати сильно зависит от параметров настройки принтера и его механических свойств [1]. Механические вибрации, вызванные быстрой сменой направления движения печатной головки вызывают эффект эха – дефект 3D-печати, при котором на ровных поверхностях появляются «ореолы», «рябь» или «звон», по форме повторяющие рядом находящийся угол или край модели (рис. 1) [2].

Современные программные комплексы управления 3D-печатью (Klipper [3]) используют алгоритмы компенсации вибраций и механических воздействий (Input Shaper), основанные на измерении резонансных характеристик принтера, для повышения качества печати на высоких скоростях и ускорениях. В качестве датчика первичной информации для таких алгоритмов используется акселерометр [4]. Однако резонансные частоты могут изменяться,

если в принтер внесены доработки и усовершенствования [2], которые влияют на движущуюся массу или изменяют жесткость конструкции, например:

- на печатающей головке устанавливается или удаляется оборудование (меняется экструдер, хотэнд, шаговый двигатель, добавляются или снимаются вентиляторы и навесное оборудование);
- натягиваются или ослабляются ремни портала;
- устанавливаются дополнительные укрепления для рамы.



а б

Рис. 1. Дефекты 3D-печати (Эхо) [1], вызванные механической вибрацией при отсутствии компенсации резонансов: *а* - «рябь», *б* - «звон»

Точность настройки Input Shaper напрямую зависит от полученных данных о спектральной плотности мощности (PSD). Качество сборки 3D-принтера – затяжка крепежа, натяжение ремней и жёсткость рамы, влияет на его механическое состояние, а следовательно, на форму и положение пиков PSD по частотам.

В литературе имеются отдельные рекомендации по настройке ремней [1, 2, 5], но систематических исследований, связывающих параметры PSD с конкретными дефектами сборки, не проводилось. Использование встроенных средств Klipper для оценки вибраций открывает возможность не только настройки компенсации, но и количественной диагностики состояния механики 3D-принтера.

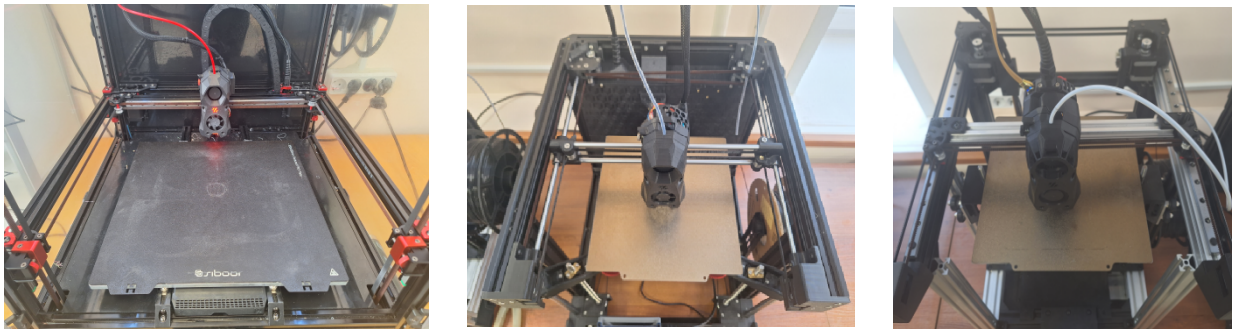
Цель работы – установить зависимости между параметрами качества сборки 3D-принтеров с кинематикой CoreXY и характеристиками спектральной плотности мощности, получаемыми в ходе штатного теста резонансов Klipper и оценить диагностическую ценность такого подхода.

Объекты исследования и их конструкции

Исследовались три FDM-принтера (рис. 2) с кинематикой CoreXY, оснащённые системой управления Klipper и трехосным акселерометром ADXL345[6], установленным на печатающей головке. Модель печатной головки во всех случаях – StealthBurner (рис. 3).

Основные характеристики исследуемых 3D принтеров представлены

Схема портала с кинематикой CoreXY и способы крепления портала показаны на рисунке 4.



а *б* *в*

Рис. 2. Исследуемые FDM 3D-принтеры: *а* -Voron 2.4[7], *б* - Ender 3 NG[8], *в* - Duender[9]



а *б* *в*

Рис. 3. Печатающая головка StealthBurner [10], установленная на исследуемых объектах - 3D принтерах: *а* –Voron 2.4, *б* – Ender 3 NG, *в* – Duender

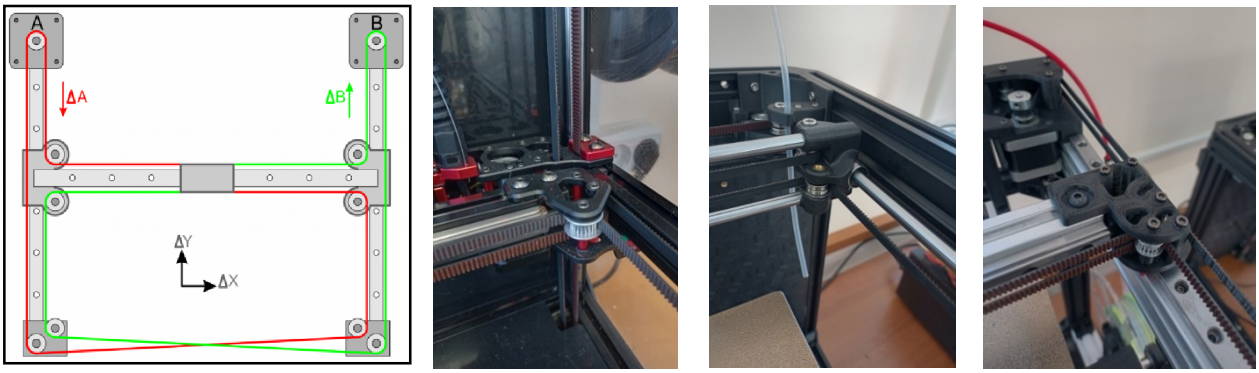
Образец 1: Voron 2.4 [7], рабочее поле 350×350 мм. Портал цельнометаллический, направляющие – рельсовые MGN 12 и MGN 9 (HIWIN). Характеризуется высокой жёсткостью конструкции.

Образец 2: Ender 3 NG (модифицированный Creality Ender 3 [8]), рабочее поле 220×220 мм. Портал частично выполнен из пластика (ABS), направляющие – валы Ø8 мм с линейными подшипниками. Наименее жёсткая конструкция.

Образец 3: Duender (разработка [9] на основе Creality Ender 3), рабочее поле 220×220 мм. В портале только каретки и угловые крепления из пластика (ABS), направляющие – рельсовые MGN12. Занимает промежуточное положение по жёсткости.

Таблица 1. Основные характеристики исследуемых 3D принтеров

Параметр	**Voron 2.4**	**Ender 3 NG**	**Duender**
Рабочее поле, мм	350 × 350	220 × 220	220 × 220
Материал портала XY	Алюминий (цельномет.)	Алюминий + пластик	Алюминий + пластик
Направляющие	Линейные рельсы (MGN12 и MGN 9)	Валы 8 мм + LM8LUU	Линейные рельсы (MGN 12)
Приводные ремни	Gates GT2 6 мм	Gates GT2 6 мм	Gates GT2 6 мм
Акселерометр	ADXL345 (на головке StealthBurner)	ADXL345 (на головке StealthBurner)	ADXL345 (на головке StealthBurner)



а *б* *в* *г*

Рис. 4. Схема портала с кинематикой CoreXY(*а*) и способы крепления портала:
б – на линейных рельсах с металлической кареткой (Voron 2.4);
в – на цилиндрических направляющих с пластиковой кареткой (Ender 3 NG);
г – на линейных рельсах с пластиковой кареткой (Duender).

Все 3D-принтеры были предварительно откалиброваны, и их номинальное состояние принято за эталонное (затяжка крепежа динамометрическим ключом, натяжение ремней с учётом разницы в массе портала).

Контролируемые в исследование факторы качества сборки

Для каждого принтера последовательно реализовывались четыре состояния механики:

Номинальное – заводская или эталонная сборка с рекомендованным натяжением ремней (измерялось акустическим методом контроля натяжения, основанным на анализе частоты вибрации ремня: 110–120 Гц для ремней GT2) и затяжкой крепежа динамометрическим ключом.

Немного ослабленные ремни – натяжение снижено до 80–90 Гц (частота основного тона ремня) без изменения других параметров.

Сильно ослабленные ремни – натяжение снижено до 50–60 Гц, что соответствует малозаметному провисанию ремней.

Ослабленные винты портала XY – крепёжные винты, соединяющие профили портала и каретки, ослаблены на 1/4 оборота от момента затяжки, обеспечивающего фиксацию без сильного люфта (имитация постепенного ослабления в процессе эксплуатации).

Погрешность измерения применяемых приборов обычно не превысила 5%.

Метод спектральной плотности мощности в Klipper

Для оценки вибраций программный комплекс Klipper использует акселерометр ADXL345, настраиваемый на частоту дискретизации 3200 Гц, что обеспечивает качественное измерение виброускорений в диапазоне от 5 до 133 Гц. Тест резонансов выполняется командой "TEST_RESONANCES AXIS=<ось>". Во время выполнения этой команды к медленному поступательному движению головки вдоль оси добавляются высокочастотные колебания с линейно растущей частотой, что позволяет преодолеть силу трения покоя и снизить шумовую составляющую. На практике (в логах Klipper) и при визуализации вы увидите что-то похожее на затухающий частотно-модулированный косинус, но наложенный на линейный дрейф, так как головка совершает колебательные движения относительно медленно движущейся средней точки. В коде алгоритма это реализовано как перемещение на очень маленькое расстояние Δx за период колебаний ($0.5/f$). Однако для упрощения модели движения и построения траектории можно считать, что средняя точка движется с некоторой постоянной микроскоростью (рис. 5).

При этом траектория головки может быть описана следующим уравнением движения как сумма медленного дрейфа и быстрых колебаний с изменяющейся частотой и амплитудой [3]:

$$x(t) = V_{dr} \cdot t + \frac{k}{4\pi^2 f(t)} \cdot \sin\left(2\pi \int_0^t f(\tau) d\tau\right), \quad (1)$$

где V_{dr} – очень маленькая скорость (например, 0.1–0.5 мм/с), обеспечивающая медленное смещение средней точки (обеспечивает срыв статического трения);

k – параметр "accel_per_hz" (по умолчанию 75 мм/с² на Гц);

$f(t)$ – линейно растущая частота, позволяющая сканировать резонансный диапазон равномерно по времени;

$A(t) = \frac{k}{2\pi^2 \cdot f(t)}$ – амплитуда уменьшающаяся с ростом частоты, чтобы ускорение оставалось пропорциональным частоте и не превышало физические ограничения привода оси;

$\phi(t) = \left(2\pi \int_0^t f(\tau) d\tau\right)$ – фаза колебаний или интеграл от текущей частоты, так как частота меняется во времени.

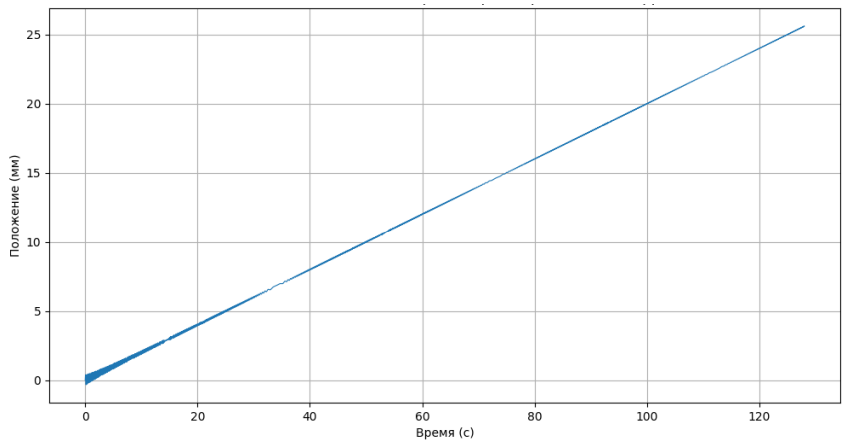


Рис. 5. График траектории движения головки 3D принтера при измерении резонансов

Таким образом, новая формула движения, используемая в последних версиях Klipper, специально разработана для обеспечения чистоты и корректности измерений на всех типах механик 3D-принтеров, гарантируя, что сила трения не помешает точному определению резонансных частот [3].

В программном комплексе Klipper обработка полученных данных осуществляется встроенным скриптом "Calibrate_shaper.py"[3]. Для расчета спектральной плотности мощности (PSD) используется метод Уэлча (Welch's method)[11] – улучшенная версия классической периодограммы, с более гладкой и надежной оценкой. Этот метод заключается в разбиении сигнала акселерометра на перекрывающиеся сегменты (обычно с перекрытием 50%) с применением оконной функции (обычно Ханна) и расчетом периодограмм к каждому сегменту с последующим её усреднением. Такой подход позволяет снизить дисперсию оценки и четко выделить реальные резонансные частоты на графике и уменьшить уровень шума.

Периодограмма для одного сегмента рассчитывается как:

$$P_w(f) = \frac{1}{M}\left|\sum_{n=0}^{N-1} a_n \cdot e^{-j2\pi nk/N}\right|^2, \quad (2)$$

где $M = \frac{N}{\Delta t}$ – количество сегментов;

a_n – отсчеты сигнала (ускорение);

N – количество отчетов в сегменте;

Δt – интервал времени между отсчетами (величина, обратная частоте дискретизации, например, 1/3200 с);

a_n –n-й отсчет ускорения в m-м сегменте данных;

$e^{-j2\pi nk/N}$ – комплексная экспонента, представляющая собой базисную функцию для преобразования Фурье.

Тогда, итоговая усредненная спектральная мощность по методу Уэлча за определенный период времени будет рассчитываться как:

$$PSD(f) = \frac{N}{\Delta t}\sum_{m=1}^{M}\left(\frac{\Delta t}{N}\left|\sum_{n=0}^{N-1} a_n^m \cdot w_n \cdot e^{-j2\pi nk/N}\right|^2\right), \quad (3)$$

где $a_n{}^m$ – n-й отсчет ускорения в m-м сегменте данных;

w_n – коэффициенты оконной функции (например, окна Ханна), применяемой к каждому сегменту для уменьшения искажений.

В контексте Klipper физический смысл пиков на графике PSD – это частоты, на которых механическая конструкция принтера наиболее сильно откликается на возбуждение вибрацией.

Методика проведения тестов и контролируемые факторы

Процедура исследования включала полнофакторный эксперимент с повторениями (минимум 5 повторений для каждого состояния) измерений.

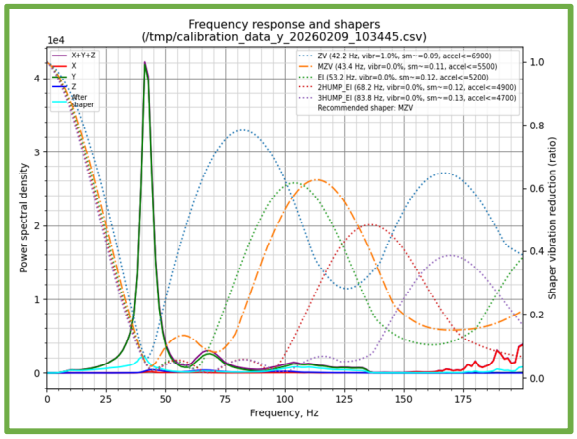
Проверка качества установки акселерометра и оценка уровня шума выполнялось командой MEASURE_AXES_NOISE, алгоритм работы которой основан на измерении среднеквадратического значения (RMS) шума для каждой оси 3D-принтера.

Для проведения тестов последовательно выполнялись команды TEST_RESONANCES AXIS=X и TEST_RESONANCES AXIS=Y с параметрами по умолчанию (диапазон частот 5–133 Гц). Данные акселерометра сохранялись для последующего анализа в CSV-файлы. Для обработки полученных измерений выполнялся скрипт calibrate_shaper.py, генерирующий PSD-графики для каждой оси.

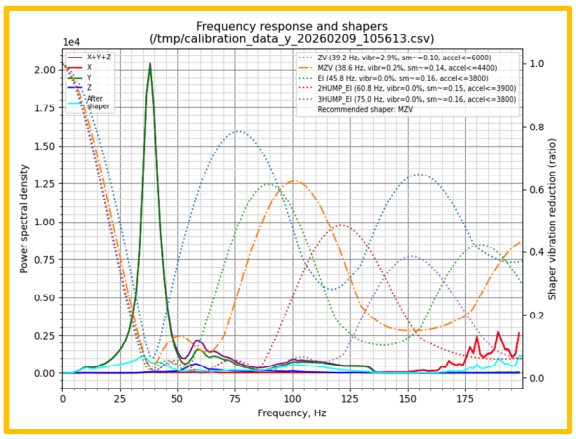
Процесс построения графиков *PSD*(*f*) происходит в три этапа:

- преобразование сигнала из временной области в частотную;
- предварительный расчет периодограммы;
- усреднение по методу Уэлча (деление на сегменты, оконная обработка, усреднение).

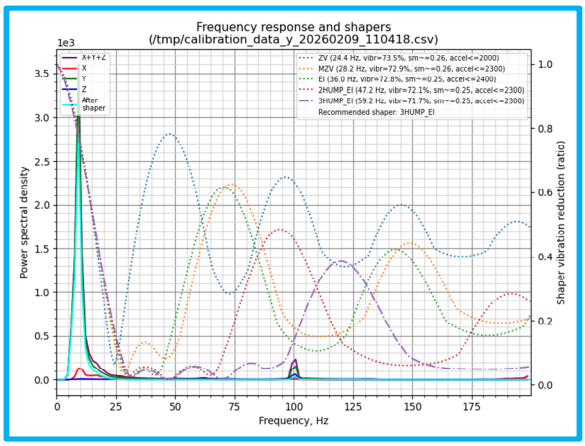
Ниже на рисунках 6-11 приведены типичные графики *PSD*(*f*) и варианты предложенных *shapers* для компенсации резонансов для трех исследуемых 3D-принтеров.



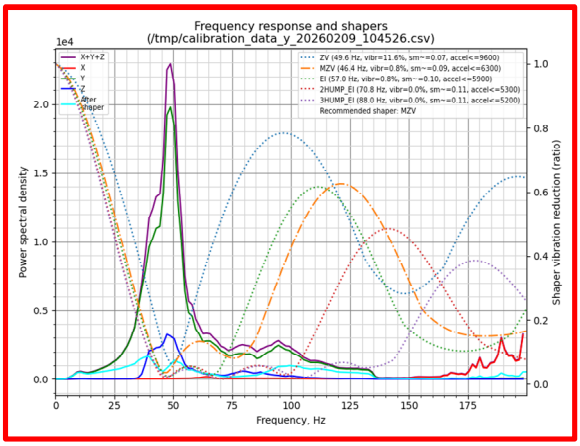
а



б

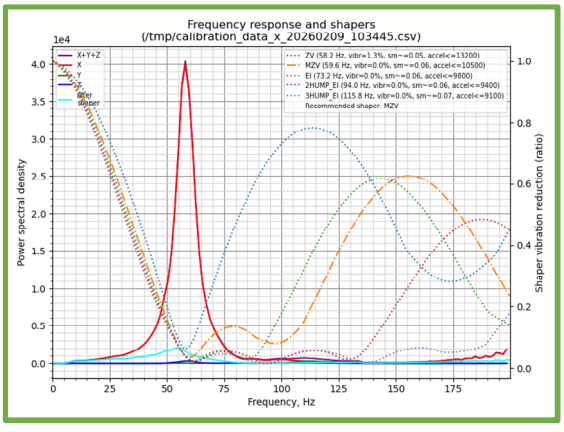


в

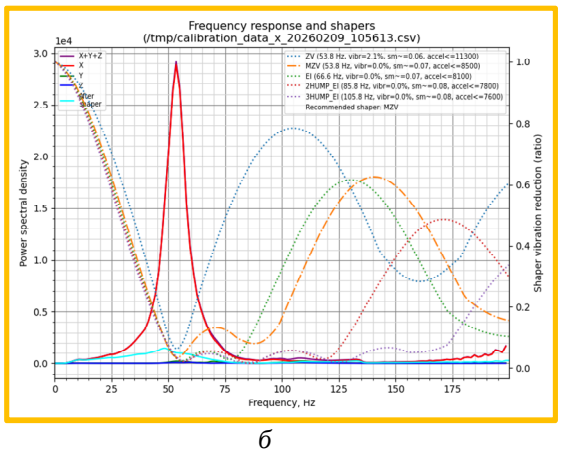


г

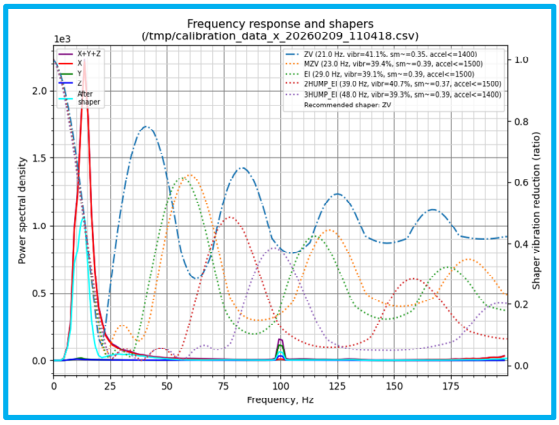
Рис. 5. Результаты на первом образце (Voron 2.4) по оси Y:
а – номинальное состояние конструкции принтера;
б – немного ослабленные ремни;
в – сильно ослабленные ремни;
г – ослабленные винты портала XY



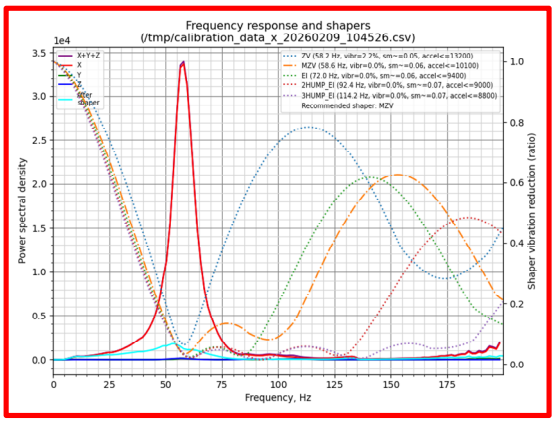
а



б

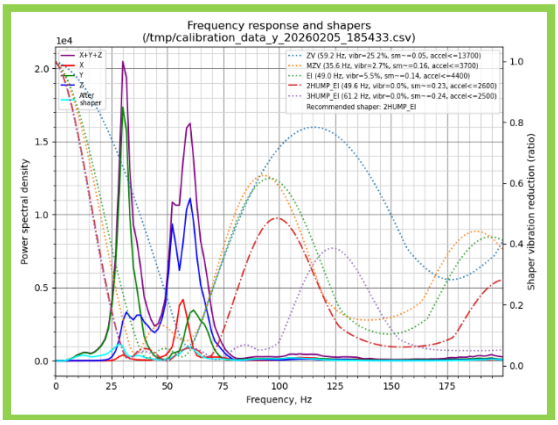


в

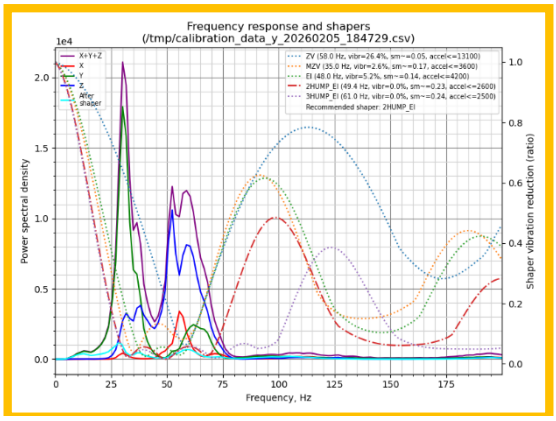


г

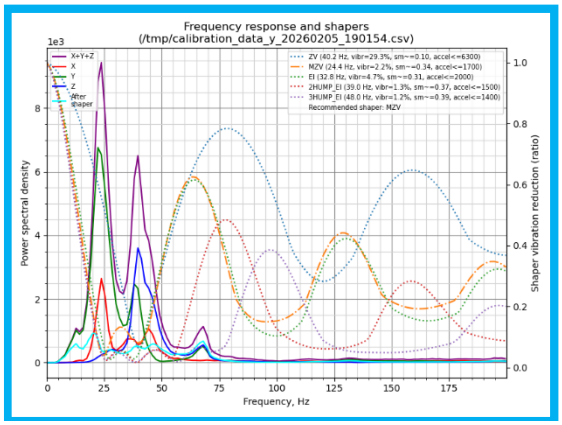
Рис. 6. Результаты на первом образце (Voron 2.4) по оси X:
а – номинальное состояние конструкции принтера;
б – немного ослабленные ремни;
в – сильно ослабленные ремни;
г – ослабленные винты портала XY



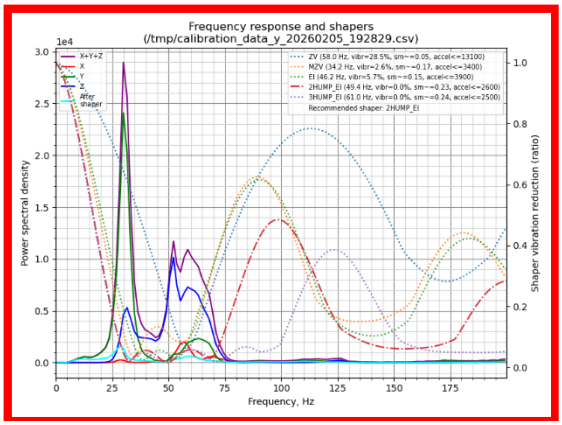
а



б

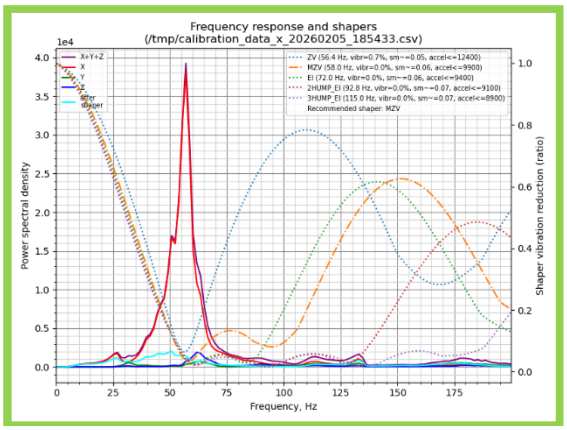


в

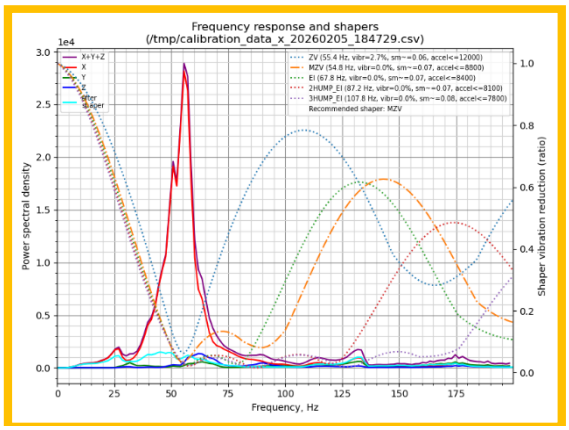


г

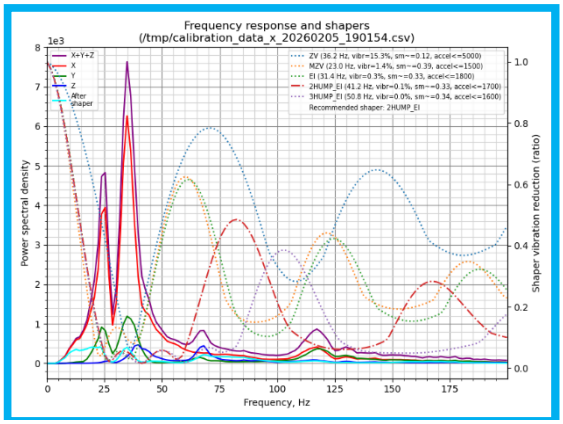
Рис. 7. Результаты на втором образце (Ender 3 NG) по оси Y:
а – номинальное состояние конструкции принтера;
б – немного ослабленные ремни;
в – сильно ослабленные ремни;
г – ослабленные винты портала XY



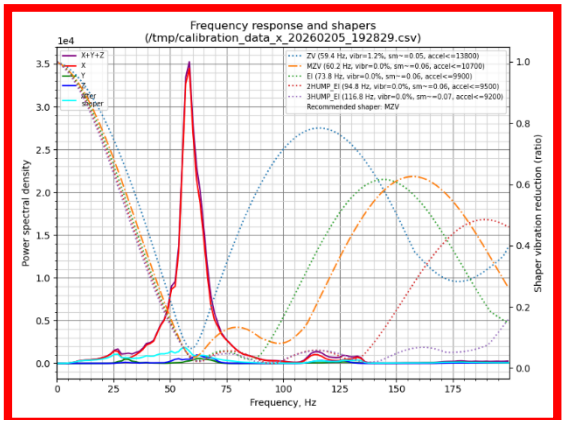
а



б

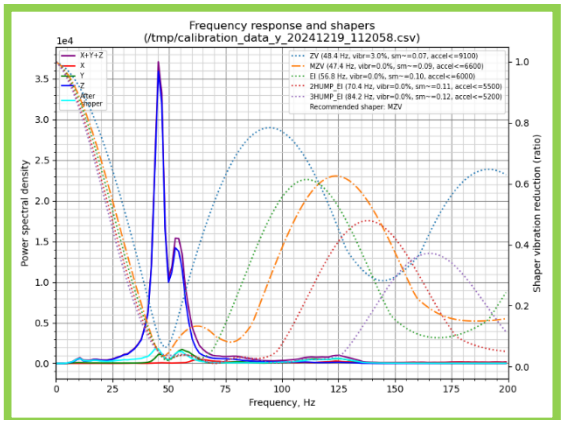


в

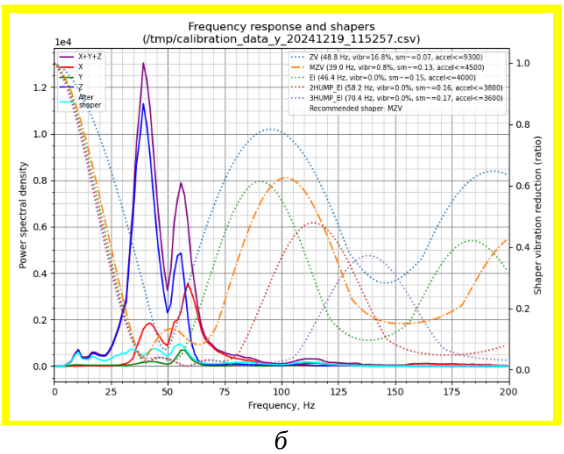


г

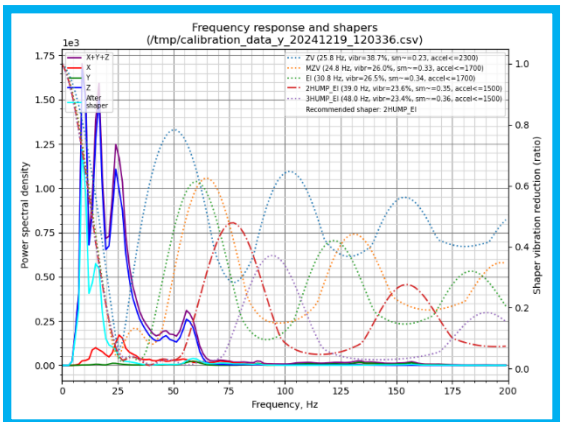
Рис. 8. Результаты на втором образце (Ender 3 NG) по оси X:
а – номинальное состояние конструкции принтера;
б – немного ослабленные ремни;
в – сильно ослабленные ремни;
г – ослабленные винты портала XY



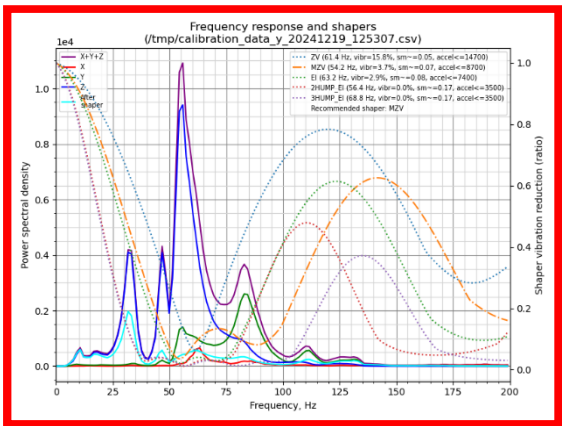
а



б

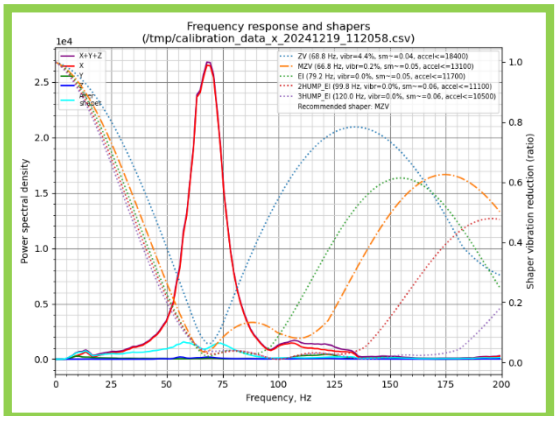


в

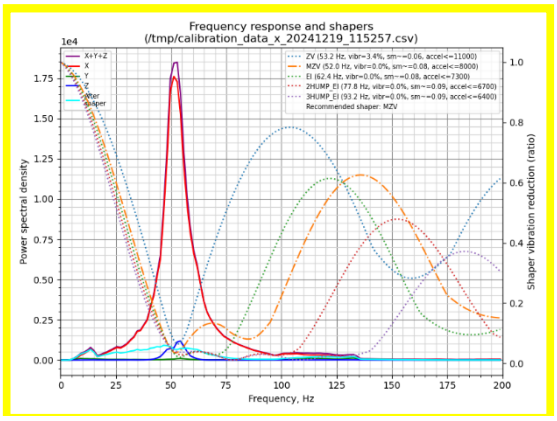


г

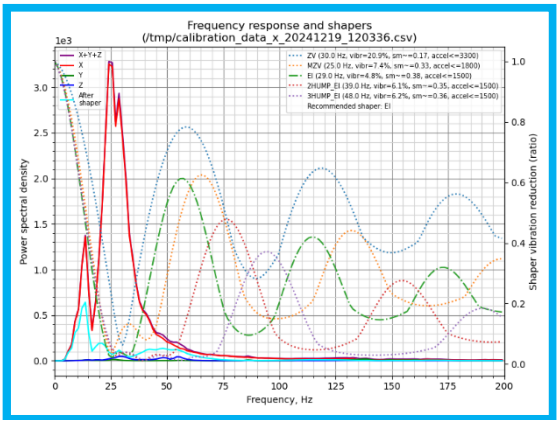
Рис. 9. Результаты на втором образце (Duender) по оси Y:
а – номинальное состояние конструкции принтера;
б – немного ослабленные ремни;
в – сильно ослабленные ремни;
г – ослабленные винты портала XY



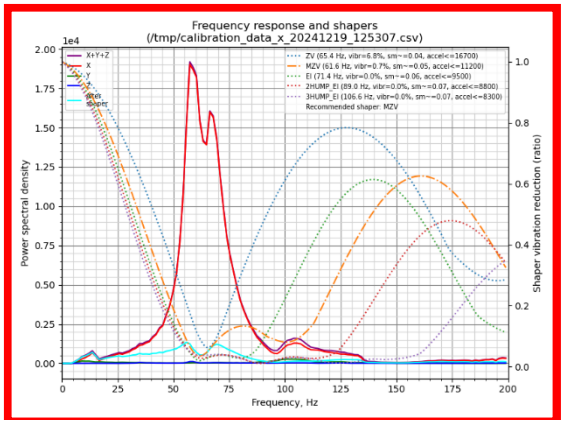
а



б



в



г

Рис. 10. Результаты на втором образце (Duender) по оси X:
а – номинальное состояние конструкции принтера;
б – немного ослабленные ремни;
в – сильно ослабленные ремни;
г – ослабленные винты портала XY

На графиках левая ось Y соответствует спектральной плотности мощности (PSD), представляющей энергию вибрации. Цветные кривые обозначают спектральное распределе-

ние вдоль осей X, Y и Z, тогда как пунктирные цветные кривые показывают остаточные вибрации после применения алгоритмов подавления резонансов. Правая ось Y представляет собой коэффициент снижения вибрации алгоритмом компенсации, количественно определяющий эффективность каждого Input Shaper в подавлении вибраций на определенных частотах. Ось X соответствует частоте вибраций. Пики на спектральных графиках соответствуют частотам, на которых вибрации наиболее выражены. Концептуально эти резонансы можно сравнить с системой «масса-пружина», где печатающая головка или печатная платформа поддерживаются ремнями, проявляющими упругое поведение. В идеальной, абсолютно жесткой раме принтера частотная характеристика демонстрировала бы один пик, соответствующий массе на соответствующем ремне. Незначительные пики могут быть результатом неоптимального натяжения ремня, ослабленных крепежных элементов, трения осей или некачественной установки гироскопа во время тестирования.

Представленные графики (рис.5-10) содержат обширную информацию о вибрационных характеристиках по осям 3D-принтера. Особое значение (верхний правый угол) имеют агоритмы Input Shaper – ZV, MZV, 2HUMP_EI, 3HUMP_EI и EI – представленные соответствующими пунктирными линиями. Кроме того, на графиках указан рекомендуемый Input Shaper для максимального подавления вибрации, параметр «sm» (время сглаживания) и параметр «accel» (максимальное рекомендуемое ускорение для соответствующей оси).

Обсуждение полученных результатов

В номинальном состоянии два 3D-принтера демонстрировали чёткие, узкие резонансные пики (Voron 2.4, Duender). В Ender 3 NG в номинальном состоянии на оси Y имеются вторичные резонансные пики. Для Duender с рельсами, но частично пластиковым порталом характерны более высокие резонансные частоты: X – 65 Гц, Y – 45 Гц. Ender 3 NG, имеющий валы и пластиковые элементы, показал более низкие частоты: X – 30 Гц, Y – 56 Гц. Voron 2.4 с рельсами, занял промежуточное положение благодаря цельнометаллической жёсткой раме: ось X – 52 Гц, ось Y – 42 Гц. Однако Voron 2.4 имеет в номинальном состоянии наиболее узкий пик PSD.

Натяжение ремней влияет на жёсткость системы 3D-принтера, что выражается в линейном сдвиге резонансной частоты. Практически это означает, что по отклонению частоты от эталонного значения можно судить о недостаточном или избыточном натяжении ремня. Полученные результаты согласуются с работами, в которых исследовалось влияние натяжения ремней на резонансные характеристики [1, 2], однако впервые показана различная чувствительность PSD к одним и тем же дефектам на принтерах с разной конструкцией портала.

В Ender 3 NG уменьшение натяжения ремня приводит к уменьшению частоты главного резонансного пика и его незначительному сужению при общем снижение амплитуды, однако по оси X это приводит к расщеплению главного резонансного пика.

Уменьшение натяжения ремня в Duender приводит к общему снижению амплитуды пиков по осям и к расщеплению главного пика на вторичные с их расширением. При этом по оси X это явление наиболее ярко выражено при максимальном ослаблении ремня, и кроме того область главного пика также смещается в низкочастотную область.

Для Voron 2.4 наблюдается чёткая корреляция между натяжением ремней и резонансной частотой. Снижение натяжения ремня приводит к уменьшению частоты и амплитуды пика, что согласуется с моделью "масса-пружина"[2]. При сильном ослаблении ремней частота снижалась на 80-12% от номинала (ось X: 52→10 Гц, ось Y: 42→37 Гц), а амплитуда пика уменьшалась в 20 раз.

Сдвиг резонансной частоты при ослаблении ремней можно объяснить уменьшением эффективной жёсткости системы «двигатель – ремень – каретка». Появление дополнительных пиков при сильном ослаблении ремней связано с возникновением нелинейных эффектов: ремень начинает работать как «мягкая пружина» с возрастающей жёсткостью при боль-

ших деформациях, а также с возбуждением мод колебаний портала и направляющих, которые в номинальном состоянии были демпфированы натяжением.

Ослабление крепежа портала приводит к снижению локальной жёсткости соединений, что вызывает появление дополнительных степеней свободы и, как следствие, новых резонансных частот. При этом основная частота резонанса, определяемая жёсткостью ремней, сохраняется, но амплитуда ее пика падает из-за появления трения и люфта в ослабленных соединениях.

Для принтеров с рельсовыми направляющими (Voron, Duender) вклад ремней в общую жёсткость доминирует, поэтому зависимость резонансной частоты от натяжения выражена сильнее. Для Ender 3 NG, где подшипники скольжения по валам вносят дополнительную нелинейность и трение, связь более сложная, и это проявляется в сильном изменении пиков при общем снижении амплитуды.

Результаты согласуются с работами, в которых исследовалось влияние натяжения ремней на резонансные характеристики, однако впервые показана различная чувствительность PSD к одним и тем же дефектам на принтерах с разной конструкцией. Ослабление винтов рамы проявляется в появлении низкочастотных резонансов, связанных с локальными деформациями и снижением общей жёсткости. Эти резонансы особенно опасны, так как они лежат в диапазоне рабочих частот печати и могут вызывать артефакты 3D-печати. Наличие дополнительных пиков является диагностическим признаком недостаточной жёсткости конструкции [12].

Для практического использования можно предложить следующие диагностические критерии:

- отклонение частоты главного пика более чем на 15% от номинала – сигнал о необходимости проверки натяжения ремней;
- появление дополнительных пиков с амплитудой >30% от главного – указывает на ослабление крепежа или о недостаточной жёсткости конструкции и неисправности направляющих.
- уширение главного пика (рост Δf более чем в 2 раза) – свидетельствует о наличии люфтов или значительного трения.

Предложенные пороговые значения (таблица 2) позволяют создать простую систему экспресс-диагностики на основе встроенных тестов Klipper, не требующую дополнительных инструментов.

Таблица 2. Рекомендуемые критерии оценки состояния механики

Параметр	**Норма**	**Требует внимания**	**Критическое состояние**
Частота основного пика	±5% от эталона	±10% от эталона	>±15%
Амплитуда основного пика по Y	>2e4	<2e4	<<2e4
Наличие доп. пиков	отсутствуют	амплитуда >10%	амплитуда >50%

Настоящее исследование имеет ряд ограничений:

- эксперименты проводились на ограниченном количестве образцов (по одному экземпляру каждого типа), что не позволяет полностью исключить влияние индивидуальных особенностей сборки 3D-принтеров;
- исследование ограничено тремя типами конструкций с одной кинематикой CoreXY, поэтому распространение выводов на другие кинематические схемы требует дополнительной верификации результатов.

Выводы

Установленные зависимости между параметрами качества сборки трёх FDM 3D-принтеров с кинематикой CoreXY и характеристиками спектральной плотности мощности, получаемыми при тестировании резонансов в Klipper позволяют сделать следующие выводы:

- Конструкция принтера и ее качество сборки является определяющими факторами для качественной печати на больших скоростях и ускорениях.
- Графики PSD формируемые с помощью программного комплекса Klipper выступают не только инструментом калибровки, но и достаточно точным методом для технической диагностики состояния 3D-принтера.
- Обнаружено, что некачественная натяжка ремня уменьшает скорости и ускорения используемые при печати более чем в три раза, чем люфты портала XY, вызванные ослаблением крепежных соединений.
- При сильном ослаблении ремня главная резонансная частота сдвигается в низкочастотную область колебаний с появлением вторичных резонансных частот в зависимости от конструктивных особенностей портала принтера.
- Некачественная затяжка крепежных элементов портала приводит к расширению главной резонансной частоты с образованием вторичных резонансных частот.

Перспективы дальнейших исследований включают расширение экспериментов на другие типы кинематики (кинематика Prusa, дельта-принтеры), исследование влияния износа направляющих и подшипников на PSD, а также разработку автоматизированного инструмента анализа PSD для диагностики состояния принтера.

Библиографический список

1. M. Duan et al., A limited-preview filtered B-spline approach to tracking control – With application to vibration-induced error compensation of a 3D printer, Mechatronics (2017), http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2017.09.002

2. Ghinea, M.; Niculescu, A.C.; Rosca, B.D. Enhancing FDM Rapid Prototyping for Industry 4.0 Applications Through Simulation and Optimization Techniques // Materials – 2025. –18(19). – 4555. https://doi.org/10.3390/ma18194555

3. Klipper Documentation. Resonance Testing. [Электронный ресурс] – URL: https://www.klipper3d.org/Resonance_Compensation.html (дата обращения: 23.03.2026).

4. И. С. Холопов Алгоритм идентификации механического воздействия по сигналам трехосного микроэлектромеханического акселерометра // Вестник РГРТУ. – 2018. – № 63– С.109-115

5. Guo, Zimu; John Halkon, Benjamin ; Zhao, Sipei Enhancing 3D printing quality: active vibration control for FDM in challenging environments // INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, INTER-NOISE 25, Sao Paulo, Brazil ,2025, Pages 1 - 994, pp. 946-954(9).

6. А. И. Калинкин, Т. С. Кислицына, И. А. Кудинов, И. А. Лютков, И. С. Холопов. Калибровка трехосного MEMS-акселерометра для прикладных задач фотограмметрии и совмещения изображений // Вестник РГРТУ. – 2020. – № 73 – С.37-51

7. VORON Design, Voron 2.4, https://vorondesign.com/voron2.4[Электронный ресурс] (дата обращения: 23.03.2026)

8. Radek Honc, ENDER 3 NG v1.2, https://rh3d.xyz/ [Электронный ресурс] (дата обращения: 23.03.2026)

9. Sergei Irbenek, Duender, https://github.com/Irbis3D/Duender [Электронный ресурс] (дата обращения: 23.03.2026)

10. VORON Design, StealthBurner, https://github.com/VoronDesign/Voron-Stealthburner [Электронный ресурс] (дата обращения: 23.03.2026)

11. Welch P. D. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms // IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics. –1967. –Vol. 15, No. 2. – P.70–73.

12. Е. С. Янов, А. В. Анцев Автоматизированный контроль технологической дисциплины современного машиностроительного производства// Вестник РГРТУ. – 2024. – № 88 – С.85-94

УДК 621.396; ГРНТИ 47.59

БЛОК СИНХРОНИЗАЦИИ РАДИОПЕРЕДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА РАДИОЛОКАЦИОННОГО МОДУЛЯ

А.А. Свиязов, О.О. Андреев
Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина, Российская Федерация, Рязань, saa@rsreu.ru

Аннотация. В статье рассматривается разработка и исследование блока синхронизации радиопередающего устройства радиолокационного модуля, предназначенного для формирования сетки частот с прецизионной стабильностью и низким уровнем фазовых шумов. Описаны принципы работы метода прямого цифрового синтеза (DDS), реализованного на базе микросхемы AD9851 и отечественной ПЛИС 5578ТС024. Приведена функциональная схема блока, рассмотрены особенности интерфейсов RS-485 и SPI, а также вопросы буферизации и коммутации выходного сигнала. Представлены экспериментальные данные по спектральным характеристикам, динамическому диапазону, свободному от паразитных составляющих (SFDR), и спектральной плотности мощности фазовых шумов. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных результатов, выявлены причины расхождений в области малых частот отстройки. Подтверждена эффективность выбранных схемотехнических решений и высокая помехоустойчивость разработанного блока синхронизации.
Ключевые слова: блок синхронизации, радиолокационный модуль, синтез частоты, DDS, AD9851, ПЛИС, фазовые шумы, спектральная плотность мощности, интерфейс RS-485, SPI.

SYNCHRONIZATION UNIT OF THE RADIO TRANSMITTER OF A RADAR MODULE

A.A. Sviyazov, O.O. Andreev
Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin, Russian Federation, Ryazan, saa@rsreu.ru

Annotation. The article addresses the development and investigation of a synchronization unit for the radio transmitter of a radar module, designed to generate a frequency grid with precision stability and low phase noise levels. The principles of operation of the direct digital synthesis (DDS) method are described, implemented using the AD9851 microchip and the domestic PLIS 5578TC024. The functional block diagram is presented, and the features of the RS-485 and SPI interfaces, as well as the issues of buffering and switching of the output signal, are discussed. Experimental data on spectral characteristics, spurious-free dynamic range (SFDR), and spectral density of phase noise are provided. A comparison of theoretical and experimental results is carried out, and the reasons for discrepancies in the low offset frequency region are identified. The effectiveness of the chosen circuit solutions and the high noise immunity of the developed synchronization unit are confirmed.
Keywords: synchronization unit, radar module, frequency synthesis, DDS, AD9851, PLIS, phase noise, spectral density, RS-485 interface, SPI.

Актуальность разработки обусловлена повышением требований к качеству радиолокационных систем и минимизации фазовых шумов, что привело к необходимости построения источников опорных колебаний с прецизионной стабильностью частоты и чрезвычайно низким уровнем собственных фазовых шумов.

Работа посвящена разработки и исследованию синтеза частоты для радиопередающего устройства. Разрабатываемое устройство должно задавать основную сетку частот, обеспечивающую внутреннюю когерентность сигналов всего модуля, формировать синусоидальный опорный сигнал с заданной частотой в непрерывном и стробирующем режиме и управление от вычислительного устройства по интерфейсу связи с физическим уровнем RS-485 (другое название – EIA/TIA-485).

Существует несколько способов синтеза сигналов. Метод прямого цифрового синтеза DDS (Direct digital synthesis DDS) благодаря рядом достоинств перед другими методами широко используется в телекоммуникационных и промышленных системах. Он обладает рядом

достоинств: метод позволяет из одного или нескольких опорных колебаний осуществлять генерацию сигналов специальной и произвольной формы и синтезировать гармонические сигналы множественных частот с высокой точностью и стабильностью; в любой момент времени частота, амплитуда и фаза сигнала точно известны и могут контролироваться; частота и фаза выходного сигнала имеют цифровое управление; высокое разрешение по частоте и фазе; быстрая перестройка на другую частоту (фазу) без разрыва фазы; цифровой интерфейс позволяет реализовать управление через микроконтроллер. Благодаря развитию электроники и технологии микросхемы-синтезаторы DDS становятся весьма недорогими компонентами, в то же время обеспечивающими высочайшее качество генерируемых сигналов.

В DDS выходной сигнала формируется в цифровой форме цифро-аналоговым преобразователем, то на его выходе формируется синусоидальный сигнал, состоящий из «ступенек». Эти «ступеньки» фильтруются с помощью фильтра нижних частот (ФНЧ), на выходе которого получается синусоидальный сигнал.

Для коммутации выходного сигнала блока синхронизации используется аналоговый коммутатор, управляемый с вычислительного устройства. Для исключения влияния нагрузки на выходе устанавливается буферный каскад.

Интерфейс RS-485 (другое название – EIA/TIA-485) использует дифференциальную передачу сигналов по витой паре проводов, что обеспечивает высокую устойчивость к синфазной помехе. Использование протоколов передачи данных с асинхронной синхронизацией снижает требования к синхронизации передающих и приемных блоков. Повысить скорость передачи данных позволяет применение синхронной передачи данных. Но в этом случае требуется дополнительная линия синхронизации. Для повышения помехоустойчивости сигнал синхронизации также передается по интерфейсу RS-485.

Синтезаторы DDS управляются посредством быстродействующего последовательного порта SPI. Поэтому необходим преобразователь сигналов интерфейсов RS-485 и SPI.

Функциональная схема блока синхронизации представлена на рисунке 1.

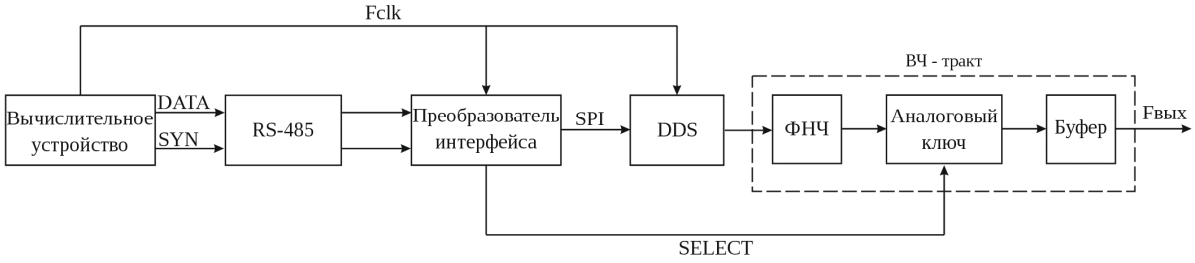


Рис.1. Функциональная схема блока синхронизации

В качестве DDS взята микросхемы AD9851 – это синтезатор с 32-разряднывм фазовым аккумулятором, встроенном множителе x6, что облегчает подбор тактового генератора и 10-разрядным высокоскоростным ЦАП с SFDR не ниже 43 дБн при выходной частоте 70 МГц [1].

В качестве ПЛИС взята отечественная микросхема 5578ТС024, являющаяся полным аналогом EP2C8 фирмы Intel, ёмкостью 500 тысяч системных вентилей с возможностью многократного перепрограммирования и изменения конфигурации и с повышенной спецстойкостью. Для конфигурирования используется ПЗУ 5578РС015 с многократным электрическим программированием [2].

Спектральная характеристика в непрерывном режиме приведена на рисунке 2 и в стробирующем режиме на рисунке 3.

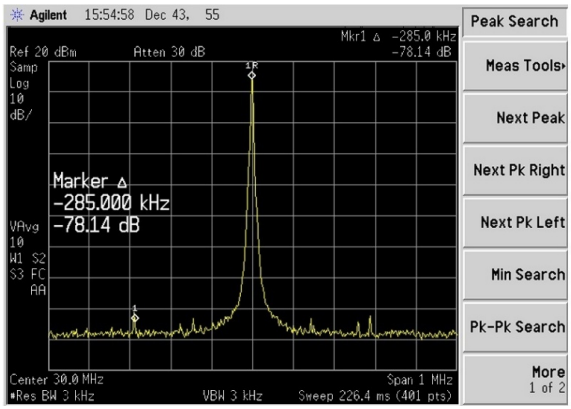


Рис. 2. Спектральная характеристика в непрерывном режиме

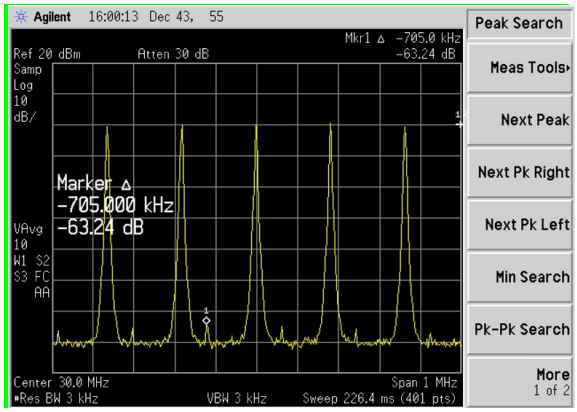


Рис. 3. Спектральная характеристика в режиме стробирования

Экспериментально был измерен динамический диапазон, свободный от паразитных составляющих (SFDR), в режиме стробирования рисунок 2 и в непрерывном режиме рисунок 3. Измерения проводились при фиксированной выходной частоте 30 МГц с помощью анализатора спектра Agilent. Экспериментально полученный уровень дискретных составляющих в непрерывном режиме составляющий минус 78,1 дБ ниже чем в режиме стробирования на 14,9 дБ, данная разность обусловлена коммутацией аналогового ключа, которая сопровождается переходными процессами, увеличивающие уровень дискретных составляющих. Не смотря на ухудшения SFDR в режиме стробирования, экспериментально получение результаты превышают паспортные значения синтезатора и свидетельствуют о правильности схемотехнических решениях.

Спектральная плотность мощности (СПМ) фазовых шумов это параметр, который оценивается в зависимости от частоты отстройки от несущей. СПМ блока синхронизации для выходной частоты 30 МГц при тактовой частоте 180 МГц приведены на рисунке 4. Измерения СПМ фазового шума и SFDR проводилось с помощью анализатора спектра Agilent E4407B с нижней границей рабочего диапазона 9 кГц. Анализатор оснащен встроенным аппаратным измерителем фазового шума и обеспечивает измерения уровня шума до минус 122 дБн/Гц. Соединение блока синхронизации и анализатора спектра выполнялось коаксиальным кабелем с разъёмами SMA.

Для анализа шумовых свойств радиоустройств известна аппроксимация спектральной плотности мощности (СПМ) фазовых шумов степенными функциями [3]:

$$S(F) = \left(\frac{f_{out}}{f_{clk}}\right)^2 \left(\frac{10^{k_2}}{F^2} + \frac{10^{k_1}}{F} + 10^{k_4}\right) + 10^{k_3} + S_{кв},$$

где f_{out} – выходная частота;

f_{clk} – тактовая частота;

k1, k2, k3, k4 – коэффициенты аппроксимации СПМ фазовых шумов DDS;

$S_{кв} = 2^{-N-0,59}\left(\frac{f_{out}}{f_{clk}^2}\right)$, где N – разрядность ЦАП.

Расчет теоретических зависимости проводился в интегрированной среде Mathcad 15.

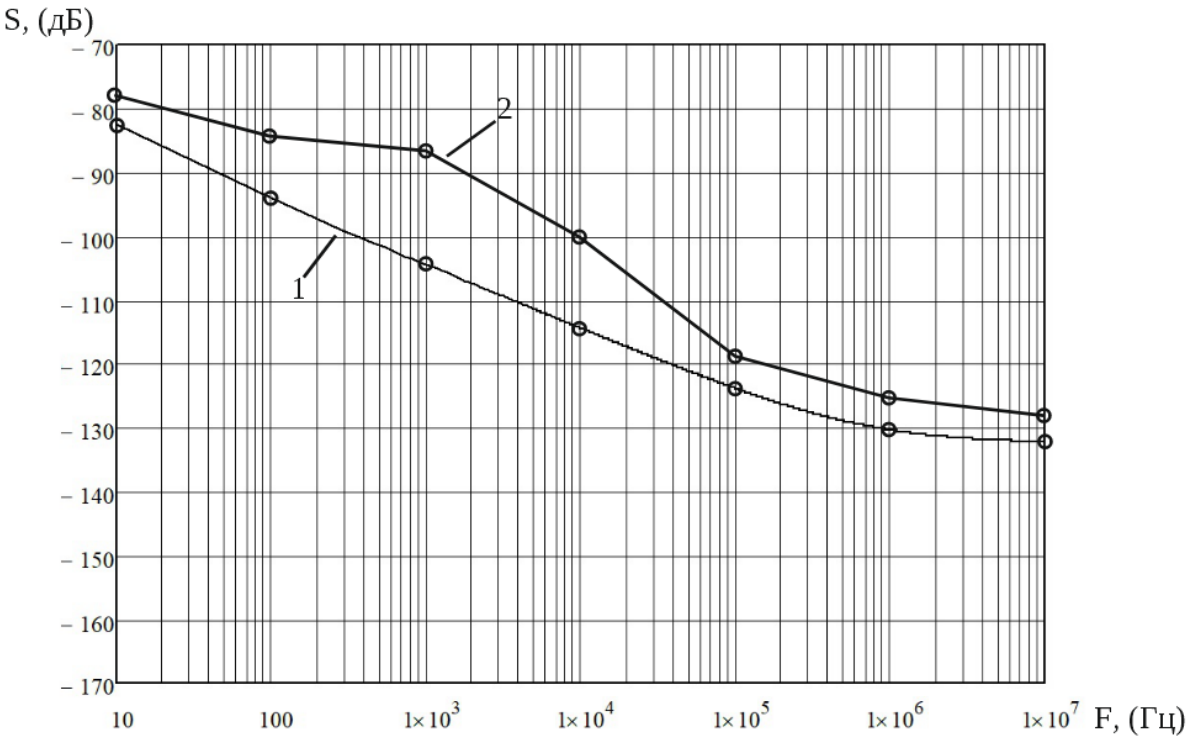


Рис. 4. Фазовые шумы блока синхронизации

Сравнение теоретической (1) и экспериментальной (2) СПМ фазовых шумов синтезатора показало удовлетворительное совпадение результатов в области частот отстройки свыше 100 кГц. В области малых частот отстройки (до 100 кГц) наблюдается систематическое превышение экспериментальных значений над теоретическими на величину минус 10–12 дБн/Гц.

На расхождение результатов влияет вклад фазовых шумов опорного генератора тактовой частоты, которые в области малых отстроек определяются флуктуациями типа 1/f и переносятся на выходной сигнал синтезатора. Также в реальных условиях измерения низкочастотные флуктуации напряжения питания вызывают паразитную фазовую модуляцию выходного сигнала DDS, что также увеличивает уровень СПМ в области малых частот отстройки. В области частот отстройки вблизи 100 кГц и выше расхождение между теоретической и экспериментальной СПМ уменьшается.

Библиографический список

1. AD9951 Referents manual: 400 MSPS 14-Bit 1.8 V CMOS Direct Digital Synthesizer [Электронный ресурс] / Analog Devices Ink. – Режим доступа: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad9951.pdf (дата обращения: 25.01.2026).

2. Строгонов А.В., Городков П.С. Особенности проектирования устройств цифровой обработки сигналов в базисе ПЛИС серии 5578 //Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т.22. – №3. – С. 256–265.

3. Ромашов В.В., Ромашова Л.В. Методика расчета коэффициентов аппроксимации спектральной плотности мощности фазовых шумов цифровых вычислительных синтезаторов // Радиотехнические и телекоммутационные системы. 2012. №1. Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-rascheta-koeffitsientov-approksimatsii-spektralnoy-plotnosti-moschnosti-fazovyh-shumov-tsifrovyh-vychislitelnyh. (дата обращения: 12.02.2026).

УДК 621.311:004.8; ГРНТИ 44.29.01

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

М.Н. Махмудов

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина, Российская Федерация, Рязань, maratnm77@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются концептуальные основы цифровой трансформации распределительного электросетевого комплекса в контексте стратегии развития до 2030 года. Анализируются эволюционные изменения энергосистемы, обусловленные ростом требований потребителей к надежности и качеству электроснабжения. Обосновывается переход от элементной к системной надежности как ключевой парадигмы цифровизации. Представлена архитектура цифровой электрической сети, включающая четыре функциональных компонента: «мозг» (программно-технический комплекс верхнего уровня на базе CIM-модели), «нервы» (инфраструктура передачи данных), «руки» (интеллектуальные коммутационные аппараты) и «глаза» (системы мониторинга и измерений). Рассмотрены перспективные технологии, включая системы накопления электроэнергии, и их роль в повышении адаптивности сетевой инфраструктуры. Показано, что интеграция разрозненных информационных систем в единое цифровое пространство на основе стандарта МЭК 61970-301 является необходимым условием перехода к риск-ориентированному управлению распределительными сетями.

Ключевые слова: цифровая трансформация, распределительные электрические сети, CIM-модель, цифровой двойник, системная надежность, интеллектуальная коммутация, системы накопления электроэнергии.

DIGITAL TRANSFORMATION OF DISTRIBUTION ELECTRIC NETWORKS

M.N. Makhmudov

Ryazan State Radiotechnical University named after V.F. Utkin, Russian Federation, Ryazan, maratnm77@mail.ru

Abstract. The article examines the conceptual foundations of digital transformation of the distribution power grid complex within the framework of the development strategy until 2030. The evolutionary changes in the power system driven by increasing consumer demands for reliability and quality of power supply are analyzed. The transition from component-based to system-based reliability as a key paradigm of digitalization is substantiated. The architecture of a digital electric network is presented, comprising four functional components: «brain» (upper-level software and hardware complex based on CIM model), «nerves» (data transmission infrastructure), «hands» (intelligent switching devices), and «eyes» (monitoring and measurement systems). Prospective technologies, including energy storage systems, and their role in enhancing the adaptability of grid infrastructure are considered. It is demonstrated that integration of fragmented information systems into a unified digital space based on IEC 61970-301 standard is a prerequisite for transitioning to risk-oriented management of distribution networks.

Keywords: digital transformation, distribution electric networks, CIM model, digital twin, system reliability, intelligent switching, energy storage systems.

В настоящее время развитие электроэнергетики в нашей стране претерпевает глубокую цифровую трансформацию отрасли, обусловленную как технологическим прогрессом, так и изменением структуры ожиданий конечных потребителей. В предшествующие года энергосистема развивалась линейно, при этом возможности инфраструктуры в полной мере соответствовали потребностям потребителей. Однако в настоящее время сформировался устойчивый дисбаланс: ожидания потребителей начинают опережать темпы модернизации сетевого хозяйства [1]. Рост числа энергоприемников, ужесточение требований к бесперебойности электроснабжения, а также необходимость сдерживания роста тарифов формируют противоречивую совокупность задач, стоящих перед сетевыми компаниями.

В качестве фундаментального отраслевого документа выступает концепция «Цифровая трансформация 2030», разработанная для распределительного сетевого комплекса. В со-

ответствии с данной концепцией - цифровизация трактуется не как простая автоматизация рутинных процессов, а как кардинальное изменение системы управления [2]. Ключевыми ориентирами трансформации являются: способность адаптироваться компаниям к новым вызовам, повышение надёжности электроснабжения, рост эффективности операционной деятельности, обеспечение доступности инфраструктуры, диверсификация бизнеса за счёт внедрения дополнительных сервисов, а также развитие кадрового потенциала.

Актуальность настоящего исследования определяется объективной потребностью в систематизации знаний о структуре и принципах функционирования цифровой электроэнергетической сети, а также в обосновании технологических решений, обеспечивающих переход от традиционной парадигмы управления распределительными сетями к цифровой.

Анализ эволюции энергосистемы позволяет выделить чёткую траекторию развития. На предыдущих этапах, обеспечение надёжности электрической сети достигалось преимущественно за счёт элементной надёжности, то есть применения высококачественного оборудования с большим сроком службы. Этому этапу были свойственны низкие темпы роста спроса на электроэнергию и относительно простые требования потребителей, касающиеся качества электроснабжения и бесперебойности [3].

Современное состояние характеризуется возникновением разрыва между фактическими возможностями энергосистемы и возросшими ожиданиями потребителей. Рост энергозависимости общества, увеличение доли нагрузок, чувствительных к качеству электроэнергии, а также недостаточный уровень автоматизации приводят к снижению степени удовлетворённости потребителей при одновременном возрастании затрат на содержание и развитие сетевой инфраструктуры.

Ключевым способом преодоления указанного противоречия выступает переход от элементной надёжности к системной. Системная надёжность, в отличие от элементной, обеспечивается не только повышением надёжности отдельных компонентов сети, но и внедрением интеллектуальных систем управления, способных оперативно реагировать на возмущения и минимизировать последствия отказов [4] Именно оптимальное соотношение затрат, направляемых на повышение элементной и системной надёжности, становится основой для повышения эффективности функционирования электрической сети.

Цифровая электрическая сеть представляет собой сложную киберфизическую систему, архитектуру которой в дидактических целях целесообразно рассматривать через аналогию с организмом, выделяя четыре функциональных компонента: «мозг», «нервы», «руки» и «глаза».

«Мозг»: программно-технический комплекс верхнего уровня

Центральным элементом архитектуры выступает программно-технический комплекс (ПТК) верхнего уровня, построенный на основе общей информационной модели (Common Information Model, CIM) в соответствии со стандартом МЭК 61970-301[5]. CIM-модель представляет собой абстрактную модель, в которой всё множество элементов электроэнергетической системы описывается единообразно в виде объектов, их свойств и связей между ними.

Ключевые преимущества применения CIM-модели включают:

- обеспечение единого информационного пространства для оперативных, инженерных и аналитических систем;
- возможность создания «цифрового двойника» сети – динамической модели, отражающей текущее состояние объектов и параметров режима;
- интеграция приложений различных производителей без необходимости разработки специализированных интерфейсов.

ПТК верхнего уровня выполняет функции центра принятия решений, анализируя данные в реальном времени и формируя управляющие воздействия для минимизации последствий аварийных ситуаций.

«Нервы»: инфраструктура передачи данных

Для функционирования цифровой электрической сети необходима развитая инфраструктура связи, обеспечивающая достоверную передачу данных между уровнями иерархии управления. В распределительных сетях применяются следующие основные технологии передачи данных:

- волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) – система, состоящая из пассивных и активных элементов, предназначенная для передачи оптического сигнала по оптоволоконному кабелю, обеспечивающая высокую пропускную способность и помехоустойчивость;
- беспроводной широкополосный доступ (БШПД) – радиомачта, передающая данные посредством радиосигнала в радиусе нескольких километров;
- цифровая радиосвязь – используется для удалённых объектов при невозможности прокладки кабельных линий;
- PLC (Power Line Communication) – передача данных на высокой частоте непосредственно по проводам линий электропередачи.

Выбор конкретной технологии осуществляется на основе технико-экономических показателей с учётом топологии сети, требований к надёжности связи и стоимости внедрения.

«Руки»: интеллектуальные коммутационные аппараты

Интеллектуальные коммутационные аппараты обеспечивают автоматическое управление режимами сети с минимальным участием персонала. К числу ключевых устройств относятся:

- Реклоузеры – умные коммутационные аппараты для воздушных линий 6–35 кВ, применяемые в сложных разветвлённых схемах с двумя и более источниками питания. Целесообразно использование нескольких реклоузеров, настроенных в единой логике. При возникновении повреждения реклоузеры автоматически изменяют своё состояние (нормально замкнутые размыкаются, нормально разомкнутые замыкаются), что позволяет локализовать зону отключения и восстановить питание неповреждённых участков за счёт переключения на резервный источник [6].
- Интеллектуальные выключатели нагрузки и разъединители – устройства, применяемые на линиях 6–35 кВ с протяжёнными отпайками или по двухлучевым схемам. При повреждении автоматический выключатель в центре питания (ПС 35–110 кВ) отключается. В бестоковую паузу интеллектуальный выключатель нагрузки (или разъединитель) отключает повреждённый участок и передаёт информацию о месте повреждения диспетчеру. После этого автоматический выключатель на подстанции повторно включается, подавая питание на линию, за исключением повреждённого участка.

«Глаза»: системы измерений и мониторинга

Расширение «цифрового следа» распределительной сети — ключевой фактор повышения эффективности управления. Если традиционно для управления требовались данные о наличии напряжения, нагрузке и положении коммутационных аппаратов, то цифровая сеть генерирует и использует:

- телеизмерения параметров режима;
- данные технического и коммерческого учета (АСУЭ);
- сигналы дискретных датчиков («сухой контакт»);
- видеопотоки технологического телевидения;
- данные мониторинга состояния оборудования (температура масла трансформаторов, частичные разряды, гололед на проводах);
- геоинформационные данные и координаты ремонтных бригад;

- метеорологическая информация.

Интеграция функций АСУЭ и телемеханики в единый контроллер позволяет одновременно передавать данные учета в аналитические системы и информацию об аварийных событиях – в оперативно-информационный комплекс диспетчера.

Системы накопления электроэнергии (СНЭ) на базе литий-ионных аккумуляторных батарей рассматриваются как перспективный инструмент повышения гибкости распределительных электрических сетей. На основе анализа целесообразности их применения выделены следующие наиболее эффективные сценарии:

- резервирование фидеров 0,4 кВ, питающих социально значимых потребителей (больницы, школы, котельные), при потере питания со стороны 6–10 кВ, с размещением СНЭ в комплектных трансформаторных подстанциях (КТП) или распределительных устройствах 0,4 кВ для временного электроснабжения присоединений;
- поддержание показателей качества электроэнергии на протяжённых фидерах 0,4 кВ в часы пиковых нагрузок, что также способствует снижению потерь;
- резервирование систем оперативного постоянного тока (СОПТ) на подстанциях 35–110 кВ с применением передвижных предварительно заряженных СНЭ.

Экономическая эффективность применения СНЭ достигается в условиях высокой стоимости традиционного сетевого строительства для решения аналогичных задач, а также при относительно невысокой присоединённой мощности потребителей.

Таким образом, цифровая трансформация распределительных электрических сетей не сводится к простой замене аналогового оборудования цифровым. Сущность данного процесса заключается в смене парадигмы управления: переходе от простого реагирования на произошедшие события к прогнозированию и предотвращению аварийных ситуаций на основе анализа больших данных.

Критическим фактором успеха цифровой трансформации выступает преодоление фрагментарности и разрозненности информационных систем. В современных сетевых компаниях эксплуатируется множество разрозненных систем (SCADA, АРМ РЗА, SAP PM, SAP IS-U, SAP CRM, АСУЗД, АСУЭ и др.), между которыми нередко отсутствуют эффективные механизмы обмена данными. Создание единой интеграционной платформы на основе CIM-модели (Common Information Model) позволяет сформировать «живую» схему сети, актуализируемую в реальном времени. Это, в свою очередь, создаёт основу для внедрения технологий искусственного интеллекта в управление режимами.

- Важным аспектом является поэтапность внедрения цифровых технологий. Переход к полной цифровой трансформации (при которой и поиск, и исполнение решения осуществляются системой без участия человека) требует последовательного прохождения промежуточных этапов:
- автоматизация (поиск решения – человек, исполнение решения – человек);
- цифровизация (поиск решения – система + человек, исполнение решения – человек);
- полная цифровая трансформация (поиск и исполнение решения – система).

Итоги исследования позволяют выделить следующие положения:

1. Цифровая трансформация распределительных электрических сетей представляет собой системный процесс перехода от элементной надёжности к системной надёжности на основе интеграции информационных технологий и анализа больших данных.
2. Архитектура цифровой сети, включающая четыре функциональных компонента («мозг», «нервы», «руки», «глаза»), обеспечивает целостность системы управления и возможность автоматического восстановления электроснабжения при аварийных режимах.
3. Ключевым технологическим решением выступает создание единого информационного пространства на основе CIM-модели (стандарт МЭК 61970-301), позволяющее интегрировать разрозненные информационные системы и сформировать цифровой двойник сети.

4. Интеллектуальные коммутационные аппараты (реклоузеры, интеллектуальные выключатели нагрузки и разъединители) в сочетании с расширенным мониторингом состояния оборудования являются основой для повышения надёжности электроснабжения без существенного увеличения капитальных затрат.

5. Системы накопления электроэнергии демонстрируют экономическую целесообразность в специфических сценариях: резервирование социально значимых объектов, поддержание качества электроэнергии на протяжённых линиях 0,4 кВ и обеспечение собственных нужд подстанций.

В будущем планируется создать алгоритмы машинного обучения для прогнозирования и перехода к упреждающему управлению электросетями. Также важно рассчитать, какую реальную прибыль принесет цифровизация в разных регионах и при разном устройстве сетей

Библиографический список

1. Стратегия развития электросетевого комплекса Российской Федерации на период до 2030 года. — М.: Минэнерго России, 2017. — 84 с.

2. Концепция цифровой трансформации распределительного сетевого комплекса до 2030 года. — М.: ПАО «Россети», 2018. — 42 с.

3. Бартоломей А.А., Сидоров А.В. Эволюция требований к надежности распределительных электрических сетей в условиях цифровой экономики // Электрические станции. — 2020. — № 5. — С. 2–10.

4. Гамазин С.И., Федин В.Т. Надежность и эффективность электрических сетей: от элементной к системной парадигме // Электричество. — 2019. — № 8. — С. 45–52.

5. IEC 61970-301:2017 Energy management system application program interface (EMS-API) – Part 301: Common Information Model (CIM) base. — Geneva: International Electrotechnical Commission, 2017. — 286 p.

6. Крючков А.Н., Соколов В.В. Интеллектуальные реклоузеры в распределительных сетях 6–35 кВ: Методы настройки и оценка эффективности // Вестник ИГЭУ. — 2021. — № 2. — С. 34–41.

7. ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Электромагнитная совместимость технических средств. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — Введ. 2014-07-01. — М.: Стандартинформ, 2013. — 24 с.

8. Шемякин С.В., Петров А.С. Системы накопления электроэнергии в распределительных сетях: анализ сценариев применения и экономическая эффективность // Энергетик. — 2022. — № 4. — С. 18–25.

УДК 004.896:621.38, ГРНТИ 28.23.15

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ ПРИ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ НА ПЛИС

И.А. Авдеев

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина, Российская Федерация, Рязань, ivan.avdeev0309@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются практические аспекты реализации алгоритмов обработки изображений в реальном времени на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС). Цель работы – оценить возможности ПЛИС для выполнения ресурсоёмких операций обработки изображений с учётом требований к скорости, энергоэффективности и параллелизму вычислений. Приводятся результаты сравнительного анализа алгоритмов фильтрации, детектирования объектов и сегментации, а также обсуждаются ограничения и перспективы применения ПЛИС в системах компьютерного зрения.

Ключевые слова: обработка изображений, реальное время, ПЛИС, параллельные вычисления, компьютерное зрение, алгоритмы, энергоэффективность.

EVALUATION OF THE POSSIBILITIES OF USING REAL-TIME IMAGE PROCESSING ALGORITHMS WHEN IMPLEMENTED ON FPGAS

I.A. Avdeev
Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russian Federation, Ryazan, ivan.avdeev0309@mail.ru.

Absract. The article discusses practical aspects of implementing real-time image processing algorithms on field-programmable gate arrays (FPGAs). The aim of the work is to evaluate the capabilities of FPGAs for performing resource-intensive image processing operations, taking into account requirements for speed, energy efficiency, and parallelism of computations. The results of a comparative analysis of filtering, object detection, and segmentation algorithms are presented, and the limitations and prospects of using FPGAs in computer vision systems are discussed.
Keywords: image processing, real time, FPGA, parallel computing, computer vision, algorithms, energy efficiency.

Введение

Обработка изображений в реальном времени является ключевой задачей для современных систем компьютерного зрения, используемых в робототехнике, медицине, видеонаблюдении и автомобильной промышленности [1]. Традиционные вычислительные платформы, такие как графические процессоры (ГП), не всегда удовлетворяют требованиям по скорости, энергопотреблению и детерминизму выполнения операций. В этом контексте программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) представляют собой перспективную альтернативу благодаря возможности параллельной обработки данных и низкому энергопотреблению [2].

Целью статьи является оценка возможностей реализации алгоритмов обработки изображений на ПЛИС с точки зрения производительности, ресурсозатрат и применимости в реальном времени. В работе анализируются основные классы алгоритмов, рассматриваются особенности их реализации на ПЛИС, а также приводятся результаты экспериментального исследования.

Теоретическая часть

ПЛИС представляют собой гибкие аппаратные платформы, позволяющие реализовывать специализированные вычислительные конвейеры за счёт параллельного выполнения операций. Это особенно важно для задач обработки изображений, которые часто требуют выполнения однотипных операций над большими массивами данных [3]. К основным преимуществам ПЛИС относятся:

1. Высокая степень параллелизма – возможность одновременной обработки нескольких пикселей или блоков изображения;

2. Низкое энергопотребление – по сравнению с универсальными процессорами, ПЛИС позволяют оптимизировать вычисления под конкретную задачу;

3. Детерминизм – гарантированное время выполнения операций, что критично для систем реального времени.

Основные классы алгоритмов обработки изображений, которые могут быть эффективно реализованы на ПЛИС, включают:

- фильтрация и шумоподавление (например, медианная фильтрация, фильтр Гаусса);
- детектирование границ и объектов (алгоритмы Кэнни, Собеля, Хаара);
- сегментация изображений (методы на основе пороговой обработки, кластеризации);
- сопоставление и трекинг объектов (алгоритмы оптического потока, корреляционные методы).

При реализации алгоритмов на ПЛИС необходимо учитывать следующие аспекты:

- оптимизация использования ресурсов – эффективное задействование логических элементов, блоков памяти и арифметических устройств;

- организация конвейерной обработки – минимизация задержек между этапами обработки;
- интеграция с внешними интерфейсами – обеспечение взаимодействия с камерами, памятью и другими компонентами системы.

В работе [4] отмечается, что успешная реализация алгоритмов на ПЛИС требует тщательного баланса между производительностью, ресурсами и сложностью разработки.

Практическая (экспериментальная) часть

Для оценки возможностей ПЛИС при обработке изображений в реальном времени было проведено экспериментальное исследование, в рамках которого на платформе Xilinx Zynq-7000 реализованы три алгоритма: фильтр Гаусса (размытие изображения), детектор границ Собеля и адаптивная пороговая сегментация.

Ключевым элементом аппаратной реализации фильтра Гаусса является двумерная свёртка с ядром 5×5. Представлен фрагмент Verilog-кода, реализующий формирование скользящего окна и вычисление свёртки.

```
// Коэффициенты ядра Гаусса 5x5 (целочисленная аппроксимация, сумма = 256)
localparam [7:0] K[0:4][0:4] = '{
   '{1, 4, 6, 4, 1},
   '{4,16,24,16, 4},
   '{6,24,36,24, 6},
   '{4,16,24,16, 4},
   '{1, 4, 6, 4, 1} };
// Основной вычислительный блок: формирование окна и свёртка
always @(posedge clk) begin
   if (data_valid) begin
      // Сдвиг данных в окне 5x5 (window_reg – матрица регистров)
      for (int i = 0; i < 4; i = i + 1)
         for (int j = 0; j < 5; j = j + 1)
            window_reg[i][j] <= window_reg[i+1][j];
      for (int j = 0; j < 4; j = j + 1)
         window_reg[4][j] <= window_reg[4][j+1];
      window_reg[4][4] <= pixel_in;
      // Вычисление свёртки, когда окно полностью заполнено
      if (window_valid) begin
         sum = 0;
         for (int i = 0; i < 5; i = i + 1)
            for (int j = 0; j < 5; j = j + 1)
               sum = sum + window_reg[i][j] * K[i][j];
         pixel_out <= sum >> 8;  // деление на 256
         out_valid <= 1'b1;
      end
   end
end
```

В приведённом фрагменте показан ключевой механизм обработки – двумерная свёртка с ядром Гаусса. Окно 5×5 реализовано в виде двумерного массива регистров *window_reg*, данные в котором сдвигаются с каждым тактом. Коэффициенты ядра заданы целыми числами, их сумма равна 256, что позволяет выполнять нормировку простым сдвигом вправо. При появлении валидного окна вычисляется взвешенная сумма и формируется выходной пиксель.

Такая конвейерная структура обеспечивает обработку одного пикселя за такт без дополнительных задержек.

На рисунках 1–6 представлены отчёты синтеза трёх алгоритмов. В таблицах приняты следующие обозначения: LUT (*Look-Up Table*) – логические ячейки для комбинационных схем (сравнение, счётчики, управление), FF (*Flip-Flop*) – триггеры для хранения данных (окно обработки, промежуточные суммы), DSP48E – аппаратные умножители (используются для свёртки и фильтрации). *Target* – целевой период тактовой частоты 100 МГц, *Estimated* – фактическая задержка критического пути после синтеза, *Uncertainty* 1.25 ns – технологический запас. *Latency* показывает задержку в тактах от входа первого пикселя до выхода первого результата, *Interval* – минимальное время между кадрами.

1. Фильтр Гаусса для размытия изображения.

Performance Estimates

Timing (ns)

Summary

Clock	Target	Estimated	Uncertainty
ap_clk	10.00	10.712	1.25

Latency (clock cycles)

Summary

Latency		Interval		
min	max	min	max	Type
4959	4959	4953	4953	dataflow

Рис. 1. Результаты синтеза фильтра Гаусса

Utilization Estimates

Summary

Name	BRAM_18K	DSP48E	FF	LUT	URAM
DSP	-	-	-	-	-
Expression	-	-	0	32	-
FIFO	0	-	60	236	-
Instance	0	16	1906	3484	0
Memory	-	-	-	-	-
Multiplexer	-	-	-	36	-
Register	-	-	6	-	-
Total	0	16	1972	3788	0
Available	280	220	106400	53200	0
Utilization (%)	0	7	1	7	0

Рис. 2. Ресурсы фильтра Гаусса

2. Детектор границ Собеля

Performance Estimates

Timing (ns)

Summary

Clock	Target	Estimated	Uncertainty
ap_clk	10.00	9.400	1.25

Latency (clock cycles)

Summary

Latency		Interval		
min	max	min	max	Type
8649	8649	8643	8643	dataflow

Рис. 3. Результаты синтеза детектора Собеля

Utilization Estimates

Summary

Name	BRAM_18K	DSP48E	FF	LUT	URAM
DSP	-	-	-	-	-
Expression	-	-	0	32	-
FIFO	0	-	60	240	-
Instance	0	3	1237	2471	0
Memory	-	-	-	-	-
Multiplexer	-	-	-	36	-
Register	-	-	6	-	-
Total	0	3	1303	2779	0
Available	280	220	106400	53200	0
Utilization (%)	0	1	1	5	0

Рис. 4. Ресурсы детектора Собеля

3. Алгоритм сегментации на основе адаптивного порога.

Performance Estimates

Timing (ns)

Summary

Clock	Target	Estimated	Uncertainty
ap_clk	10.00	9.400	1.25

Latency (clock cycles)

Summary

Latency		Interval		
min	max	min	max	Type
6569	6720	6559	6717	dataflow

Рис. 5. Результаты синтеза пороговой обработки

Utilization Estimates

Summary

Name	BRAM_18K	DSP48E	FF	LUT	URAM
DSP	-	-	-	-	-
Expression	-	-	0	32	-
FIFO	0	-	80	320	-
Instance	0	3	1015	1806	-
Memory	-	-	-	-	-
Multiplexer	-	-	-	36	-
Register	-	-	6	-	-
Total	0	3	1101	2194	0
Available	280	220	106400	53200	0
Utilization (%)	0	1	1	4	0

Рис. 6. Ресурсы пороговой обработки

Каждый алгоритм оценивался по следующим критериям:

- Скорость обработки (количество кадров в секунду).
- Задержка обработки (время от получения кадра до вывода результата).
- Использование ресурсов ПЛИС (логические элементы, блоки памяти, DSP-блоки).

Результаты эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты реализации алгоритмов на ПЛИС

Алгоритм	Скорость (кадр/с)	Задержка (мс)	Использование LUT (%)	Использование DSP (%)
Фильтр Гаусса	20 165	0,049	7	7
Детектор Собеля	11 562	0,086	5	1
Пороговая обработка	14 900	0,067	4	1

Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Фильтр Гаусса демонстрирует наивысшую скорость обработки (20 165 кадр/с) при использовании 7% логических ресурсов и 7% DSP-блоков. Это объясняется эффективной реализацией свёртки 5×5 на ПЛИС, что позволяет использовать его для предварительной обработки изображений в системах реального времени, где критична высокая производительность.

2. Детектор границ (оператор Собеля) требует минимальных аппаратных ресурсов (5% LUT, 1% DSP), обеспечивая 11 562 кадр/с. Несмотря на более низкую скорость по сравнению с фильтром Гаусса, он эффективно выделяет контуры объектов и может применяться в системах с жёсткими ограничениями по энергопотреблению.

3. Пороговая обработка показывает сбалансированные показатели (14 880 кадр/с при 4% LUT и 1% DSP), что делает её оптимальным выбором для задач бинаризации изображений в встраиваемых системах с ограниченными аппаратными возможностями.

Сравнение с реализацией тех же алгоритмов на цифровом и графическом процесерах показывает, что ПЛИС обеспечивают сопоставимую производительность при значительно меньшем энергопотреблении. При обработке 20 000 кадров в секунду энергопотребление ПЛИС составляет единицы ватт, тогда как ЦП и ГП потребляют десятки ватт, что даёт экономию электроэнергии.

Таким образом, экспериментально подтверждена эффективность использования ПЛИС для задач обработки изображений в реальном времени, особенно в энергоэффективных встраиваемых системах.

Заключение

Проведённое исследование подтвердило высокий потенциал ПЛИС для реализации алгоритмов обработки изображений в реальном времени. Ключевыми преимуществами являются возможность параллельной обработки данных, низкое энергопотребление и детерминизм выполнения операций. Однако разработка под ПЛИС требует глубоких знаний аппаратной части и тщательной оптимизации алгоритмов.

Таким образом, ПЛИС представляют собой эффективную платформу для систем компьютерного зрения, требующих обработки изображений в реальном времени с ограничениями по энергопотреблению и задержкам.

Библиографический список

1. Гонсалес, Р., Вудс, Р. Цифровая обработка изображений. – 4-е изд. – М.: Техносфера, 2022. – 360 с.
2. Хамахер, К., Вранешич, З., Заки, С. Организация ЭВМ. – 5-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 258 с.
3. Уэйли, Д., Сканнелл, К. Проектирование систем цифровой обработки сигналов на ПЛИС. – М.: ДМК Пресс, 2018. –480 с.
4. Педж, Д., Салдана, М. Проектирование на ПЛИС с использованием VHDL. – М.: ДМК Пресс, 2021. – 325 с.
5. Кузнецов, А.С., Петров, И.В. Сравнительный анализ аппаратных реализаций фильтров размытия на ПЛИС. // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 5 (220). – С. 102–115.
6. Смирнов, А. В. Программируемые логические интегральные схемы в системах обработки изображений // Цифровая обработка сигналов. – 2020. – № 3. – С. 45–52.
7. Xilinx Inc. Vivado Design Suite User Guide: High-Level Synthesis (UG902). – 2023. – URL: https://www.xilinx.com/support/documentation/sw_manuals/xilinx2023_1/ug902-vivado-high-level-synthesis.pdf
8. Зайцев, В. П. Алгоритмы и структуры данных для обработки изображений на ПЛИС // Мир электроники. – 2022. – № 5. – С. 78–84.

УДК 62-1/-9; ГРНТИ 41.01.11

ПЕРСПЕКТИВЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ НА НАТРИЙ-ИОННЫЕ В СИСТЕМАХ ГАРАНТИРОВАННОГО ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО КОМПЛЕКСА РОССИИ

Р.В. Зимнухов

Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета
Российская Федерация, Рязань, zema.mervin@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается целесообразность и перспективы использования натрий-ионных (Na-ion) аккумуляторов в качестве альтернативы доминирующим литий-ионным (Li-ion) системам накопления энергии (СНЭ) для объектов электросетевого хозяйства России. Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения технологического суверенитета, волатильностью цен на литий и суровыми климатическими условиями эксплуатации на большей части территории страны. Проведен детальный сравнительный анализ ключевых характеристик двух технологий: плотности энергии, ресурса (срока службы), температурных диапазонов работы, безопасности, стоимости и экологичности. Особое внимание уделено влиянию низких температур на эффективность и деградацию аккумуляторов. На основе полученных данных и анализа текущего состояния российского рынка (проекты SNDGLOBAL, «Роснано», «Росатом») сделаны выводы о нишевом характере применения Na-ion технологий. Обосновано, что наибольший эффект от их внедрения может быть достигнут в стационарных системах резервного питания распределительных сетей, особенно в регионах с холодным климатом и на объектах с высокими требованиями к безопасности.

Ключевые слова: натрий-ионный аккумулятор, литий-ионный аккумулятор, система накопления энергии, электросети, распределительные подстанции, бесперебойное питание, холодный климат, стоимость хранения энергии (LCOS), технологический суверенитет.

PROSPECTS FOR REPLACING LITHIUM-ION ACCUMULATORS WITH SODIUM-ION BATTERIES IN GUARANTEED POWER SUPPLY SYSTEMS FOR RUSSIA'S POWER GRID COMPLEX

R.V. Zimnukhov

Ryazan Institute (branch) Moscow Polytechnic University,
Russian Federation, Ryazan, zema.mervin@yandex.ru

Abstract. The article discusses the feasibility and prospects of using sodium-ion (Na-ion) batteries as an alternative to the dominant lithium-ion (Li-ion) energy storage systems (SNES) for Russian electric grid facilities. The relevance of the study is determined by the need to ensure technological sovereignty, the volatility of lithium prices and the harsh climatic conditions of operation in most of the country. A detailed comparative analysis of the key characteristics of the two technologies has been carried out: energy density, service life, operating temperature ranges, safety, cost, and environmental friendliness. Special attention is paid to the effect of low temperatures on the efficiency and degradation of batteries. Based on the data obtained and an analysis of the current state of the Russian market (SNDGLOBAL, Rusnano, and Rosatom projects), conclusions are drawn about the niche nature of the use of Na-ion technologies. It is proved that the greatest effect of their implementation can be achieved in stationary backup power supply systems of distribution networks, especially in regions with a cold climate and facilities with high safety requirements.

Keywords: sodium-ion battery, lithium-ion battery, energy storage system, power grids, distribution substations, uninterruptible power supply, cold climate, cost of energy storage (LCOS), technological sovereignty.

Современное развитие электросетевого комплекса России неразрывно связано с внедрением цифровых технологий и повышением надежности электроснабжения. Одним из ключевых элементов здесь выступают системы гарантированного бесперебойного питания подстанций и системы накопления энергии (СНЭ), позволяющие сглаживать пики нагрузок и обеспечивать резервирование. На сегодняшний день доминирующей технологией являются литий-ионные (Li-ion) аккумуляторы, обладающие высокой плотностью энергии и значительным ресурсом. Однако существует ряд факторов, стимулирующих поиск альтернатив:

высокая стоимость и ограниченность запасов лития, а также существенное снижение эффективности Li-ion батарей при низких температурах, что особенно актуально для климатических условий на территории РФ.

В качестве одного из самых многообещающих претендентов на роль «технологии следующего поколения» рассматриваются натрий-ионные (Na-ion) аккумуляторы. Они привлекают внимание благодаря доступности сырья, потенциально низкой стоимости и лучшим показателям работы в условиях низких температур.

Цель данной работы – на основе открытых источников и аналитических данных провести сравнительный анализ Na-ion и Li-ion аккумуляторов по критически важным для российской энергетики параметрам и оценить перспективы их применения в сетевом хозяйстве, в том числе в контексте начавшихся в 2025-2026 гг. проектов локализации производства в России.

Для объективного сопоставления был выбран ряд критериев, сгруппированных в три категории: технические (энергетическая плотность, удельная мощность, цикличность), эксплуатационные (температурный режим, безопасность, скорость старения) и экономические (цена сырья, полная стоимость владения (TCO), степень технологической готовности). В основе работы лежит сравнительный анализ сведений из научно-технической периодики и отраслевых обзоров.

Ключевое достоинство натрий-ионной технологии связано с общедоступностью сырья. Натрий входит в число наиболее распространённых химических элементов; его можно добывать из океанской воды или поваренной соли. Процесс получения натрия отличается технологической простотой и сравнительно невысоким экологическим следом. Напротив, добыча лития трудоёмка, дорога, локализована в нескольких странах (Южная Америка, Австралия) и зачастую сопряжена с образованием опасных отходов. Всё это делает Na-ion батареи в долгосрочной перспективе гораздо менее чувствительными к геополитическим рискам и скачкам цен на сырьё.

Энергетическая плотность (ёмкость на единицу объёма)

Именно здесь у натрий-ионных аккумуляторов на сегодняшний день находятся самые слабые места. Как показано в таблице 1, их объёмная плотность энергии почти вдвое уступает показателям литий-ионных аналогов.

Таблица 1. Сравнение плотности энергии

Параметр	Литий-ионные (Li-ion)	Натрий-ионные (Na-ion)
Плотность энергии (Вт·ч/л)	300 – 680	150 – 275
Следствие	Компактность, малый вес	Больший объем и масса батареи

Для мобильной техники (телефоны, электромобили) такое отставание критично. Однако применительно к стационарным накопителям энергии на подстанциях, где вес и габариты не играют решающей роли, этот недостаток становится менее существенным. Более того, его можно частично компенсировать за счёт упрощённой конструкции систем теплоотвода.

Ресурс и срок службы

Срок службы является ключевым параметром для сетевой инфраструктуры, где замена батарей – затратная процедура. Здесь литий-железо-фосфатные (LFP) аккумуляторы остаются лидерами, демонстрируя до 10 000 циклов. Ресурс современных Na-ion батарей пока скромнее и сильно варьируется в зависимости от производителя и условий эксплуатации.

Тем не менее, даже ресурса в 3000-5000 циклов достаточно для многих применений в резервном питании, где циклы заряда-разряда происходят не ежедневно.

Влияние климатических условий России

Этот параметр является, пожалуй, ключевым для России. Эксплуатация в широком диапазоне температур – от -50°С в Арктике до +40°С в южных регионах – предъявляет жесткие требования к батареям.

Литий-ионные аккумуляторы демонстрируют серьезные проблемы при низких температурах:

Снижение емкости: при -20°С доступная емкость может упасть на 20-30%, а при -40°С – более чем на 50%.

Замедление реакций: химические реакции замедляются, внутреннее сопротивление резко возрастает.

Риск при зарядке: зарядка Li-ion аккумулятора при температуре ниже 0°С категорически не рекомендуется из-за риска литирования (образования дендритов лития на аноде), что приводит к необратимой потере емкости и угрозе короткого замыкания. Для эксплуатации в таких условиях требуются сложные и энергозатратные системы подогрева.

Натрий-ионные аккумуляторы обладают врожденной устойчивостью к холоду. Их химия позволяет эффективно работать в диапазоне от -40°С до +60°С без существенной потери характеристик. Они допускают глубокий разряд «в ноль» без критической деградации и менее требовательны к условиям транспортировки и хранения.

Безопасность и экологичность

Na-ion батареи имеют меньший риск теплового разгона по сравнению с большинством Li-ion химий. Они более устойчивы к механическим повреждениям (проколам, сжатию) и перегрузкам. Натрий менее токсичен, что упрощает утилизацию, хотя на данный момент в России отсутствует специализированная инфраструктура для переработки именно Na-ion батарей.

Таблица 2. Итоговое сравнение характеристик аккумуляторов

Параметр	Литий-ионные (Li-ion)	Натрий-ионные (Na-ion)	Преимущество для сетей РФ
Рабочая температура	+20°С (оптимальная), требуется подогрев ниже 0°С	-40°С …+60°С	Na-ion
Плотность энергии	Высокая	Средняя	Li-ion (некритично)
Ресурс (циклы)	3000 – 10 000+	1000 – 6000	Li-ion (критично)
Стоимость сырья	Высокая, волатильная	Низкая, стабильная	Na-ion
Безопасность	Высокая (особенно LFP)	Очень высокая	Na-ion
Зарядка на морозе	Невозможна Опасна	Возможна	Na-ion

Анализ перспектив внедрения в России

На момент 2025-2026 годов в России наблюдается активная фаза формирования собственной аккумуляторной индустрии. Можно выделить два ключевых вектора:

Литий-ионное направление: Запуск гигафабрики «Росатома» в Немане (Калининградская область) для производства полностью отечественных Li-ion ячеек, ориентированных в том числе на системы резервного энергоснабжения.

Натрий-ионное направление: Компания SNDGLOBAL совместно с китайскими партнерами уже поставляет на рынок Na-ion решения и планирует полную локализацию произ-

водства в Санкт-Петербурге. Кроме того, о планах по разработке Na-ion батарей заявили «Роснано» и «Норникель».

Учитывая сравнительные характеристики, можно спрогнозировать нишевое распределение технологий в российском электросетевом комплексе:

Li-ion останутся в проектах, где критически важна компактность и максимальный ресурс (например, в мобильных дизель-генераторных установках с накопителями, в частотном регулировании с высокой цикличностью);

- Na-ion будут востребованы в следующих сегментах:

1. Системы собственных нужд подстанций (СОПТ) и гарантированного питания для устройств РЗА и связи, особенно на открытых распределительных устройствах (ОРУ) в регионах с холодным климатом. Отказ от систем подогрева упрощает конструкцию и повышает надежность;

2. Системы накопления для изолированных и удаленных энергорайонов, работающие в паре с ВИЭ (солнечными панелями, ветрогенераторами). Нетребовательность Na-ion к условиям эксплуатации и возможность глубокого разряда здесь являются решающими преимуществами;

3. Буферные накопители на подстанциях для выравнивания графика нагрузки, где объем и вес не имеют решающего значения, а на первый план выходят безопасность и низкая совокупная стоимость владения (ТСО).

Заключение

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что натрий-ионные аккумуляторы не являются прямым и повсеместным заменителем литий-ионных в ближайшей перспективе из-за более низкой плотности энергии и пока еще не до конца подтвержденного ресурса в условиях реальной эксплуатации. Однако они обладают уникальным набором свойств – морозостойкость, безопасность, дешевизна сырья – которые делают их идеальным кандидатом для использования в стационарных системах энергоснабжения объектов сетевой инфраструктуры России.

Начало локализации производства Na-ion батарей в 2025-2026 годах (проекты SNDGLOBAL, «Роснано») является своевременным и стратечески верным шагом. Для успешного внедрения необходима дальнейшая работа по нескольким направлениям: оптимизация химического состава для увеличения ресурса, разработка нормативной базы и создание инфраструктуры для утилизации. Технологии Na-ion и Li-ion в российских энергосетях будут не столько конкурировать, сколько дополнять друг друга, закрывая разные классы задач и климатических зон.

Библиографический список

1. Галлямов М.О. Химические источники тока: элементы и аккумуляторы / М.О. Галлямов. – М.: Физический факультет МГУ, 2024. – 330 с. URL: [https://istina.msu.ru/download/654454221/1s7Z68:F739neMPBP-MCgnK9O_l_0EprUk/?ysclid=mnsrmkxo1t73756916]

2. Макарян И.А., Ефимов О.Н., Гусев А.Л. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РЫНКА ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 06/1 (127). – URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-i-perspektivy-razvitiya-rynka-litiy-ionnyh-akkumulyatorov] (дата обращения: 10.04.2026).

3. Кулова Т.Л., Скундин А.М. От литий-ионных к натрий-ионным аккумуляторам // Электрохимическая энергетика. – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 122-150. URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/ot-litiy-ionnyh-k-natriy-ionnym-akkumulyatoram]

4. Перспективы внедрения натрий-ионных технологий в промышленное производство // [Elec.ru]. – 2025. – 8 сентября. – URL: [https://www.elec.ru/publications/elektricheskaja-generatsija/9094/] (дата обращения: 20.02.2026).

5. На Северо-Западе создадут кластеры по производству ионных аккумуляторов // Российская газета. – 2025. – 8 июля. – URL: [https://rg.ru/2025/07/08/reg-szfo/na-severo-zapade-sozdadut-klastery-po-proizvodstvu-ionnyh-akkumuliatorov.html] (дата обращения: 20.02.2026).

6. Как литий-ионные аккумуляторы работают в холодную погоду? // Acebattery. – 2024. – 26 декабря. – URL: [https://ru.acebattery.com/blogs/how-lithium-ion-batteries-perform-in-cold-weather] (дата обращения: 20.02.2026).

7. В России организуют собственное производство аккумуляторов для электромобилей // Российская газета. – 2026. – 9 февраля. – URL: [https://rg.ru/2026/02/09/reg-szfo/usilennoe-pitanie.html] (дата обращения: 20.02.2026).

8. Влияние низкой температуры на работу аккумулятора // EverExceed. – 2024. – 30 марта. – URL:[https://ru.everexceed.com/blog/effect-of-low-temperature-on-battery-performance_b557] (дата обращения: 20.02.2026).

9. Квашенкина О. Почему натрий-ионные аккумуляторы выгоднее батарей с литием? // Эксперт. – 2026. – 14 февраля. – URL: [https://expert.ru/analitika/pochemu-natriy-ionnye-akkumulyatory-vygodnee-batarey-s-litiem/] (дата обращения: 20.02.2026).

10. «Роснано» займется производством натрий-ионных батарей // CNews. – 2025. – 31 октября. – URL: [https://www.cnews.ru/news/top/2025-10-31_rosnano_zajmetsya_natrij-ionnym] (дата обращения: 20.02.2026).

11. Созданы прототипы литий-ионных аккумуляторов для экстремального холода // Министерство науки и высшего образования РФ. – 2025. – 8 апреля. – URL: [https://www.minobrnauki.gov.ru/press-center/news/nauka/97217/] (дата обращения: 20.02.2026).

12. Мотор заведется на экстремальном холоде: российские ученые разработали специальные аккумуляторы // Московский комсомолец. – 2025. – 17 апреля. – URL: [https://www.mk.ru/science/2025/04/17/motor-zavedetsya-na-ekstremalnom-kholode-rossiyskie-uchenye-razrabotali-specialnye-akkumulyatory.html] (дата обращения: 20.02.2026).

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИЯ О IX МЕЖДУНАРОДНОМ ФОРУМЕ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» СТНО-2026»……. 3

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ. РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА»..... 6

Секция «МИКРОВОЛНОВАЯ, ОПТИЧЕСКАЯ И КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА».....6

Горлин О.А., Бирюков Д.О. Моделирование сумматора мощности на полосковых линиях..... 6

Горлин О.А., Костиков О.А. Разработка широкополосного микрополоскового СВЧ развязывающего устройства высокого уровня мощности..... 12

Горлин О.А., Орлов А.М. Разработка широкополосного коаксиального СВЧ развязывающего устройства высокого уровня мощности..... 17

Железнов И.И., Будак В.П. Гибридный микрофизический подход с нейросетевым контроллем для высокоточного 3D моделирования переноса резонансного излучения в безэлектродных СВЧ-источниках сложной конструкции..... 21

Горностаев П.А., Дармаев А.Н., Кубраков Р.В., Кунин Е.А., Матвеев А.А., Чурсин А.В., Холодов Д.К., Шаталин А.А. Применение решения уравнения для граничного электрона при настройке электронно-оптических систем..... 30

Горностаев П.А., Дармаев А.Н., Кубраков Р.В., Кунин Е.А., Матвеев А.А., Медякова А.Е., Шаталин А.А. Компьютерная модель детектора обратно-отраженных электронов..... 36

Тихомиров Д.А., Богачев Р.Ю., Журавлев С.Д., Шестеркин В.И. Прямонакальный термоэмиссионный катод из фольги тугоплавкого металла для электронной микроскопии..... 41

Анисимов П.А., Дармаев А.Н., Кунин Е.А., Масленников С.П., Матвеев А.А., Степанцов А.С., Феоктистов Г.В. Определение параметров начальной стадии электрораспыления жидкости методами математического моделирования..... 46

Фролов Г.Н., Козлов Е.А. Программа расчета электронно оптической системы микрофокусной рентгеновской трубки..... 52

Грачев Е.Ю., Трубицын А.А., Козлов Е.А. Моделирование теплового режима катодного узла микрофокусной рентгеновской трубки..... 58

Трубицын А.А., Грачев Е.Ю., Козлов Е.А., Новикова М.С. Проблемы численного анализа низкопервеансных электронных пушек..... 63

Анисимов П.А., Дармаев А.Н., Кунин Е.А., Масленников С.П., Матвеев А.А., Степанцов А.С., Феоктистов Г.В. Определение параметров начальной стадии электрораспыления жидкости методами математического моделирования..... 68

Голованов Н.А., Галдецкий А.В., Морев С.П. Электронно-оптическая система для низковольтного многолучевого СВЧ усилителя Ku-диапазона..... 74

Секция «ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ, МИКРО-И НАНОЭЛЕКТРОНИКА»..... 78

Гудков Ю.Д., Мишустин В.Г. Моделирование оптического поглощения в полупроводниках с использованием генеративного искусственного интеллекта..... 78

Званкович Н.К., Соколов А.М., Муратова Е.Н. Получение и диагностика мембран пористого анодного оксида алюминия..... 83

Гололобов Г.П., Бадыкшанова Р.Р. Разработка функциональных покрытий на основе сплава Ni-W для МЭМС-технологий..... 88

Горячкин Д.Р., Литвинов В.Г. Дефекты полупроводников в космическом пространстве: природа, влияние и способы обеспечения надежности..... 92

Литвинова Д.В., Литвинов В.Г. Установка для измерения электрической емкости полупроводниковой барьерной структуры при высоких напряжениях смещения..... 98

Баранов Т.А., Зубков М.В. Анализ факторов, влияющих на квантовую эффективность фотоэлектрических преобразователей..... 101

Иванов А.А., Мишустин В.Г. Применение резонансно-туннельных диодов в современной электронике..... 106

Манцева Ю.Н. Методы численного моделирования многослойных полупроводниковых гетероструктур..... 112

Сердюков Е.А. Исследование спектральной характеристики излучения инжекционного полупроводникового лазера на основе двойной гетероструктуры арсенид алюминия--галлия/фосфид индия..... 118

Слугин А.В. Исследование влияния параметров выращивания на свойства поверхности пористого кремния..... 125

Трунин С.Д., Мишустин В.Г. Фотоприемники дальнего ИК диапазона на основе полупроводниковых наноструктур..... 128

Чуваков Н.А., Гудзев В.В. тВлияние глубоких центров на параметры кремниевых полупроводниковых структур..... 135

Яцемирский И.А., Литвинов В.Г., Ермачихин А.В. Исследование электрофизических свойств облученных протонами кремниевых гетероструктурных фотоэлектрических преобразователей..... 139

Уласень А.А., Мошников В.А. Особенности формирования наноструктур на основе оксида цинка методом локального анодного окисления.....144

Секция «ПРОМЫШЛЕННАЯ СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ»..... 149

Киселёва О.А., Баранникова Д.Д., Киселёва А.Д., Баранников Д.А. Формирование наблюдателя состояния в сервоприводе с бесконтактным двигателем постоянного тока.... 149

Фёдоров В.А., Глухов Д.М. Энергоэффективный электропривод насосов на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами..... 154

Самохина Д.С., Сливкин Е.В. Современные технологии в сетях напряжением 0,4 кВ..... 157

Королев А.О., Климаков В.В., Логунов Н.О. Исследование влияния качества сборки конструкций FDM-принтеров на резонансные частоты..... 162

Свиязов А.А., Андреев О.О. Блок синхронизации радиопередающего устройства радиолокационного модуля..... 175

Махмудов М.Н. Цифровая трансформация распределительных электрических сетей..... 179

Авдеев И.А. Оценка возможностей использования алгоритмов обработки изображений в реальном времени при их реализации на ПЛИС..... 183

Зимнухов Р.В. Перспективы замещения литий-ионных аккумуляторов на натрий-ионные в системах гарантированного питания электросетевого комплекса России..... 190

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ – СТНО-2026

Научное издание

В 11 томах

Том 2

Под общей редакцией О.В. Миловзорова.

Подписано в печать 15.06.26. Формат 60x84 1/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Гарнитура «Times New Roman».
Усл. печ. л..
Тираж 100 экз. Заказ №.

Рязанский государственный радиотехнический университет,
Редакционно-издательский центр РГРТУ,
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

ISBN 978-5-7722-0445-0

