

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-2025

**VIII МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-
ТЕХНИЧЕСКИЙ ФОРУМ**

Сборник трудов

Том 2

Рязань
2025

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

Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2025 [текст]: сб. тр. VIII международ. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.2./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2025.

ISBN 978-5-7722-0422-1

Т.2: – 212 с.,: ил.

ISBN 978-5-7722-0424-5

Сборник включает труды участников VIII Международного научно-технического форума «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2025.

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

Авторская позиция и стилистические особенности сохранены.

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

ISBN 978-5-7722-0422-1

ISBN 978-5-7722-0424-5

© Рязанский государственный
радиотехнический университет, 2025

ИНФОРМАЦИЯ О VIII МЕЖДУНАРОДНОМ ФОРУМЕ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» СТНО-2025

VIII Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2025 состоялся 04.03.2025-06.03.2025 в г. Рязань в Рязанском государственном радиотехническом университете имени В.Ф. Уткина.

В рамках форума «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2025 состоялась работа четырех Международных научно-технических конференций:

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

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

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

- Алгоритмическое и программное обеспечение вычислительных систем и сетей;
- ЭВМ и системы;
- Информационные технологии в конструировании электронных средств;
- Модели искусственного интеллекта в САПР;
- Информационные системы и защита информации;
- Математические методы и модели в научных исследованиях и прикладных проблемах;

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;
- Финансы и налоги;

«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;

Мионов 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:

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

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

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

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

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

Губарев А.В., 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.;

Журавлёва Т.А., доцент кафедры экономической безопасности, анализа и учета, к.э.н., доц.;

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.;

Ключко В.К., профессор кафедры автоматизации 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.;

Куприянова М.Н., доцент кафедры экономики, менеджмента и организации производства, к.э.н., доц.

Ленков М.В., декан факультета автоматизации и информационных технологий в управлении, зав. кафедрой автоматизации информационных и технологических процессов, к.т.н., доц.

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

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

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

Мельник О.В., профессор кафедры информационно-измерительной и биомедицинской техники, д.т.н., доц.;

Меркулов Ю.А., старший преподаватель кафедры автоматизации информационных и технологических процессов;

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 нанoeлектроники, 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.;

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

Тарасова В.Ю., ассистент кафедры электронных вычислительных машин, преподаватель-исследователь;

Торженева 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.;

Шурчкова И.Б., доцент кафедры экономической безопасности, анализа и учета, к.э.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 629.05; ГРНТИ 47.14

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПЬЕЗООХЛАДИТЕЛЯ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В ГЕРМЕТИЧНЫХ КОРПУСАХ ПРИБОРОВ

В.В. Климаков, С.А. Сафронов, А.А. Фефелов, А.Н. Чувилин

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, super.scorpion1999@yandex.ru*

Аннотация. В работе рассматривается способ интенсификации теплообмена блока РЭА в герметичном исполнении корпуса. Разработана и рассчитана упрощенная математическая модель, имитирующая пассивное и активное охлаждение внутреннего пространства блока естественной и вынужденной конвекцией. Получены данные о скоростях воздушных потоков в зазорах, тепловом поле, а также перепады температур между корпусом и внутренним блоком при разных типах охлаждения.

Ключевые слова: герметичный корпус, пьезоохладитель, пьезолопасть, конвекционный теплообмен, воздушный зазор, БИНС.

MODELING THE USE OF A PIEZO COOLER TO INTENSIFY HEAT EXCHANGE IN SEALED DEVICE HOUSINGS

V. V. Klimakov, S. A. Safronov, A.A. Fefelov, A.N. Chuvilin

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, super.scorpion1999@yandex.ru*

The summary. The paper discusses a method for intensifying heat transfer of a REA unit in a hermetically sealed housing. A simplified mathematical model simulating passive and active cooling of the unit's internal space by natural and forced convection has been developed and calculated. Data on air flow velocities in gaps, the thermal field, and temperature differences between the housing and the internal unit for different types of cooling have been obtained.

Keywords: sealed housing, piezo cooler, piezo blade, convection heat exchange, air gap, SINS

Теплообмен в герметичных корпусах приборов

Теплообмен в герметичных корпусах с замкнутым воздушным объемом является сложным процессом, который зависит от множества факторов. В таких устройствах, где воздух ограничен стенками, передача тепла происходит преимущественно за счет конвекции, теплопроводности и излучения, причем эффективность и преобладание одного механизма над другим зависит от геометрических характеристик системы, температур поверхностей и объемных плотностей тепловыделения [1,2]. Однако из-за ограниченного пространства (малых размеров воздушных зазоров) и теплоизолирующих свойств воздуха как теплоносителя, при малых скоростях его движения, возникают специфические трудности в теплообмене таких конструкций [3].

Для улучшения теплообмена в замкнутых объемах часто применяют дополнительные меры, такие как установка вентиляторов для принудительного перемешивания воздушных масс, использование гибких теплопроводящих материалов (термопадов) в зазорах [4], создание специальных каналов для циркуляции воздуха [3] и теплоаккумулирующих веществ (парафинов) в случае импульсной работы прибора [5]. Однако даже с учетом этих мер проекти-

рование такие системы требуют тщательного анализа процессов теплообмена при учете всех перечисленных факторов.

В авиационном приборостроении применяются два основных метода охлаждения:

1. Пассивное охлаждение: Использование радиаторов, теплопроводящих материалов и продуманной конструкции корпуса для естественного отвода тепла. Этот метод прост и надежен, но может быть недостаточным для систем с высоким тепловыделением.

2. Активное охлаждение: Применение вентиляторов, термоэлектрических охладителей (Пельтье) или жидкостных систем охлаждения. Эти методы более эффективны, но увеличивают сложность, массу и энергопотребление системы и прибора в целом.

Тепловыделение особенно критично в компактных герметичных корпусах, где компоненты расположены близко друг к другу, что усложняет теплообмен [3]. Такой прибор должен быть спроектирован так, чтобы эффективно отводить тепло от внутренних компонентов и минимизировать температурные градиенты внутри системы [6]. Кроме того, обычно измерительные чувствительные элементы в таких конструкциях не имеют жесткой связи с внешним корпусом прибора, а закреплены через подвесы или амортизационные системы. Конструктивные исполнения амортизаторов бывают самые разнообразные, но любой из них обязательно содержит упругие элементы и детали, обеспечивающие демпфирование и крепление амортизатора к корпусу.

Частным случаем описанного ранее конструктивного исполнения замкнутого герметичного объема, являются отсеки корпуса бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) [7] и других авиационных приборов. Теплообмен в БИНС является важным аспектом их проектирования и эксплуатации, так как их гироскопы и акселерометры крайне чувствительны к изменениям температуры и даже небольшие ее колебания могут вызывать изменения их характеристик (например, смещение нуля или изменение масштабного коэффициента), которые потребуются программно устранять [7].

Для минимизации влияния температуры на точность БИНС часто используются системы термостабилизации [8]. Они поддерживают постоянную температуру внутри системы или компенсируют температурные изменения с помощью алгоритмов коррекции при цифровой обработке информации [9]. Термостабилизация может быть реализована с помощью нагревателей, датчиков температуры и систем управления [8], которые поддерживают температуру в оптимальном диапазоне. Контроль температуры и эффективный теплообмен играют ключевую роль в обеспечении надежности и точности как навигационных систем, так и авиационных приборов.

Исследования по интенсификации теплообмена в конструкции БИНС уже активно проводятся. В работах [6, 7] были приведены исследования температурного поля в бесплатформенной инерциальной навигационной системе на лазерных гироскопах и кварцевых акселерометрах и обнаружены перестройки тепловых потоков внутри системы, снижающие ее эксплуатационную надежность. Определен допустимый предел для разности температур инерциальных датчиков и внешней поверхности корпуса прибора. Так же, в работе [10] была разработана тепловая модель бесплатформенной инерциальной навигационной системы на лазерных гироскопах, в которой, с помощью программного обеспечения Comsol Multiphysics, качественно и количественно анализируется распределение теплового поля в конструкции БИНС при использовании пассивного охлаждения.

Описанные ранее работы за основу берут непосредственно пассивное охлаждение, однако, в дополнении к ним (или как аналог), имеет смысл использовать пьезоэлектрические модули для активного охлаждения [11, 12]. Это должно позволить более эффективно использовать для охлаждения воздушную прослойку между внутренними блоками, узлами и внешним корпусом.

Таким образом, целью данной работы является компьютерное моделирование эффективности конвективного теплообмена внутренних узлов РЭА в герметичном исполнении

корпуса с малым воздушным зазором, при применении пьезоэлектрических модулей активного охлаждения.

Моделирование применения пьезоохладителя для интенсификации теплообмена в герметичных корпусах приборов

Пьезоэлектрические модули для активного охлаждения (пьезоохладители), в общем случае, представляют собой небольшие колеблющиеся под воздействием пьезоэффекта пластинки [12], которые могут обеспечивать перемешивание воздушной массы внутри замкнутых малогабаритных объемов электронных устройств. Стоит отметить, что данные пьезоохладители в сравнении с обыкновенным вентилятором, обладают значительно меньшим энергопотреблением (~мВт), и могут быть созданы в компактных габаритных размерах.

В данной статье в качестве основы для моделирования в Comsol Multiphysics, была взята и значительно упрощена модель из работы [10] (рисунок 1, а). Внутренние элементы и узлы были объединены в единый монолитный блок, как показано на рисунке 1, б.

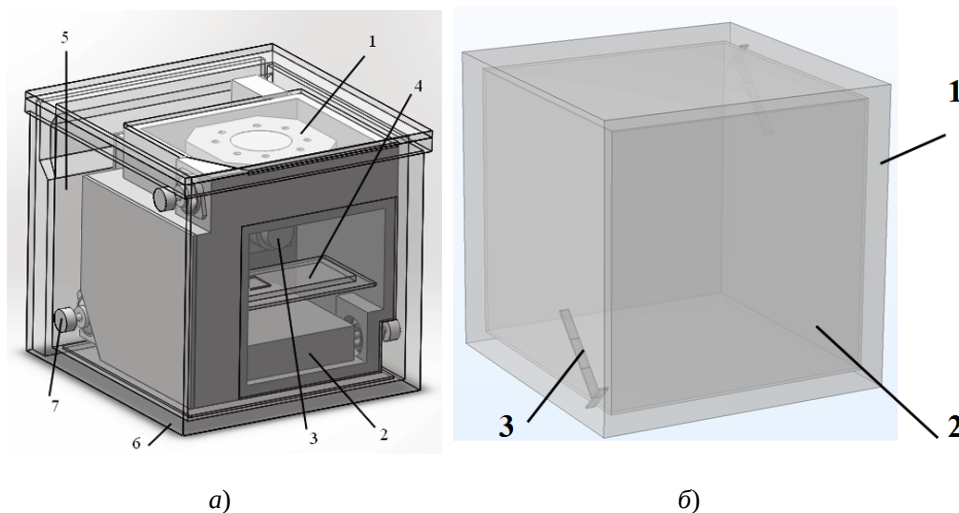


Рис.1. Геометрии расчетной модели: а) геометрия модели представленная в работе [10], где: 1 — кольцевой лазер, 2 — высоковольтный источник, 3 — блок акселерометров, 4 — УРПК, 5 — перегородка между отсеком электроники и отсеком БЧЭ, 6 — внешний корпус, 7 — амортизатор; б) упрощенная геометрия модели для моделирования активного конвективного охлаждения пьезоэлектрическим модулем, где: 1 — внешний корпус, 2 — внутренний монолитный блок, 3 — условно представленный пьезоохладитель

Внешний корпус представляет из себя куб, стенки которого, в целях оптимизации математической модели, были заданы как «тонкая стенка» (Thin Layer) с толщиной 5 мм. Внутренний блок — куб с длиной ребра 158 мм и толщиной стенки 1мм. Воздушный зазор между внешним корпусом и внутренним блоком (источником тепла) составляет 8 мм. Данный зазор имитирует прилегающие к стенке корпуса внутренние блоки и узлы БИНС с пренебрежением их развитой геометрии поверхности. Две пьезолопасти пьезоохладителя были расположены в противоположных амортизаторах углах двух граней куба.

Форма ячеек сетки на расчетной модели была выбрана в виде тетраэдра, так сетка данного типа хорошо подходит для моделирования поведения подвижных воздушных масс. Количество созданных ячеек сетки при ее разбиении на расчетной геометрии модели около 1,8 млн. Качество построения сетки на геометрии расчетной модели показано на рисунке 2.

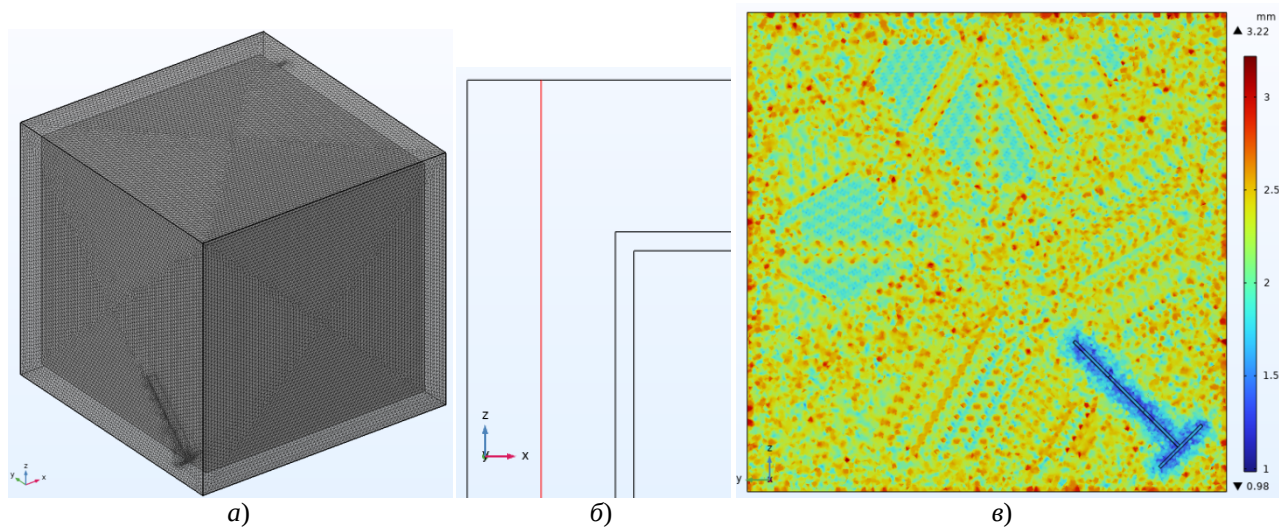


Рис. 2. Качество построения сетки на геометрии расчетной модели:

а) – визуализация сетки на трехмерной модели, б) – положение секущей плоскости в центре воздушно-го зазора, в) – визуализация размеров ячеек сетки по секущей плоскости

Граничные условия: температура окружающей среды и начальная температура элементов модели 27°C , давление воздуха 1 атм, материал блока и корпуса – алюминий, мощность тепловыделения на внутреннем блоке 40 Вт, коэффициент теплоотдачи со стенок внешнего корпуса (за исключением нижней стенки) $8,4\text{ Вт}/(\text{м}^2\text{K})$. Вектор силы тяжести ориентирован по оси Z вниз.

В результате первого этапа моделирования, была получена характеристика выхода модели на стационарный тепловой режим при пассивном охлаждении естественной конвекцией в замкнутом объеме рисунок 3 (без включения пьезолопастей).

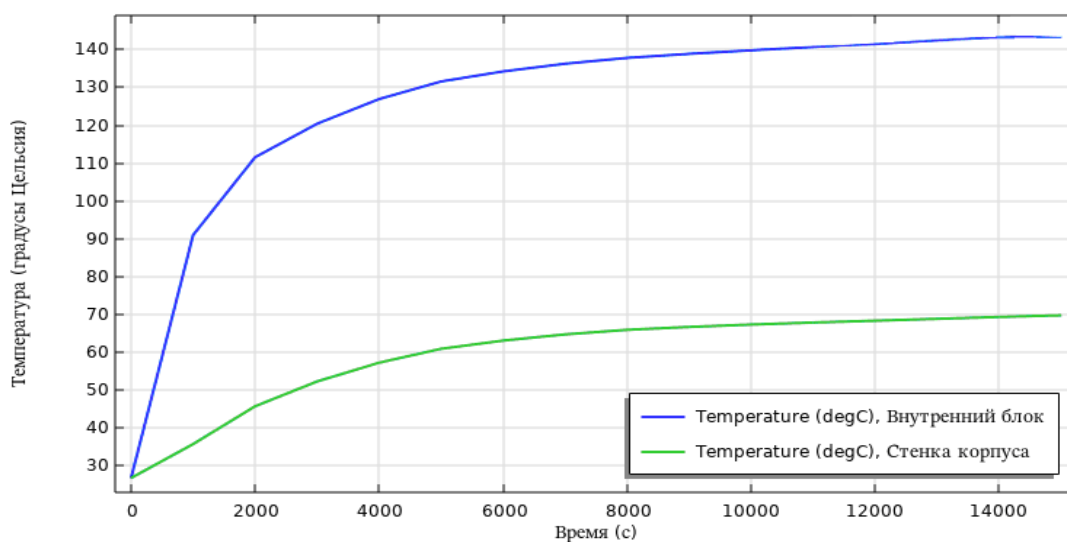


Рис. 3. Выход на стационарный тепловой режим при естественной конвекции в замкнутом объеме и на внешней поверхности корпуса прибора при температуре окружающей среды 27°C и заданной внутренней мощности тепловыделения 40 Вт.

Разница средней температуры между внутренним блоком (источником тепла) и стенкой корпуса составляет $75,4^{\circ}\text{C}$. Подобная разница температуры говорит о крайне низкой эффективности теплопередачи между горячей и холодной (внешней) стенками при естественной конвекции внутри корпуса. Проанализируем движение воздушных масс в зазорах центральной области модели (рисунок 4).

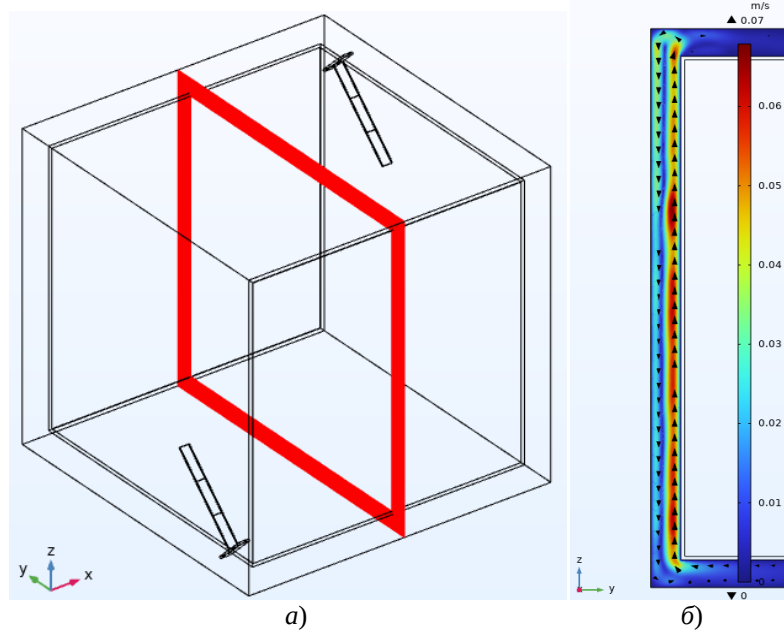


Рис. 4. Движение воздушных масс в зазоре между стенками внутреннего блока и корпусом при естественной конвекции в замкнутом объеме в стационарном режиме после (15000 с): а) – положение секущей плоскости по центру, б) – визуализация скоростей воздушных потоков в зазоре

Также, проанализируем движение воздуха в пристеночных областях в воздушном зазоре (в секущих плоскостях параллельных плоскости ZY при их смещении относительно стенок зазора на 2 мм см. рисунок 2, б).

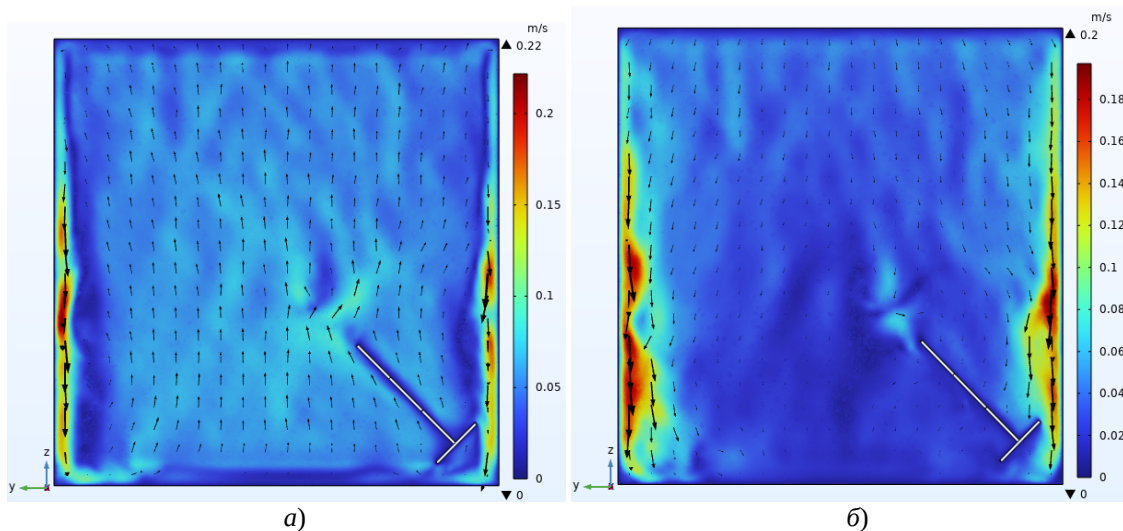


Рис. 5. Движение воздушных масс в пристеночной области зазора при стационарном режиме (15000 с): а) – положение - 2 мм до стенки внутреннего блока, б) – положение - 2 мм от внешней стенки корпуса внутрь

Из рисунка 4 можно заметить, что воздух, нагреваясь от внутреннего блока, начинает подниматься, сталкиваясь с верхней стенкой корпуса, и передаёт часть своей тепловой энергии корпусу, тем самым охлаждается и опускается вдоль внешней стенки вниз, пока не достигнет дна и не нагреется снова. Так же на рисунке 5 можно заметить пучности скоростей воздушного потока в боковых частях, это связано с тем, что данные области соответствуют углам модели, где расстояние между корпусом и внутренним блоком максимально. Это позволяет воздуху передать свою энергию стенкам и охладиться, в следствии чего происходит увеличение скорости нисходящий потоков.

Проанализируем теперь явление вынужденной конвекции, обусловленной колебательным движением лопастей пьезоохладителей. В качестве пьезоохладителей в математической модели используются пластинки шириной 5 мм и длиной 10 мм, конструктивно аналогичные лопасти из работы [12], с боковых поверхностей которых задается воздушный поток в виде синусоидальной функции с частотой 50 Гц и предельной скоростью 0.35 м/с. Данные пластинки закреплены на основании, с которого задается постоянный воздушный поток 0.4 м/с, имитирующий параллельный лопасти поток, возникающий в процессе веероподобного колебания обнаруженного при моделировании и экспериментальных исследованиях в работе [12]. В качестве начального распределения температур было взято тепловое поле из предыдущего исследования после выхода на стационарный режим. Для начального распределения поля скоростей данные также взяты из предыдущего исследования.

На рисунке 6 представлена визуализация движения воздушных потоков при работе в модели условной пьезолопасти в различные моменты времени.

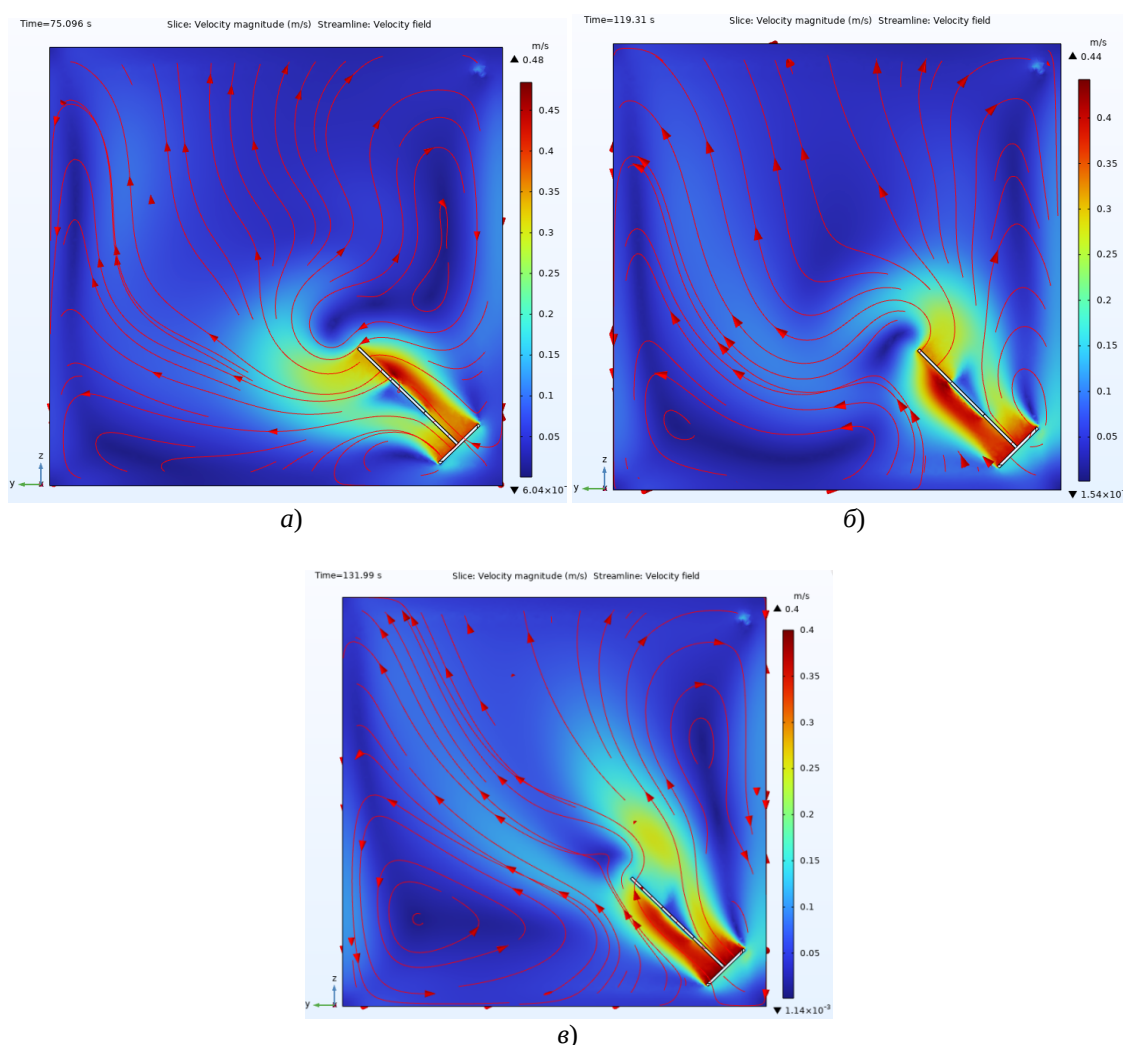


Рис. 6. Перемешивание воздушных масс и линии, характеризующие направление воздушного потока в различные моменты времени: а) – 75 секунда, б) – 119 секунда, в) – 131 секунда

Из рисунка 6 виден процесс развития вынужденного конвективного движения под действием пьезоохладителя (максимальная скорость 0,48 м/с), а на рисунке 7 процесс перемешивания воздушной массы в объеме.

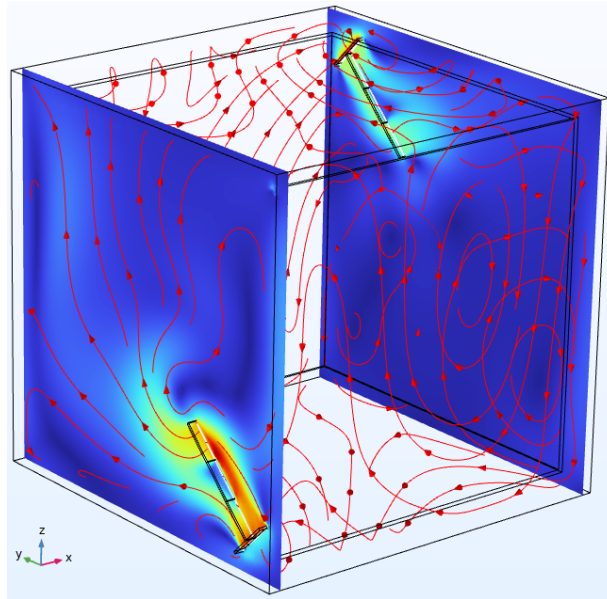


Рис. 7. Трехмерная визуализация воздушных потоков при перемешивании воздушной массы в объеме (75 секунда)

В результате расчета теплового поля, были получены данные о разнице температур между внутренним блоком и внешним корпусом. При этом перепад температур снижается до $37,7^{\circ}\text{C}$, что в 2 раза меньше, чем в модели без использования пьезолопастей. Это свидетельствует о более интенсивной теплопередаче к внешнему корпусу в результате появившейся в зазоре конвекции.

Проанализируем перераспределение тепловых потоков путем визуализации изотерм в приповерхностном сечении (вблизи внутреннего блока на расстоянии 2 мм от поверхности), форма которых вызвана передвижением горячих масс воздуха по средствам перемешивания. На рисунке 9 показано тепловое поле, и изотермы в момент времени 131 секунда.

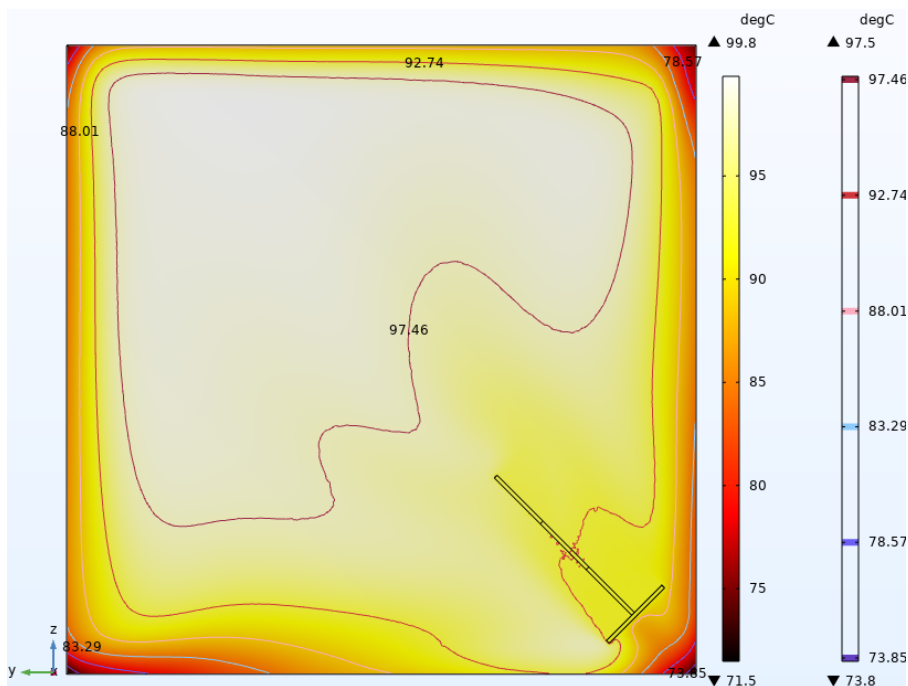


Рис. 8. Распределение теплового поля и изотермы (131 секунда)

Из рисунка 8 видно, что наиболее горячий участок располагается в противоположной от лопасти части модели, что свидетельствует о довольно интенсивном перемешивании в объеме воздуха и интенсивном тепломассопереносе. При этом разница температур между слоями разогретой воздушной массы составляет 20-28 ° С.

Выводы

В ходе моделирования были получены данные о распределении воздушных потоков как при пассивном, так и при активном охлаждении внутреннего блока и значения перепада температур между стенкой корпуса и внутренним блоком. При этом при работе пьезоохладителя разница температуры между блоком и корпусом снижается почти в 2 раза (с 75,4° С до 37,7 ° С), по сравнению с пассивным охлаждением. Полученные результаты свидетельствуют об ощутимом эффекте от подобного способа охлаждения при его применении в герметичных корпусах РЭА с малыми воздушными зазорами. Дальнейшее исследование потребует осуществить поиск оптимального положения в корпусе РЭА.

Библиографический список

1. Дульнев Г. Н., Семяшкин Э. М. Теплообмен в радиоэлектронной аппаратуре. Л.: Энергия, 1968. 282 с.
2. Полушкин А.В. Влияние конструктивных параметров системы кондуктивного охлаждения на температурный режим радиоэлектронной аппаратуры в герметичном корпусе: Дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук: 01.04.14 - СПбГУИТМО. - СПб., 2007. - 164 с.
3. Павлова А.Д. Особенности процессов теплообмена в радиоэлектронных аппаратах в герметичном исполнении: Дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук: 01.04.14- СПбГУИТМО.- СПб., 2011.- 98 с.
4. Sim, L.C. Thermal characterization of Al₂O₃ and ZnO reinforced silicone rubber as thermal pads for heat dissipation purposes/ Sim, L.C., Ramanan, S.R., Ismail, H., Seetharamu, K.N., Goh, T.J. // Thermochimica Acta, 430. 2005. 155-165. DOI: 10.1016/j.tca.2004.12.024.
5. Аймбетова И.О. Исследование теплофизических и эксплуатационных свойств теплоаккумулирующих материалов на основе парафинов / Аймбетова И.О., Сулейменов У.С., Хадзарагова Е.А., Алкацев М.И. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 11-1. С. 6–17. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-6-17.
6. Климаков В.В. Исследование теплового режима навигационной системы на кольцевых газоразрядных лазерах/ Климаков В.В., Молчанов А.В., Улитенко А.И., Чиркин М.В. // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. № 39-2. С. 48-52.
7. Чиркин М.В. Пассивные теплоотводящие элементы, интегрированные в конструкцию бесплатформенной инерциальной навигационной системы / Чиркин М.В., Климаков В.В., Мелехин В.Н., Молчанов А.В., Улитенко А.И. // В сборнике: XIX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. 2012. С. 95-97.
8. Громов Д.С. Тепловая защита и термостабилизация волоконно-оптического гироскопа в составе бесплатформенной инерциальной навигационной системы //Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014, № 2 (90). С. 137-142.
9. Молчанов А.В. Применение современных методов обработки информации в триаде прецизионных лазерных гироскопов / Молчанов А.В., Белокуров В.А., Чиркин М.В., Кагаленко М.Б., Кошелев В.И., Мишин В.Ю., Морозов Д.А. // В сборнике: XXIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. Главный редактор В. Г. Пешехонов. 2016. С. 98-100.
10. Климаков В.В. Тепловая модель бесплатформенной инерциальной навигационной системы на лазерных гироскопах. / Климаков В.В., Молчанов А. В., Чиркин М. В.// Навигация и управление летательными аппаратами. 2013, №7, С. 60-69.
11. Алексюнин Е. С. Современные системы активного охлаждения электронных компонентов на основе пьезоустройств // ИВД. 2013. №2 (25). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyye-sistemy-aktivnogo-ohlazhdeniya-elektronnyh-komponentov-na-osnove-piezoustroystv> (дата обращения: 31.03.2025).
12. Сафронов С.А. Моделирование работы пьезолопасти электронного модуля охлаждения / Сафронов С.А., Климаков В.В. // В сборнике: Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2024. Сборник трудов VII Международного научно-технического форума. В 10-ти томах. Рязань, 2024. С. 52-60.

УДК 621.385.6; ГРНТИ 47.29.37

РАЗРАБОТКА МПФС С 3-ЕЙ ГАРМОНИКОЙ И МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ НА КАТОДЕ ДЛЯ ЛБВ Х-ДИАПАЗОНА

Ю.Ю. Филин, С.П. Морев, Н.М. Коломийцева

АО «НПП «Исток» им. Шокина»,

Российская Федерация, Фрязино, yuryufilin@istokmw.ru

Аннотация. Представлены результаты разработки МПФС со значимой величиной 3-ей гармоники и полем на катоде. Найдено распределение продольной составляющей магнитного поля для устойчивой фокусировки электронного потока на всем протяжении области взаимодействия. Показано, что использование магнитного поля на катоде, сформированного за счет обратной полярности первого магнита, обеспечивает устойчивую транспортировку трубчатого электронного потока

Ключевые слова: электронно-оптическая система (ЭОС), магнитная периодическая фокусирующая система (МПФС) с 3-ей гармоникой, трубчатый пучок.

DEVELOPMENT OF A 3RD HARMONIC MPFS AND A CATHODE MAGNETIC FIELD FOR X-BAND TWT

Yu.Yu. Filin, S.P. Morev, N.M. Kolomiitseva

JSC "RPC" Istok" named after Shokin",

Russian Federation, Fryazino, yuryufilin@istokmw.ru

Abstract. The article presents the results of developing a MPFS with a significant value of the 3rd harmonic and a field at the cathode. The distribution of the longitudinal component of the magnetic field for stable focusing of the electron beam throughout the interaction region is found. It is shown that the use of a cathode field formed due to the reverse polarity of the first magnet ensures stable transportation of a tubular electron beam

Keywords: electron-optical system (EOS), magnetic periodic focusing system (MPFS) with the 3rd harmonic, tubular beam.

В работе [1] описана электронно-оптическая система (ЭОС) ЛБВ с МПФС и модуляцией «ноль-минус» (запирание тока пучка осуществлялось подачей отрицательного потенциала на фокусирующие электроды при нулевом потенциале на них в рабочем режиме), которая позволила обеспечить защиту элементов замедляющей системы от локального токооседания и улучшить токопрохождение в ЛБВ. В этой ЭОС трубчатый электронный поток, сформированный кольцевым катодом, преобразуется в области пролетного канала в сплошной аксиально-симметричный (рис. 1).

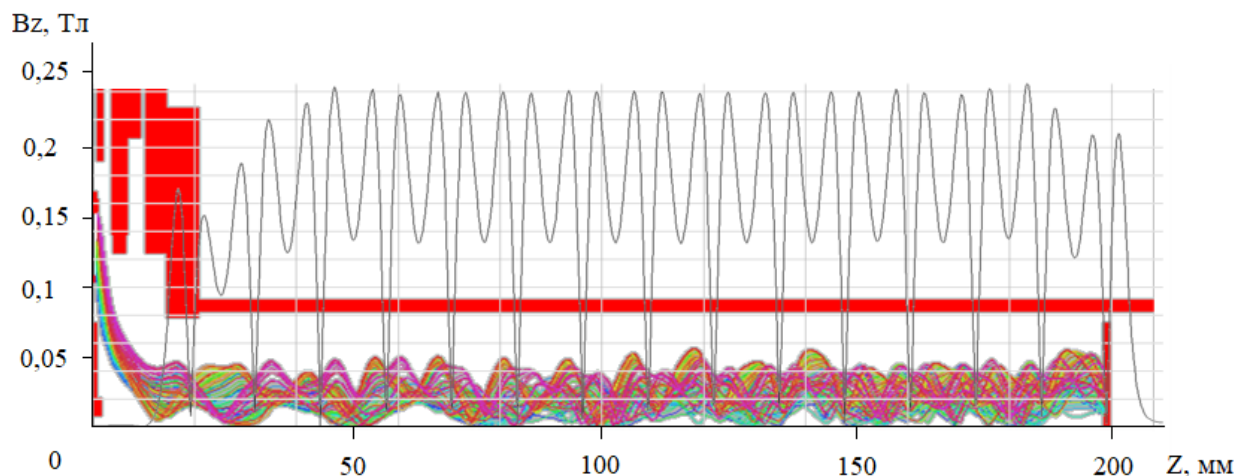


Рис. 1. Формирование и транспортировка электронного потока в ЭОС в магнитном поле с 3-ей гармоникой

В настоящей работе представлены результаты разработки МПФС с магнитным полем на катоде электронной пушки с целью обеспечения сохранности трубчатого потока в области пролетного канала. Использование трубчатого потока в рассмотренной ЛБВ может позволить улучшить её выходные параметры за счет концентрации тока пучка вблизи с замедляющей системой.

В исходной конструкции ЭОС катодный полюс надежно экранировал катод от магнитного поля МПФС, за счет чего происходило преобразование трубчатого потока в области электронной пушки в аксиально-симметричный поток в пролетном канале ЭОС. Для формирования трубчатого потока необходимо сформировать на катоде магнитное поле определенной величины.

Поставленная цель может быть достигнута за счет выполнения катодного полюса из немагнитного материала (например меди). В этом случае формируется так называемый «обратный хвост» магнитного поля от первого магнита, достигающий катода электронной пушки. Такое решение приводит к минимальным изменениям в конструкции МПФС, однако, требует увеличения толщины первого магнита МПФС для обеспечения требуемой величины магнитного поля на катоде, равной 50 Гс (рис. 2).

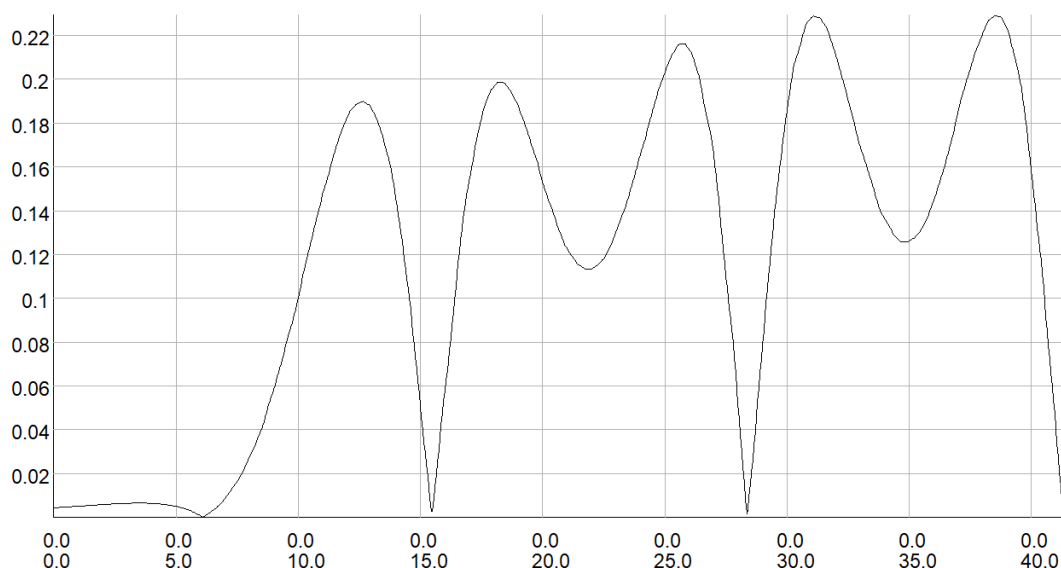


Рис. 2. Распределение модуля осевой компоненты индукции магнитного поля с полем на катоде

В результате введения магнитного поля в катодную область электронной пушки без изменения конструкции ЭОС было обеспечено формирование и транспортировка трубчатого электронного потока на всей протяженности ЭОС ЛБВ. Результат теоретических расчетов транспортировки трубчатого потока в разработанной МПФС приведены на рисунке 3.

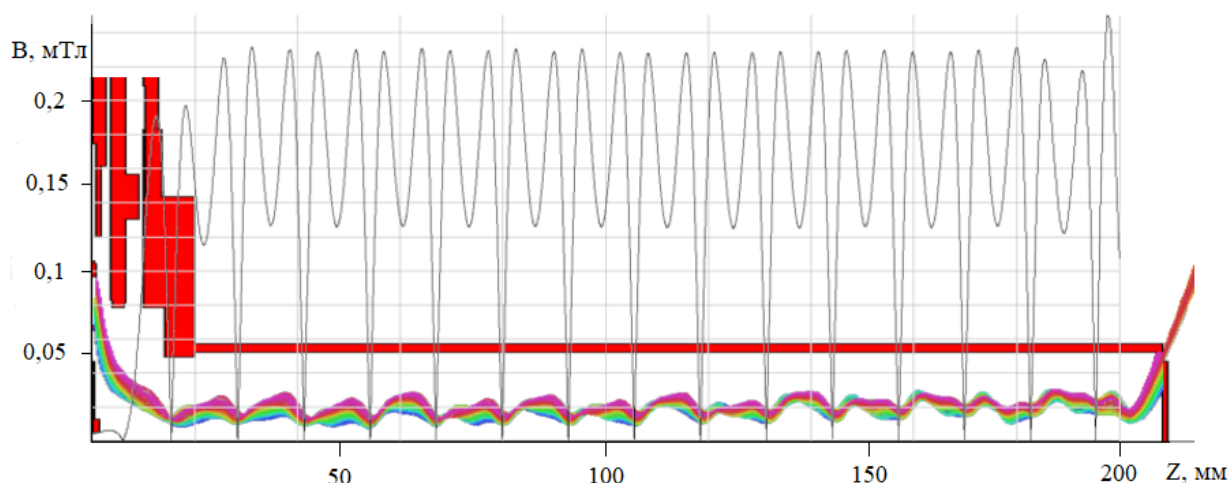


Рис. 3. Формирование и транспортировка трубчатого электронного потока в ЭОС в разработанном магнитном поле с 3-ей гармоникой

Параметры ЭОС и разработанной МПФС приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Конструктивные параметры электронно-оптической системы

Ток пучка, мА	380,0
Ускоряющее напряжение, В	9000
Микропервеанс, $\text{мкА/В}^{3/2}$	0,445
Диаметр катода, мм	3,7
Диаметр канала, мм	2,0

Таблица 2. Конструктивные параметры магнитной периодической фокусирующей системы

Амплитуда поля на оси, Гс	2300
Поле на катоде, Гс	50
Период МПФС, мм	25,7
Параметр магнитного поля	1,08
Бриллюэновский радиус пучка в МФС, мм	0,347
Средний радиус пучка (с учетом поперечных скоростей), мм	0,445

Внесенные изменения в конструкцию катодного полюса позволили обеспечить формирование и транспортировку трубчатого электронного потока при необходимом уровне магнитного поля на катоде.

1. Филин, Ю.Ю. Результаты модернизации конструкции электронно-оптической системы с кольцевым катодом в ЛБВ с низковольтным управлением. // Ю.Ю. Филин, С.П. Морев, Н.М. Коломийцева [др.]// Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника. – 2024. – Вып.3(563), – С. 55 – 63.

УДК 621.385.6; ГРНТИ 47.29.37

РАЗРАБОТКА ЭОС ДЛЯ МНОГОЛУЧЕВОГО КЛИСТРОНА С-ДИАПАЗОНА С ВЫХОДНОЙ НЕПРЕРЫВНОЙ МОЩНОСТЬЮ НЕ МЕНЕЕ 200 КВТ

А.С. Моисеев, А.С. Арефьев, В.И. Пугнин, А.Н. Юнаков

АО «НПП «Исток» им. Шокина»,

Российская Федерация, Фрязино, asmoiseev@istok.ad

Аннотация. Выполнены расчеты магнитной системы и электронно-оптической системы 4-х лучевого клистрона С-диапазона с выходной непрерывной мощностью не менее 200 кВт, обеспечивающей формирование и транспортировку электронного потока в магнитном поле, обеспечиваемом МФС на постоянных магнитах.

Ключевые слова: электронно-оптическая система, электронный поток, магнитная фокусирующая система.

DEVELOPMENT OF AN EOS FOR A MULTIPATH C-BAND KLYSTRON WITH A CONTINUOUS OUTPUT POWER OF AT LEAST 200 KW

A.S. Moiseev, A.S. Arefev, V.I. Pugnini, A.N. Unakov

JSC «NPP «Istok» named after Shokin»,

Russia, Fryazino, asmoiseev@istok.ad

Annotation. Calculations of a magnetic system and an electron-optical system of a 4-beam C-band klystron with a continuous output power of at least 200 kW have been performed, which ensures the formation and transportation of an electron flux in a magnetic field provided by an MFS with permanent magnets.

Keywords: electron-optical system, electron flow, magnetic focusing system.

Мощный клистрон непрерывного действия с выходной мощностью 200 кВт, работающий на частоте 4,6 ГГц, предназначен для нагрева плазмы в токамаках. Однолучевой клистрон с такими параметрами работает при напряжении 45 кВ и имеет фокусирующую систему типа соленоид. Недостатком такого клистрона является необходимость использования источника питания соленоида. Так как в токамаке типа Т-15 предполагается одновременная работа не менее 20 клистронов, питание соленоидов требует достаточно больших затрат энергии.

В связи с этим разработка магнитной системы на постоянных магнитах для мощного клистрона является актуальной задачей.

Анализ возможных вариантов конструкции клистрона позволил выбрать следующую конструкцию клистрона с фокусирующей системой на постоянных магнитах:

4 луча в резонаторной системе на высшем виде колебаний; магнитный зазор - 120 мм; диаметр полюсных наконечников – 140 мм; напряжение катода 29 кВ; микропервеанс луча - 0,81 мкА/В^{3/2}. Величина магнитного поля – не менее 100 мТ.

Проектирование магнитной системы

Проектирование магнитной системы проводилось по программе Орега путем подбора размеров элементов системы.

Общий вид спроектированной магнитной системы с элементами резонаторной системы показан на рисунке 1. Модель магнитной фокусирующей системы (МФС) на постоянных магнитах в программе Орега показана на рисунке 2.

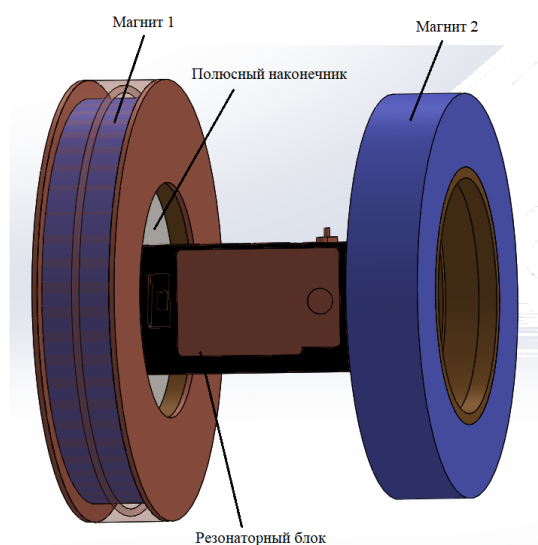


Рис. 1. Общий вид спроектированной магнитной системы с элементами резонаторной системы

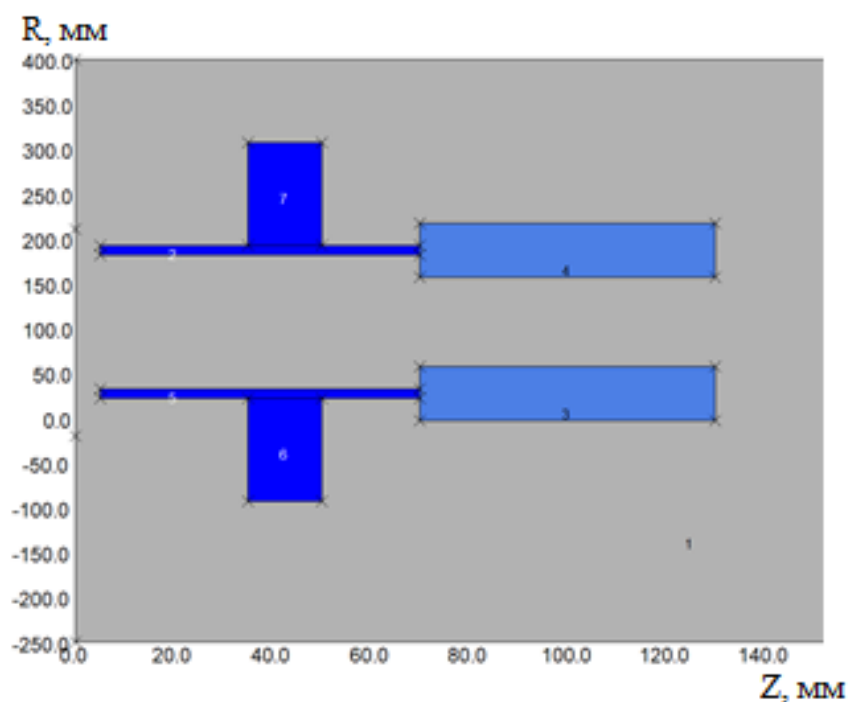


Рис. 2. Модель МФС на постоянных магнитах

Масса магнитной системы не превышает 30 кг.

Расчет магнитного поля проводился на оси магнитной системы. В реальной системе пролетные каналы будут располагаться на диаметре 42 мм, что значительно меньше диаметра полюсных наконечников (140 мм). Очевидно, что таким смещением канала от центра можно пренебречь. Поэтому дальнейшие расчеты электронно-оптической системы проводились для магнитного поля, рассчитанного для оси системы.

На рисунке 3 указан модуль распределения магнитного поля в системе на постоянных магнитах.

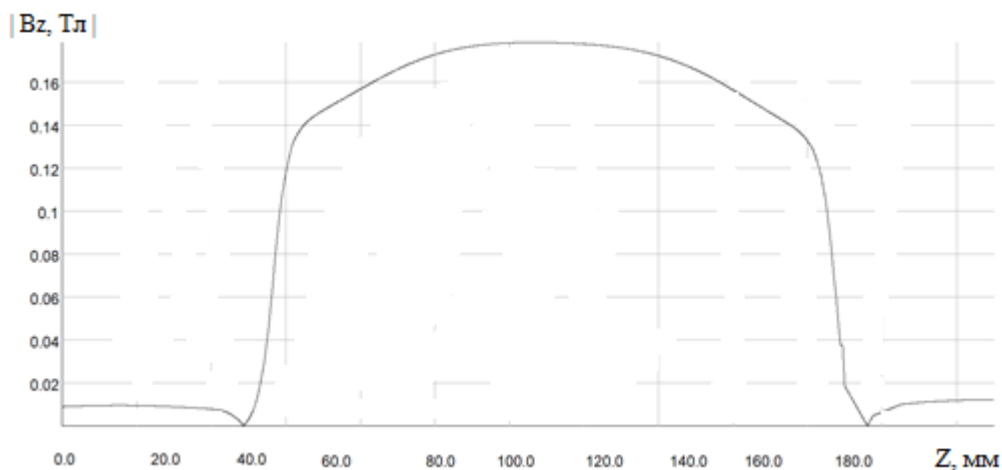


Рис. 3. Модуль распределения магнитного поля в системе на постоянных магнитах

Проектирование электронно-оптической системы

Проектирование многолучевой пушки свелось к проектированию одиночной пушки Пирса сферического типа со сходящимся потоком. Для формирования электронного пучка используется фокусирующий электрод, расположенный вблизи поверхности катода и находящийся с ним под одним потенциалом. Расчеты проводились по программе Орега.

В таблице 1 представлены основные параметры системы:

Таблица 1. Параметры ЭОС

Ускоряющее напряжение, В	29000
Ток катода, А	4
Фокусирующее поле, Тл	0,16
Поле на катоде, Тл	0,006
Радиус катода, мм	8
Радиус кривизны катода, мм	12
Радиус канала, мм	4
Микропервеанс	0,81
Заполнение	0,53

Для поиска геометрии управляющих электродов и их положения относительно катода проведены многочисленные расчеты процессов формирования пучка. На основании анализа проведенных расчетов была найдена конфигурация фокусирующего электрода и его положение относительно анода (рис. 4). Найденная конструкция ЭОС позволяет обеспечить транспортировку электронного потока для одного пролетного канала без токооседания.

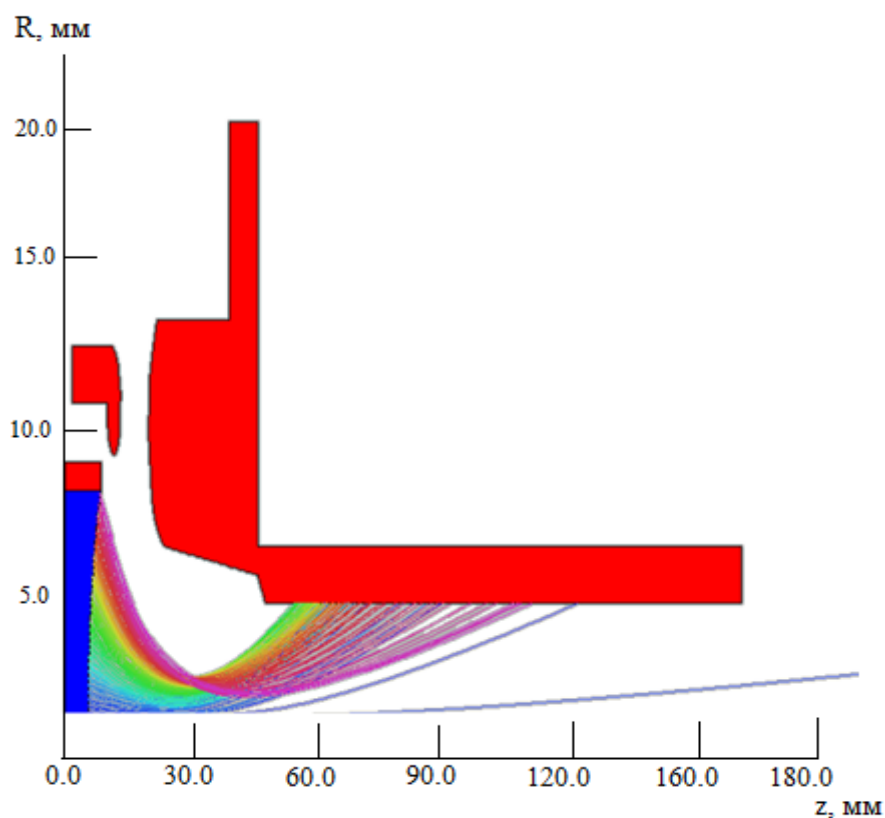


Рис. 4. Формирование и транспортировка электронного потока без магнитного поля

Теоретический расчет транспортировки электронного потока в магнитном поле показал, что в области пролетного канала токооседания не происходит (рис. 5).

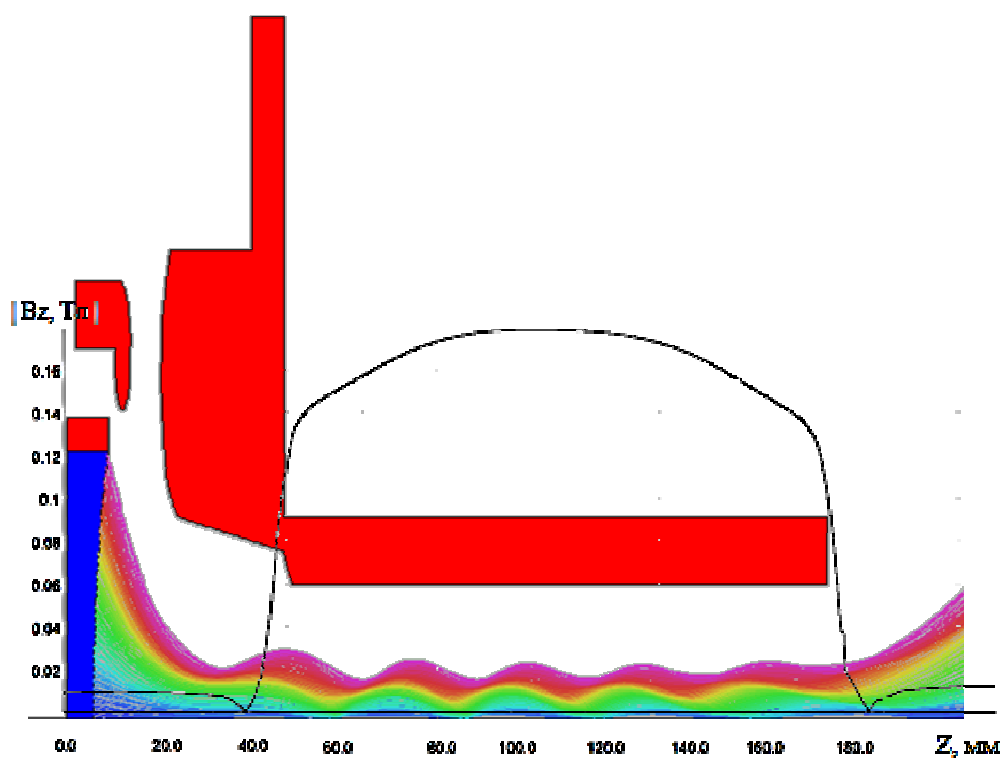


Рис. 5. Формирование и транспортировка электронного потока с учетом магнитного поля

Выводы

Выполнены расчеты магнитной системы и электронно-оптической системы 4-х лучевого клистрона С-диапазона с выходной непрерывной мощностью не менее 200 кВт, обеспечивающая формирование и транспортировку электронного потока в магнитном поле, обеспечиваемом МФС на постоянных магнитах.

1. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. Изд. «Советское радио», Москва – 1966.

УДК 621.387.322; ГРНТИ 47.29

ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ШИРОКОДИАПАЗОННОГО МАНОМЕТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

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

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

Аннотация. Исследованы возможности построения источника электронов для широкодиапазонного (10^{-7} -760 Торр) вакуумметра с одним манометрическим преобразователем на основе устойчивых к действию воздуха при атмосферном давлении прямонакального катода и фотокатода. Показано, что использование прямонакального платинового катода ограничено при давлении воздуха выше 1 Торр вследствие поверхностной ионизации углекислого газа, содержащегося в воздухе, на нити накала с образованием отрицательных ионов. Исследован ряд материалов для фотокатода, обеспечивающих эмиссию электронов под действием ультрафиолетового излучения (185, 254, 275 нм). Установлено, что стабильный источник электронов может быть создан на основе фотоэмиссии электронов из фотокатода на основе бора или индия при использовании источника излучения с длинами волн 185 и 254 нм. *Ключевые слова:* источник электронов, термокатод, фотокатод, ультрафиолетовое излучение, измерение давления, манометрический преобразователь, поверхностная ионизация с образованием отрицательных ионов, магнитное поле.

AN ELECTRON SOURCE FOR WIDE RANGE PRESSURE GAUGE CONVERTER

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

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

The summary. The possibilities of constructing an electron source for a wide-range (10^{-7} -760 Torr) vacuum gauge with one pressure gauge converter based on a direct-channel cathode and photocathode resistant to air at atmospheric pressure are investigated. It is shown that the use of a direct incandescent cathode is limited at an air pressure above 1 Torr due to the surface ionization of carbon dioxide contained in the air on the filament with the formation of negative ions. A number of materials for the photocathode providing electron emission under the action of ultraviolet radiation (185, 254, 275 nm) have been studied. It has been established that a stable electron source can be created based on the photoemission of electrons from a boron or indium-based photocathode using a radiation source with wavelengths of 185 and 254 nm.

Keywords: electron source, thermocathode, photocathode, ultraviolet radiation, pressure measurement, gas pressure gauge transducer, surface ionization with the formation of negative ions, magnetic field.

В промышленности и научных исследованиях имеется «запрос на приобретение широкодиапазонных вакуумметров, позволяющих проводить измерения абсолютных давлений в широком диапазоне от 10^{-7} до 10^5 Па» [1]. В работе [2] описан прототип широкодиапазонного манометрического преобразователя для измерения давления газа в диапазоне 10^{-7} – 760 Торр. Его работа основана на рассеянии электронов при движении в скрещенных электриче-

ском и магнитных полях при расположении фотокатода на торцевом электроде цилиндрического магнетрона. Для измерения давления в диапазоне $10^{-7} - 10^{-2}$ Торр в качестве меры давления используется ток коллектора рассеянных электронов при их циклическом движении между торцевыми электродами. В диапазоне давлений $10^{-2} - 760$ Торр давление определяется по току источника электронов. В качестве источника электронов использовался фотокатод на основе плёнки галлия, облучаемый ультрафиолетовым (длина волны 260 нм) светодиодом. В ходе исследования было установлено, что с течением времени при работе на воздухе при атмосферном давлении уровень эмиссии снижался. Это приводило к увеличению погрешности измерения в диапазоне низкого вакуума, которое было основано на измерении величины фототока. Поэтому возникла потребность в исследовании причин снижения уровня эмиссии и поиске материала для фотокатода, стабильно работающего в условиях низкого вакуума, или применении источника электронов, работающего на другом принципе, например, на использовании термоэмиссии.

Оценим требуемую величину тока источника электронов I_{cmin} исходя из минимально возможного для измерения уровня тока рассеянных электронов I_{amin} , поступающих на анод манометрического преобразователя. Зависимость тока рассеянных электронов I_a от давления газа P и тока источника электронов I_c определяется по следующему соотношению [2]

$$I_a = I_c \left[1 - \exp \left(- \frac{\sigma PL}{kT} \right) \right], \quad (1)$$

где σ – сечение рассеяния электронов на молекулах газа;

L – длина пути электрона в межэлектродном промежутке от катода до попадания на коллектор электронов;

k – постоянная Больцмана;

T – абсолютная температура.

Задав минимально измеряемый ток рассеянных электронов I_{amin} при давлении P , по соотношению (1), можно рассчитать требуемый ток источника электронов I_{cmin} .

$$I_{cmin} = \frac{I_{amin}}{1 - \exp \left(- \frac{\sigma PL}{kT} \right)}. \quad (2)$$

Величина L зависит от напряжения между анодом и катодом манометрического преобразователя, индукции магнитного поля вдоль его оси и расстояния между торцевыми электродами. Проведём оценку величины минимально необходимого тока катода манометрического преобразователя для следующего электрического режима: напряжение на аноде 10 В, напряжение на коллекторе электронов 10 В, напряжение на торцевых и центральном электродах -1В, индукция магнитного поля 60 мТл, при давлении азота 10^{-7} Торр. Будем считать, что сечение рассеяния электронов на молекулах азота 10^{-15} см², а минимально измеряемый ток анода 10^{-12} А. При таком электрическом режиме моделирование в программе CST даёт значение длины траектории электрона в межэлектродном промежутке $L = 590$ см. Тогда в соответствии с соотношением (2) $I_{cmin} = 5,3 \cdot 10^{-10}$ А. Шаг циклической траектории электрона при этом составит 0,45 мм, что потребует использовать ширину катода в манометрическом преобразователе меньше этого значения. При индукции магнитного поля 20 мТл будет необходим минимальный ток катода $I_{cmin} = 1,6 \cdot 10^{-9}$ А. Шаг циклической траектории электрона при этом составит 1,35 мм, что потребует использовать ширину катода в манометрическом преобразователе меньше этого значения.

В работе [2] установлено, что при увеличении давления в манометрическом преобразователе до 760 Торр фототок катода уменьшался примерно в 60 раз по сравнению с фотото-

ком при давлении воздуха меньше 10^{-2} Торр. Это обстоятельство позволяет сравнивать различные материалы для фотокатода при атмосферном давлении воздуха.

Существенно упростить конструкцию широкодиапазонного манометрического преобразователя могло бы использование термокатода, устойчивого к действию воздуха при атмосферном давлении. При этом отпадала бы проблема ввода ультрафиолетового излучения в объём преобразователя, его фокусировки, подбора источника ультрафиолетового излучения, сложности с обезгаживанием прибора при наличии оптического окна. Для проверки такой возможности был исследован катод прямого накала из платины. Известно, что в галогенных (галогенных) течеискателях используется эмиттер из платиновой проволоки, работающий при температуре 800 – 900 °С на воздухе при атмосферном давлении [3]. В источнике [4] указывается, что давление насыщенного пара платины при температуре 1427 °С составляет $4,65 \cdot 10^{-7}$ Торр, а при температуре 1200 °С в атмосфере кислорода норма потерь материала не превышает 0,1 % за 100 часов. Расчёт тока эмиссии для прямонакального катода из платины диаметром 0,45 мм и длиной 60 мм при работе выхода платины 5,3 эВ для температуры 1240 °С с помощью уравнения Ричардсона (основного уравнения для термоэмиссии) дал значение тока $5,4 \cdot 10^{-10}$ А. Это указывало на возможность достижения минимального тока, необходимого для реализации широкодиапазонного манометрического преобразователя с термокатодом. При этом минимальном токе эмиссии ток катода при атмосферном давлении воздуха составил бы $9 \cdot 10^{-12}$ А.

Для экспериментальной проверки возможности использования термокатода использовался макет диода с платиновым прямонакальным катодом диаметром 0,1 мм и длиной 6 мм. Радиус медного анода составлял 30 мм. К середине катода была прикреплена термопара хромель-копель для установления постоянной температуры катода при изменении давления в макете. Макет устанавливался под колпак установки вакуумного напыления УВН-2М-1. Давление под колпаком изменялось путём откачки воздуха форвакуумным насосом и измерялось деформационным манометром. Между анодом и катодом прикладывалось напряжение 10 В от стабилизированного источника напряжения, ток катода измерялся электрометрическим усилителем. Цель эксперимента заключалась в измерении зависимости тока катода от давления воздуха.

На рисунке 1 представлена зависимость тока катода I_c от давления воздуха при температуре катода 534 °С (напряжение на термопаре хромель-копель 43,3 мВ).

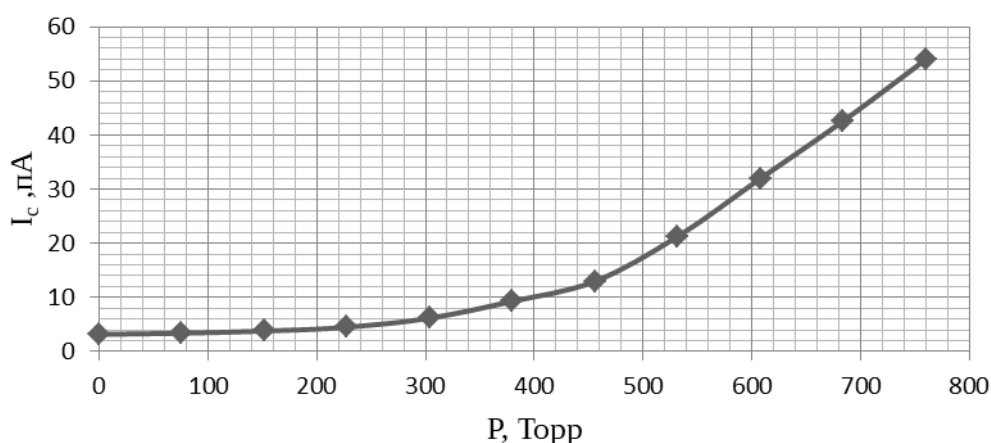


Рис. 1. Зависимость тока катода от давления воздуха

При эмиссии электронов с катода с ростом давления воздуха ток должен уменьшаться за счёт возврата части электронов на катод из-за рассеяния на молекулах воздуха [5], однако в данном случае ток увеличивался. Увеличение тока с ростом давления воздуха может быть

объяснено поверхностной ионизацией на нагретой нити накала с образованием отрицательных ионов. С ростом давления увеличивается поток молекул, падающих на нагретую нить катода, что увеличивает поток отрицательных ионов. Величину тока отрицательных ионов с катода можно рассчитать с помощью уравнения Саха–Ленгмюра [6]

$$I_c = \frac{g_i}{g_a} e v \exp \left[\frac{e(\theta - \phi)}{kT} \right], \quad (3)$$

где g_i/g_a – отношение статистических весов ионного и атомного состояний ионизирующихся частиц;

e – заряд электрона;

v – поток атомов падающих на поверхность катода;

θ – электронное сродство газа;

ϕ – работа выхода материала катода;

k – постоянная Больцмана;

T – температура катода.

Результаты расчёта тока отрицательных ионов с платинового катода с работой выхода 5,3 эВ при температуре 534 °С, диаметре нити платинового катода 0,1 мм, длине катода 60 мм при давлении воздуха 760 Торр с учётом парциальных давлений газов в составе воздуха приведены в таблице 1.

Результат расчёта показывает, что в область экспериментальных значений тока катода попадает только ток отрицательных ионов углекислого газа. Учёт влияния электрического поля в области нити при напряжении анод-катод 10 В не дал существенного изменения величин токов.

В широкодиапазонном манометрическом преобразователе рост давления газа выше 10^{-2} Торр приводит к уменьшению тока электронов катода [2], а при наличии поверхностной ионизации ток отрицательных ионов увеличивается с ростом давления. Это должно привести к образованию минимума на градуировочной характеристике и неоднозначности измерения давления газа, что ограничивает возможность использования термоэммиттера в манометрическом преобразователе.

Таблица 1. Результаты расчёта тока эмиссии отрицательных ионов

Род газа	Парциальное давление, Торр	Сродство к электрону, эВ	Ток катода, А	Температура катода, °С
Азот	593	0,05	$2,2 \cdot 10^{-25}$	534
Кислород	159	0,94	$1,1 \cdot 10^{-24}$	534
Углекислый газ	0,24	3,8 [7]	$1,2 \cdot 10^{-9}$	534

Рассмотрим возможности использования различных материалов для фотокатодов, работающих в ультрафиолетовой области спектра для источника электронов широкодиапазонного манометрического преобразователя.

Основными требованиями к фотокатоду являются обеспечение минимального уровня тока, что определяет нижнюю границу диапазона измерения давления газа. Кроме этого требуется стабильность эмиссионной способности фотокатода при действии газов в составе воздуха, которая обеспечивает верхнюю границу диапазона (10^{-2} – 760 Торр).

Исследования материалов для фотокатода проводились с помощью макета в виде диода с межэлектродным расстоянием 5 мм, площадью катода 65 мм^2 из исследуемого материала фотокатода. Ультрафиолетовое излучение поступало на катод через отверстие в медном аноде. В качестве источников ультрафиолетового излучения использовались светодиод ($\lambda = 275 \text{ нм}$), малогабаритные ртутные газоразрядные лампы с кварцевой ($\lambda = 185$ и 254 нм) и

увиолевой ($\lambda = 254$ нм) оболочками. Между анодом и катодом прикладывалось постоянное напряжение 10 В и измерялся фототок с помощью электрометрического усилителя. Для изменения температуры фотокатода использовался десятиваттный резистор, на котором располагался катод. Температура катода измерялась с помощью термопары хромель-копель. Макет размещался под колпаком установки вакуумного напыления УВН-2М-1, что позволяло измерять фототок как при атмосферном давлении воздуха, так и давлении 10^{-2} Торр. Давление измерялось деформационным и термопарным вакуумметрами. Основной целью исследования являлось измерение зависимости фототока при атмосферном давлении воздуха от времени для различных материалов фотокатода.

На рисунке 2 представлена зависимость фототока от давления воздуха для фотокатода из индия при облучении его светодиодом с длиной волны 275 нм и мощностью излучения 10 мВт.

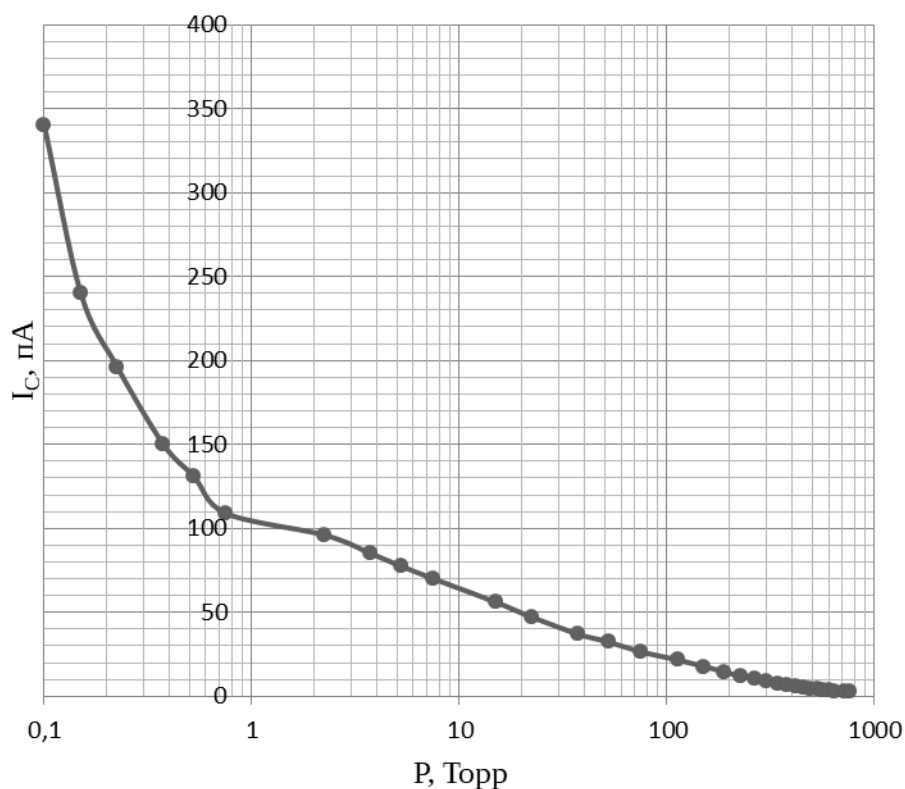


Рис. 2. Зависимость тока фотокатода из индия от давления воздуха

В отличие от аналогичной зависимости для термокатада (рисунок 1) ток фотокатода уменьшается с ростом давления воздуха, что подтверждает наличие поверхностной ионизации с образованием отрицательных ионов в случае термокатада. Аналогичный вид имели зависимости фототока от давления воздуха фотокатоды из галлия, графита, бора, карбида кремния. Поскольку при атмосферном давлении воздуха на поверхности фотокатода адсорбируются пары воды, что может изменять работу выхода электронов, исследовалась зависимость тока фотокатода от температуры. На рисунке 3 приведена зависимость тока фотокатода из индия от температуры при действии излучения с длиной волны 275 нм.

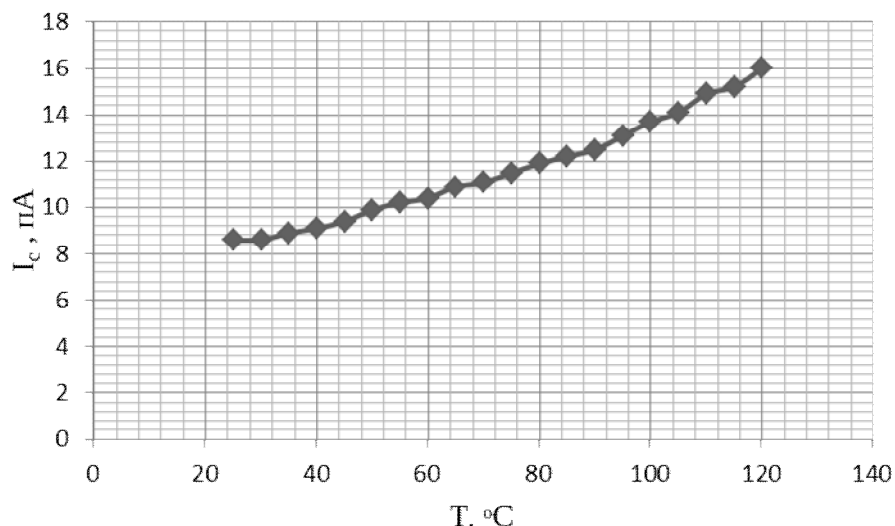


Рис. 3. Зависимость тока фотокатода из индия от температуры при атмосферном давлении воздуха

Аналогичные зависимости фототока от температуры наблюдались для фотокатодов из галлия и графита. Рост фототока при увеличении температуры фотокатода указывает на возможность удаления адсорбированных плёнок и увеличения фототока.

Величины фототоков из катодов графита, бора, карбида кремния при атмосферном давлении имели величину порядка долей пикоампера, что меньше допустимого значения (1 пА) для использования в широкодиапазонном манометрическом преобразователе. Это объясняется тем, что энергия кванта излучения светодиода на длине волны 275 нм составляет 4,52 эВ, что близко к красной границе фотоэффекта для этих материалов.

Поэтому в дальнейшем исследование материалов фотокатодов проводилось с использованием миниатюрных ртутной газоразрядных ламп тлеющего разряда с увиолевой оболочкой, излучающей на длине волны 254 нм с энергией кванта 4,89 эВ и кварцевой оболочкой, излучающей на длинах волн 254 и 185 нм с энергией кванта 6,72 эВ. Целью исследования было исследование стабильности во времени фототока для фотокатодов из различных материалов. На рисунке 4 приведена зависимость отношения β фототока в произвольный момент времени к фототоку в начальный момент времени для индия при атмосферном давлении (755 Торр) от времени облучения на длине волны 254 нм. Интенсивность облучения контролировалась по свечению разряда лампы с помощью фотодиода ФД-24.

На рисунке 5 представлены зависимости отношения фотокатода из графита, индия и бора в произвольный момент времени к фототоку в начальный момент времени от времени при атмосферном давлении воздуха при облучении лампой с кварцевой оболочкой, излучающей на длинах волн 185 и 254 нм.

Изменение фототока от времени воздействия ультрафиолетового излучения может быть обусловлена фотодиссоциацией молекул окисной плёнки на поверхности фотокатода, если энергия кванта излучения больше энергии диссоциации окисла. В результате изменяется фотоэлектронная работа выхода и, следовательно, фототок. Так в случае фотокатода из индия энергия связи в молекуле оксида индия составляет 3.3 эВ, что меньше энергии 4,52 эВ кванта излучения с длиной волны 275 нм.

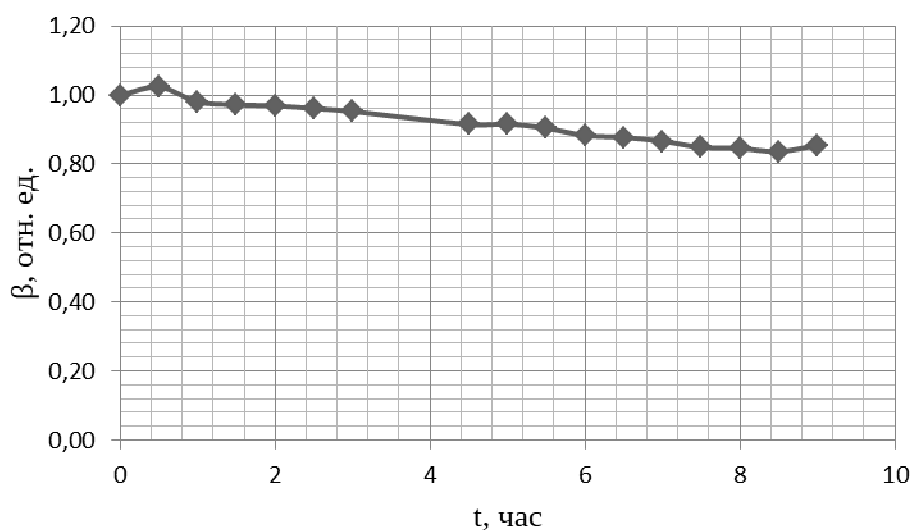


Рис. 4. Зависимость отношения тока фотокатода из индия в произвольный момент времени к фототоку в начальный момент времени от времени при атмосферном давлении воздуха при облучении светом с длиной волны 254 нм.

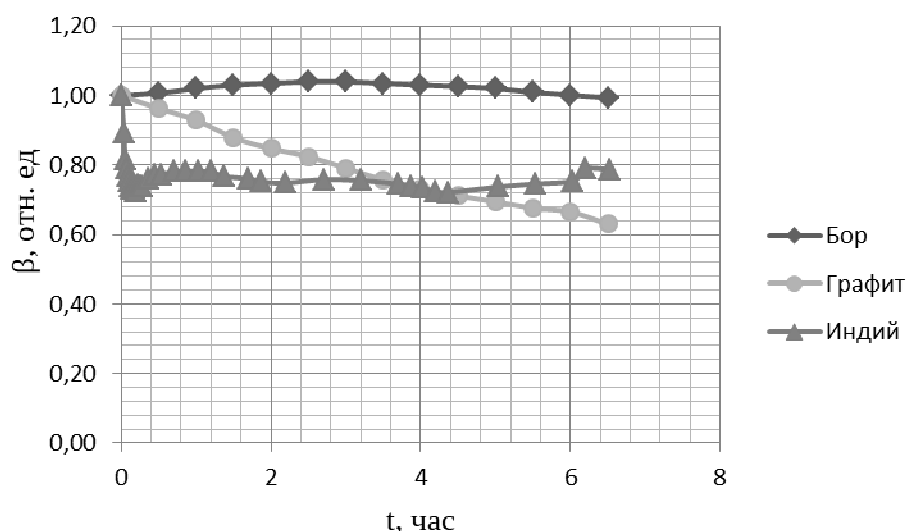


Рис. 5. Зависимость отношения тока фотокатода из бора графита и индия в произвольный момент времени к фототоку в начальный момент времени от времени при атмосферном давлении воздуха при облучении светом с длинами волн 185 и 254 нм.

Наилучшую стабильность фототока от времени облучения на длине волны 185 нм показал фотокатод из кристаллического бора (рисунок 5). Достаточно стабильным, если не считать начальный участок зависимости длительностью 5 минут, оказался фотокатод из индия. Сложность использования источника излучения с длиной волны 185 нм заключается в том, что такие металлы как медь, алюминий, являющиеся конструкционными материалами манометрического преобразователя, под действием рассеянного от фотокатода излучения, создают фотоэмиссию составляющую заметную часть (порядка 10 %) от эмиссии катода. Это будет вносить погрешность измерения давления в диапазоне $10^{-2} - 760$ Торр, поскольку ток фотокатода является мерой давления газа в этом диапазоне. Это говорит о необходимости использовать в манометрическом преобразователе антиэмиссионные покрытия. При использовании источника излучения с длиной волны 254 нм величиной фотоэмиссии конструкци-

онных материалов можно пренебречь по сравнению с фотоэмиссией фотокатода. Однако, при использовании излучения с этой длиной волны ток фотоэмиссии бора уменьшался примерно в 100 раз.

Таким образом можно заключить, что использование термоэмиссионного источника электронов в широкодиапазонном манометрическом преобразователе в диапазоне давлений воздуха 10^{-2} – 760 Торр ограничивается явлением поверхностной эмиссии отрицательных ионов. Стабильный источник электронов может быть создан на основе фотоэмиссии электронов из фотокатода на основе бора или индия при использовании источника излучения с длинами волн 185 и 254 нм.

Библиографический список

1. Чернышенко А. А. Развитие системы метрологического обеспечения в области вакуумных измерений в работах ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» // Эталоны. Стандартные образцы. 2022. Т. 18. № 3. С. 73–88 <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2022-18-2-73-88A>.
2. Базылев В. К., Жидков А. М., Коротченко В. А. Широкодиапазонный манометрический преобразователь на основе рассеяния электронов молекулами газа // Вестник РГРТУ. 2022. № 81. С. 89 – 95.
3. Ланис В. А., Левина Л. Е. Техника вакуумных испытаний. // М. – Л., Госэнергоиздат, 1963, 264 с.
4. Голубцов И. В., Желиговская Н. Н., Дьякова Г. Б. Временные предельные нормы по расходованию драгоценных металлов.//М.: МГУ им. М. В. Ломоносова. 2021, 197 с.
5. Di Mauro A. et al. Photoelectron Backscattering Effects in Photoemission from CsI into Gas Media // Nucl. Instr. Meth. A. 1996. V.371. P.137.
6. Фридрихов С. А., Мовнин С. М. Физические основы электронной техники. М.: Высшая школа. 1982, 608 с.
7. Салаватов Т.Ш., Байрамова А.С., Воробьев К. А. Использование диоксида углерода в качестве химического сырья // Вестник Евразийской науки, 2021 №2, <https://esj.today/PDF/03NZVN221.pdf>.

УДК 621.385.6; ГРНТИ 47.29.37

ИСПЫТАНИЯ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ КАТОДА М-ТИПА, МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНОУГЛЕРОДОМ, В СОСТАВЕ МОЩНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ЛБВ

Т.М. Крачковская, Н.В. Ржевин, С.Д. Журавлев, Р.Ю. Богачев, Д.А. Тихомиров

АО «НПП «Алмаз»,

Российская Федерация, Саратов, RzhevinNV@almaz-rpe.ru

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований металлопористых катодов, модифицированных нанокуглеродом. Длительные испытания мощной импульсной ЛБВ на долговечность с таким катодом в форсированном режиме показали, что предложенная технология изготовления металлопористых катодов позволяет достигать время их работы в ЛБВ без потери эмиссионной способности до 6100 ч. при плотности тока 5-7 А/см². Зафиксированное за время испытаний изменение величины тока катода не превысило 4%.

Ключевые слова: мощная импульсная лампа бегущей волны (ЛБВ), металлопористый катод, нанокуглерод, долговечность

DURABILITY TESTS OF AN M-TYPE CATHODE MODIFIED WITH NANOCARBON AS PART OF A POWERFUL PULSED TWT

T.M. Krachkovskaya, N.V. Rzhevin, S.D. Zhuravlev, R.Yu. Bogachev, D.A. Tikhomirov

SC «NPP «Almaz»,

Russian Federation, Saratov, RzhevinNV@almaz-rpe.ru

The summary. the results of experimental studies of metal-porous cathodes modified with nanocarbon are presented. Durability tests of a powerful pulse traveling-wave tube for with such a cathode in accelerated mode have shown that the proposed technology for manufacturing metal-porous cathodes allows them to reach their operating time in a TWT without loss of emissivity up

to 6100 hours at a current density of 5-7 A/cm². The change in cathode current recorded during the tests did not exceed 4%.

Keywords: Pulse high power traveling wave tube amplifiers, metal-porous cathode, nanocarbon, durability

1. Введение

В настоящее время для совершенствования радиолокационных систем различного назначения, а также для обеспечения возможности конкуренции бортовых радиолокационных станций (БРЛС) с использованием вакуумных активных элементов, с БРЛС на основе АФАР, необходим качественный скачок в уровне применяемых ЛБВ. Одним из важных параметров, требующих улучшения, является долговечность ЛБВ, которая определяется в основном катодно-сеточным узлом (КСУ). В частности, требуется обеспечить долговечность КСУ не менее 5000 часов при плотности тока 5-7 А/см² в квазинепрерывном режиме [1-2]. В настоящее время долговечность КСУ в указанных приборах составляет 1200 часов с минимум 2-кратным запасом по эмиссионной долговечности катода. Поэтому актуальной задачей является повышение долговечности КСУ. Эта задача решается по двум направлениям: путем повышения долговечности источника электронов, в качестве которого применяется металлопористый катод (МПК) М-типа, и повышения долговечности и надежности конструкции сеточного узла, в том числе, за счет применения сеточных электродов из материалов с высокими антиэмиссионными и механическими свойствами [1, 3-4]. Долговечность МПК можно повысить путем его модификации наноуглеродными материалами [5].

2. Экспериментальные результаты

В данной работе было проведено исследование долговечности МПК М-типа (покрытие Os-Ir-Al) с пропиткой алюмосиликатом бария-кальция ($3\text{BaO} \cdot 0.5\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 0.5\text{SiO}_2$), модифицированным сульфаддуктом нанокластеров углерода – углероном. Испытаниям в КСУ в составе стеклянной колбы подвергались катоды диаметром 10 мм с модифицированной углероном и типовой пропиткой при повышенной температуре (Тф) относительно рабочей (Тр) в режиме непрерывного горения, т.е. с поданным напряжением накала катода без токоотбора. Контроль эмиссионных параметров осуществлялся путем снятия недокальной характеристики с отбором тока 4 А при скважности 10000 с определением характеристического напряжения накала (Унх) в точке перегиба (20% спад по эмиссии), значение которого должно соответствовать характеристической температуре (Тх) не ниже 50 °С относительно от рабочей (Тр). Вторым контролируемым по ВАХ критерием для макетов КСУ служит падение тока катода при Тр, которое не должно превышать 5%.

По итогам форсированных испытаний макетов КСУ, представленных в таблице 1, получены положительные результаты по долговечности для модифицированного катода (коэффициент ускорения 7,6) в сравнении с типовым (коэффициент ускорения 7,2), его ресурсная долговечность по критерию Тр-Тх > 50 °С и критерию падения тока составила 9120 часов, тогда как у типового 3240 часов, что в ~2,8 раза больше. Данный результат может быть объяснен пониженной в 1,6 раз скоростью испарения для катодов с модифицированным алюмосиликатом, относительно типового алюмосиликата при температуре катода ~1150 °С [6], которая поддерживалась во время испытаний. Кроме того, снижение скорости испарения положительно влияет и на повышение надежности КСУ с точки зрения возникновения паразитной термоэмиссии с сеточных электродов.

Таблица 1. Результаты формированных испытаний по долговечности для модифицированного и типового катодов ЛБВ

Наработка, при Тф ч	Модифицированный катод			Типовой катод		
	Долговечность при Тр, ч	Унх, В	$\Delta U_{нх}$ от нулевого значения	Долговечность при Тр, ч	Унх, В	$\Delta U_{нх}$ от нулевого значения
0	0	10,68		0	10,7	
150	1140	10,6	-0,08	1080	11	0,3
300	2280	10,85	0,13	2160	11,1	0,4
450	3420	10,95	0,23	3240	11,4	0,7
550	4180	11	0,32	3960	12	1,3
650	4940	11,1	0,42	-	-	
1000	7600	11,1	0,42	-	-	
1100	8360	11,55	0,87	-	-	
1200	9120	11,65	0,97	-	-	

Следующим этапом, 2 КСУ с модифицированными углеродом катодами были собраны в макеты ЛБВ. Макеты успешно прошли откачку и последующий контроль эмиссионных параметров катодов в триодном режиме, после чего была проведена операция предварительных динамических испытаний, при которой катоды работали 35 часов с токоотбором 4 А при скважностях от 40 до 4, паразитные термоэмиссионные токи отсутствовали.

На последнем этапе один макет ЛБВ будет проходить испытания на длительную безотказность по режимам ТУ на изделие, а другой поставлен на испытания в режиме непрерывного горения.

Предварительные результаты испытаний ЛБВ с модифицированным катодом на непрерывное горение показали, что при форсированной наработке в 744 часа с коэффициентом 8,22 ресурсная долговечность катода составляет 6100 часов, в настоящее время критерии годности катода выполняются, утечка в цепи сетка-катод не развивается и составляет -0,05 мА. Недокальная характеристика прибора, снятая на скважности 4 перед наработкой и после форсированной наработки 744 ч представлена на рисунке 1, значения параметров тока катода и напряжения накала приведены в таблице 2.

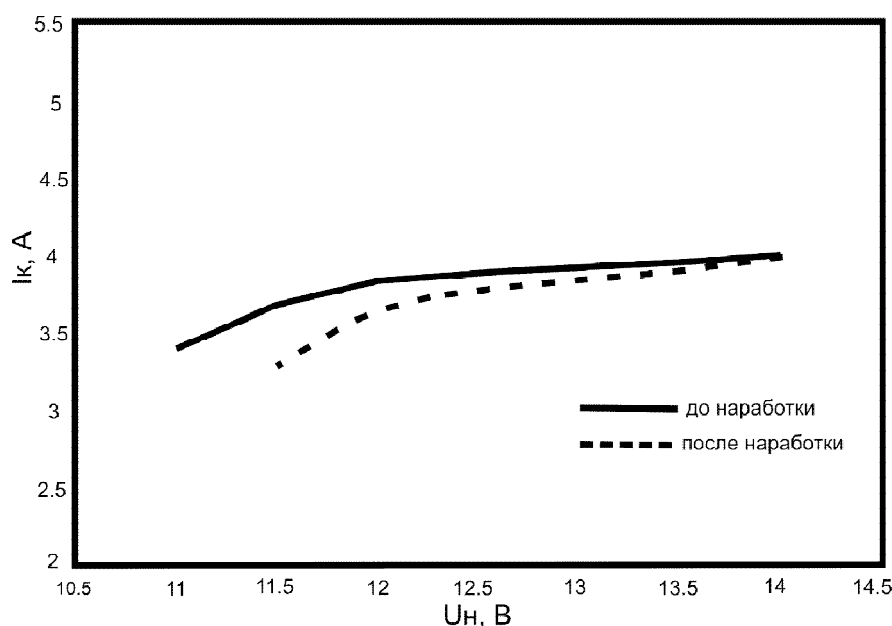


Рис. 1. Семейство недокальных характеристик ЛБВ с модифицированным катодом в процессе наработки

Таблица 2. Значения параметров тока катода и напряжения накала

Наработка, при Тф, ч	Ун, В	14	13,5	13	12,6*	12	11,5	11	Икх, А	Унх, В
0	Ик, А	4	3,96	3,92	3,9	3,84	3,68	3,4	3,508	11,2
744	Ик, А	4	3,91	3,85	3,8	3,65	3,29	-	3,392	11,64
* рабочее напряжение накала										

Из таблицы 2 следует, что падение тока катода при рабочем напряжении накала 12,6 В за время наработки составило 3,3%, а изменение характеристического напряжения составило 0,44 В, что соответствует запасу по температуре $T_p - T_x = 60$ °С, согласно данным пирометрирования. Промежуточный контроль эмиссионных параметров катода в составе прибора осуществлялся путем снятия недокальной характеристики в триодном режиме с отбором тока 4 А при скважности 4 с определением характеристического напряжения накала (Унх) при котором ток катода уменьшится на 10% по отношению к току катода при рабочем напряжении накала через каждые 100 ч.

Испытания продолжаются до полного исчерпания ресурса катода.

3. Заключение

Полученные в ходе испытаний КСУ и приборов результаты можно считать положительными с точки зрения повышения долговечности катода и надежности КСУ, так как было зафиксировано отсутствие паразитного тока термоэмиссии и незначительное падение тока катода после ресурсной наработки 6100 часов, что свидетельствует о том, что дальнейшие исследования и разработка МПК с нанотуголеродом является перспективной для применения таких катодов в долговечных мощных импульсных ЛБВ.

Библиографический список

1. Апин М.П. и др. Разработка и создание комплексированных СВЧ-устройств в АО «НПП «Алмаз»/ М.П. Апин, А.Б. Данилов, Н.А. Калистратов, Д.И. Кириченко, С.И. Кузюткин, С.А. Нефедов, А.Д. Рафалович, В.А. Сенчуров, П.Д. Шалаев // Радиотехника, 83, 8 (12), 6 (2019).
2. Нефедов С.А., Поляков И.В., Ржевин Н.В. Современное состояние и перспективы разработки и применения мощных импульсных ЛБВ X-диапазона с низковольтным управлением электронным потоком. Научно-техническая конференция «Мощные вакуумные СВЧ-приборы». Тезисы. Москва. 22-23 мая 2024. АО «НПП «Торий». с.16-17.
3. Melnikova I.P., Lyasnikova A.V., Maltseva S.V. A new anti-emission material for manufacturing of cathode-mesh electrodes// Letters on materials 7 (3), 2017 pp. 218-221. DOI: 10.22226/2410-3535-2017-3-218-221
4. Богачев Р.Ю. и др. Катодно-сеточные узлы для мощных импульсных ЭВП СВЧ с сетками из анизотропного пиролитического графита / Р.Ю. Богачев, Д.А. Бессонов, С.Д. Журавлев, Т.М. Крачковская, В.И. Шестеркин // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. - 2024. - Вып. 3 (563) – С. 64-73.
5. Крачковская Т.М. и др. Влияние режимов и времени работы на эмиссионные характеристики катодов М-типа, модифицированных нанотуголеродом / Т.М. Крачковская, П.Д. Шалаев, В.И. Шестеркин, Р.Ю. Богачев, Д.А. Тихомиров, Ю.А. Одинцова, Г.Р. Биктимирова // Материалы XXII Координационного науч.-тех. семинара по СВЧ технике. 11-15 сентября 2023 г., г. Нижний Новгород, АО «НПП «Салют». С. 5-7.
6. Емельянов А.С. и др. Метод и результаты измерения скорости испарения активного вещества с поверхности металлопористого катода / Емельянов А.С. Богачев Р.Ю., Журавлев С. Д., Крачковская Т.М., Шестеркин В.И. // Тезисы докладов юб. науч.-техн. конф. АО «НПП «Исток» им. Шокина» «СВЧ-электроника 2023», г. Фрязино, 25-26 мая 2023, с. 63.

УДК 621.385.632; ГРНТИ 47.29.37

МПФС ДЛЯ СВЧ УСИЛИТЕЛЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

С.П. Морев, Н.А. Сычев

АО «НПП «Исток» им. Шокина»,

Российская Федерация, Московская область, г. Фрязино, info@istokmw.ru

Аннотация. В работе рассмотрена возможность создания магнитной периодической фокусирующей системы (МПФС) с несинусоидальным распределением осевой компоненты индукции магнитного поля, предназначенной для транспортировки электронного потока в протяженном канале электронно-оптической системы (ЭОС) вакуумного СВЧ усилителя, предназначенного для работы в диапазоне 220 ГГц. Проведено проектирование МПФС с третьей пространственной гармоникой магнитного поля с амплитудой магнитного поля, равно 0,6 Тл и периодом 16 мм. Приведены расчеты транспортировки электронного потока с током 0,14 А при ускоряющем напряжении 22,4 кВ в пролетном канале 0,4 мм при параметре магнитного поля, равном 1,0.

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

MPFS FOR A TERAHERTZ MICROWAVE AMPLIFIER

S.P. Morev, N.A. Sychev

JSC "RPC "ISTOK" named after Shokin",

Russia, Fryazino, info@istokmw.ru

The summary. The paper considers the possibility of creating a magnetic periodic focusing system (MPFS) with a non-sinusoidal distribution of the axial component of magnetic field induction, designed to transport an electron stream in an extended channel of an electron-optical system (EOS) of a vacuum microwave amplifier designed to operate in the 220 GHz band. The design of an MPFS with the third spatial harmonic of a magnetic field with a magnetic field amplitude equal to 0.6 Tl and a period of 16 mm has been carried out. Calculations of electron flow transportation with a current of 0.14 A at an accelerating voltage of 22.4 kV in a span channel of 0.4 mm with a magnetic field parameter of 0.9 are presented.

Keywords: electron-optical system, periodic magnetic focusing system, electron flux transportation in a periodic magnetic field.

Введение

Продвижение в коротковолновую часть миллиметрового и субмиллиметрового (терагерцевого) диапазонов продолжает оставаться одним из активно развивающихся направлений электронной техники при разработках новых поколений компактных усилителей СВЧ. При необходимости создания усилителя с относительно невысокими (15-30 кВ) напряжениями замедляющей структуры, пожалуй, основным привлекательным прибором в терагерцевой части СВЧ диапазона является лампа бегущей волны (ЛБВ) и клистрон с распределенным взаимодействием (КРВ). В работе [1] были рассмотрены результаты проектирования однолучевой ЭОС с мощностью пучка более 3 кВт для СВЧ усилителя 220 ГГц диапазона. Транспортировка электронного потока в этой ЭОС обеспечивалась магнитной фокусирующей системой с униполярным типом магнитного поля амплитудой 0.45Тл.

В настоящей работе, рассмотрена возможность применения МПФС в однолучевой ЭОС с током пучка 0.14 А, ускоряющим напряжением 22.4 кВ при транспортировке электронного потока в пролетном канале диаметром 0.4 мм.

Постановка задачи

При продвижении в коротковолновую часть миллиметрового или субмиллиметрового диапазонов длин волн из-за значительного уменьшения поперечных размеров пролетного канала, даже без учета возможных отклонений размеров деталей ЭОС от номинальных размеров, возникают трудности в разработке ЭОС. Так, на частотах свыше 100 ГГц при опти-

мальной величине безразмерного параметра $\gamma_e a = \frac{2\pi f a}{\sqrt{2\eta U}}$ (здесь f - частота, $2a$ - диаметр пролетного канала, U - ускоряющее напряжение), равного $\gamma_e a = 1.0$, размер пролетного канала ЭОС становится столь малым, что для обеспечения приемлемого заполнения пучком пролетного канала требуются высокие значения уровня магнитного поля.

Низкий первеанс электронного потока (менее $0,1 \text{ мкА/В}^{3/2}$) и высокая (более 100) компрессия потока в электронной пушке (из-за необходимости обеспечения приемлемой плотности тока на катоде для его долговечной работы), делает невозможным проектирование ЭОС без учета влияния поперечных составляющих скоростей электронов в пучке [2].

В работе [3] при разработке широкополосной ЛБВ было показано, что за счет выбора параметров пространства взаимодействия значение параметра $\gamma_e a$ может быть увеличено почти в два раза при относительно высоких значениях электронного КПД, а в работе [4], даже при еще большем увеличении значения параметра $\gamma_e a$ удалось получить относительно высокие значения электронного КПД для КРВ на частотах в 340 ГГц. В работе [5] при разработке ЛБВ W - диапазона применение повышенного значения параметра $\gamma_e a$ позволило существенно увеличить диаметр пролетного канала и уменьшить величину фокусирующего магнитного поля, при этом за счет оптимизации параметров замедляющей системы удалось сохранить высокие значения электронного КПД [6].

В [1] была рассмотрена ЭОС с параметрами, представленными в таблице 1-2. Транспортировка электронного потока в ЭОС была осуществлена магнитной фокусирующей системой с униполярным магнитным полем. При использовании МПФС с синусоидальным распределением и амплитудой магнитного поля в $\sqrt{2}$ больше массогабаритные характеристики фокусирующей системы существенно лучше, однако для обеспечения приемлемой величины параметра магнитного поля α , период МПФС не должен превышать 8 мм (при этом $\alpha < 0,3$) и получение такой МПФС проблематично.

Таблица 1. Конструктивные параметры ЭОС

Ток пучка, мА	140,0
Ускоряющее напряжение, В	22400
Микропервеанс, $\text{мкА/В}^{3/2}$	0,045
Диаметр катода, мм	1,10
Диаметр канала, мм	0.4
Тип катода	Импрегнированный
Плотность тока на катоде, А/см^2	15,6
Плотность тока в пучке, А/см^2	480
Компрессия пучка по площади без учета поперечных скоростей ($U_{\perp \max} = 0$)	90
Компрессия пучка по площади с учетом поперечных скоростей ($U_{\perp \max} = 0.7 \text{ В}$)	35

Таблица 2. Конструктивные параметры МФС

Амплитуда поля на оси, Гс	4500
Бриллюэновский радиус пучка a_p в МФС, мм	0,058
Средний радиус пучка в МФС R_p при $U_{\perp \max} = 0,7 \text{ В}$, мм	0,093
Заполнение канала пучком (R_p/R_{kan}) при $U_{\perp \max} = 0 \text{ В}$	0,29
Заполнение канала пучком (a_p/R_{kan}) при $U_{\perp \max} = 0,7 \text{ В}$	0,47

Транспортировка электронного потока в МПФС при параметрах магнитного поля $\alpha > 0,3$ может быть осуществлена при наличии в распределении продольной компоненты индукции магнитного поля третьей пространственной гармоники с амплитудой, равной половине амплитуды первой гармоники. В работе [7] представлены результаты испытаний ЛБВ с такой МПФС, свидетельствующие о транспортировке электронного потока в протяженном

канале при параметре магнитного поля $\alpha \sim 1,0$. Связь распределения продольной компоненты индукции магнитного поля в МПФС с третьей гармоникой в области, ограниченной внутренним диаметром полюсных наконечников, с геометрическими размерами МПФС (показаны на рисунке 1) с одинаковой намагниченностью магнитов в соответствии с [8] имеет вид:

$$B_z(r, z) = \frac{8U_0}{\pi\Delta} \sum_k \frac{1}{k} \left[\cos(\rho k) \sin\left(\frac{\pi k}{2}\right) \right] \sin\left(\frac{\pi k \Delta}{L}\right) \frac{I_0\left(\frac{2\pi k r}{L}\right)}{I_0\left(\frac{2\pi k r_n}{L}\right)} \sin\left(\frac{2\pi k z}{L}\right). \quad (1)$$

Здесь $\rho = 2\pi(b + \Delta/2)/L$;

b – протяженность магнитомягкой втулки;

Δ – зазор между наконечником и втулкой;

L – период системы;

U_0 – значение скалярного магнитного потенциала на границе области;

r_n – радиус полюсных наконечников и втулки;

I_0 – функция Бесселя;

r и z – координаты.

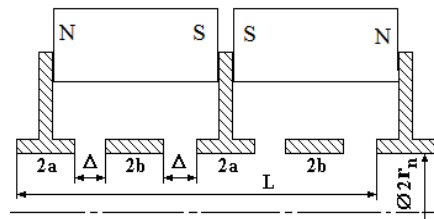


Рис. 1. Схематическое изображение периода МПФС с третьей гармоникой

Результаты расчетов

В соответствии с (1) требуемое отношение амплитуды третьей гармоники к амплитуде первой гармоники, равное 0.5, обеспечивается при следующих продольных размерах ячеек МПФС: внутренний диаметр наконечников и вставки $2r_n = 3.7$ мм, толщина наконечника $2a = 1.3$ мм, зазор между наконечником и втулкой $\Delta = 2.1$ мм, протяженность втулки $2b = 2.5$ мм, период $L = 16.0$ мм,

При наружном диаметре наконечников $2D_n = 18$ мм, наружном диаметре магнитов $2D_m = 24$ мм, наружном диаметре втулки $2D_{vt} = 4.5$ мм, толщине магнита из сплава КС-25, равной 6.7 мм реализуется амплитуда магнитного поля 0.6 Тл (рис. 2).

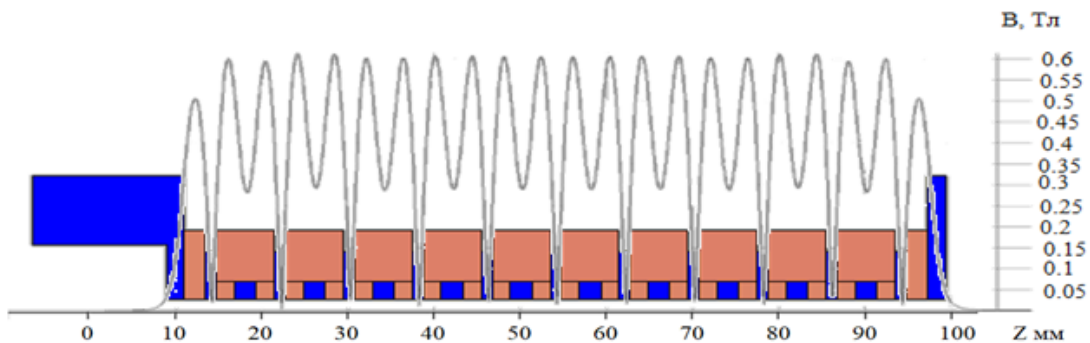


Рис. 2. Распределение осевой компоненты индукции магнитного поля с третьей гармоникой

На рисунке 3 представлен результат расчета электронной пушки с требуемыми параметрами электронного потока и расчет электронного потока с учетом поперечных скоростей электронов в МПФС в протяженном канале транспортировки.

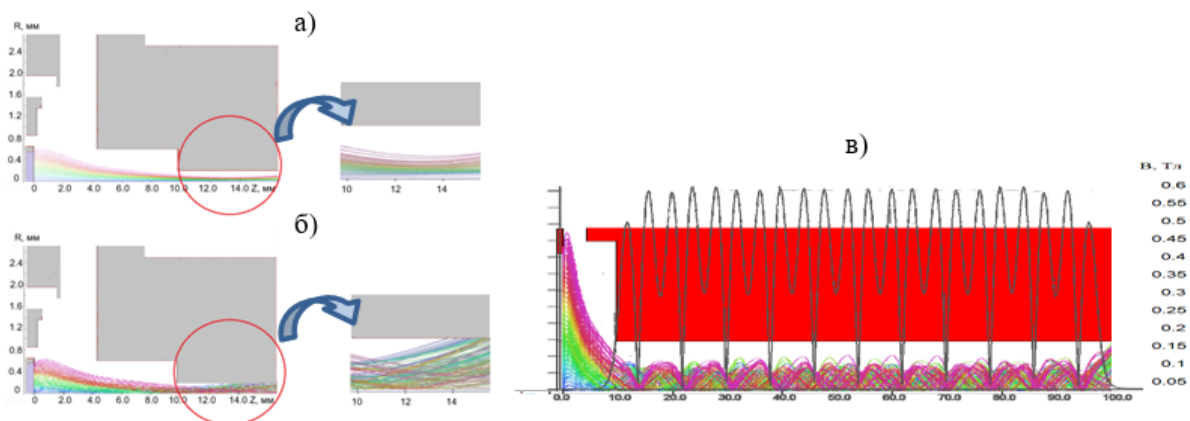


Рис. 3. Расплывание пучка под действием собственного пространственного заряда (а, б) и его транспортировка в МПФС (в)

На рисунке 3, а влияние поперечных скоростей не учитывалось, а на рисунках 3, б и в – учитывалось.

Библиографический список

1. Morev S.P., Sychev N.A. On the design of electron-optical systems of microwave ED for the 220 GHz /International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE), 26-27 Sept. 2024, pp. 22-24, DOI: 10.1109/APEDE59883.2024
2. Морев С.П., Пензяков В.В. "Проектирование аксиально-симметричных ЭОС с учетом поперечных скоростей" Лекции по СВЧ электронике. IX Зимняя школа-семинар. Саратов, 1993.- С.140-152.
3. 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.
4. F. Zhang, W. Liu, Zh. Jin et al "Design and Simulation for 100-Watt-Class 340-GHz Extended Interaction Klystron," IEEE Trans on ED, vol. 69, No. 11, pp. 6329-6335, 2022.
5. 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
6. 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
7. Результаты модернизации конструкции электронно-оптической системы с кольцевым катодом в ЛБВ С низковольтным управлением/Филин Ю.Ю., Морев С.П., Коломийцева Н.М., Именина К.С., Комраков П.А.//Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника. – 2024. – Вып.3(563), – С. 55 – 63.
8. Дармаев А.Н., Морев С.П. Приближенная оценка величин высших гармонических составляющих распределения магнитного поля в МПФС с магнитомягкими вставками/ Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2006/ Материалы международной научно-технической конференции, Саратов, 2006, С. 375-381

УДК 621.385.632; ГРНТИ 47.29.37

МАГНИТНАЯ ФОКУСИРУЮЩАЯ СИСТЕМА ДЛЯ МНОГОЛУЧЕВОГО СВЧ УСИЛИТЕЛЯ W-ДИАПАЗОНА

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

АО «НПП «Исток» им. Шокина»,

Российская Федерация, г. Фрязино, info@istokmw.ru

Аннотация. В работе рассмотрена возможность создания магнитной фокусирующей системы (МФС) с униполярным распределением осевой компоненты индукции магнитного поля, предназначенной для транспортировки электронного потока в протяженном канале многолучевой электронно-оптической системы (ЭОС) вакуумного СВЧ усилителя, предназначенного для работы в W-диапазоне. Проведено проектирование МФС и расчет транспортировки электронного потока в многолучевой ЭОС с током 0.45 А при ускоряющем напряжении 10 кВ в пролетном канале 0.4 мм.

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

MAGNETIC FOCUSING SYSTEM FOR THE MULTIPATH MICROWAVE AMPLIFIER W-BAND

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

JSC NPP Istok named after Shokin”,

Russian Federation, Fryazino,, info@istokmw.ru

The summary. The paper considers the possibility of creating a magnetic focusing system (MFS) with a unipolar distribution of the axial component of magnetic field induction, designed to transport an electron stream in an extended channel of a multipath electron-optical system (EOS) of a vacuum microwave amplifier designed to operate in the W-band. The design of the MFC and the calculation of the electron flow transportation in a multipath EOS with a current of 0.45 A at an accelerating voltage of 10 kV in a span channel of 0.4 mm have been carried out.

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

Введение

Продвижение в коротковолновую часть миллиметрового и субмиллиметрового (терагерцевого) диапазонов продолжает оставаться одним из активно развивающихся направлений электронной техники при разработках новых поколений компактных усилителей СВЧ. При относительно невысоких (15-30 кВ) напряжениях замедляющей структуры основными привлекательными приборами в терагерцевой части СВЧ диапазона являются лампа бегущей волны (ЛБВ) и клистрон с распределенным взаимодействием (КРВ). В работе [1] были представлены результаты разработки однолучевой ЭОС ЛБВ W-диапазона с выходной мощностью 150 Вт при напряжении на замедляющей системе (ЗС), равном 21.6 кВ. Транспортировка электронного потока в этой ЭОС обеспечивалась магнитной периодической фокусирующей системой (МПФС).

В настоящей работе рассмотрена возможность создания МФС, предназначенной для транспортировки электронного потока в многолучевой ЭОС вакуумного СВЧ усилителя W-диапазона с током пучка 0.45 А, при напряжении ЗС равном 10 кВ в пролетном канале диаметром 0.4 мм.

Постановка задачи

В работе [2] при разработке широкополосной ЛБВ было показано, что за счет выбора параметров пространства взаимодействия значение безразмерного параметра $\gamma_e a = \frac{2\pi f a}{\sqrt{2\eta U}}$ (здесь f - частота, $2a$ - диаметр пролетного канала, U – напряжение ЗС) может быть увеличе-

но почти в два раза (от 0.7 до 1.8) при относительно высоких значениях электронного КПД, а в работе [3] даже при еще большем увеличении значения параметра $\gamma_e a$ удалось получить относительно высокие значения электронного КПД для КРВ на частотах в 340 ГГц. В работе [4] при разработке ЛБВ W-диапазона применение повышенного значения параметра $\gamma_e a$ позволило существенно увеличить диаметр пролетного канала и уменьшить величину фокусирующего магнитного поля, при этом за счет оптимизации параметров замедляющей системы удалось сохранить высокие значения электронного КПД [5].

Параметры ЭОС, рассмотренные в работе [1], представлены в таблицах 1-2.

Таблица 1. Параметры ЭОС [1]

Ток пучка, мА	170.0
Напряжение на ЗС, В	21600
Микропервеанс, мкА/В ^{3/2}	0.054
Диаметр катода, мм	2.20
Диаметр канала, мм	0.5
Тип катода	импрегнированный
Плотность тока на катоде, А/см ²	4.5
Плотность тока в пучке, А/см ²	276
Компрессия пучка по площади без учета поперечных скоростей ($U_{max}=0$)	210
Компрессия пучка по площади с учетом поперечных скоростей ($U_{max}=0.7V$)	62

Таблица 2. Параметры МФС [1]

Амплитуда поля на оси, Тл	0.53
Период МПФС, мм	9.0
Параметр магнитного поля	0.3
Бриллюэновский радиус пучка a_p в МФС, мм	0.075
Заполнение канала пучком (R_p/R_{kan}) при $U_{max}=0$ В	0.3
Средний радиус пучка в МФС R_p при $U_{max}=0.7$ В, мм	0.14
Заполнение канала пучком (a_p/R_{kan}) при $U_{max}=0.7$ В	0.56

Уменьшение напряжения на ЗС может быть достигнуто за счет применения много лучевой ЭОС. В качестве примера была рассмотрена 18-лучевая ЭОС, центры катодов которой расположены в одной плоскости на окружности радиуса R, а оси пучков сходятся в этой плоскости от периферии к центру окружности.

Результаты расчётов

Параметры парциальной ЭОС представлены в таблицах 3-4.

Таблица 3. Параметры ЭОС

Ток пучка, мА	25.0
Напряжение на ЗС, В	10000
Микропервеанс, мкА/В ^{3/2}	0.025
Диаметр катода, мм	0.60
Диаметр канала, мм	0.4
Тип катода	импрегнированный
Плотность тока на катоде, А/см ²	8.8
Плотность тока в пучке, А/см ²	80
Компрессия пучка по площади без учета поперечных скоростей ($U_{max}=0$)	24
Компрессия пучка по площади с учетом поперечных скоростей ($U_{max}=0.7V$)	9

Таблица 4. Параметры МФС

Амплитуда поля на оси, Тл	0.215
Период МПФС, мм	$B_0=\text{const}$
Параметр магнитного поля	$B_0=\text{const}$
Бриллюэновский радиус пучка a_p в МФС, мм	0.06
Заполнение канала пучком (R_p/R_{kan}) при $U_{max}=0$ В	0.3
Средний радиус пучка в МФС R_p при $U_{max}=0.7$ В, мм	0.1
Заполнение канала пучком (a_p/R_{kan}) при $U_{max}=0.7$ 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).

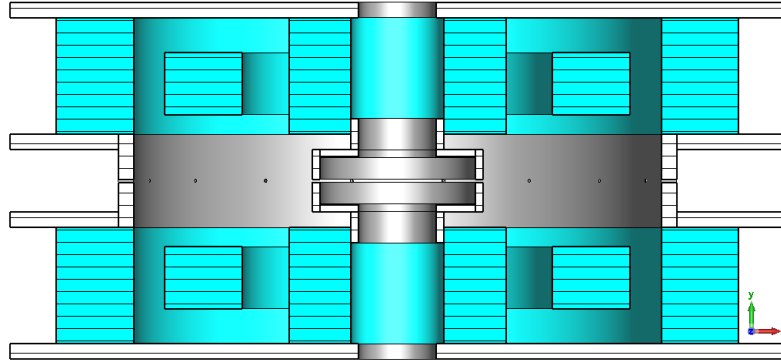


Рис. 1. МФС для многолучевой ЭОС

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

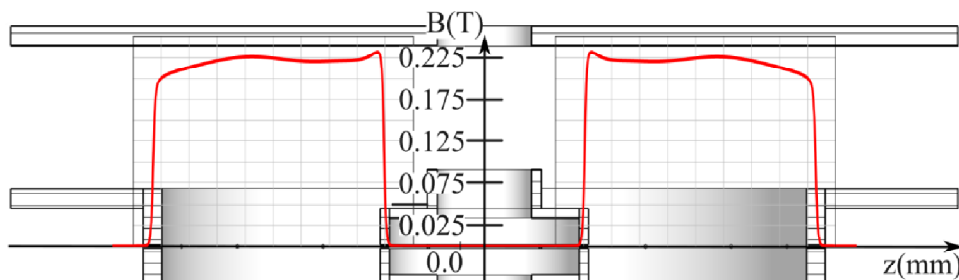


Рис. 2. Распределение магнитного поля вдоль оси парциальной ЭОС (представлена половина конструкции МФС)

Контур электронного потока (ЭП) в предложенной ЭОС получен на основе решения безразмерного уравнения (1) для огибающей ЭП в магнитном поле МФС (рисунок 2) [6].

$$\frac{d^2 R}{dZ^2} + \alpha b(Z) R - \frac{\beta}{R} - \frac{\alpha K}{R^3} - \frac{E_{ph}^2}{R^3} = 0, \quad (1)$$

где $\alpha, \beta, K, E_{ph}^2$ – общепринятые параметры магнитного поля, пространственного заряда и катодных условий и фазового объема ЭП соответственно;

R, Z – нормированные радиус и продольная координата;

$b(Z)$ – нормированная амплитуда магнитного поля (МП).

Результаты расчёта транспортировки ЭП в МП представлены на рисунке 3. Анализ результатов расчёта показал, что учёт влияния поперечных составляющих скоростей электронов привёл к увеличению заполнения пучком пролётного канала с 0.3 до 0.5.

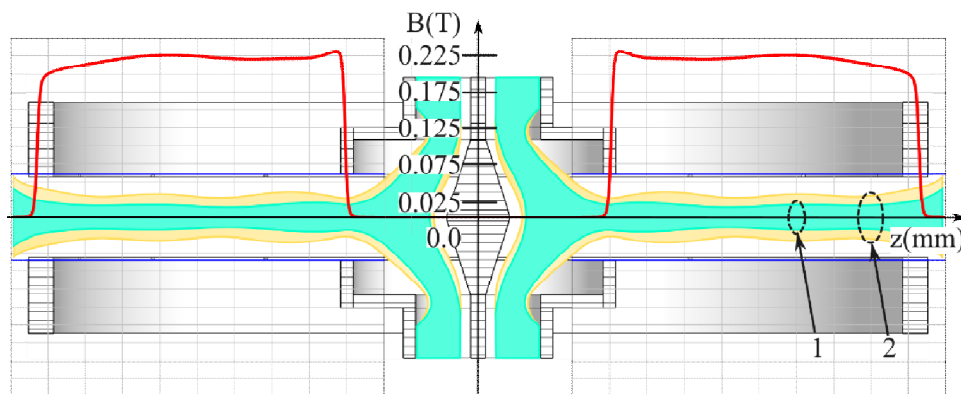


Рис. 3. Граница многоскоростного электронного потока в пролетном канале частичной ЭОС вместе с профилем магнитного поля
 (1 – заполнение ЭП в канале без учёта поперечных скоростей,
 2 – заполнение ЭП в канале с учётом поперечных скоростей)

Заключение

В работе рассмотрена новая конструкция МФС на постоянных кольцевых магнитах с аксиальной и радиальной намагниченностью для фокусировки ЭП усилителя СВЧ W-диапазона. Предложенная конструкция МФС обеспечила одинаковую фокусировку ЭП в одной плоскости по азимуту и возможность увеличения выходной мощности усилителя за счёт роста числа ЭП.

Анализ результатов транспортировки ЭП в МФС с амплитудой 0.215 Тл показал, что при ускоряющем напряжении 10 кВ и частичном токе 25 мА (суммарный 450 мА для 18 лучей) удастся обеспечить прохождение ЭП в канале с заполнением, не превышающим 0.5.

Влияние низкого ускоряющего напряжения питания (10 кВ) и поперечных скоростей приводит к увеличению заполнения ЭП в канале в 1.7 раза.

Библиографический список

1. X. Wang, X. Yang, Z. Guo et al. Study on high-transmission rate W-band electro-optical system and travelling wave tube. Proceedings of the IVEC, 2024.
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. F. Zhang, W. Liu, Zh. Jin et al “Design and Simulation for 100-Watt-Class 340-GHz Extended Interaction Klystron,” IEEE Trans on ED, vol. 69, No. 11, pp. 6329-6335, 2022.
4. 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.
5. 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.
6. Морев С.П., Пензяков В.В. Методы расчета электронных пучков с ненулевым фазовым объёмом: Обзоры по электронной технике. Сер. Электроника СВЧ - М.: ЦНИИ “Электроника”, 1984. - Вып.2(1000). - 43с.

УДК 537.226; ГРНТИ 47.09.53

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ И СТЕКЛЯННЫХ СФЕР

И.М. Томилов, Г.Е. Кулешов

*Национальный исследовательский Томский государственный университет (НИ ТГУ),
Российская федерация, Томск, nikobellik2004@gmail.com*

Аннотация. В работе приведены исследования электромагнитных характеристик композиционных материалов со стеклянными включениями. Рассмотрен процесс изготовления композитов на основе эпоксидной смолы с наполнителем в виде стеклянных микросфер диаметром 800 мкм. Приводится методика измерения электромагнитных параметров волноводным методом в СВЧ диапазоне. Показаны графики частотных зависимостей комплексной диэлектрической проницаемости для образцов с разным процентным содержанием стеклянных микросфер. Сделаны выводы о влиянии стеклянных наполнителей на диэлектрическую проницаемость композитов.

Ключевые слова: комплексная диэлектрическая проницаемость, композиционный материал, эпоксидная смола, стеклянные микросферы, волноводный метод, S-параметры, СВЧ.

ELECTROMAGNETIC PARAMETERS OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON EPOXY RESIN AND GLASS SPHERES

I.M. Tomilov, G.E. Kuleshov

*National Research Tomsk State University (NR TSU),
Russian Federation, Tomsk, nikobellik2004@gmail.com*

The summary. The paper presents studies of electromagnetic characteristics of composite materials with glass inclusions. The process of manufacturing composites based on epoxy resin with a filler in the form of glass microspheres with a diameter of 800 μm is considered. A technique for measuring electromagnetic parameters by a waveguide method in the microwave range is given. Graphs of frequency dependences of complex permittivity for samples with different percentages of glass microspheres are shown. Conclusions are made about the effect of glass fillers on the permittivity of composites.

Keywords: complex permittivity, composite material, epoxy resin, glass spheres, waveguide method, S-parameters, microwave (SHF).

В радиоэлектронной промышленности имеется постоянная потребность в материалах, обеспечивающих поглощение и (или) отражение электромагнитных волн в рабочем диапазоне частот электронной аппаратуры. Выбор подобного материала с требуемыми электромагнитными свойствами основывается на поставленной задаче при разработке конкретного устройства. Поэтому зачастую в качестве радиоматериалов используются композиционные смеси, состоящие из непроводящей матрицы и включений (диэлектрических, полупроводниковых или проводящих). Варьируя концентрацию и состав наполнителей, можно получать материалы с заданными электромагнитными свойствами. Такие материалы позволяют решать поставленную задачу по разработке радиоэлектронных устройств эффективнее и с меньшими финансовыми затратами.

В данной работе объектом исследования является композиционный материал на основе эпоксидной смолы и диэлектрических включений. В качестве диэлектрического включения используются стеклянные микросферы. Исследование электромагнитных характеристик (комплексная диэлектрическая проницаемость, коэффициенты прохождения, отражения и поглощения) данных материалов в СВЧ диапазоне частот является актуальной задачей.

Метод изготовления образцов композитов

В качестве полимерной основы композиционного материала используется эпоксидный клей марки ЭД-20. Наполнителем для композитов выступают стеклянные микросферы со средним диаметром 800 мкм. Их контроль осуществлялся по средствам оптической мик-

роскопии с помощью цифрового микроскопа Levenhuk D400T. Изображения микросферических диэлектрических включений представлены на рисунке 1.

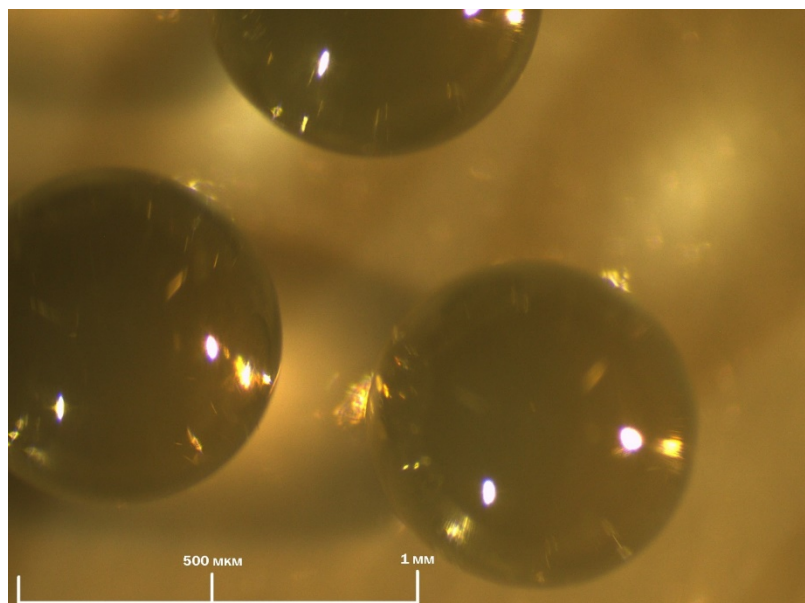


Рис. 1. Изображение стеклянных микросфер диаметром 800 мкм

Для изготовления образцов композитов используется разборная фторопластовая форма, соответствующая размерам измерительной коаксиальной ячейки. В данную форму заливается эпоксидная смола ЭД-20, смешанная с отвердителем ПЭПА, после вносятся стеклянные микросферы. Предварительно все исходные компоненты взвешиваются на аналитических весах с погрешностью не более 0,5 мг в соответствующих массовых соотношениях. Полученная композиционная смесь подвергается ультразвуковой обработке и тщательно перемешивается до однородного состояния. Далее, после окончательной полимеризации образца, производится его механическая обработка. Она включает в себя доработки толщины образца, внешнего и внутреннего диаметра. Итоговый экспериментальный образец представляет собой коаксиальную шайбу толщиной 2,25 мм с внешним диаметром 7 мм и внутренним диаметром 3 мм. Общая схема изготовления образца представлена на рисунке 2.



Рис. 2. Схема процесса изготовления образцов

Методика исследования

Исследование электромагнитных характеристик экспериментальных образцов осуществлялось волноводным методом с использованием коаксиальной измерительной ячейки ($d_{\text{внеш.}} = 7$ мм, $d_{\text{внут.}} = 3$ мм) [1]. Измерения проводились на векторном анализаторе цепей Р4М-18 фирмы «Микран» в диапазоне от 100 МГц до 18 ГГц. В используемой методике измеряются S -параметры матрицы рассеяния (коэффициенты отражения и прохождения) и фазовые характеристики волновода без образца и с образцом [2]. Далее вычисляется коэффициент поглощения ($A=100-T-R$). На основе полученных данных, с учетом толщины образца, по модернизированной методике Беккера-Джарвиса, рассчитывались значения комплексной диэлектрической проницаемости [3].

У данной методики измерений имеются и определенные недостатки. Прежде всего это высокая погрешности при расчёте диэлектрической проницаемости в случае наличия зазора между металлическими стенками волновода и экспериментальным образцом [2, 3]. При этом для образцов правильной формы, не обладающих высокими значениями диэлектрической проницаемости, данный недостаток имеет незначительное влияние на результаты.

Результаты исследования

На рисунках 3-5 представлены результаты измерения электромагнитного отклика от образца из чистой эпоксидной смолы и образцов композитов с включениями стеклянных микросфер.

На всех представленных зависимостях имеется область резонансного изменения электромагнитного отклика, где коэффициент прохождения снижается, а поглощение возрастает. Она обусловлена наличием объемного четвертьволнового резонанса на толщине образца. Для чистой эпоксидной смолы область четвертьволнового резонанса менее выражена и находится в диапазоне 16–17 ГГц. Для композитов она более выражена и сдвигается в область 14 ГГц, что обусловлено более высокими значениями диэлектрической проницаемости.

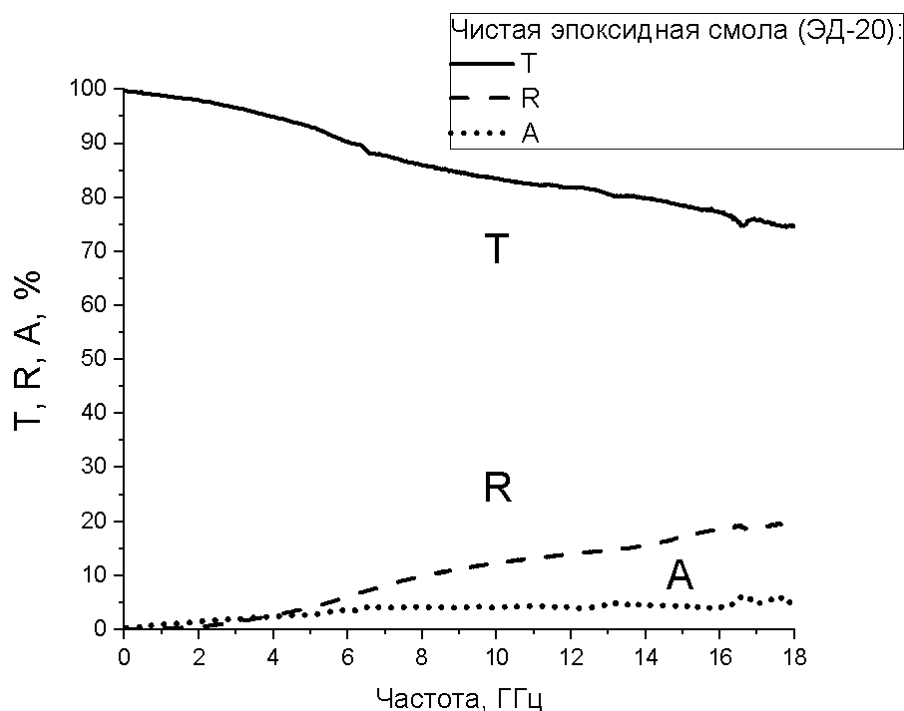


Рис. 3. Электромагнитный отклик от образца из чистой эпоксидной смолы ЭД-20

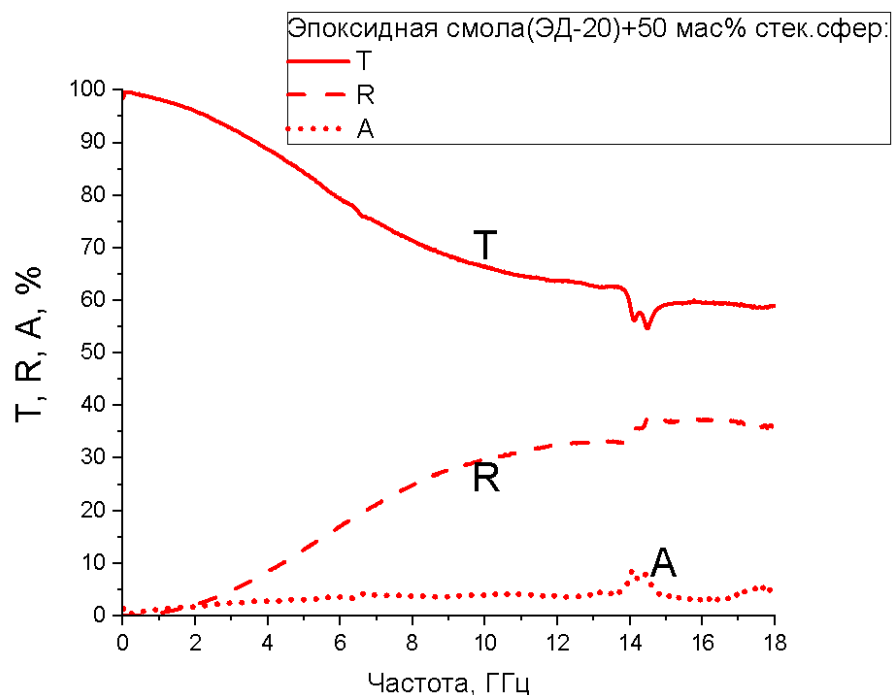


Рис. 4. Электромагнитный отклик образца композита с добавлением 50 мас.% стеклянных микросфер

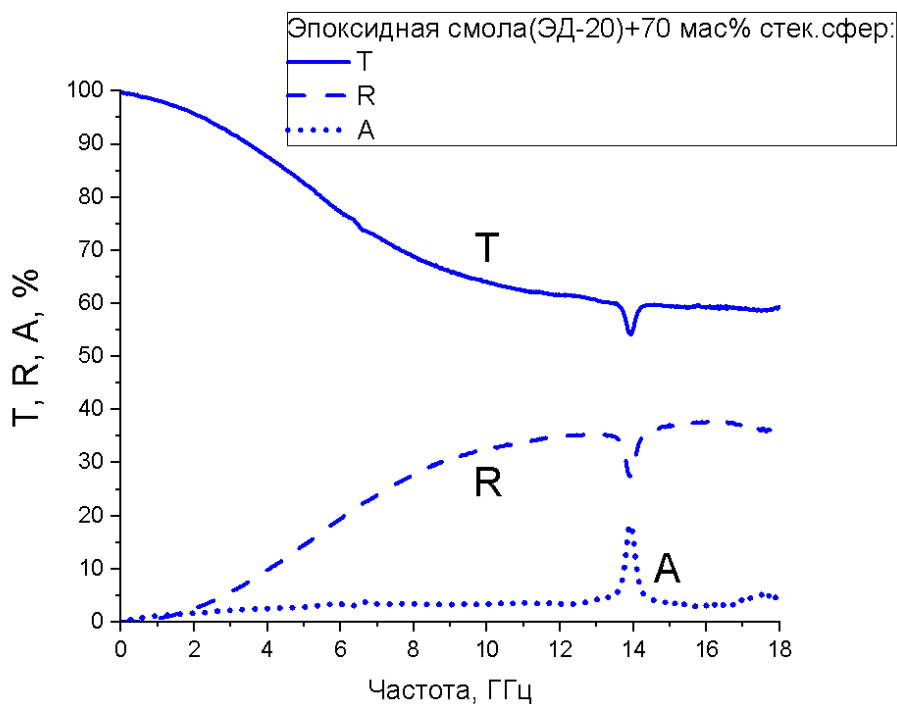


Рис. 5. Электромагнитный отклик образца композита с добавлением 70 мас.% стеклянных микросфер

Из графиков видно, что коэффициент прохождения (T) плавно убывает с ростом частоты. При этом он уменьшается со 100% до 80% для чистой эпоксидной смолы и до 60% для композита с 70 мас.% стеклянных микросфер. Это показывает, что в диапазоне частот до 18 ГГц исследованные материалы не могут использоваться в качестве экранирующих покрытий.

При этом с ростом частоты растет и коэффициент отражения, увеличиваясь с 0% до 20% (рис. 3) на частоте 18 ГГц для чистой эпоксидной смолы. При добавлении наполнителя в виде стеклянных микросфер коэффициент отражения увеличивается практически в два раза и достигает 40%.

Коэффициент поглощения во всех случаях в среднем не превышает 5%, за исключением области объемного резонанса, поэтому композиты со стеклянными включениями могут быть использованы в качестве радиопрозрачных материалов только на частотах до 2 ГГц.

На рисунке 6 показаны результаты расчёта комплексной диэлектрической проницаемости образцов на основе чистой эпоксидной смолы ЭД-20 и образцов из эпоксидной смолы с содержанием 50 мас.% и 70 мас.% стеклянных микросфер. Повышение массы содержащихся в образце стеклянных микросфер приводит к увеличению диэлектрической проницаемости образца.

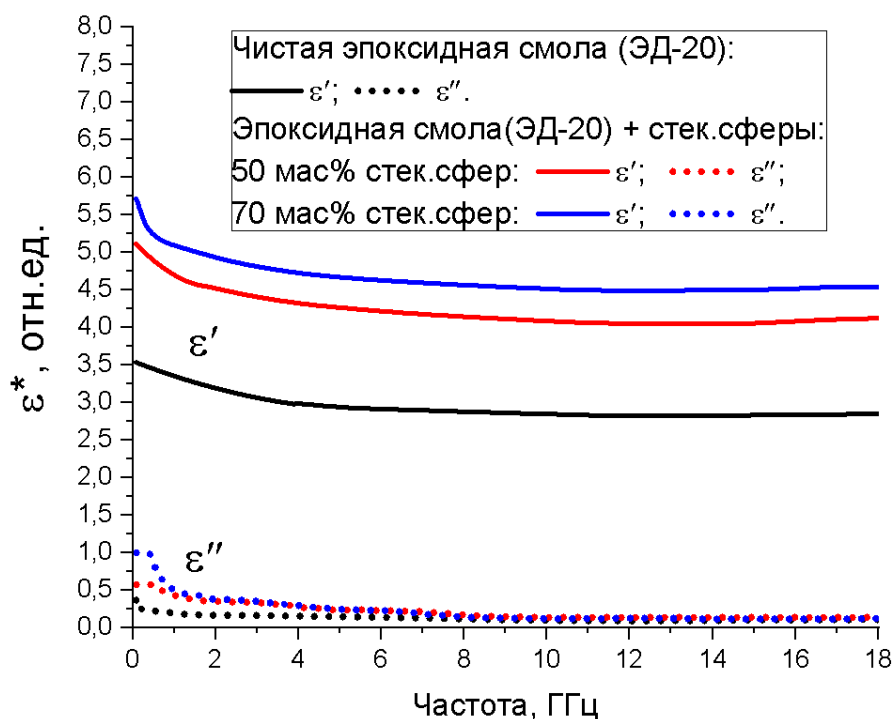


Рис. 6. Результаты исследований комплексной диэлектрической проницаемости экспериментальных образцов на основе эпоксидной смолы и стеклянных микросфер

Полученные результаты свидетельствуют о зависимости величины диэлектрической проницаемости от массового содержания стеклянных микросфер в композите — увеличение массы микросфер в композите приводит к линейному увеличению диэлектрической проницаемости. Это подтверждает ранее сделанные выводы.

Работа проведена на оборудовании ЦКП «Центр радиофизических измерений, диагностики и исследования параметров природных и искусственных материалов» Национального исследовательского Томского государственного университета.

Библиографический список

1. Колесникова В. М. Волноводный метод измерений электромагнитных параметров материалов в СВЧ диапазоне и оценка погрешности измерений / В. М. Колесникова, Ю. Л. Барин // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. — 2018. — № 9. — Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep18/6/text.pdf>. — дата доступа: 20.02.2025 г.
2. Григорьев А. Д. Новый волноводный метод измерения параметров диэлектриков / А. Д. Григорьев // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. — 2018. — № 5. С. 33–38.
3. Chalapat K, Sarvala K, Li J, Sorin G. Wideband Reference-Plane Invariant Method for Measuring Electromagnetic Parameters of Materials – IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2009, v. 57, – pp. 2257-2267.

УДК 621.385.632.12; ГРНТИ 29.35.45

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОННО-ВОЛНОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ЛАМПЕ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ Ка-диапазона ЧАСТОТ СО СПИРАЛЬНОЙ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ

И.А. Чистяков^{1,2,*}, Д.Н. Золотых^{1,2}, И.П. Медведков¹¹Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Алмаз», Российская Федерация, Саратов²Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,

Российская Федерация, Саратов

*ChistyakovIA@almaz-rpe.ru

Аннотация. Представлены результаты оптимизации электронно-волнового взаимодействия лампы бегущей волны (ЛБВ) О-типа длинноволновой части Ка-диапазона. Для определения значений выходных характеристик была использована программа [3], основанная на решении уравнений взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем замедленной волны в одномерном приближении. Целевой функцией при оптимизации являлась выходная мощность, а варьируемыми параметрами – значения шага спиральной замедляющей системы (СЗС). Показано, что с использованием суррогатного метода оптимизации удалось увеличить выходную мощность на 11.8% и коэффициент усиления на 4.9% при неизменных параметрах электрического режима и конфигурации локальных поглотителей СВЧ-энергии. Ключевые слова: лампа бегущей волны (ЛБВ), оптимизация, пространство взаимодействия, Ка-диапазон.

OPTIMIZATION FOR ELECTRON-WAVE INTERACTION IN A KA-BAND TRAVELING-WAVE TUBE WITH A HELICAL SLOW-WAVE STRUCTURE

I.A. Chistyakov^{1,2,*}, D.N. Zolotykh^{1,2}, I.P. Medvedkov¹¹Stock Company «Research-and-Production Enterprise «Almaz», Russia, Saratov²Saratov State University, Russia, Saratov

*ChistyakovIA@almaz-rpe.ru

Annotation. The optimization results of electron-wave interaction in an O-type traveling-wave tube (TWT) for the long-wavelength part of the Ka-band are presented. To determine the output characteristics, a computational program [3] was utilized, which is based on solving the interaction equations between the electron beam and the electromagnetic field of the slow-wave structure in a one-dimensional approximation. The objective function for optimization was the output power, while the varied parameters were the pitch values of the helical slow-wave system (SWS). It is demonstrated that the application of a surrogate optimization method led to an 11.8% increase in output power and a 4.9% increase in gain while maintaining the electrical operation parameters and the configuration of the microwave energy absorbers unchanged.

Keywords: traveling wave tube (TWT), optimization, interaction space, Ka-band.

Введение

Развитие систем передачи данных происходит в нескольких направлениях, включающих в себя увеличение объема и качества передаваемой информации, увеличение плотности каналов связи в частотном диапазоне, внедрение новых способов кодировки информации и модуляции радиосигналов. В совокупности это приводит к ужесточению требований к приёмно-передающей аппаратуре и, как следствие, к ужесточению существующих и появлению новых требований к электронной компонентной базе этой аппаратуры. Одним из ярких примеров являются ЛБВ космического назначения – за последние десятилетия существенно изменились требования к линейности данных изделий, наличию и уровню гармонических составляющих в спектре выходного сигнала, амплитудно-фазовым характеристикам. Достижения в области технологий вакуумной электроники и внедрение новых материалов открыло возможности значительного улучшения таких «традиционных» характеристик ЛБВ, как электронный КПД, коэффициент усиления, технический КПД.

Для расчёта характеристик усилителей типа ЛБВ применяется специализированное программное обеспечение [1], большая часть которого разработана коллективами предприятий-изготовителей, что обусловлено специфичностью физических процессов и технологий производства данного типа изделий. Очевидно, что в процессе разработки и проектирования ЛБВ для удовлетворения всем достаточно жёстким и иногда противоречивым требованиям требуется применение различных методов оптимизации. Если целевая функция относительно проста и количество варьируемых параметров невелико, то оптимизационные алгоритмы могут быть достаточно легко встроены в специализированное программное обеспечение [2], и получены соответствующие оптимальные решения, удовлетворяющие совокупности нескольких выходных характеристик ЛБВ.

В случае, когда целевая функция многомерна и количество варьируемых параметров достаточно велико, оптимизационные алгоритмы требуют особого внимания и прямое применение классических методов оптимизации не всегда может быть оправдано с точки зрения временных затрат и получаемых результатов. В этом случае интерес представляют алгоритмы оптимизации, основанные на вероятностных моделях. Кроме того, в настоящий момент на рынке программного обеспечения представлен ряд программных продуктов, позволяющих реализовать подобные оптимизационные алгоритмы, основанные на принципах суррогатного моделирования. Одним из таких продуктов является программный пакет DT-Seven [3].

В данной статье рассмотрены предварительные результаты использования данного программного обеспечения для решения задачи максимизации электронного КПД ЛБВ космического назначения. Решение задачи оптимизации конструкции ЛБВ с учётом остальных выходных характеристик станет предметом дальнейших исследований в данном направлении.

Постановка задачи

Суть алгоритма оптимизации заключается в поиске наиболее эффективных и оптимальных решений поставленной задачи с учетом накладываемых ограничений. При численном моделировании электронно-волнового взаимодействия в ЛБВ на выходные характеристики оказывают существенное влияние следующие параметры:

- электродинамические (геометрия ВЧ-пакета, свойства материалов);
- конструктивные (длина пространства взаимодействия, закон распределения ВЧ-потерь, вносимых локальными поглотителями СВЧ-энергии, разрывы);
- параметры режима (частота входного сигнала, ускоряющее напряжение, ток электронного пучка, мощность входного сигнала и т.д.).

На конструктивные параметры наложены строгие технологические и производственные ограничения, а соблюдение требований технического задания обязывает сохранять постоянными параметры электрического режима. Варьирование величин электродинамических параметров в данном случае может привести к заметному улучшению значений выходных характеристик.

Постановку задачи можно сформулировать следующим образом: *необходимо определить такое распределение закона изменения шага СЗС, которое обеспечило бы наибольшее значение электронного КПД (выходной мощности).* В данной работе функцией цели выбрана выходная мощность, а варьируемыми параметрами – пять значений шагов спирали, т.е. периода СЗС.

Интеграция оптимизационных алгоритмов с программой расчета выходных характеристик [3] была осуществлена с использованием программного пакета DT-Seven [3]. На рис. 1 представлена многоуровневая расчетная схема численной модели.

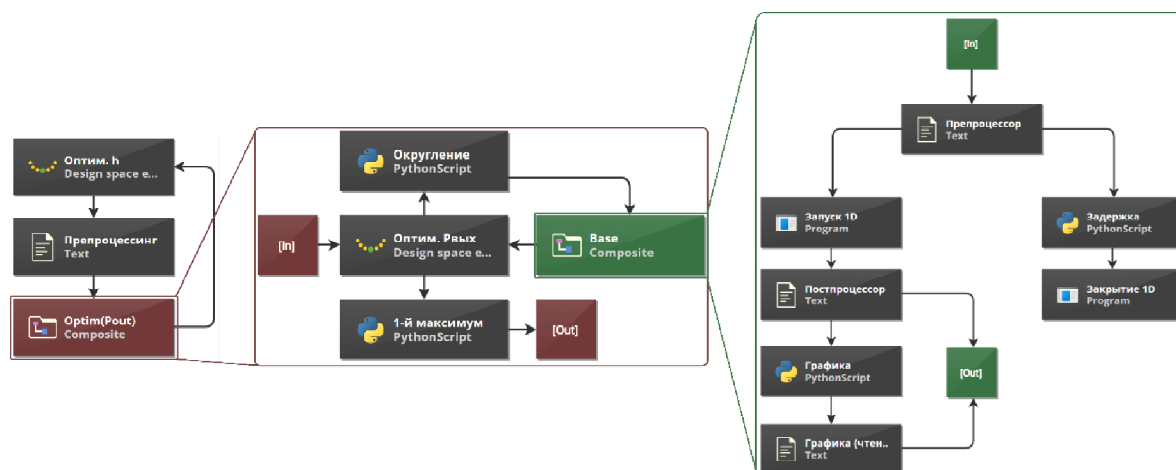


Рис. 1. Многоуровневая расчетная схема оптимизации электронно-волнового взаимодействия

Суррогатная оптимизация электронно-волнового взаимодействия

Сложность оптимизационных задач при проектировании различных радиотехнических систем, включая ЛБВ, постоянно растет. Развитие численного моделирования позволило анализировать ранее недоступные по масштабу и сложности модели. Нахождение оптимальной конфигурации пространства взаимодействия ЛБВ сводится к поиску глобального экстремума сложной нелинейной функции. Один из способов сделать такой анализ практически осуществимым – использование суррогатных моделей или аппроксимаций, благодаря которым удастся сократить число вызовов вычислительно дорогой модели и ускорить процесс оптимизации. В литературе рассмотрено множество методов построения суррогатных моделей, их обзор приведен в [4]. В данной книге подробно рассматриваются формальные постановки задачи аппроксимации и соответствующая математическая теория.

Для достижения поставленных целей использована двухуровневая модель:

1. использование метода градиентного спуска [5] для заданной конфигурации пространства взаимодействия с целью поиска точки, соответствующей режиму насыщения выходной мощности;
2. суррогатное моделирование с варьированием пяти шагов СЗС для поиска оптимальной конфигурации пространства взаимодействия с максимальным электронным КПД.

Суррогатная модель оптимизации основана на методе кригинга (моделирования с помощью гауссовских процессов) [5] с применением подхода «вероятности улучшения» при выборе новых точек-кандидатов. Метод вероятности улучшения направлен на выбор точек, в которых вероятность улучшения текущего оптимума максимальна.

Следует отметить, что суррогатное моделирование в данном случае показало высокую эффективность ввиду того, что в варьируемые параметры входят лишь пять шагов из закона изменения.

Первоначальная конфигурация закона изменения шага СЗС (рис. 3, кривая – 1), которая в дальнейшем подверглась оптимизации, выбиралась из условий применения ЛБВ, требуемых выходных характеристик, знаний физики процесса, опыта проектирования и имеющихся аналогов.

Общая схема методов исследования функции с использованием суррогатных моделей

На рисунке 2 представлена общая схема метода исследования функции с использованием суррогатной модели, которая применялась в данной работе. На начальном этапе осуществлено предварительное исследование (рис. 2 (1)) с целью первоначального определения интервалов варьируемых параметров, которые подбирались исходя из требуемого уровня замедления для сохранения ускоряющего напряжения и поддержания условий синхронизма.

Далее произведено построение начальной обучающей выборки данных (рис. 2 (2)) с учетом предварительного исследования (см. рис. 4 (а)) путём сэмплирования пространства параметров в порядке, заданном схемой латинского гиперкуба (рис. 2 (2)). Латинский гиперкуб обеспечил равномерное покрытие пространства, снижая вероятность попадания в область локального минимума. Затем, с использованием программы [1] происходило наполнение модели данными из обучающей выборки, где варьируемым (входным) параметрам присваивались соответствующие выходные, после чего формировался исходный набор данных для обучения.



Рис. 2. Общая схема метода исследования функции с использованием суррогатной модели

После чего была построена суррогатная модель, используя собранные на предыдущем этапе обучающие данные. Следует отметить, что предугадать количество тренировочных примеров, необходимых для построения точной суррогатной модели заранее затруднительно. Именно поэтому в алгоритм заложено постепенное обогащение набора обучающих данных (с использованием подходов, предназначенных для распределения новых точек кандидатов по областям (рис. 2 (4)), где суррогатная модель демонстрирует недостаточную точность или не определена, а также где расположены наиболее интересные комбинации параметров конструкции). На заключительном этапе происходило обогащение обучающей выборки: выполнялся многоитеративный прогон модели для получения соответствующих выходных значений, без использования программы расчета выходных характеристик. Затем суррогатная модель повторно обучалась (рис. 2 (5-6)) на дополненном наборе обучающих данных [6-7].

Первым этапом в оптимизации служила конфигурация пространства взаимодействия, полученная последовательной ручной оптимизацией закона изменения, со средней выходной мощностью ≈ 140 Вт и коэффициентом усиления ≈ 53 дБ. В качестве варьируемых параметров выбраны 5 значений шага из закона изменения СЗС, представленного на рис. 4 (б) (кривая – 1). Прочие параметры ВЧ-пакета, электрического режима и распределения локальных поглотителей СВЧ-энергии оставались неизменными.

На рисунке 3 изображены результаты численного анализа электронно-волнового взаимодействия с использованием алгоритмов оптимизации.

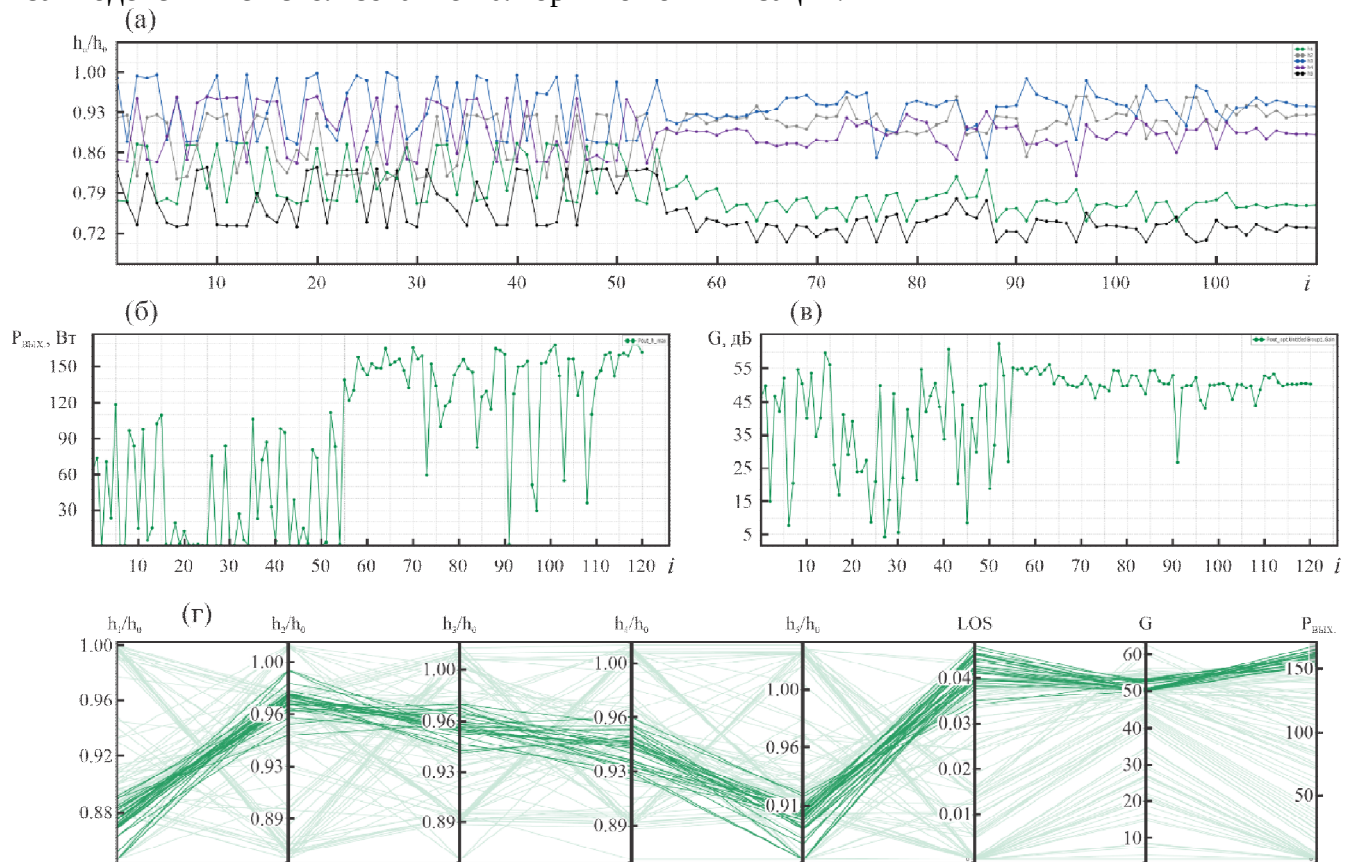


Рис. 3. Результаты численного анализа пространства взаимодействия с использованием алгоритмов оптимизации: h_n/h_0 – нормированный шаг СЗС; (а) – зависимость варьируемых целевых параметров от номера итерации; (б) – зависимость целевой функции от номера итерации; (в) – зависимость коэффициента усиления от номера итерации; (г) – диаграмма параллельных координат целевой функции, варьируемых и отслеживаемых переменных

На рисунке 4 представлены интервалы изменения варьируемых параметров (а) и сопоставление закона изменения шага СЗС (б) в составе ВЧ-пакета рассматриваемой ЛБВ, где 1 – вариант до начала оптимизации, 2 – вариант после проведения оптимизации с наилучшей комбинацией варьируемых параметров.

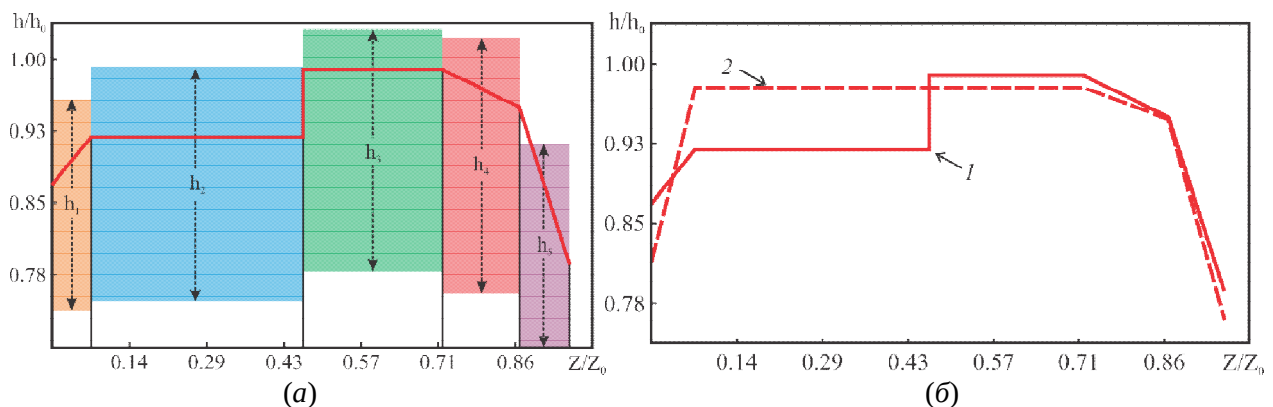


Рис. 4. Интервалы изменения варьируемых параметров (а) и закон изменения шага СЗС (б): h_n/h_0 , Z/Z_0 – нормированный шаг СЗС и продольная координата, соответственно; 1 – вариант до начала оптимизации; 2 – вариант после проведения оптимизации

Оптимальная конфигурация закона изменения шага позволила получить среднюю выходную мощность на уровне ≈ 156 Вт и коэффициент усиления ≈ 55.7 дБ. Сопоставление расчетных вариантов приведено на рисунке 5.

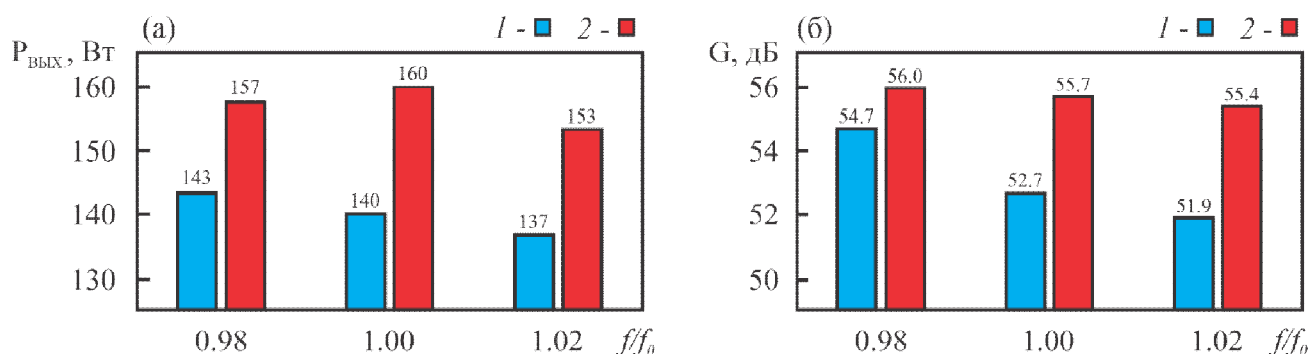


Рис. 5. Гистограммы распределений выходной мощности (а) и коэффициента усиления (б) в режиме насыщения выходной мощности: 1 – вариант до начала оптимизации; 2 – вариант после оптимизации

Анализ данных, представленных на рисунке 5 показал, что использование методов оптимизации позволило увеличить выходную мощность на 16 Вт (11.8% относительных) в среднем по диапазону, а коэффициент усиления на 2.6 дБ (4.9% относительных).

Заключение

В данной работе рассмотрен подход к оптимизации электронно-волнового взаимодействия ЛБВ О-типа. Разработана многоуровневая расчетная схема, включающая авторскую программу расчета выходных характеристик [1] и алгоритмы суррогатной оптимизации, основанные на гауссовских процессах.

Оптимизация закона изменения шага спирали с использованием суррогатного моделирования позволила: существенно сократить время поиска оптимального решения, увеличить выходную мощность на 16 Вт (11.8%) в среднем по диапазону, повысить коэффициент усиления на 2.6 дБ (4.9%), а также снизить перепады выходной мощности и коэффициента усиления в рабочей полосе частот.

Применение гауссовских процессов в суррогатной модели позволило эффективно аппроксимировать сложную зависимость выходных характеристик от параметров конструкции, а также адаптивно выбирать новые точки для вычислений. Разработанная многоуровневая схема может быть расширена и использована для оптимизации «тонких» параметров ЛБВ, что также является перспективным направлением для дальнейших исследований.

Также планируется сравнение различных методов оптимизации, включая как простейшие базовые алгоритмы: полный перебор, метод Розенброка, так и более сложные подходы. Данные исследования позволят определить наиболее эффективные подходы для оптимизации параметров ЛБВ с учетом точности, вычислительных и временных затрат, а также устойчивости к локальным минимумам.

Библиографический список

1. Ильина Е.М., Филатов В.А., Конторин Ю.Ф. Усовершенствованные одномерная нелинейная модель и программа расчета выходных характеристик ЛБВ //Материалы XII Зимней школы-семинара по СВЧ электронике и радиофизике. Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж». – 2002. – С.
2. Роговин В.И., Тюрин Д.А. Проектирование пространства взаимодействия лампы бегущей волны с использованием метода оптимизации //Радиотехника. – 2020. – Т. 84. – №. 3. – С. 54-60.
3. DATADVANCE / [Электронный ресурс] // Программное обеспечение для исследования и оптимизации моделей : [сайт]. — URL: <https://www.datadvance.ru/> / <https://dt.calscenter.ru/> (дата обращения: 20.02.2025).

4. Sobester A., Forrester A., Keane A. Engineering design via surrogate modelling: a practical guide. – John Wiley & Sons, 2008.
5. Нестеров Ю.Е. Методы выпуклой оптимизации. – 2007.
6. Koziel S., Leifsson L. Surrogate-based modeling and optimization. – New York : Springer, 2013.
7. Jiang P., Zhou Q., Shao X. Surrogate model-based engineering design and optimization. – Berlin/Heidelberg, Germany : Springer, 2020.

УДК 621.3.032.26, 621.385.6; ГРНТИ 47.29.37

ВЛИЯНИЕ НЕСООСНОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ МНОГОЛУЧЕВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА

И.О. Чигуров*, М.В. Рахматулин, Д.Л. Шалашова****

**АО «Научно-производственное предприятие «Алмаз»,
Россия, Саратов, chigurov@gmail.com,*

***Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.,
Россия, Саратов, michaelrakhmatulin@yandex.ru*

Аннотация. В работе представлены результаты трехмерного моделирования траекторий электронного потока многолучевой электронной пушки в программе CST Particle Studio. Показано влияние на уровень токопрохождения угловой, радиальной и комбинированной (угловой и радиальной) несоосностей управляющей сетки многолучевой электронной пушки в области влета в анодный блок. Установлено, что наибольшее влияние на траекторию электронного потока оказывает радиальная несоосность управляющей сетки.

Ключевые слова: многолучевая электронная пушка, электронный поток, токопрохождение, несоосность.

INFLUENCE OF MISALIGNMENT OF CONSTRUCTION ELEMENTS OF A MULTIBEAM ELECTRON GUN ON THE FORMATUION OF ELECTRON FLOW

I.O. Chigurov*, M.V. Rakhmatulin, D.L. Shalashova****

**JSC "Research and Production Enterprise 'Almaz',
Russia, Saratov, chigurov@gmail.com,*

***Saratov State Technical University named after Gagarin Y.A., Saratov, Russia, . Gagarin Y.A.,
Russia, Saratov, michaelrakhmatulin@yandex.ru*

Abstract. The paper presents the results of three-dimensional modeling of electron flux trajectories of a multibeam electron gun in the CST Particle Studio program. The influence of angular, radial and combined (angular and radial) misalignment of the control grid of the multibeam electron gun in the region of the flight into the anode block on the level of current flow is shown. It is found that the radial misalignment of the control grid has the greatest influence on the electron flux trajectory.

Keywords: multibeam electron gun, electron flow, current flow, misalignment.

Многолучевые электронные пушки находят широкое применение в различных типах электровакуумных приборах, таких как лампы бегущей волны (ЛБВ) и многолучевые клистроны (МЛК) [1-3]. При создании СВЧ приборов типа О с протяженными электронными пучками возможны перекосы отдельных элементов конструкции относительно геометрической оси замедляющей системы [4]. Это приводит к нарушению аксиальной симметрии электронного пучка, вследствие чего происходит ухудшение токопрохождения. Ранее, в работах [4-8] исследовалось влияние несоосностей элементов конструкции в электронно-оптических системах (ЭОС) ламп бегущей волны на качество формирования электронных потоков. При этом влияние несоосностей элементов конструкции многолучевых ЭОС мало исследовано. В работе [9] представлены результаты качественной оценки влияния несоосности управляющей сетки многолучевой электронной пушки на траекторию электронных потоков.

Целью данной работы является оценка влияния на уровень токопрохождения угловой, радиальной и комбинированной (угловой и радиальной) несоосности управляющей сетки многолучевой электронной пушки в области влета электронного пучка в анодный блок.

Методика исследования

В программе CST Particle Studio [10] было проведено моделирование траектории заряженных частиц в электростатических полях. На рисунке 1 представлена 3D – модель многолучевой электронной пушки, построенной в программе CST Particle Studio. На рисунке 1 приняты следующие обозначения: 1 – девятнадцатилучевой катод, 2 – управляющая сетка, 3 – анод. Для исследования влияния угловой несоосности на траекторию электронного потока выбрано максимально возможное значение отклонения управляющей сетки $0,5^\circ$. Для исследования влияния радиальной несоосности на траекторию электронного потока значение смещения управляющей сетки составляет 0,03 мм.

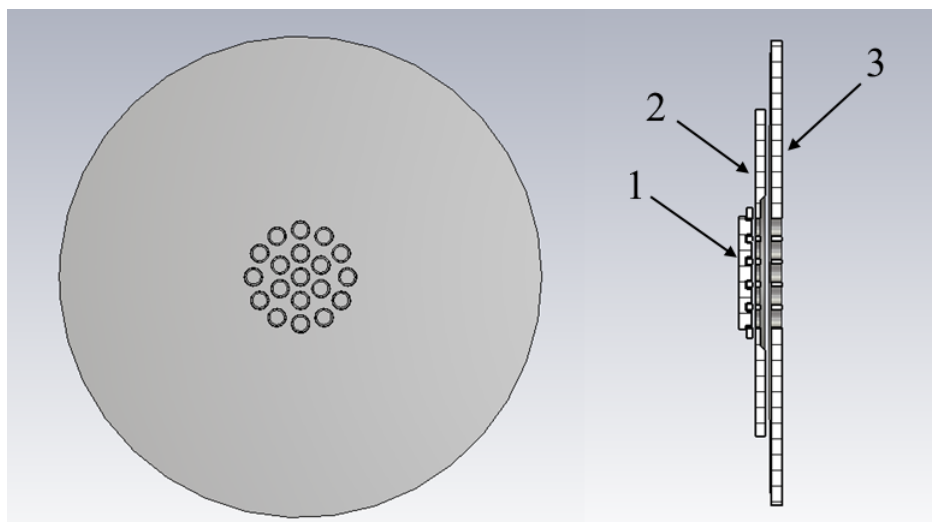


Рис. 1. 3D-модель многолучевой электронной пушки

Результаты исследования и обсуждение

На рисунке 2 представлены результаты расчета траекторий электронных потоков в многолучевой пушке при отсутствии отклонений управляющей сетки. На рисунке 3 представлен график поперечного сечения траекторий электронных потоков вдоль оси Z при отсутствии отклонений управляющей сетки.

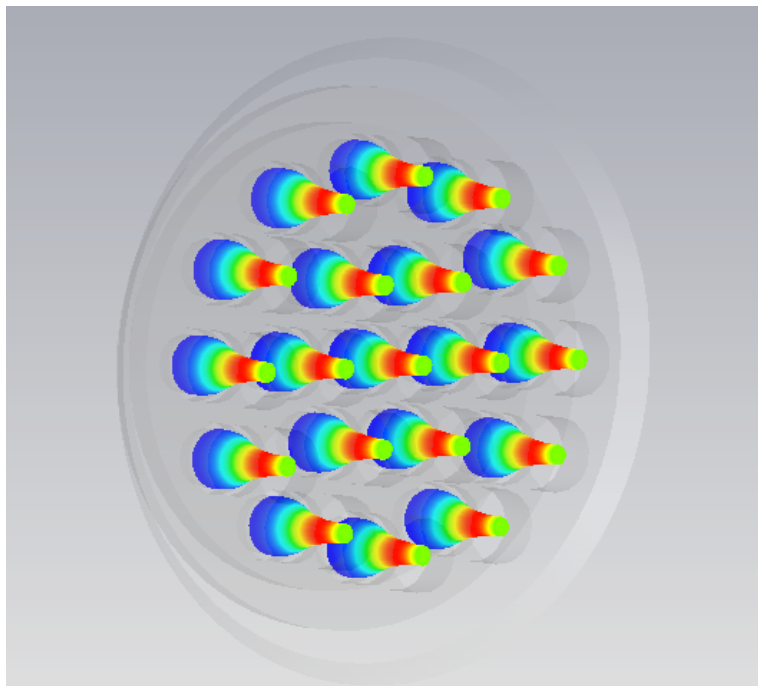


Рис. 2. Результат расчета траекторий движения заряженных частиц в многолучевой пушке при отсутствии отклонений управляющей сетки

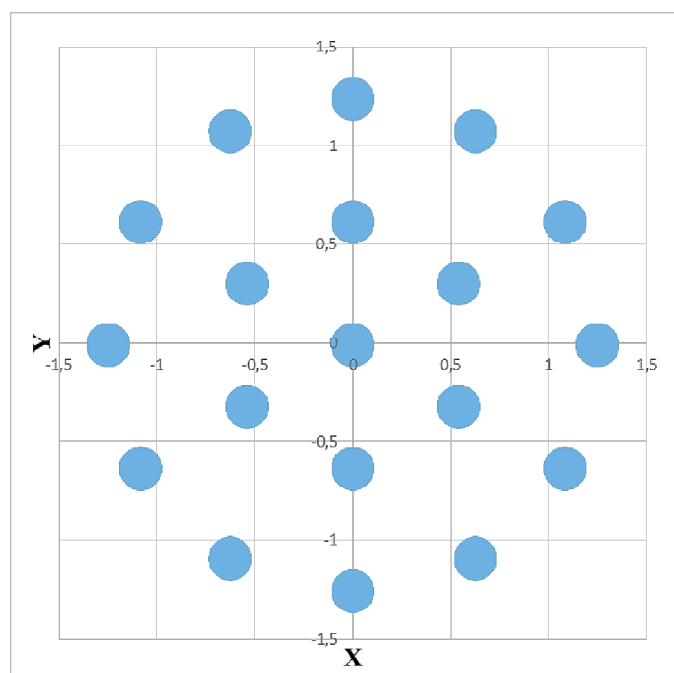


Рис. 3. Изменение вдоль координаты Z поперечного сечения электронных потоков при отсутствии отклонений управляющей сетки.

Для оценки влияния угловой, радиальной и комбинированной несоосностей управляющей сетки относительно многолучевого катода и анода на траекторию электронных потоков был проведен ряд расчетов:

- смещение управляющей сетки относительно многолучевого катода и анода на 0,03 мм;
- наклон управляющей сетки относительно многолучевого катода и анода на $0,5^\circ$;

– смещение на 0,03 мм и наклон на $0,5^\circ$ управляющей сетки относительно многолучевого катода и анода. Результаты расчетов траекторий электронных потоков представлены на рисунках 4-6.

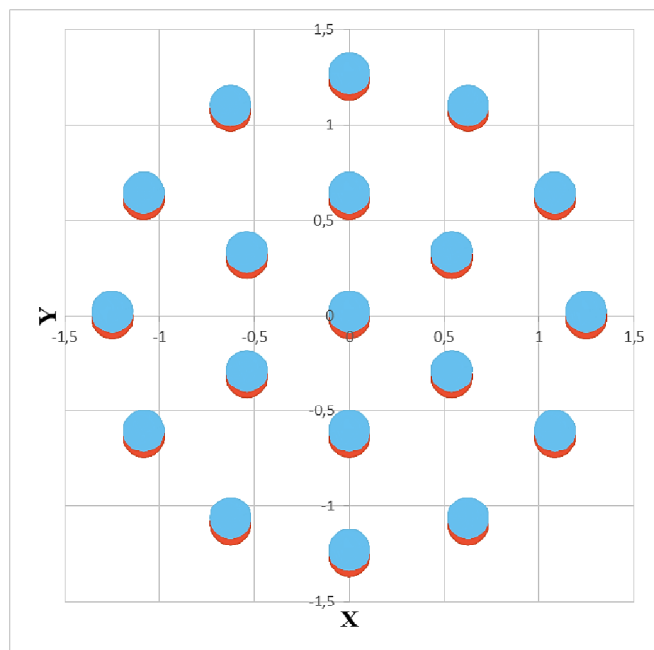


Рис. 4. Изменение вдоль координаты Z поперечного сечения электронных потоков при смещении управляющей сетки на 0,03 мм. Синий – электронные потоки без отклонений управляющей сетки;
Красный – траектории электронных потоков при смещении управляющей сетки на 0,03 мм

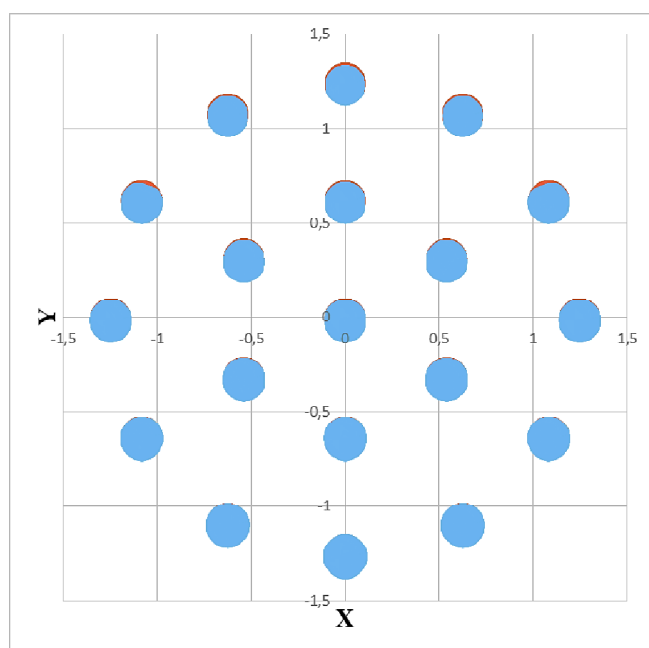


Рис. 5. Изменение вдоль координаты Z поперечного сечения электронных потоков при наклоне управляющей сетки на $0,5^\circ$. Синий – электронные потоки без отклонений управляющей сетки;
Красный – траектории электронных потоков при наклоне управляющей сетки на $0,5^\circ$

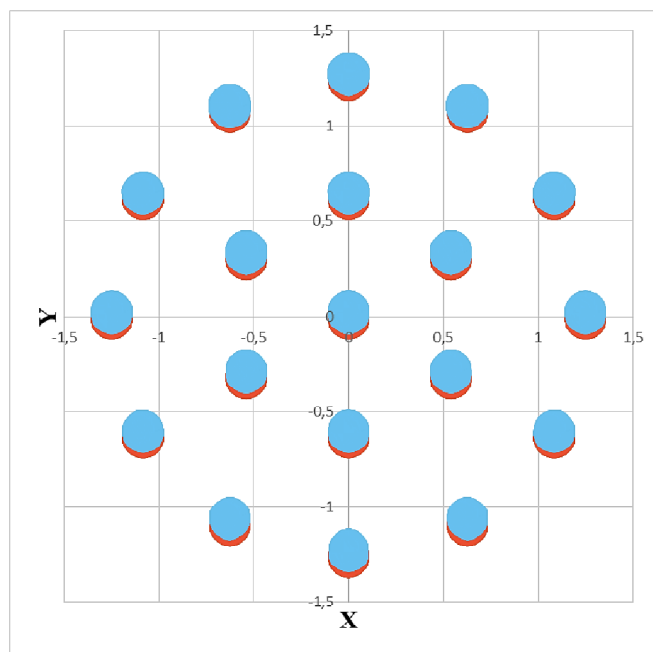


Рис. 6. Изменение вдоль координаты Z поперечного сечения электронных потоков Z при смещении и наклоне управляющей сетки. Синий – электронные потоки без отклонений управляющей сетки;

Красный – траектории электронных потоков при смещении и наклоне управляющей сетки

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что существенное влияние на траекторию электронных потоков влияет радиальная несоосность. Смещение управляющей сетки относительно многолучевого катода и анода в поперечном сечении на 0,03 мм приводит к отклонению электронных потоков от центров пролетных каналов на величину до $\approx 12,4\%$ от радиуса пролетного канала. При комбинированной несоосности отклонение электронных потоков от центров пролетных каналов достигает значения $\approx 12,4\%$. Наклон управляющей сетки относительно многолучевого катода и анода вплоть до 1° не вносит существенного влияния на траекторию электронных потоков. Отклонение электронных потоков относительно центра пролетных каналов достигает 4,6%. При этом наблюдается увеличение уровня токоотбора на 8,8%. Результаты расчета катодного тока представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчета катодного тока при наличии/отсутствии отклонений управляющей сетки

Наличие отклонений	Ток катода, мА
Без отклонений	735
Наклон управляющей сетки на 1°	799
Смещение управляющей сетки на 0,03 мм	729
Смещение управляющей сетки на 0,03 мм и наклон на $0,5^\circ$	798

Библиографический список

1. Калашников, Д. АО "НПП "Торий". Электроника больших мощностей / Д. Калашников // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2022. – № 6(217). – С. 58-63. – DOI 10.22184/1992-4178.2022.217.6.58.62. – EDN CDWBHB.
2. Чигуров, И. О. Исследование системы двух связанных через щель резонаторов миниатюрного многолучевого клистрона в режиме настройки на кратные резонансные частоты / И. О. Чигуров, В. А. Царев, А. В. Ливчина // Журнал радиоэлектроники. – 2018. – № 7. – С. 4. – DOI 10.30898/1684-1719.2018.7.1. – EDN PAAWLB.
3. Емелин, И. А. Многолучевые лампы бегущей волны с пространственно-развитыми замедляющими системами типа петляющий волновод / И. А. Емелин, А. Ю. Мирошниченко, П. Д. Шалаев // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2024. – № 1. – С. 644-648. – EDN GIGALS.

4. Григорьев Ю.А., Рехен Г.А., Батуев Ю.И. Влияние несоосностей элементов конструкции электронно-оптических систем ЛБВ на формирование электронных пучков. - Электронная техника Серия 1 СВЧ- техника. Выпуск 6, 1972.
5. Батуев Ю.И., Григорьев Ю.А., Рехен Г.А. Расчет неламинарных электронных пучков. «Электронная техника», серия 1, «Электроника СВЧ», 1971, выпуск 6, стр.51-60
6. Сукач К.А. Оценка влияния разброса геометрических размеров МПФС на формирование электронного потока в ЛБВ. Журнал электронная техника. Серия 1 Электроника СВЧ №8 1974г. 56-65 с.
7. Каневский Е.И., Майорова Е.А., Романов О.И. Связь между поперечной составляющей фокусирующего магнитного поля и токооседанием электронного потока. «Электронная техника», серия 1, «Электроника СВЧ», 1970, выпуск 7, стр.16-26
8. Nishihara H., Terada M. Measurement on misalignment of the axis of a magnetic field for electron-beam focusing. J. of the Appl. Phys., 1970, vol. 41, No 8, p.3322
9. Шалашова Д.Л. Оценка влияния отклонений управляющей сетки многолучевой электронной пушки на уровень токопрохождения / Д.Л. Шалашова, М.В. Рахматулин, Е.С. Молякова, И.О. Чигуров // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика: Сборник трудов XIX Всероссийской конференции молодых ученых, Саратов, 8-9 октября 2024 года. – Саратов: Техно-Декор, 2024. – С. 145-146
10. Studio C. S. T. M. CST Studio Suite //Computer Simulation. – 2010.

УДК 537.86, 537.87, ГРНТИ 29.35.45

ГРУППИРОВКА ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ДИОДЕ С СВЧ МОДУЛЯЦИЕЙ ВТОРИЧНОЙ ЭМИССИИ

А.В. Галдецкий

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

Аннотация. Рассмотрено взаимодействие электронного потока с статическим и СВЧ полями в цилиндрическом диоде с вторичноэмиссионным катодом, которое определяет развитие вторичноэмиссионного разряда. Показано, что благодаря неоднородности электрического поля в зазоре происходит сильная группировка электронного сгустка, компенсирующая влияние поля пространственного заряда и разброса вторичных электронов по энергиям. Этот механизм группировки позволяет увеличить равновесное значение заряда сгустка и тока пучка.

Ключевые слова: мультипактор, вторичная эмиссия, микроимпульсная пушка, диод, пространственный заряд.

ELECTRON FLOW BUNCHING IN CYLINDRICAL DIODE WITH MICROWAVE MODULATION OF SECONDARY EMISSION

A.V. Galdetskiy

JSC "RPC "Istok" named after Shokin", Fryazino,
Russia, Fryazino, Galdetskiy@istokmw.ru

The summary. Electron flow interaction with static and microwave fields in cylindrical diode having secondary electrons emitter influencing properties of multipactor discharge is considered. It is demonstrated that due to nonuniformity of electric field in the gap strong bunching mechanism takes place, which compensates influence of space charge field and initial energy dispersion of secondary electrons. This mechanism makes possible increasing of equilibrium charge of the bunch and total beam current.

Keywords: Multipactor, secondary emission, micropulse gun, diode, space charge.

Введение

До настоящего времени ВЧ модуляция вторичной эмиссии использовалась в основном в магнетронах и амплитронах [1-3]. Двухэлектродный вторичноэмиссионный разряд (мультипактор) в выходных резонаторах клистронов рассматривался как паразитное явление. Сравнительно недавно были выполнены теоретические и экспериментальные работы по применению двухэлектродного вторичноэмиссионного разряда (мультипактора) в качестве

источника сгруппированного пучка для ускорителей электронов [4-9]. В рассмотренной структуре входное ВЧ напряжение приложено к диоду (являющемуся частью резонатора), электроды которого состоят из вторичноэмиссионного материала, а один из электродов выполнен в виде сетки. Электронный сгусток, стартовавший с одного из электродов в определенной фазе ВЧ сигнала, подгруппировывается ВЧ полем и достигает противоположного электрода в тормозящей фазе. Здесь он выбивает сгусток вторичных электронов («запомнивший» уменьшенную длину первичного сгустка), который возвращается, подгруппировываясь, к первому электроду спустя период ВЧ сигнала после старта исходного сгустка. В следующем периоде весь процесс повторяется. Ток пучка увеличивается (а длина сгустка уменьшается) до тех пор, пока не наступает динамическое равновесие, при котором поле пространственного заряда компенсирует группирующее действие ВЧ поля. Каждый раз при попадании сгустка на сетку часть электронов проходит сквозь нее, выходит за пределы входного зазора, где используется для дальнейшего ускорения. Требуемый зазор сетка-катод также пропорционален рабочей длине волны, как и в случае с триодом с термокатодом, но его величина существенно выше.

Мы предлагаем использовать для усиления СВЧ колебаний механизм одноэлектродного мультипактора, в котором возврат электронов к вторичноэмиссионному перфорированному электроду осуществляется за счет приложенного к зазору дополнительного постоянного напряжения смещения. Класс приборов на основе этого механизма мы назвали аленотрон [10] (рис. 1). В таком приборе имеется возможность повышения рабочей частоты без значительного уменьшения величины зазора. Триодный вариант (рис. 1, а) не требует компрессии пучка (и магнитного поля) и может быть использован при не слишком высоких требованиях к плотности тока, например, при невысоких частотах и мощностях. Клистродный вариант (рис. 1, б) допускает компрессию пучка и особенно привлекателен при повышении рабочей частоты.

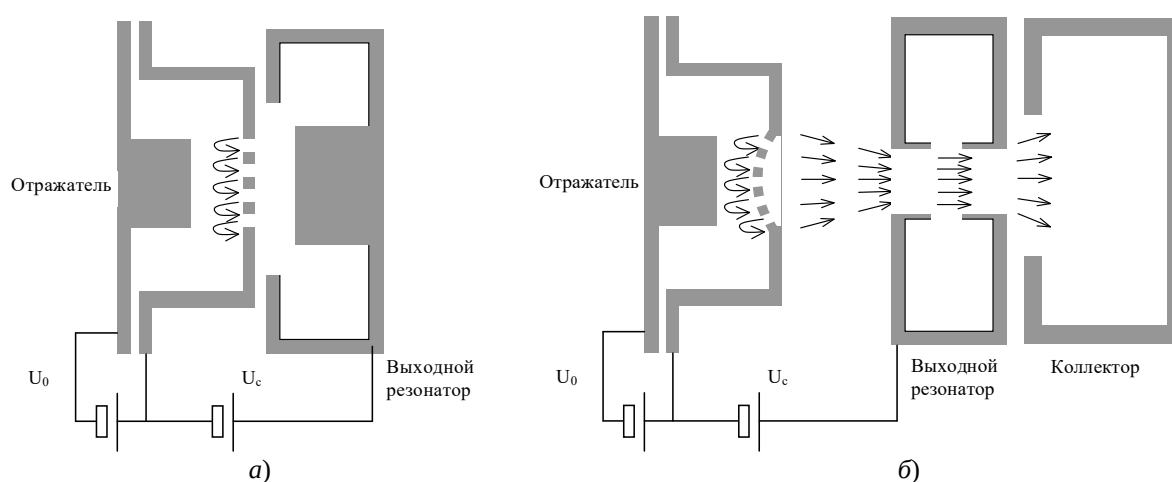


Рис. 1. Схемы возможных конструкций аленотрона: а) – триодная схема (вакуумный транзистор), б) – клистродная схема

Ожидаемые преимущества аленотрона:

- Значительная плотность тока
- «Мгновенное» время включения
- Отсутствие мощности накала
- «Холодный» катод = повышенная стабильность электродов и отсутствие испарения активного вещества

В аленотроне с плоским зазором существуют два механизма группировки пучка:

- механизм отражательного клитсрона – быстрые электроны, имеющие начальную скорость большую, чем у «среднего» электрона, удаляются от катода дальше, что приводит к сближению времен возвращения;
- «неправильнофазные» электроны, которые приходят к катоду в тормозящей фазе вч поля, не создают вторичных электронов и, таким образом, их потомки выбывают из дальнейшей эволюции.

Из анализа процесса формирования сгустка становится ясно, что электроны, стартовавшие раньше, чем центр сгустка, удаляются от катода на наибольшее расстояние и, вследствие этого, возвращаются к катоду заметно позже, чем центр сгустка. Это означает удлинение сгустка и ослабление качества группировки. Отсюда становится очевидным, что если бы при удалении от катода величина возвращающего электрического поля возрастала, то это приводило бы к уменьшению времени дрейфа наиболее удаленных электронов, укорочению сгустка и повышению качества группировки. В частности, этот фактор противодействовал бы разгруппирующему влиянию сил пространственного заряда и разброса начальных скоростей вторичных электронов. В результате можно ожидать повышения равновесной величины сгруппированного тока и выходной мощности прибора. Структура поля в зазоре и интенсивность группировки сгустка заметно зависят от геометрии зазора. В частности, в коаксиальном цилиндрическом диоде, в котором перфорированный катод является внешним проводником коаксиала, а вторичные электроны стартуют с него к центральному проводнику коаксиала, возвращающее электрическое поле сильно неоднородно. В результате наиболее удаленные от катода электроны оказываются очень близко к центральному проводнику (отражателю) и испытывают сильное возвращающее воздействие, что обеспечивает сокращение длительности сгустка и усиление группировки.

Ниже мы детальнее рассмотрим процесс группировки электронов в цилиндрическом диоде с вторичным эмиттером.

Анализ группирующих свойств электрического поля цилиндрического диода

Рассмотрим коаксиальный диод, в котором внешний проводник радиуса a является вторичным эмиттером, а на внутренний электрод радиуса b подается постоянное напряжение смещения U_0 и СВЧ напряжение U_1 (рис. 2, а).

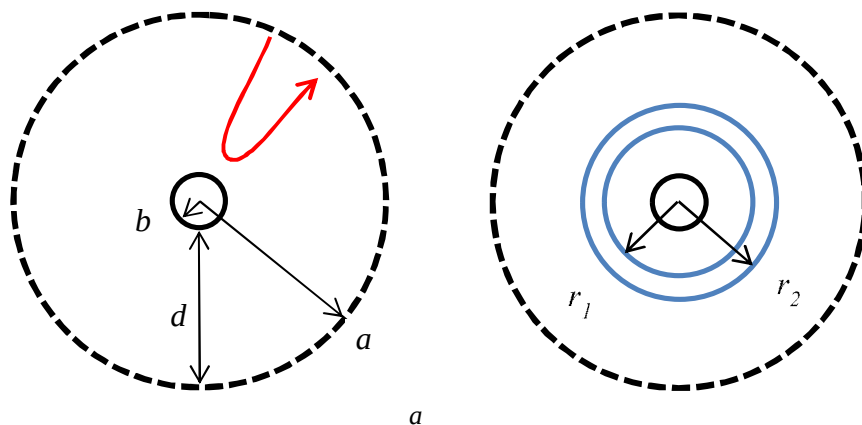


Рис. 2. Модели коаксиального диода: а) - модель цилиндрического диода с вторичным эмиттером и траектория частицы в нем; б) - модель кольцевого сгустка в коаксиальном диоде.

Фактически, такой диод является формирователем электронного сгустка (группирователем). Часть сгустка периодически проникает через внешний перфорированный проводник в зазор выходного коаксиального резонатора.

Проанализируем, в какой степени неоднородность поля электродов цилиндрического диода способна компенсировать разгруппирующее действие сил пространственного заряд сгустка. Рассмотрим модель сгустка с внутренним и внешним радиусами r_1 и r_2 (Рис. 2б) с однородной плотностью пространственного заряда ρ , который дрейфует в цилиндрическом диоде, к отражателю которого приложено СВЧ напряжение $U(t)$ (6),

В этом случае электрическое поле электродов описывается выражением:

$$E(r) = \frac{U}{r \ln\left(\frac{a}{b}\right)} \quad F(r) = -eE(r). \quad (1)$$

При отрицательном потенциале на отражателе сила, действующая на частицы, направлена от центра, и на внутренней поверхности сгустка она заметно превышает силу, действующую на внешней границе сгустка. Таким образом, частицы на внутренней и внешней границах сгустка будут двигаться, сближаясь к центру сгустка. Это означает, что поле цилиндрических электродов обладает дополнительным группирующим действием по сравнению с полем плоского диода.

Поле пространственного заряда сгустка равно

$$E_{nz}(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \begin{cases} \frac{2Q}{r} & b < r < r_1 \\ \frac{2}{r} [Q + \pi\rho(r^2 - r_1^2)] & r_1 < r < r_2 \\ \frac{2}{r} [Q + \pi\rho(r_2^2 - r_1^2)] & r_2 < r < a \end{cases}$$

$$Q(r_1, r_2) = \frac{\pi\rho}{\ln\left(\frac{a}{b}\right)} \left[r_1^2 \left(\ln\left(\frac{a}{r_1}\right) + \frac{1}{2} \right) - r_2^2 \left(\ln\left(\frac{a}{r_2}\right) + \frac{1}{2} \right) \right]. \quad (2)$$

Отсюда суммарное поле, действующее на частицу на внутренней границе, описывается выражением

$$E_{tot}(r_1) = \frac{U}{r_1 \ln\left(\frac{a}{b}\right)} + \frac{Q(r_1, r_2)}{2\pi\epsilon_0 r_1} = \frac{1}{r_1} \left[\frac{U}{\ln\left(\frac{a}{b}\right)} + \frac{Q(r_1, r_2)}{2\pi\epsilon_0} \right]. \quad (3)$$

Суммарное поле, действующее на частицу на внешней границе равно

$$E_{tot}(r_2) = \frac{U}{r_2 \ln\left(\frac{a}{b}\right)} + \frac{Q + \pi\rho(r_2^2 - r_1^2)}{2\pi\epsilon_0 r_2} = \frac{1}{r_2} \left[\frac{U}{\ln\left(\frac{a}{b}\right)} + \frac{Q + \pi\rho(r_2^2 - r_1^2)}{2\pi\epsilon_0} \right]. \quad (4)$$

Оценим эти силы количественно. Рассмотрим случай, когда в зазоре с радиусами внутреннего и внешнего проводников $b = 0.5$ мм и $a = 3$ мм движется сгусток со средним током на единицу длины $I = 1$ А/см с частотой повторения 3 ГГц. Тогда плотность заряда ρ выражается через средний ток сгустков, бомбардирующих эмиттер:

$$\rho = \frac{-1}{\pi f(r_2^2 - r_1^2)}. \quad (5)$$

При внутреннем и внешнем радиусах сгустка $r_1 = 0.55$ мм и $r_2 = 0.9$ мм (рис. 3) поле пространственного заряда составляет, согласно (2), 0.858 кВ/мм на внутреннем радиусе (сила направлена к центру) и -0.142 кВ/мм на внешнем радиусе (сила направлена от центра). Таким образом, имеется сильный разгруппирующий эффект пространственного заряда, приводящий к расширению сгустка.

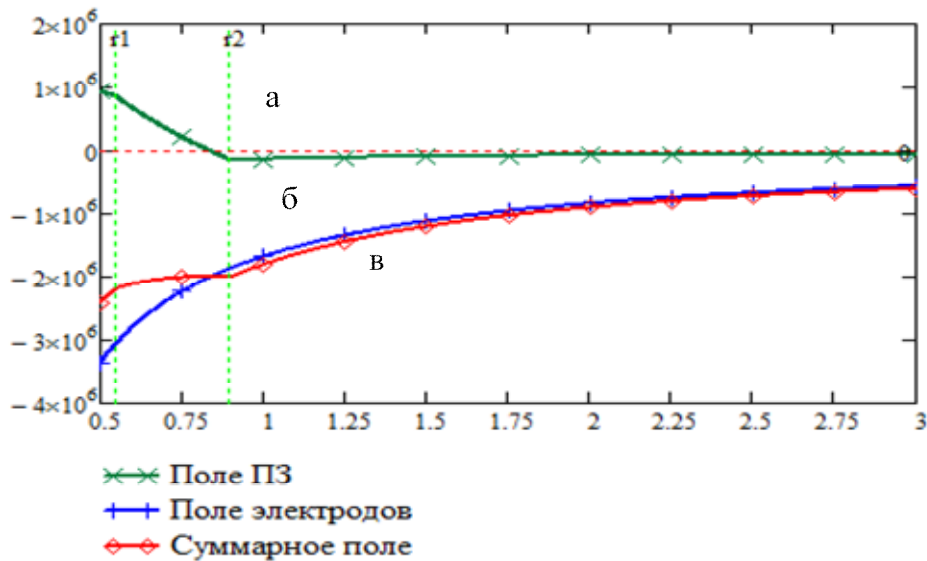


Рис. 3. Профиль электрического поля в зазоре (а), поля электродов (б), суммарного поля (в).

Однако если к отражателю приложено напряжение $U = -3000$ В, то суммарное поле, в соответствии с (3), (4), равно -2.187 кВ/мм на внутреннем радиусе и -2.002 кВ/мм на внешнем радиусе (силы направлены от центра). Таким образом, неоднородное поле электродов полностью компенсировало разгруппирующее действие пространственного заряда и даже создало дополнительный механизм группировки. Этот механизм не наблюдается в модуляторе на основе плоского диода, и он тем сильнее, чем толще сгусток, и чем больше приложенное к отражателю напряжение. Он накладывается на кинематический механизм группировки, который имеет место и в модуляторе на основе плоского диода. Последний имеет сходство с группировкой в отражательном клистроне и в генераторе с тормозящим полем и обусловлен тем, что частицы испытывающие воздействие более сильного поля имеют большую скорость, но и вынуждены проходить больший путь, что приводит к их возвращению в фазе СВЧ поля, близкой к оптимальной.

Рассмотрим, как группирующий эффект меняется в процессе движения сгустка. Будем полагать, что толщина сгустка меняется пропорционально расстоянию от внутренней границы до отражателя $r_2 - r_1 = \alpha(r_1 - b)$ при $\alpha = 3$. Тогда суммарные поля на внутренней и внешней границах сгустка оказываются весьма близки (рис. 4).

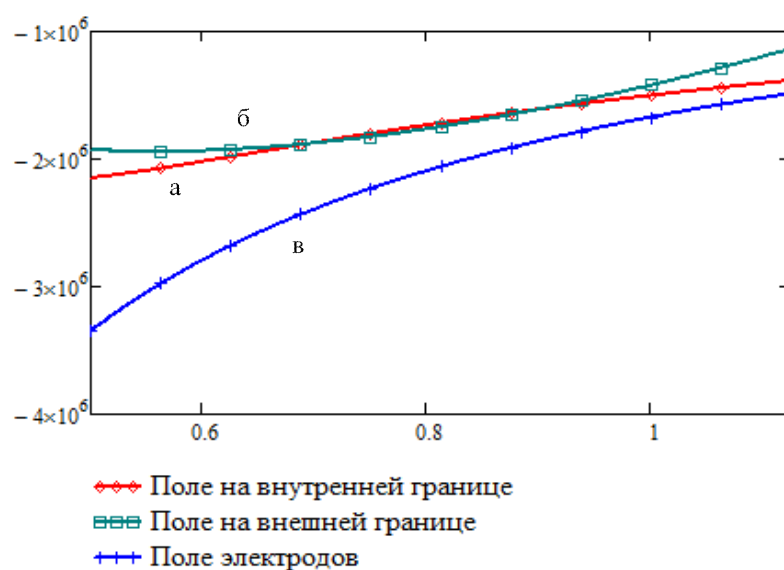


Рис. 4. Зависимость поля на внутренней границе (а) и внешней границе (б), а также поля электродов (в) от радиуса внутренней границы.

Причем это свойство сохраняется при изменении α в широких пределах от 2 до 7.

Анализ цилиндрического диода-группирователя с вторичным эмиттером

Рассмотрим движение сгустка в зазоре толщины d , к которому приложено ВЧ напряжение U_1 частоты ω (соответствующей длине волны λ) и статическое напряжение смещения U_0 .

Для предварительной оценки группирующих свойств поля в зазоре пока не будем рассматривать влияние поля пространственного заряда на движение частиц. Учитывая аксиальную симметрию задачи, рассмотрим только изменение радиальных координат и скорости. Изменение радиальной координаты частицы описывается уравнением

$$\ddot{r} = -\frac{eU(t)}{mr \ln\left(\frac{a}{b}\right)} + \frac{v_{\phi 0}^2 a^2}{r^3} \quad U(t) = U_0 + U_1 \cos(\omega t). \quad (6)$$

где $v_{\phi 0}$ - азимутальная компонента начальной скорости частицы, $e > 0$, m - заряд и масса электрона, $U(t)$ - напряжение между наружным и внутренним проводниками.

Введем безразмерные переменные $\varphi = \omega t$, $x = \frac{a-r}{d}$ так что радиальная координата в диоде изменяется от 0 до 1. Тогда уравнение движения частицы приобретает вид:

$$\ddot{x}(\varphi) = \frac{V_0 + V_1 \cos \varphi}{D - x} - \frac{B}{(D - x)^3}, \quad (7)$$

где $D = \frac{a}{d}$;

$$V_0 = AU_0;$$

$$V_1 = AU_1;$$

$$A = \frac{e}{mc^2} \frac{1}{\ln\left(\frac{a}{b}\right)} \left(\frac{\lambda}{2\pi d}\right)^2;$$

$$B = \frac{2W_{az}}{mc^2} \left(\frac{\lambda D}{2\pi d}\right)^2;$$

$$W_{az} = \frac{mv_\varphi^2}{2} - \text{начальная энергия азимутального движения частицы. При этом скорость и}$$

энергия радиального движения частицы выражаются через безразмерную скорость $\dot{x}$:

$$v = -c \frac{2\pi d}{\lambda} \dot{x} \quad E = mc^2 \left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)^2 \frac{\dot{x}^2}{2}.$$

Уравнение движения (7) решается при начальных условиях

$$x(\varphi_s) = 0, \quad \dot{x}(\varphi_s) = \frac{\lambda}{2\pi d} \sqrt{\frac{2W_s}{mc^2}},$$

где W_s - начальная энергия радиального движения частицы.

Так например, при приложенных к внутреннему проводнику (отражателю) напряжениях $U_0 = -121.5$ В и $U_1 = 506$ В, нулевых начальных энергиях радиального и азимутального движения и фазе старта $\varphi_0 = -1.14$ получаем траекторию частицы (рис. 5):

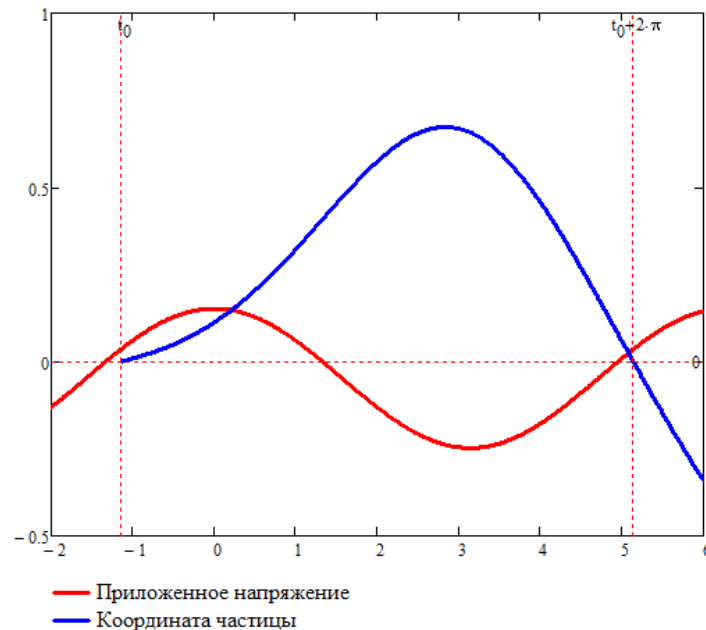


Рис. 5. Зависимость нормированных приложенного напряжения и продольной (радиальной) координаты от времени

В данном примере:

- частица стартует в фазе $\varphi_0 = -1.14$, а возвращается в фазе $\varphi_0 = 4.8$ с отставанием от фазы старта на 0.346 – т.е. для вторичных электронов эта траектория не повторится на следующем периоде;
- начальная фаза соответствует ускоряющему СВЧ полю, а конечная фаза соответствует тормозящему СВЧ полю, что будет препятствовать старту вторичных частиц;

- частица стартовала с нулевой начальной энергией радиального движения, а вернулась с энергией $E_f = 426.8$ эВ. Эта энергия получена от СВЧ поля. На отражатель нет токооседания, его средний ток равен нулю, энергия от источника смещения не потребляется. Энергия вращательного движения на финише равна начальной энергии вращательного движения, так как движение происходит в аксиально-симметричном поле.

Очевидно, что необходимо подобрать параметры конструкции и режима так, чтобы выполнялись следующие условия:

- Должна существовать равновесная (неподвижная) фаза φ_0 : частица, стартовавшая в этой фазе, возвращается в той же фазе φ_0 , но на следующем периоде и создает вторичные частицы, которые повторяют ее траекторию (с точностью до влияния начальных скоростей);
- Равновесная фаза должна соответствовать ускоряющему интервалу СВЧ поля;
- Равновесная фаза должна быть устойчива: если под действием каких-то причин частица стартует в фазе $\varphi_0 + \delta\varphi_s$, сдвинутой на некоторую величину $\delta\varphi_s$, то она должна вернуться в фазе $\varphi_0 + \delta\varphi_f$ и $|\delta\varphi_f| < |\delta\varphi_s|$. Фактически, это условие означает наличие группировки частиц при их движении;
- Энергии частицы на финише W_f должно быть достаточно для размножения вторичных частиц, т.е. $W_f \geq eU_{cr}$, где U_{cr} – первый критический потенциал вторичного эмиттера.

Решая уравнения движения (7) при различных начальных фазах, построим зависимость фазы финиша от фазы старта (рис. 6, а):

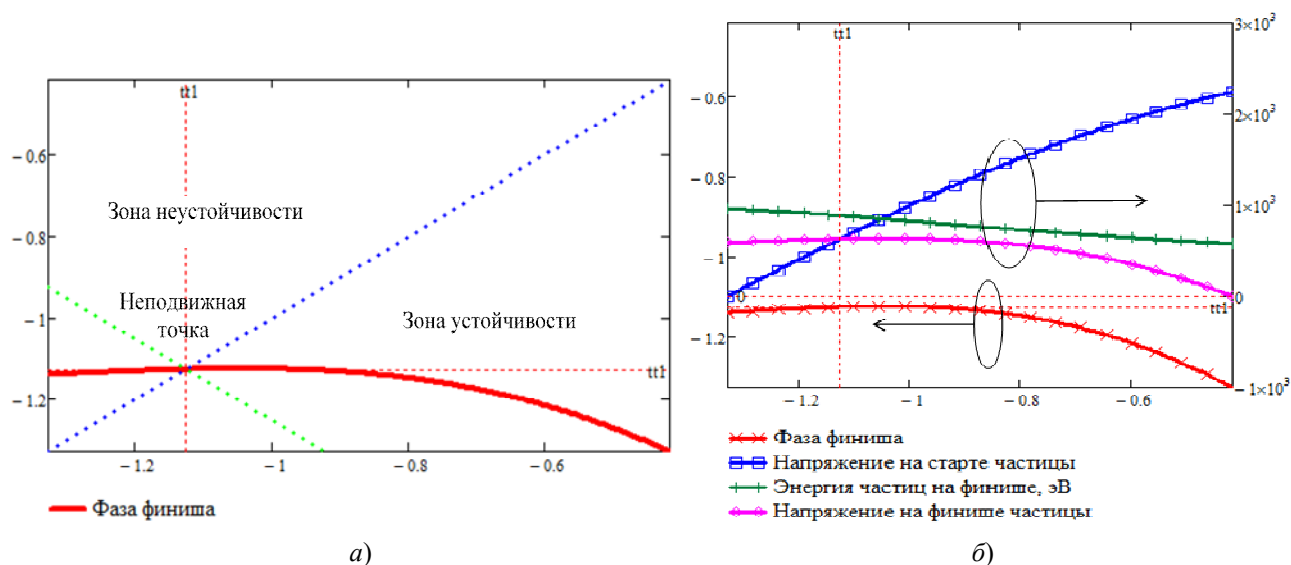


Рис. 6. Зависимости для определения поведения частиц: а) – зависимость фазы возврата частицы от начальной фазы; б) – фаза возврата частицы, напряжение на отражателе в момент старта, энергия частиц на финише в эВ, напряжение на отражателе на финише как функции фазы старта частицы

Здесь видно, что система обладает неподвижной точкой: частицы, стартовавшие при начальной фазе $tt_1 = -1.13$ возвращаются в следующем периоде в той же фазе. Кроме того, кривая находится в зоне устойчивости: частицы, стартовавшие в фазе, отличной от фазы неподвижной точки, в следующем периоде возвращаются в фазе более близкой к фазе неподвижной точки. Таким образом, после нескольких периодов частицы будут группироваться вблизи фазы неподвижной точки. Чтобы этот процесс не прервался поле должно быть ускоряющим для вторичных частиц, как во время старта, так и на финише. Построим зависимость полей на старте и финише от начальной фазы частиц (рис. 6, б).

Из графика следует, что левая граница интервала допустимых начальных фаз -1.33 определяется условием наличия ускоряющего поля на старте, а правая граница -0.42 – условием наличия ускоряющего поля на финише частицы. Таким образом, существует диапазон фаз шириной 0.91 , откуда все частицы будут захвачены в сгусток. Рассмотрим траектории данных частиц в первом периоде СВЧ поля (рис. 7):

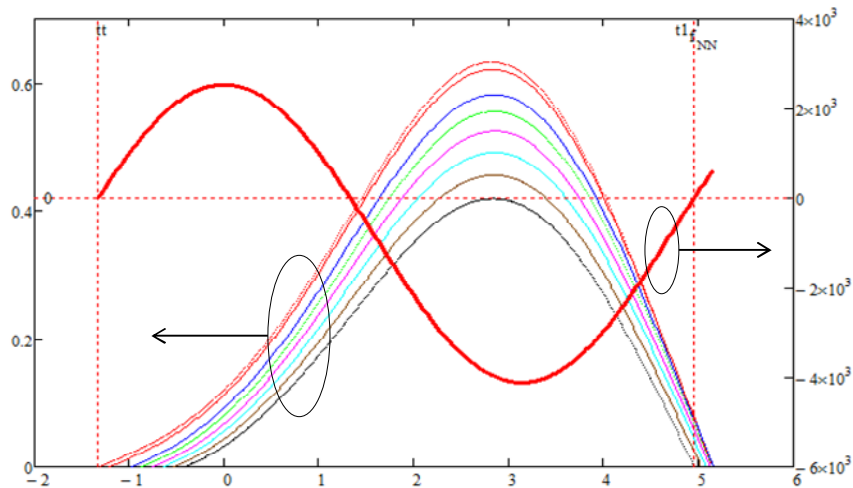


Рис. 7. Траектории частиц с различными фазами старта и временная зависимость напряжения на модуляторе

Очевидна заметная степень группировки частиц уже на одном периоде СВЧ колебаний.

При настолько сильном механизме группировки можно ожидать достаточно умеренного влияния разброса по начальным продольным скоростям. Построим траектории частиц, стартующих в один момент времени и имеющих разброс начальных продольных скоростей, соответствующий разброс по продольным энергиям от 0 до 53 эВ (рис. 8).

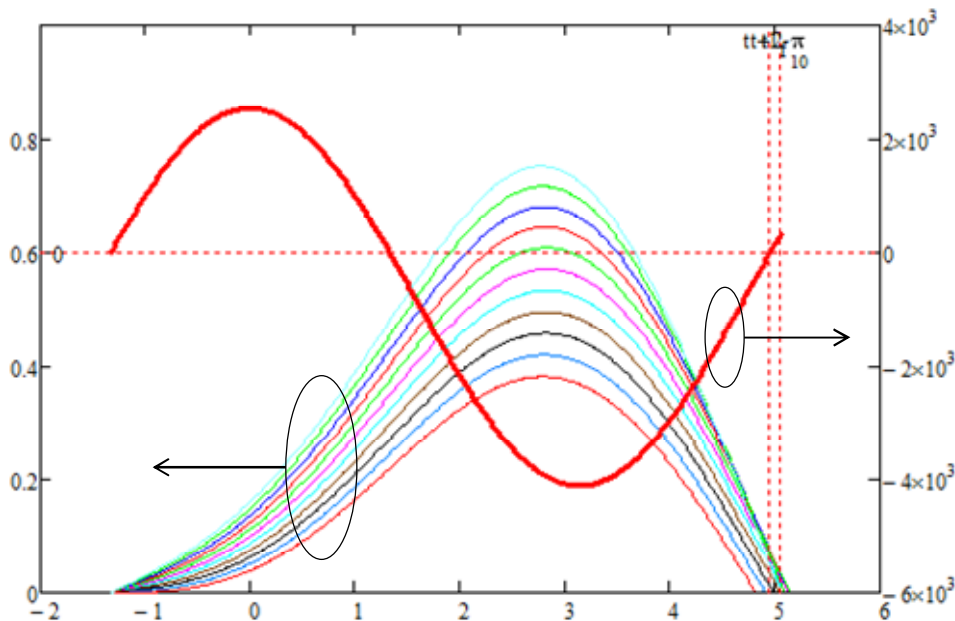


Рис. 8. Траектории частиц с различными начальными продольными энергиями (0-53 эВ) и временная зависимость напряжения на модуляторе.

Очевидна компенсация разброса по начальным продольным скоростям, и на финише частицы концентрируются в достаточно малом диапазоне фаз финиша. Отметим также, что часть частиц приходит в интервале, когда поле является тормозящим вторичные частицы. Это приводит к селекции неправильнофазных частиц, дополняющей механизмы группировки.

Рассмотрим теперь влияние разброса по азимутальным скоростям на группировку частиц. При разбросе начальных азимутальных скоростей, соответствующем энергиям азимутального движения от 0 до 22 эВ траектории частиц будут иметь вид, представленный на рисунке 9.

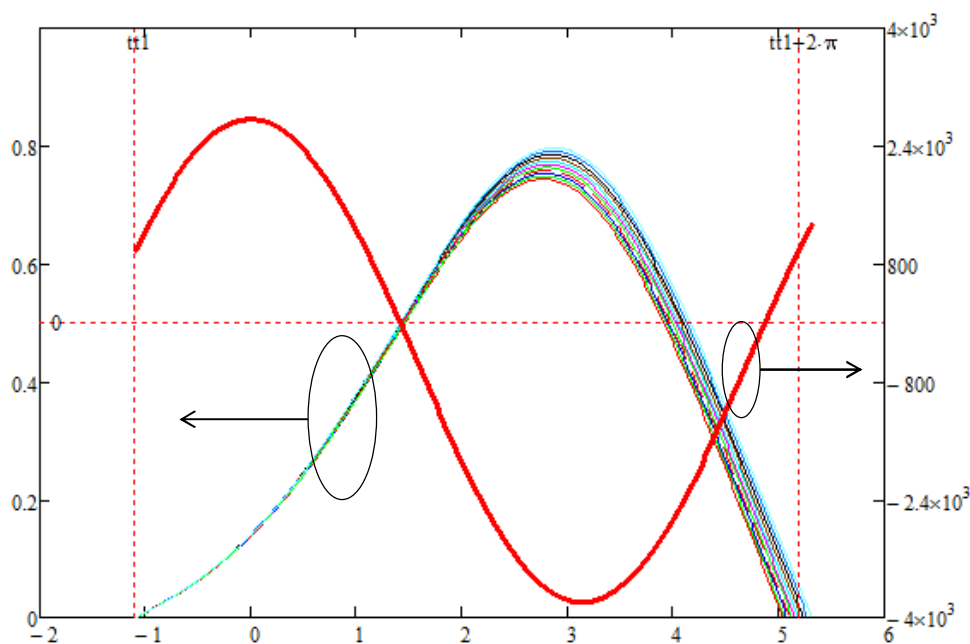


Рис. 9. Траектории частиц с различными поперечными энергиями (0-22 эВ) и временная зависимость напряжения на модуляторе

Заключение

Рассмотренные выше зависимости позволяют сделать следующие выводы:

1. В цилиндрическом диоде с вторичным эмиттером существует три механизма фазировки электронов:

- **Кинематический механизм группировки.** Он обусловлен тем, что частицы, эмитированные в фазах, когда они испытывают воздействие более сильного поля, приобретают большую скорость, но и вынуждены проходить больший путь, что приводит к тому, что они возвращаются к эмиттеру в фазе СВЧ поля, близкой к оптимальной. Этот механизм имеет сходство с группировкой в отражательном клистроне и в генераторе с тормозящим полем.

- **Группировка сильно неоднородным тормозящим полем.** Большую часть времени пролета на сгусток действует тормозящая сила, причем большая на внутренней границе сгустка (более удаленной от эмиттера), чем на внешней границе. Это приводит к сжатию сгустка в процессе пролета. По-видимому, такой механизм ранее не рассматривался.

- Сепарация неправильнофазных электронов вторичным эмиттером. Электроны, приходящие на эмиттер в тормозящей фазе поля, не создают вторичных частиц и выбывают из системы.¹

2. Наличие значительного группирующего эффекта позволяет бороться с мешающими факторами: разбросом начальных радиальных и азимутальных скоростей, разбросом времен эмиссии.

Библиографический список

1. Вайнштейн, Л.А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике / Л.А. Вайнштейн, В.А. Солнцев // М.: Советское радио. - 1973. — 400 с..
2. Gritsunov, A.V. A cathode-driven CFA gain increase / A.V. Gritsunov, G.G. Kozorezov, L.Y. Turenko // in Proceedings of 12th International Conference Microwave and Telecommunication Technology. 2002.
3. Kozorezov, G.G. Incandescence-free miniature vacuum microwave amplifier with distributed interaction / G.G. Kozorezov, V.N. Ivanov, G.P. Petin // in Proceedings of 2005 15th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology. 2005.
4. Vaughan J.R.M. Multipactor. - IEEE Transactions on Electron Devices. 1988. v. 35 (7). - pp. 1172-1180.
5. Mako F.M., Peter W. A high-current micro-pulse electron gun. Proceedings of International Conference on Particle Accelerators, 17-20 May 1993, 1993 pp. 2702-2704.
6. Nation J.A., Schachter L., Mako F.M. et al. Advances in cold cathode physics and technology. Proceedings of the IEEE. 1999 v. 87(5). — pp. 865-889.
7. Mako F., Len L.K. Self-bunching micro-pulse guns for high-power RF generation. in Abstracts. International Vacuum Electronics Conference 2000 (Cat. No.00EX392). 2000.
8. Guharay S.K., Len L.K., Mako F. High-current micro-pulse electron guns and accelerator applications. in PACS2001. Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference (Cat. No.01CH37268). 2001.
9. Riyopoulos S., Chernin D., Dialetis D. Effect of random secondary delay times and emission velocities in electron multipactors. - IEEE Transactions on Electron Devices. 1997. v. 44(3). — pp. 489-497.
10. Галдецкий А.В. Аленотрон - новый класс вакуумных СВЧ-приборов на основе модуляции вторичной эмиссии / А.В. Галдецкий // Электронная техника. Сер. 1 СВЧ-техника. 2001. № 2. — с. 24-32.

УДК 537.291; ГРНТИ 25.35.39

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КАТОДНОЙ ЛИНЗЫ В ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОМ И КОЛЛИМАТОРНОМ РЕЖИМАХ

А.А. Трубицын, Е.Ю. Грачев, Э.Г. Кочергин

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

Аннотация. Разработаны средства моделирования катодной линзы с практически произвольной конфигурацией электродов в параксиальном приближении. Определены условия реализации телескопического и коллиматорного режимов. Изучена взаимосвязь параметров, обеспечивающих данные режимы работы линзы.

Ключевые слова: электронная оптика, катодная линза, параксиальное приближение.

STUDY OF ELECTRONIC-OPTICAL PROPERTIES OF A CATHODE LENS IN TELESCOPIC AND COLLIMATOR MODES

A.A. Trubitsyn, E.Yu. Grachev, E.G. Kochergin

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, assur@bk.ru

The summary. The means for modeling a cathode lens with a virtually arbitrary configuration of electrodes in the paraxial approximation have been developed. The conditions for implementing telescopic and collimator modes have been determined. The relationship between the parameters that ensures these modes of lens operation has been studied.

¹ Точнее, созданные вторичные электроны быстро возвращаются на эмиттер и выбывают из дальнейшего взаимодействия

Keywords: electron optics, cathode lens, paraxial approximation.

Источником электронов в большинстве эмиссионных электронных систем (электронные пушки в методах электронной спектроскопии, электронные микроскопы, электронные литографы, микрофокусные рентгеновские трубки и др.) является макроразмерный твердотельный катод. Испущенные катодом электроны ускоряются полем анода. Для фокусировки электронов на этапе ускорения вблизи катода размещают дополнительные электроды, чаще всего электрод Венельта [1]. Таким образом катод оказывается погруженным во внешнее поле, созданное потенциалами этих дополнительных электродов и анода. Указанная система электродов «катод - промежуточный электрод - анод» обладает специфическими электронно-оптическими свойствами и поэтому получила отличительное название – катодная линза или иммерсионный объектив.

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 низкоперевансных, поскольку их микропереванс не превышает величину $10^{-2} \text{ A/V}^{3/2}$ [2]. Численный анализ низкоперевансных катодных линз не требует учета пространственного заряда и поэтому не вызывает особых математических и вычислительных трудностей. Однако численные методы мало отличаются по своим аналитическим возможностям от средств натурального эксперимента и позволяют лишь оптимизировать характеристики изучаемого объекта в сравнительно узких диапазонах входных параметров. Задачи обнаружения новых свойств объектов и систем могут быть решены лишь путем теоретического аналитического исследования. Теоретическая электронная оптика включает в себя разделы параксиальной оптики и теорию аберраций.

Параметры подавляющего большинства электронно-оптических систем могут быть спрогнозированы с достаточной для практики точностью в рамках аксиально-симметричных моделей.

Основное уравнение параксиальной электронной оптики в случае аксиальной симметрии, позволяющее построить траекторию частицы $r=r(z)$ при известном распределении потенциала на оси симметрии $\Phi = \Phi(z)$, является линейным дифференциальным уравнением второго порядка, которое в цилиндрической системе координат r, θ, z имеет вид [2]

$$r'' + \frac{\Phi'}{2\Phi} r' + \frac{\Phi''}{4\Phi} r = 0. \quad (1)$$

Для обычных типов электронных линз (иммерсионная, одиночная, линза-диафрагма и др.) данное уравнение решается стандартными численными методами без принятия каких-либо дополнительных мер.

Моделирование катодной линзы даже в параксиальном приближении сопряжено с рядом трудностей, обусловленных математической особенностью, возникающей при интегрировании уравнения параксиальной траектории (1) вблизи поверхности С катода $z = z_c$, поскольку $\Phi_c = \Phi(z_c) = 0$, , причем $\Phi'_c \neq 0$. Здесь и далее в статье значения всех функций на поверхности катода индексируются символом «с».

Согласно теории решений уравнений такого рода [3] одно из частных решений уравнения (1) $p = p(z)$ является аналитической функцией, а второе решение $g = g(z)$ можно записать в виде:

$$g = \sqrt{\Phi} q, \quad (2)$$

где $q = q(z)$ – аналитическая функция, которая как следует из (1) и (2) удовлетворяет уравнению

$$q'' + \frac{3}{2} \frac{\Phi'}{\Phi} q' + \frac{3}{4} \frac{\Phi''}{\Phi} q = 0. \quad (3)$$

Можно показать, что функции $p(z)$ и $q(z)$ удовлетворяют одинаковым граничным условиям

$$p_c = q_c = 1, \quad p'_c = q'_c = -\frac{\Phi''_c}{2\Phi'_c}, \quad (4)$$

а частные решения $p(z)$ и $g(z)$ связаны между собой соотношением

$$\sqrt{\Phi}(pg' - gp') = \frac{1}{2} \Phi'_c, z > z_c$$

Частные решения являются ключевыми функциями в параксиальной оптике, поскольку позволяют установить все электронно-оптические характеристики электронных линз – увеличение, кардинальные элементы, траектории электронов и др.

Общее решение или уравнение траектории записывается как сумма частных решений

$$r(z) = ap(z) + bg(z),$$

где a и b – постоянные, определяемые из начальных условий на поверхности катода.

В работе [4] удалось найти выражения a и b для катодной линзы и записать уравнение траектории в виде

$$r(z) = r_c \cdot p(z) + \frac{2\sqrt{\varepsilon}}{\Phi'_c} \sin \vartheta_c \cdot g(z), \quad (5)$$

где ε – начальная энергия вылета электрона из катода, являющаяся математической величиной первого порядка малости, r_c – радиальная координата старта электрона с поверхности катода, ϑ_c – начальный угол.

Далее в выкладках пригодится выражение $r'(z)$, поэтому продифференцируем уравнение (5):

$$r'(z) = r_c \cdot p'(z) + \frac{2\sqrt{\varepsilon}}{\Phi'_c} \sin \vartheta_c \cdot g'(z), \quad (6)$$

На настоящий момент катодные линзы мало исследованы не только в рамках теории аббераций, но даже в параксиальном приближении. Наиболее полно электронно-оптические свойства параксиальной катодной линзы представлены в работе [5] на основе анализа уравнения траектории (5), причем осевое распределение потенциала $\Phi(z)$ находилось методом разделения переменных в предположении бесконечно малых промежутков между электродами.

К сожалению, метод разделения переменных позволяет вычислить функцию распределения потенциала лишь для идеализированных электронно-оптических систем (ЭОС) с простой конфигурацией границы. Для решения проблем анализа параксиальных свойств и аббераций катодных линз с реальной, практически произвольной конфигурацией электродов в рамках настоящей работы создано и развивается компьютерное приложение FOCUS CL [6].

Приложение FOCUS CL моделирования катодных линз состоит из трех основных модулей – графического редактора создания и модификации конструкции катодной линзы, модуля расчета потенциала методом граничных элементов в точке, в области и на оси; модуля вычисления частных решений $p(z)$, $g(z)$ методом Рунге-Кутты и траекторий $r(z)$ (5) и их графического отображения. Методом граничных элементов решается внешняя задача Дирихле при выражении потенциала в пространстве через комбинацию потенциалов простого и двойного слоев [7]. Такая постановка полевой задачи дает возможность моделировать системы с электродами практически произвольной толщины и формы, в том числе, с углами и изломами. Функция распределения осевого потенциала $\Phi(z)$, вычисленная в наборе дискретных уз-

лов, интерполируется сплайнами. Предусмотрена процедура сглаживания узловых значений $\Phi(z)$ методом скользящего полинома по пяти точкам [8]. Для нахождения значений производных $\Phi'(z)$, $\Phi''(z)$, $p'(z)$ и $g'(z)$ применяются пяти- и шести-узловые формулы численного дифференцирования [9].

Именно анализ уравнений (5) и (6) позволяет обнаружить ряд уникальных режимов катодной линзы [5].

В частности, телескопический режим, в котором параллельный поток ($\sin \vartheta_c = 0$) электронов, покидающих поверхность катода, остается параллельным $r'(z)=0$ в пространстве изображений $z \geq z_{im}$ в области однородного поля, будет определяться системой выражений

$$\begin{cases} \sin \vartheta_c = 0, \\ p'(z) = 0, z \geq z_{im}, \end{cases} \quad (7)$$

где z_{im} - граница пространства изображений.

Коллиматорный режим, в котором поток электронов, исходящих из точечного источника ($r_c=0$), преобразуется в параллельный поток $r'(z)=0$ в пространстве изображений $z \geq z_{im}$, как это видно из (6) определяется системой

$$\begin{cases} r_c = 0, \\ g'(z) = 0, z \geq z_{im}. \end{cases} \quad (8)$$

Реализация как телескопического, так и коллиматорного режимов в параксиальной катодной линзе в конечном счете определяется конкретным видом распределения потенциала $\Phi(z)$ в (1) и (4).

Для трехэлектродной катодной линзы, типа изображенных на рисунках 1, а и 2, а и состоящей из дискообразного катода C и двух цилиндрических (промежуточного и ускоряющего) электродов одинакового диаметра d , такой конкретный вид $\Phi(z)$ определяется длиной l и потенциалом V промежуточного электрода при фиксированном потенциале V_{acc} ускоряющего электрода, длина которого значительно превышает диаметр d .

В телескопическом режиме, как следует из (5), ход траекторий не зависит от энергии ε . Результаты траекторного анализа линзы с относительной длиной промежуточного электрода $l/d = 0.7$ и его относительным потенциалом $V/V_{acc} = 0.141$ представлены на рисунке 1, а, при этом графики частных решений $p(z)$ и $g(z)$ демонстрируются на рисунке 1, б. Обращает на себя внимания участок зависимости $p(z)=const$ при $z \geq z_{im}$ как характерная особенность телескопического режима, где $z_{im} \approx l + d$.

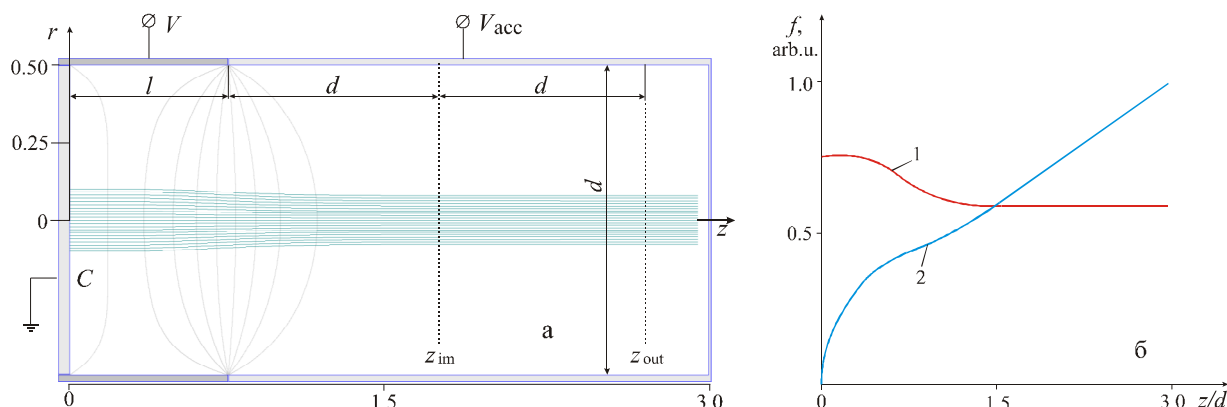


Рис. 1. Моделирование трехэлектродной катодной линзы в параксиальном приближении: а) – траектории (5) электронов с $\vartheta_c=0$ и $r_c = 0-0.2d$ в телескопическом режиме, б) – частные решения: 1 – p , 2 – g

Рисунок 2, а демонстрирует ход траекторий электронов в трехэлектродной катодной линзе в коллиматорном режиме в диапазоне начальных углов $\vartheta_c = -70^\circ - +70^\circ$ с шагом 10° при относительной начальной энергии $\varepsilon/V_{acc}=10^{-3}$ и относительной длине $l/d=1$ промежуточного

электрода с относительным потенциалом $V/V_{acc} = 0.49$. Диапазон углов $\vartheta_c = -70^\circ - +70^\circ$ выбран потому, что позволяет исключить неинформативные «хвосты» на угловых распределениях электронов при расчетах вблизи границ полного диапазона углов -90° и $+90^\circ$ и является репрезентативным для катодной линзы, поскольку составляет почти 90% от полного телесного угла 2π с.р. Для этой линзы график частного решения $g(z)$ по отношению к максимальному значению функции g_{max} с характерным для коллиматорного режима участком $g(z)=const$ при $z \geq z_{im}$ представляется на рисунке 2, б.

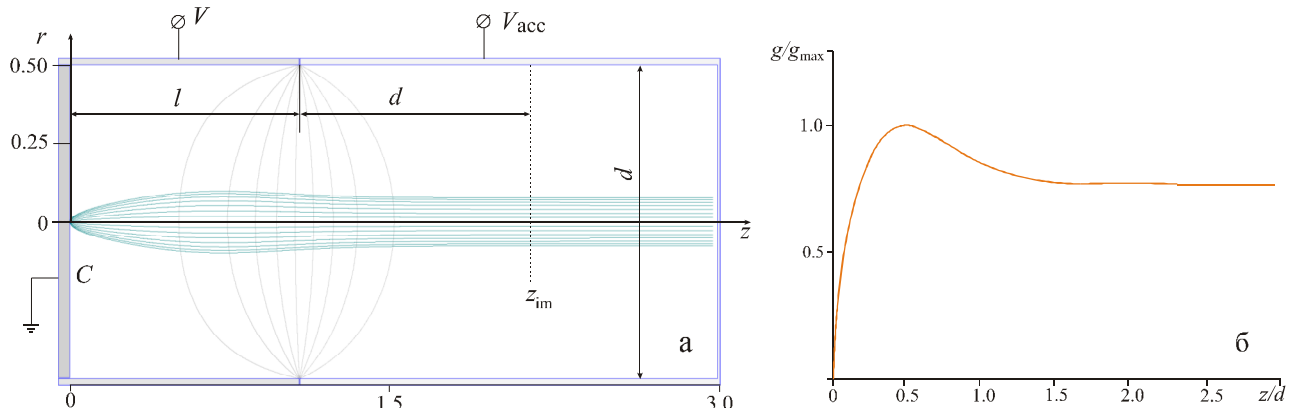


Рис. 2. Моделирование трехэлектродной катодной линзы в параксиальном приближении: а) – траектории электронов в коллиматорном режиме, б) – частное решение $g(z)$

По результатам расчетов трехэлектродной катодной линзы в парадигме предлагаемого подхода, базирующегося на решении уравнений (1) и (3), сделан вывод о наличии связи между длиной l и потенциалом V промежуточного электрода, которая обеспечивает телескопический режим (7) (см. рисунок 3, а) или коллиматорный режим (8) (см. рисунок 3, б).

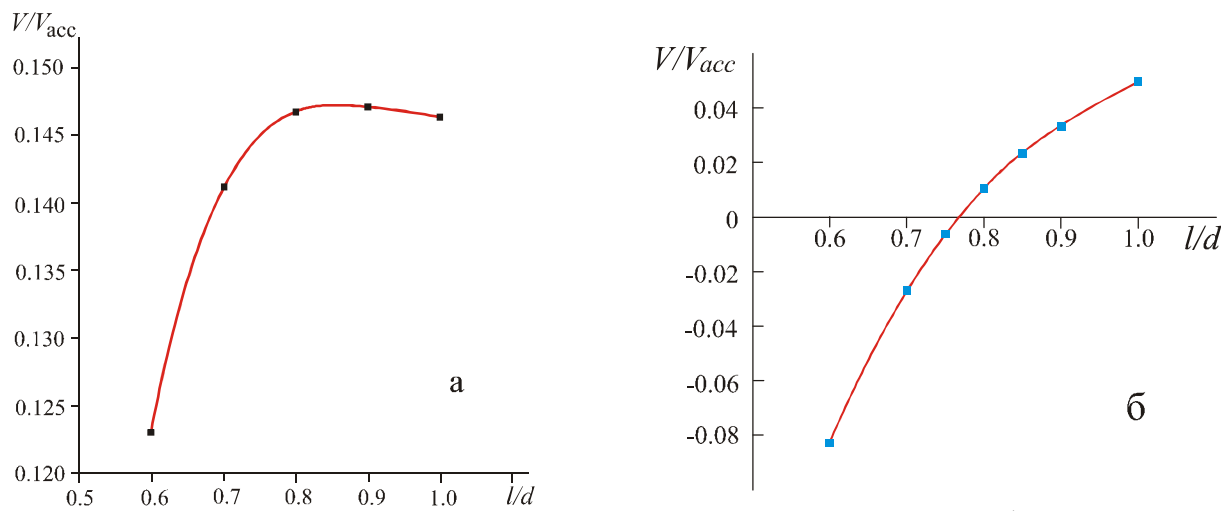


Рис. 3. Связь между потенциалом промежуточного электрода V и его длиной l , обеспечивающая: а - телескопический режим (7), б – коллиматорный режим (8)

Представленные на рисунке 3 зависимости получены для малой величины δ промежутков между электродами ($\delta \ll d$), точное значение которой равно $\delta = 0.002d$. Анализ результатов статьи [5], где исследована линза с бесконечно малыми изолирующими промежутками между электродами, и зависимостей на рисунке 3 показывает их совпадение в пределах относительной разницы значений $\Delta V/V_{acc} = 0.2\%$, что прямым образом подтверждает безупречность выводов работ [4, 5] и корректность представляемой здесь численно-аналитической методики исследования параксиальных катодных линз.

Телескопический режим окажется полезным при построении эмиссионных систем с термокатодами, поскольку, в отличие от типовых катодных линз с электродом Венельта, здесь в пространстве катод-анод не образуется кроссовер, и электроны движутся практически параллельно оптической оси, т.е. занимают малый объем фазового пространства. Коллиматорный режим способен сыграть свою положительную роль при разработке эмиссионных систем с острыми катодами – автоэмиссионными и катодами Шоттки.

Финансирование работы

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 25-29-00124).

Библиографический список

1. Сушков, А.Д. Вакуумная электроника. Физико-технические основы / А.Д. Сушков. – СПб.: Лань, 2022. – 464 с.
2. Хокс, П. Электронная оптика и электронная микроскопия / П. Хокс. – М.: Мир, 1974. – 320 с.
3. Смирнов, В.И. Курс высшей математики, т.3, ч.2 / В.И. Смирнов. – М.: Наука, 1974. – 816 с.
4. Yakushev, E. M. Theory and Computation of Electron Mirrors: The Central Particle Method / E. M. Yakushev // *Advances in Imaging and Electron Physics*. – 2013, vol. 178. - pp. 147–247.
5. Якушев, Е.М. К определению кардинальных элементов и угловых характеристик катодной линзы с вращательной симметрией / Е.М. Якушев, С.Б. Бимурзаев, М.А. Холодов // *Вестник Актуального государственного университета им. К. Жубанова*. - 2016, 44 (2). – с. 32-39.
6. Трубицын А.А. Программа Focus CL моделирования катодных линз / А.А. Трубицын, Е.Ю. Грачев, Э.Г. Кочергин // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024680471 . - 2024.
7. Трубицын А.А. Вычисление сингулярных интегралов при решении задачи Дирихле методом граничных элементов / А.А. Трубицын // *Журнал вычислит. матем. и матем. физики*. - 1995, 35 (4). – С. 532-541.
8. Корн, Г.А., Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г.А. Корн, Т.М. Корн. – М.: Наука, 1978. - 832 с.
9. Абрамовиц, М. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицам / М. Абрамовиц, И. Стиган. – М.: Наука, 1979. – 831 с.

УДК 681.7.03; ГРНТИ 21.39

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ В СВЧ-ТЕХНИКЕ И ОПТИКЕ

А.О. Королев, В.В. Климаков

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, alexey127200@mail.ru*

Аннотация. Рассматриваются материалы применимые для областей СВЧ-техники и оптики. Приводятся примеры применения в различных изделиях. Сравниваются их характеристики и особенности применения в аддитивной технологии.

Ключевые слова: аддитивные технологии, полимеры, СВЧ, оптика

APPLICATION OF MATERIALS FOR ADDITIVE TECHNOLOGY IN MICROWAVE TECHNIQS AND OPTICS

A.O. Korolev, V.V. Klimakov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russian Federation, Ryazan, alexey127200@mail.ru*

Annotation. Materials applicable to the fields of microwave and optics are considered. Examples of applications in various products are given. Their characteristics and application features in additive technology are compared.

Keywords: additive technologies, polymers, microwave, optics

Современные технологии в области оптики и СВЧ-техники требуют использования материалов с уникальными свойствами, такими как высокая прозрачность, низкие диэлектрические потери, термостабильность и механическая прочность. В последние годы значительное внимание уделяется разработке и применению полимеров и композитов, которые могут заменить традиционные материалы, такие как стекло и керамика, благодаря своим улучшенным характеристикам и более низкой стоимости производства.

В данной статье приведен обзор современных материалов, которые могут быть использованы в оптике и СВЧ-технике, их ключевые свойства и примеры применения для аддитивных технологий производства.

Применение новых материалов в оптической технике

В оптике полимерные материалы нашли широкое применение благодаря своей легкости, гибкости и возможности создания сложных форм. Одним из наиболее популярных материалов является полиметилметакрилат (ПММА, он же акриловое стекло и оргстекло), который обладает высокой прозрачностью (до 92%) и низким коэффициентом дисперсии. ПММА широко используется для изготовления линз, световодов и защитных покрытий в оптических приборах. Однако его низкая термостойкость и склонность к царапинам ограничивают его применение в условиях повышенных нагрузок. Ярким примером применения ПММА в оптической технике может стать его использование для изготовления призм (см. рис.1) [3].



Рис. 1. Призма из ПММА

Другим перспективным материалом является поликарбонат (ПК), который сочетает в себе ударопрочность и легкость. Поликарбонат используется для создания защитных линз и в различных оптических приборах. Однако его высокий коэффициент дисперсии и склонность к царапинам делают его менее пригодным для высокоточных оптических систем. В качестве примера применения можно привести его использование для линз сканирующих устройств [3].

Современные оптические полимеры, такие как циклоолефиновые сополимеры (СОС), обладают низким водопоглощением и стабильным показателем преломления, что делает их идеальными для создания оптических волокон и линз в медицинских устройствах, таких как эндоскопы. СОС также используются в оптических фильтрах и призмах, где важны стабильность и низкие оптические потери [3, 9].

Полистирол находит широкое применение в оптике за счет своих уникальных свойств, таких как высокая прозрачность в видимом диапазоне спектра, низкая плотность и простота обработки. За счет своей дешевизны распространен в производстве недорогих оптических элементов. Хороший пример применения – оптическое волокно ПС-ПММА, где полистирол является светопроводящей сердцевиной [2, 3].

CR-39 (аллилдигликолькарбонат) – материал используемый для производства очковых линз, фильтров и призм. Обладает высокой прозрачностью в видимом диапазоне спектра и низким показателем преломления. Устойчив к царапинам, ударопрочен и легкий. Данный

материал отличается тем, что позволяет регистрировать треки протонов при его облучении, что дает возможность применять его в дозиметрии [6].

Фотополимеры HRIP (полимер с высоким показателем преломления) – это фотополимеры с высоким показателем преломления ($n > 1.5$), способные отверждаться под воздействием ультрафиолетового света. Обладают высокой прозрачностью в видимом и инфракрасном диапазонах [7].

Помимо использования новых материалов, активно разрабатывают технологии для использования уже давно изобретенных, таких как стекло. Стекло обладает отличными прочностными свойствами и низким коэффициентом теплового расширения. Для него было создано ответвление от технологии послойной печати, что позволило изготавливать изделия из стекла аддитивным методом, изображенным на рисунке 2. Помимо послойного наплавления также используется технология стереолитографии на основе смолы, содержащей стекло. Получаемые данным методом результаты изображены на рисунке 3.

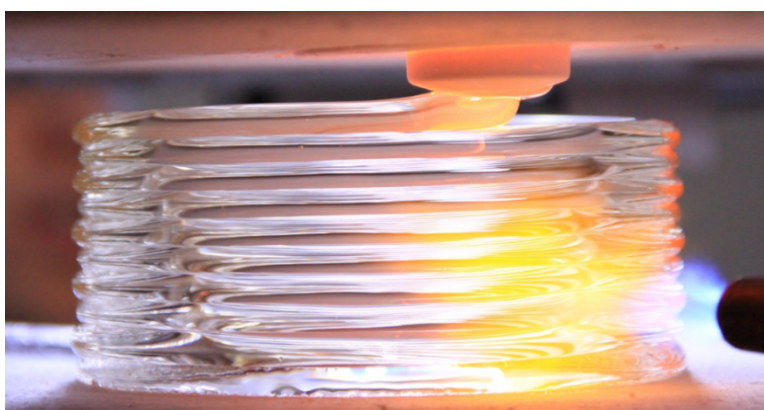


Рис. 2. Технология послойного наплавления стекла

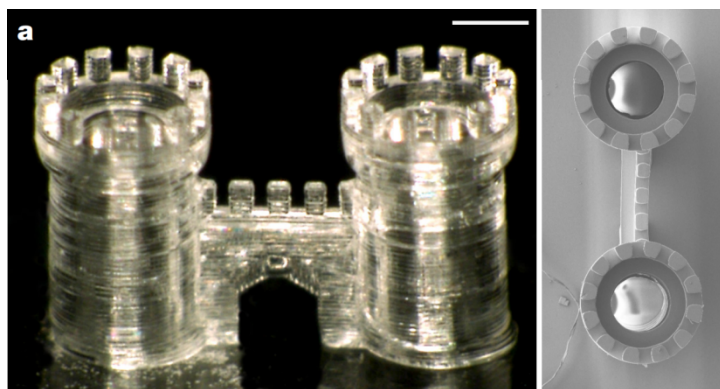


Рис. 3. Технология стереолитографии с использованием стекла

Подробные характеристики предлагаемых материалов для оптической техники можно посмотреть в таблице 1.

Таблица 1. Параметры полимеров подходящих для оптической техники

Параметры	ПММА	Полистирол	Поликарбонат	CR-39	СОС	Фотополимеры (HRIP)	Стекло
Прозрачность	92	88	88-90	90	92	90-95	90-95
Дисперсия (число Аббе)	57-58	30-35	30-34	58	55-60	30-40	50-60
Показатель преломления	1.49	1.59-1.66	1.58	1.498	1.53	1.6-1.84	1.5-1.6
Поглощение света (1/см)	0.01-0.1	0.1-0.5	0.1-0.3	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-0.2	0.01-0.2
Отражение света (%)	~4	~5	~5	~4	~4	~5	~4
Поляризация	Низкая	Высокая	Высокая	Низкая	Низкая	Низкая	Низкая
Прочность (МПа)	70-80	40-60	60-70	50-60	60-80	50-70	70-90
Предел прочности (МПа)	80-90	50-70	70-80	60-70	70-90	60-80	80-100
Теплоемкость (Дж/г*К)	1.4-1.6	1.2-1.4	1.2-1.3	1.3-1.5	1.1-1.3	1.0-1.2	0.8-1.0
Коэффициент линейного расширения ($10^{-6}/K$)	70-90	60-80	65-70	80-100	60-70	50-70	5-10
Стоимость (руб/кг)	150-300	200-400	400-800	800-1500	1500-3000	4000-6000	20000-30000

Применение новых материалов в СВЧ-технике

В СВЧ-технике полимерные материалы играют важную роль благодаря своим уникальным свойствам, таким как легкость, гибкость и возможность создания сложных геометрических форм. Одним из ключевых материалов является полипиррол (РРу), который представляет собой проводящий полимер за счет своих свойств при окислении и обладающий в таком состоянии проводимость от 2 до 100 См/см. РРу обладает электропроводящими свойствами, что делает его идеальным для создания композитов, поглощающих электромагнитные волны. Это особенно полезно для разработки защитных покрытий и экранов в СВЧ-устройствах, таких как антенны и радары. Кроме того, РРу используется в сенсорах для обнаружения токсичных и взрывоопасных газов, что делает его незаменимым в промышленных и военных приложениях. Однако его относительно низкая механическая прочность и сложность обработки ограничивают применение в высоконагруженных устройствах. На его основе фирма Milliken&Companу выпускает ткани и бумагу для поглощения СВЧ-излучения [5].

Другим важным материалом для СВЧ-техники является PLA с углеродными добавками. Этот материал сочетает в себе легкость и доступность с электропроводящими свойствами благодаря углеродным нанотрубкам. PLA с углеродными добавками используется для прототипирования корпусов и креплений в СВЧ-устройствах, таких как портативные радары и сенсоры. Однако его ограниченная термостойкость и механическая прочность делают его менее пригодным для применения в высоконагруженных устройствах.

Полиимиды – высокоэффективные полимерные материалы имеющие отличные свойства и исключительную термостойкость (до 300-400 °С). Имеют низкие диэлектрические потери, хорошую механическую прочность и химическую стойкость. Нашли широкое применение в изготовлении печатных плат, в том числе и в СВЧ диапазоне [8, 10].

РЕЕК (полиэфирэфиркетон) — это полимер, который обладает высокой термостойкостью (до 275°С) и химической устойчивостью. Эти свойства делают РЕЕК идеальным материалом для создания механически нагруженных деталей, таких как корпуса радаров и ан-

тени. PEEK также широко используется в аэрокосмической промышленности для создания компонентов, работающих в экстремальных условиях. Однако его высокая стоимость и сложность обработки ограничивают применение в массовом производстве. В качестве примера можно привести использование этого материала компанией Zeus для изготовления своих термоусадочных трубок (см. рис. 4) [10].



Рис. 4. Термоусадочная трубка компании Zeus с применением PEEK

PEI 9085 (Ultem) - еще один полимер, который нашел применение в СВЧ-технике. Он обладает высокой прочностью и термостойкостью (до 217°C), что делает его пригодным для создания корпусов и креплений в высокочастотных устройствах. PEI 9085 также устойчив к воздействию химикатов и пламени, что делает его идеальным для использования в агрессивных средах. Пример применения – изоляторы компании Radiall для своих соединителей SMA 2.9 (см. рис. 5) [10].

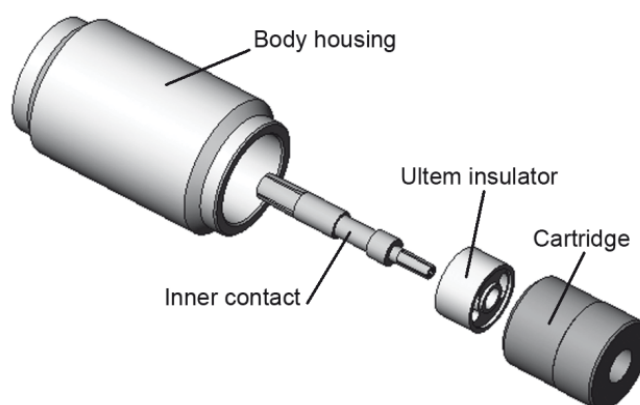


Рис. 5. Строение соединителя SMA 2.9 от компании Radiall

VisiJet SL – один из лучших вариантов материала для фотополимерной печати устройств СВЧ. Обладает почти одинаковым с полиамидом диэлектрической проницаемостью, но у него на порядок выше тангенс диэлектрических потерь. Применим для технологии SLA, что делает его легким и доступным для прототипирования маломощных СВЧ-устройств.

FJY1020C - это СВЧ ламинат из PTFE, армированный стеклотканью и наполненный керамикой, для применения в радиочастотном/микроволновом диапазоне. Имеет низкие диэлектрические потери и хорошую механическую прочность. Выпускается в виде уже готовых подложек для печатных плат [1, 4].

Подробные характеристики предлагаемых материалов для СВЧ-техники можно посмотреть в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры полимеров, подходящих для СВЧ-техники

Параметры	Полипиррол	Графитовый композит	Полиимиды	PEEK	PEI 9085 (Ultem)	VisiJet SL	FJY1020C
Диэлектрическая проницаемость (ϵ)	~3-5	~10-15	~3-4	~3.2	~3.1	~3-4	10.2±0.3
Тангенс угла диэлектрических потерь ($\tan\delta$)	0.01-0.05	0.01-0.05	0.002-0.004	0.002-0.005	0.001	0.01-0.02	0.0021
Теплопроводность (Вт/м*К)	0.1-0.5	100-150	0.1-0.2	0.25	0.22	0.1-0.2	0.82
Электрическая прочность (кВ/мм)	20-30	15-20	20-30	20-30	20-25	15-20	>46
Прочность (МПа)	20-40	50-70	80-100	90-100	100-120	50-70	60-70(изгиб)
Предел прочности (МПа)	25-50	60-80	90-110	100-110	110-130	60-80	-
Стоимость (руб/кг)	3000-6000	3000-5000	8000-12000	8000-12000	10000-15000	6000-8000	15000-20000
Теплоемкость (Дж/г*К)	1.2-1.5	0.7-0.9	1.1-1.3	1.3-1.5	1.2-1.4	1.1-1.3	1.0-1.2
Коэффициент линейного расширения ($10^{-6}/K$)	50-70	10-20	30-50	30-50	40-60	60-80	20-40
Проводимость	Высокая (до 100 См/см)	Средняя (до 40 См/см)	Диэлектрик	Диэлектрик	Диэлектрик	Диэлектрик	Диэлектрик

Современные полимерные материалы открывают новые возможности для создания высокоэффективных устройств как в оптике, так и в СВЧ-технике. В оптике полимеры, такие как ПММА, поликарбонат и циклоолефиновые сополимеры, позволяют создавать легкие и прочные оптические системы с высоким качеством изображения. В СВЧ-технике полимеры, такие как полипиррол, PLA с углеродными добавками, PEEK, PEI 9085 и TPU, обеспечивают высокую электропроводность, термостойкость и механическую прочность, что делает их идеальными для использования в антеннах, радарх и сенсорах.

Выводы

Использование приведенных в статье материалов для производства оптики и СВЧ-техники с помощью аддитивных технологий не только улучшает характеристики устройств, но и снижает их массогабаритные параметры и стоимость. Физические свойства данных материалов могут быть модифицированы в некоторых пределах, что позволяет управлять процессом проектирования будущего прибора. Это делает их перспективными для широкого применения в различных отраслях, включая медицину, телекоммуникации, аэрокосмическую промышленность и военную технику.

Библиографический список

1. Пономарев С.Г., Тарасовский В.П., Кошкин В.И., Боровин Ю.М. Керамические поглотители свч-энергии на основе продуктов химического диспергирования алюминий-магниевого сплава. // Новые огнеупоры. 2016;1(5):54-57. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2016-5-54-57>

2. Файзуллин И.З., Голубчикова К.Е., Вольфсон С.И. Светорассеивающий композиционный материал на основе полистирола, полиэтилена и стеклянных полых микросфер. // Пластические массы. 2019;(7-8):62-66. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2019-7-8-62-66>
3. Екименкова А.С., Вознесенская А.О., Тоцилина Т.В. Особенности применения оптических полимеров при проектировании оптических систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 6. С. 786–790. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-786-790
4. Е. А. Ненашева, О. Н. Трубицына, Н. Ф. Картенко, О. А. Усов Керамические материалы для СВЧ-электроники // Физика твердого тела. – 1999. – Т. 41, № 5. – С. 882-884. – EDN RGQDZH.
5. Межуев Я.О., Штильман М.И., Коршак Ю.В. Применение полианилина и полипиррола в электронике. // Пластические массы. 2020;(7-8):28-31. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2020-7-8-28-31>
6. Шарапов И.А. Оптические материалы, современные свойства и возможные пути развития // Современные научные исследования и инновации. 2021. № 11 [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2021/11/96866> (дата обращения: 01.04.2025).
7. Zhang, J.; Li, B.; Song, H.; Zhao, C.; Liang, S.; Dong, Z.; Yu, J. High Refractive Index Diphenyl Sulfide Polymers for Solar Cell Antireflection Coatings.//Energies 2022, 15, 3972. <https://doi.org/10.3390/en15113972>
8. Использование современных технологий при создании оптико-электронных систем / Г. Г. Горбунов, Д. Н. Еськов, М. А. Парпин, И. В. Родыгин // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2021. – Т. 64, № 2. – С. 126-136. – DOI 10.17586/0021-3454-2021-64-2-126-136. – EDN EICZVV.
9. Garo Khanarian, "Optical properties of cyclic olefin copolymers," Opt. Eng. 40(6) (1 June 2001) <https://doi.org/10.1117/1.1369411>
10. А. Прокимов, Кива Джурицкий, Юлия Смирнова Перспективные изоляционные материалы для радиочастотных кабелей и соединителей // Компоненты и технологии.— 2017 .— №2(187) .— С. 107-115 .— URL: <https://rucont.ru/efd/582512> (дата обращения: 01.04.2025)

УДК 621.382; ГРНТИ 47.09.29

МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОАКСИАЛЬНОГО ЦИРКУЛЯТОРА ВЫСОКОГО УРОВНЯ МОЩНОСТИ

О.А. Горлин, В.В. Климаков

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

Аннотация. В работе представлены результаты моделирования тепловых характеристик развязывающего устройства на 7 кВт. Разработана тепловая модель аналога циркулятора ФКЦВ23-27 в программе Comsol Multiphysics, определены области теплораспределения по узлам развязывающего устройства, заданы электрические параметры и рассчитаны температурные значения.

Ключевые слова: мощные коаксиальные развязывающие устройства, тепловые характеристики, конвекция, излучение теплопроводностью, вносимые потери

THE METHOD OF MODELING THERMAL CHARACTERISTICS HIGH-POWER COAXIAL CIRCULATOR

O.A.Gorlin, V.V. Klimakov

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

Abstract. The paper presents the results of modeling the thermal characteristics of a 7 kW decoupling device. A thermal model of an analogue of the FCCV23-27 circulator has been developed in the Comsol Multiphysics program, the heat distribution regions at the nodes of the decoupling device have been determined, electrical parameters have been set and temperature values have been calculated.

Keywords: powerful coaxial decoupling devices, thermal characteristics, convection, radiation by thermal conductivity, insertion loss

В настоящее время ферритовые развязывающие устройства (ФРУ) находят широкое применение в различных приборах и устройствах СВЧ техники, где являются неотъемлемой частью для многих приемо-передающих модулей многоканальных систем, обеспечивают ра-

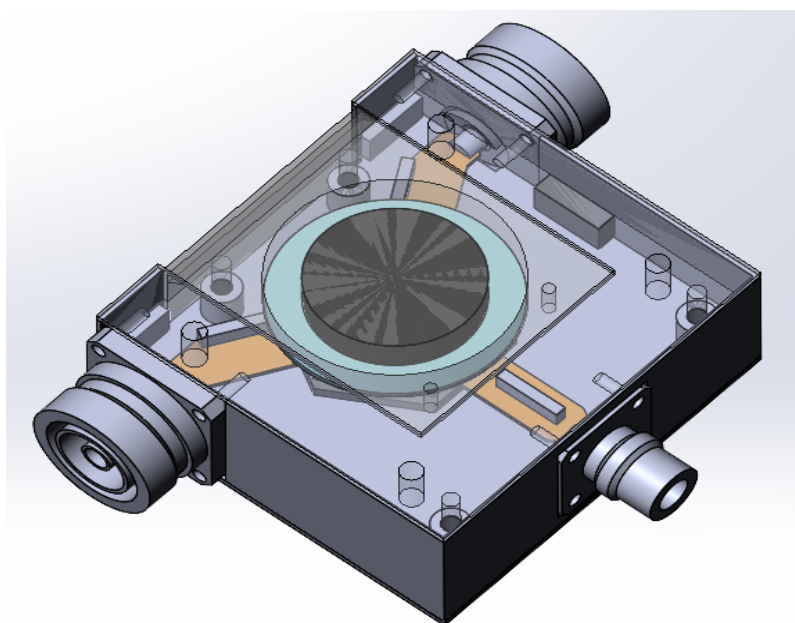
боту генераторов на переменные нагрузки, устойчивость работы усилительных цепочек и т.д. [1-4]. ФРУ используются для защиты мощных источников радиосигналов от переотражений в СВЧ-трактах, для обеспечения их стабильности в случае изменяющейся во времени нагрузки и для развязки передатчика, приемника и антенны в радиолокационных системах, особенно в фазированных антенных решетках [5]. Одной из важных задач при разработке развязывающих (РУ) на высокую мощность [2] является не только возможность возникновения электрического пробоя, который ухудшает согласование прибора и сопровождается при его развитии дополнительными потерями, но и разогрев ферритовых вкладышей за счет поглощаемой ими электромагнитной энергии, создающими локальные перегревы, которые также выводят из строя ФРУ.

Целью данной работы является разработка модели, подбора метода расчёта и исследование температурных характеристик коаксиального развязывающего устройства.

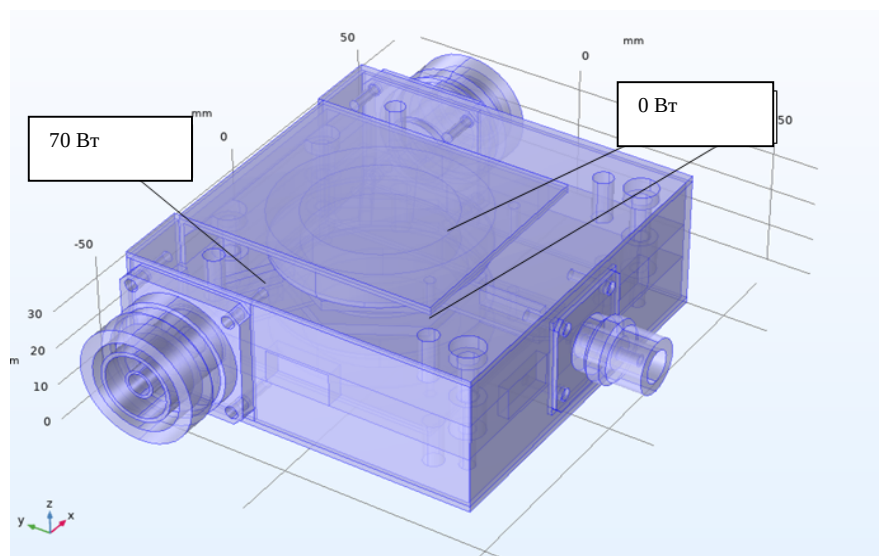
В программе Comsol Multiphysics была разработана модель ФРУ (рисунок 1) аналога коаксиального циркулятора ФКЦВ23-27 для исследования температурных характеристик. Исходные данные были взяты из ЕСКФ.430441.085ТУ СВЧ-ПРИБОРЫ и ЭЛЕМЕНТЫ завода «МАГНЕТОН» [4] и должны соответствовать значениям, указанным в таблице 1.

Таблица 1. Требования к параметрам ФРУ

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
Рассеиваемая мощность при максимальном уровне входного сигнала и прямых потерях 0,3 дБ	Вт	70



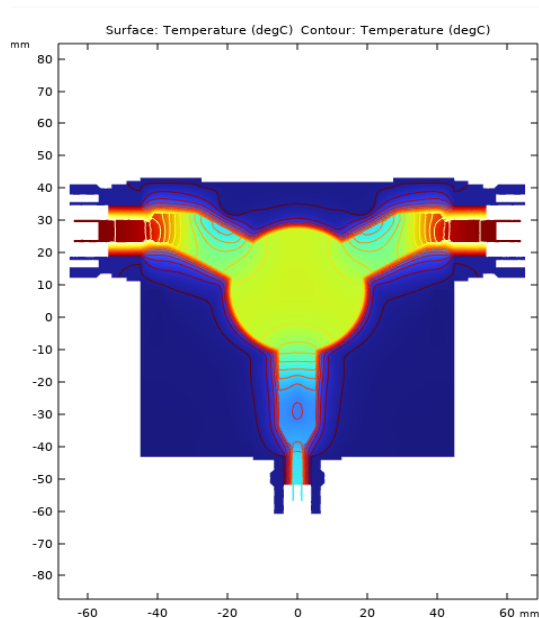
а)



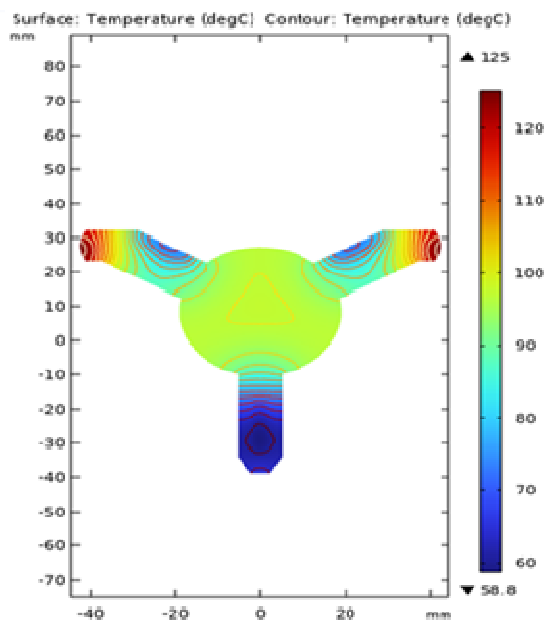
б)

Рис. 1. Развязывающее устройство: а) – модель, разработанная в программе Comsol Multiphysics; б) – модель РУ с распределением тепла

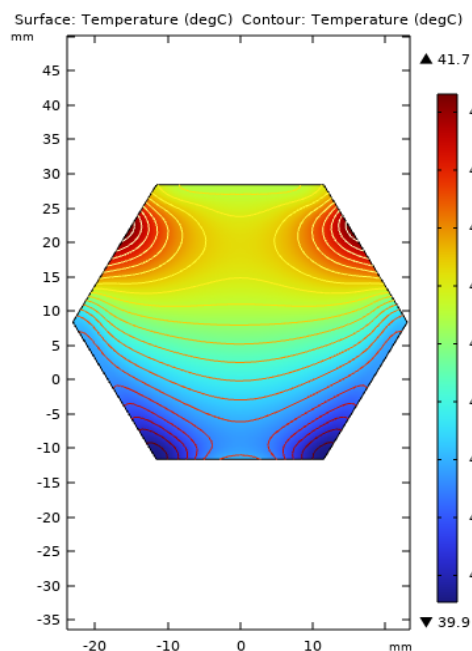
В модели за источник тепла был выбран проводник, как в работе [6]. В результате моделирования конструкции происходит разогрев развязывающего устройства до 1340С на спаянной части проводника с разъёмом (рисунок 2, а и б), а температура остальных частей РУ не превышает 1000С (рисунок 2, а и в). По результатам можно сказать, что смоделированное коаксиальное РУ длительное время работать не сможет – произойдет перегрев в узлах спайки проводника с разъемами.



а



б



б

Рис. 2. Результаты расчета температурного поля ФРУ:
а – корпус с разъемами; б – проводник; в – феррит

В результате экспериментальных исследований циркулятора Ф К Ц В 23-27 на мощности 7 кВт были зафиксированы значения температур вблизи поверхности разъемом 50°C при температуре окружающей среды 25°C , что показывает плохую сходимость результатов с разработанной моделью. Для устранения данной ошибки и корректировки тепловой модели был смоделирован резонаторный блок, состоящий из проводника и ферритовых обкладок, с целью корректировки распределения источника тепла. Максимальные потери в экспериментальном развязывающем устройстве ФКЦВ23-27 составляют 0,5 дБ, при этом на разъемах составляют 0,2 дБ как заявлено производителем, в феррите 0,2 дБ (рисунок 3) и в проводнике с учетом припаивания к разъемам 0,1 дБ.

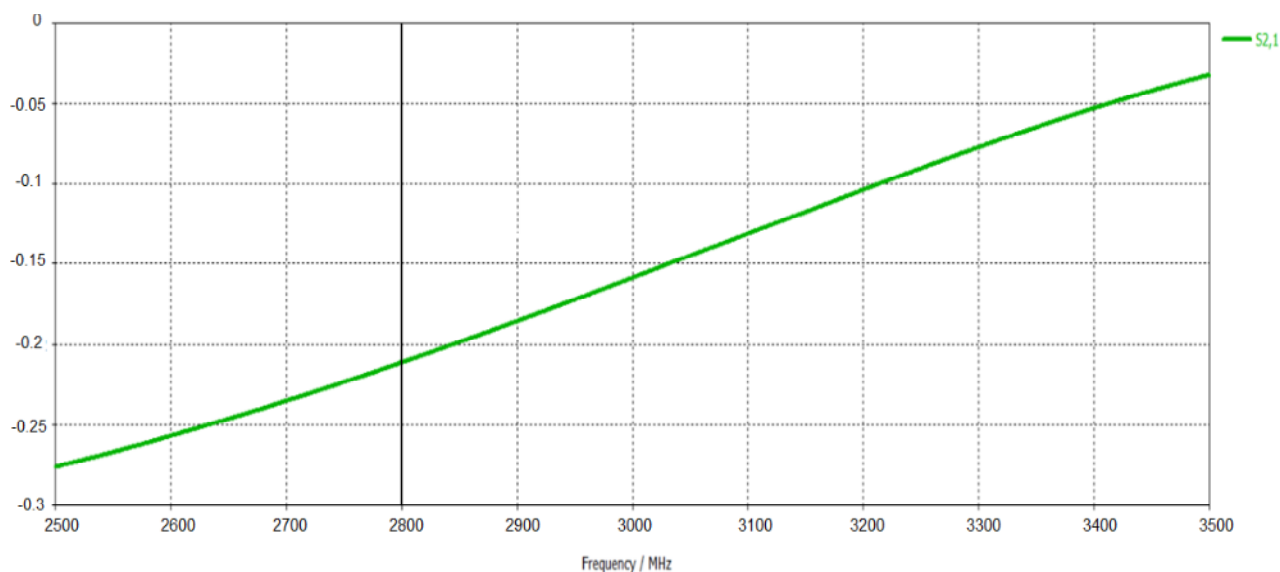


Рис. 3. Прямые потери в проводнике и ферритах

Таким образом, было выбрано следующее распределение тепловой мощности по узлам развязывающего устройства между проводником (42 Вт) и ферритами (28 Вт), показанный на рисунке 4.

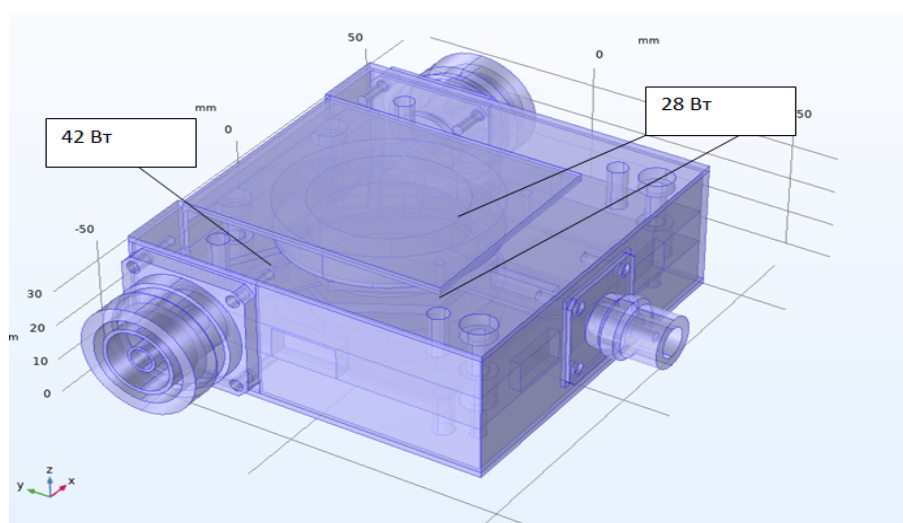


Рис. 4. Модернизированная модель РУ

По данной модели получены результаты расчета температурного поля РУ (рисунок 5).

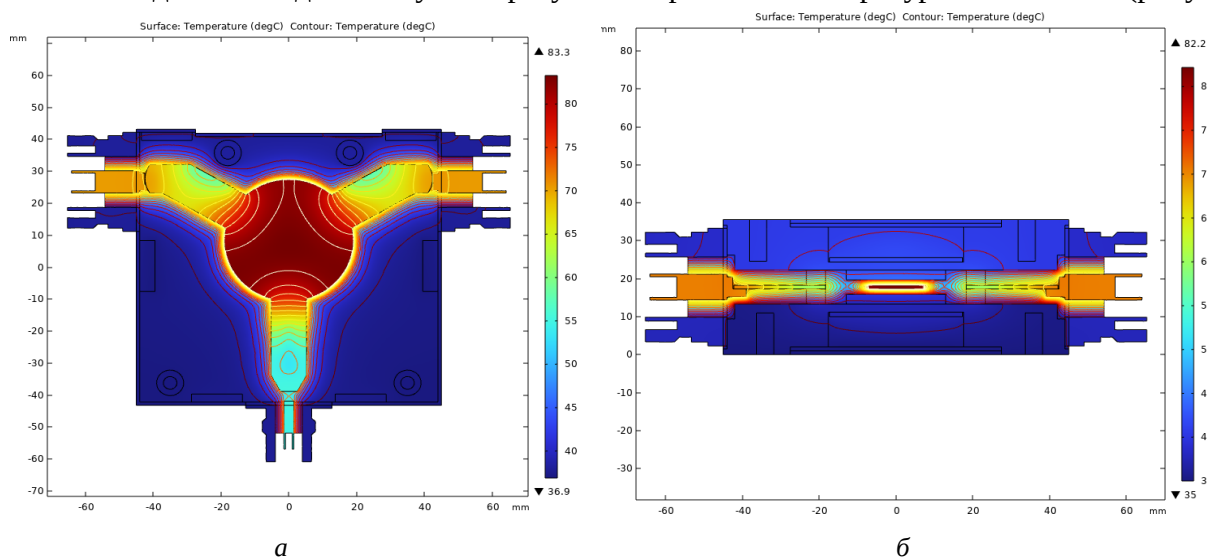


Рис. 5. Результаты расчета температурного поля ФРУ:
а) – вид сверху; б) – вид сбоку

Из рисунка 5 видно, общая температура РУ снизилась до $83,3^{\circ}\text{C}$, перегрева в области соединения с разъемами нет.

Заключение

Разработана тепловая модель коаксиального развязывающего устройства в программе Comsol Multiphysics и предложен метод расчета задания тепловой мощности на узлах РУ из расчета прямых потерь по элементам конструкции. Выявлены слабые места в коаксиальном развязывающем устройстве (перегрев в соединениях разъемов с проводником) и найдены пути их решения. Зафиксирована максимальная температура в моделируемой конструкции на проводнике $83,3^{\circ}\text{C}$, что сопоставимо с результатами эксперимента с погрешностью 5 %.

Рассчитана конструкция радиаторов, охлаждаемых естественной конвекцией, которая обеспечивает рассеиваемую мощность 70 Вт.

Библиографический список

1. Д.П. Ефремов, Современное состояние развития производства в области ферритовых развязывающих приборов // «Электроника и микроэлектроника СВЧ», том 1, 2015, С. 201-206.
2. Н. Егоров, Мощные СВЧ-устройства – решения компании FERRITE MICROWAVE TECHNOLOGIES// Электроника НТБ, №4, 2014, С.150-154.
3. David M. Pozar. Microwave Enineering. // Wley.-4th ed/ 2011, 756 p.
4. Каталог продукции фирмы ОАО «завод Магнетон» <http://magneton@magneton.ru> (Дата обращения 1.03.25)
5. Helzajn J. The Stripline Circulator Theory and Practice. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008, 604 p.
6. Горлин О.А. Моделирование тепловых характеристик мощного развязывающего устройства/ Горлин О.А., Климаков В.В.// Сборник трудов VII Международного научно-технического форума. В 10-ти томах. Рязань РГРТУ, 2024,. С. 32-35.

УДК 621.382; ГРНТИ 47.09.29

УВЕЛИЧЕНИЕ ПОЛОСЫ ЧАСТОТ РАЗВЯЗЫВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

О.А. Горлин, Д.А. Яшин

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

Аннотация. В работе представлены результаты моделирования развязывающего устройства. Разработана модель аналога циркулятора ЦФМ, оптимизированы магнитная система и проводник с целью расширения рабочей полосы. Получено расширение рабочей полосы на 200 МГц.

Ключевые слова: микрополосковые развязывающие устройства, расширение полосы, реактивные элементы, вносимые потери

INCREASING THE FREQUENCY BAND OF DECOUPLING DEVICES

O.A.Gorlin, D.A. Yashin

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

Abstract. The paper presents the results of modeling the decoupling device. A model of the CFM circulator analog has been developed, the magnetic system and conductor have been optimized in order to expand the working band. An operating band extension of 200 MHz has been obtained.

Keywords: microstrip decoupling devices, band expansion, reactive elements, insertion loss

Микрополосковые развязывающие устройства (МРУ) являются неотъемлемой частью радиосистем, которые обеспечивают равномерность уровня СВЧ мощности генераторов, устойчивую работу усилительных цепочек на переменные нагрузки, позволяют распределить мощность СВЧ сигнала в цепях радиолокационных станций [1-3]. Исследуемый циркулятор ферритовый магнитный (ЦФМ) использовался в блоках для развязки устройств в диапазоне 2,7-3,1 ГГц, но в связи модернизацией блока и увеличения рабочей частоты с 2,6 до 3,2 ГГц на сегодняшний день данное развязывающее устройство (РУ) не применяется.

Существуют основные пути повышения полосы частот в микрополосковых Y-циркуляторах:

- использование четвертьволновых трансформаторов или четырехполюсников из отрезков линии [2];
- использование сосредоточенных элементов [4-5];
- использование реактивных элементов [6-9].

При использовании четвертьволновых трансформаторов полосу можно увеличить до 15-20%, но при этом увеличиваются габаритные размеры. Сосредоточенные элементы в виде LC -параметров создают полосно-расширяющие цепи, увеличивающие полосу до 25%, но с повышением рабочей частоты возникает сложность в разработке и настройке, а соответственно и серийном производстве. Наилучшим вариантом расширения полосы РУ ЦФМ является применение реактивных элементов.

Целью данной работы является поиск путей расширения рабочей полосы, разработка модели, исследование основных параметров и нахождение оптимальных с целью получения максимальной рабочей полосы частот не изменяя габаритных размеров РУ.

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	0,3
Развязка, не менее	дБ	15
КСВН входа, не более	-	1,5
Диапазон рабочих частот, не более	ГГц	2,7-3,1

В программе была разработана трёхмерная модель аналога ЦФМ для исследования основных электрических параметров (рисунке 1).

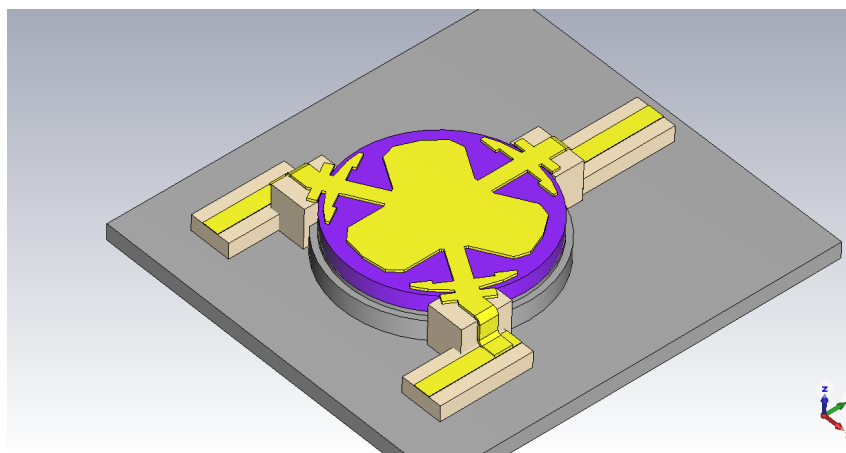


Рис. 1. Трёхмерная модель развязывающего устройства с разработанным вариантом топологии резонатора

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

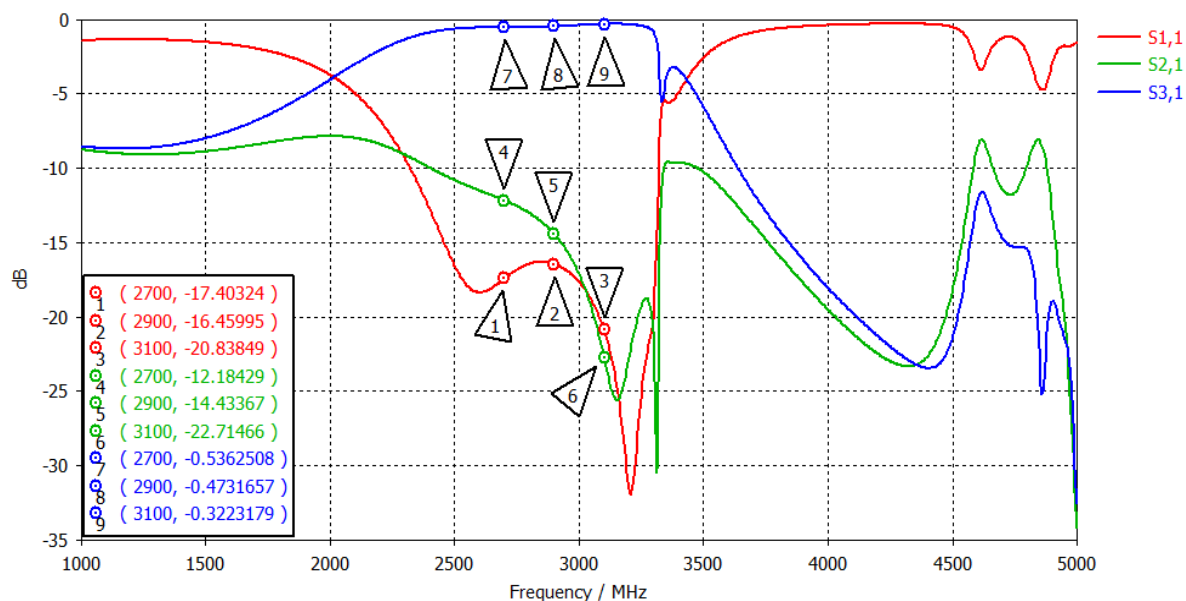


Рис. 2. Частотная зависимость прямых потерь, развязки и КСВН развязывающего устройства с действующим вариантом топологии проводника

Таблица 2 – Параметры развязывающего устройства РАВС.434823.204-01, полученные по результатам моделирования

Параметры	2,7 ГГц	2,9 ГГц	3,1 ГГц	
1. Прямые потери, дБ	-0,54	-0,47	-0,32	
2. Развязка, дБ	-12,18	-14,43	-22,71	
3. КСВН, дБ	-17,40 (1,31)	-16,45 (1,35)	-20,84 (1,2)	

В результате моделирования показано, что данный циркулятор работает в полосе частот 400 МГц, при этом изменяя магнитное поле можем двигать рабочую полосу частот. Данная модель сопоставлялась с экспериментальным образцом, который показал результаты соответствующие моделированию с погрешностью в 4 %.

Для расширения полосы частот по методу показанному в работе [7] была изменена топология проводника (рисунок 3). Оптимизация рабочей полосы методом покоординатного спуска от изменения геометрических параметров проводника и внешнего магнитного поля, полученные результаты показанны на рисунке 4 и таблице 4.

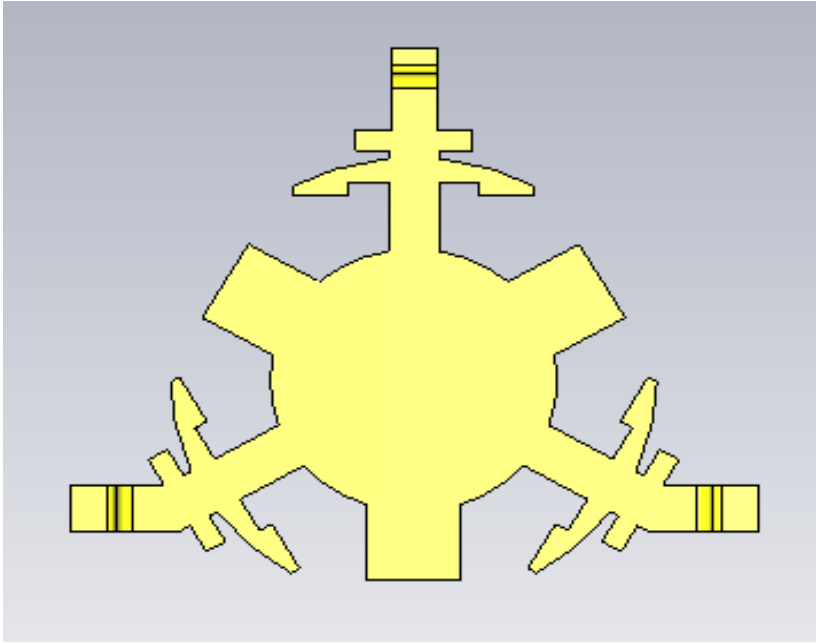


Рис. 3. Топология проводника РУ

Моделирование РУ с новой топологией проводника и изменяя магнитное поле были получены результаты, приведенные на рисунке 4 и таблице 3.

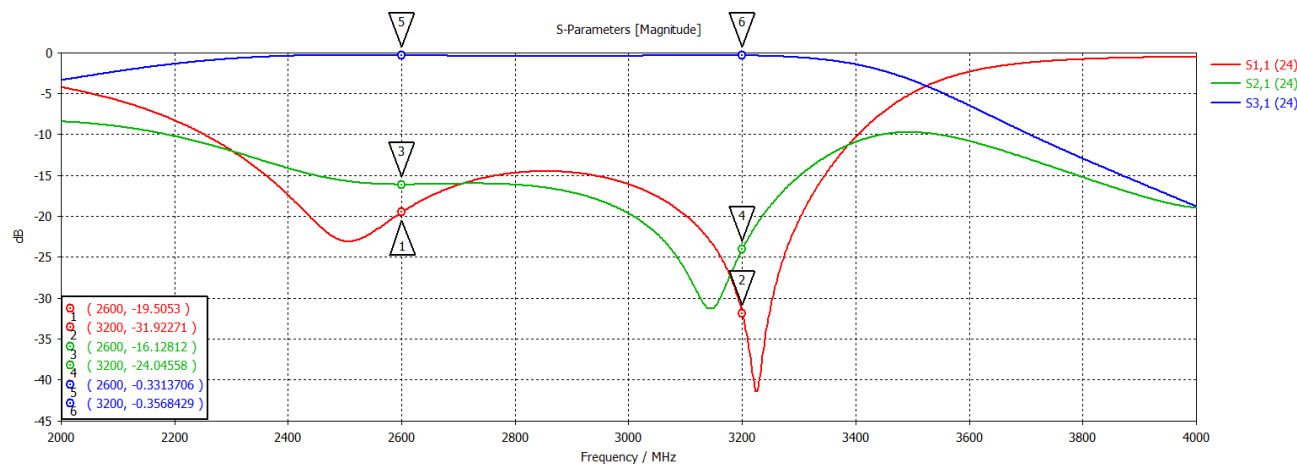


Рис. 4. Частотная зависимость прямых потерь, развязки и КСВН развязывающего устройства с действующим вариантом топологии проводника в программе CST StudioSuiteпо действующему КД (при магнитном поле 1600 Эр)

Таблица 3 – Параметры развязывающего устройства полученные по результатам моделирования с новой топологией проводника

Параметры	2,6 ГГц	3,2 ГГц
1. Прямые потери, дБ	-0,33	-0,36
2. Развязка, дБ	-16,12	-24,04
3. КСВН, дБ	-19,50 (1,24)	-31,92 (1,06)

Из рисунка 4 и таблицы 3 видно, что прямые потери не превышают 0,4 дБ, минимальная развязка составляет 15 дБ и КСВН не более 1,24, что удовлетворяет параметрам КД и показывает возможность реализации РУ с рабочей полосой частот 600 МГц.

Заключение

Разработана модель ЦФМ с реактивными элементами, с помощью которой можно определить оптимальную совокупность параметров резонаторной системы и намагниченности ферритов, обеспечивающих максимальную полосу РУ при неизменных габаритных размерах РУ. Моделирование показало, увеличение рабочей полосы с 400 МГц до 600 МГц с параметрами, удовлетворяющими КД (таблица 1), что показывает возможность реализации и дальнейшего использования циркулятора в усовершенствованных блоках.

Библиографический список

1. В.С. Щербаков Развитие СВЧ электроники в России, «СВЧ-электроника». Материалы научно-технической конференции. Фрязино, 2016.
2. Вамберский М.В, Абрамов В.П., Казанцев В.И. Конструирование ферритовых развязывающих приборов СВЧ. Москва: Радио и связь, 1982. – 136 с.
3. J. Helzajn The Stripline Circulator Theory and Practice. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008. – 640 p.
4. S. Takeda, T. Okada Circuit Simulator for wideband lumped element circulator // Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), 2018. – Pp. 1262-1264.
5. Бородин В.Н. Автоматизированное проектирование ферритовых циркуляторов на сосредоточенных элементах / Бородин В.Н., Козлов В.А., Михалицын Е.А., Сорокин А.В. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2020. Т.23, №4. С.74-84.
6. Вамберский М.В. Инженерный расчет полосковых Y-циркуляторов дециметрового диапазона волн / Вамберский М.В, Казанцев В.И. // Радиотехника. 1968. Т.23, №11. С.24-30.
7. Буданов В.Н. Расширение полосы частот микрополосковых Y-циркуляторов с помощью реактивных элементов / Буданов В.Н., Петров А.С., Соколова Т.Н., Волобуев М.Н. // Электронная техника. 1978. Серия 10, №5. С.57-62.
8. 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.
9. Гуревич Г.Л. Миниатюрный полосковый Y-циркулятор на сосредоточенных элементах / Гуревич Г.Л., Малеев В.П., Отмахов Ю.А. // Электроника СВЧ. Серия 1, №3. 1975. – С.46-53.

СЕКЦИЯ «ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА»

УДК 53.084.6, 53.084.872-876; ГРНТИ 29.19.31

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫХ КОНТАКТОВ ПРИ ПОМОЩИ РАСТРОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

А.С. Ефимкин, Д.С. Логинов, Т.А. Холомина, Н.Б. Рыбин

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина
Российская Федерация, Рязань, aleksejefimkin133@gmail.com

Аннотация. Экспериментально изучена и проанализирована зависимость параметров низкочастотного шума магнитоуправляемых контактов от площади пятен контактной эрозии, образовавшихся после коммутационных испытаний.

Ключевые слова: магнитоуправляемые контакты, низкочастотный шум, спектральная плотность мощности шума, контактная эрозия.

STUDY OF THE SURFACE OF MAGNETO-CONTROLLED CONTACTS USING SCANNING ELECTRON MICROSCOPY (SEM)

A.S. Efimkin, D.S. Loginov, T.A. Kholomina, N.B. Rybin

Ryazan State Radio Engineering University named after V. F. Utkin.
Russia, Ryazan, aleksejefimkin133@gmail.com

Abstract. The dependence of the parameters of low-frequency noise of magneto-controlled contacts on the area of contact erosion spots formed after switching tests was experimentally studied and analyzed.

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

Введение

Флуктуации параметров объектов являются следствием протекающих в них процессов и проявляются в виде низкочастотного (НЧ) шума, который обнаружен во всех приборах и материалах, однако его общая физическая природа окончательно не выяснена. Изучение этого фундаментального явления, которое влияет на пределы чувствительности электронных приборов, является актуальной задачей [1-3].

Низкочастотная шумовая спектроскопия является неразрушающим экспериментальным методом исследования материалов и электронных устройств. С помощью сочетания методов спектроскопии НЧ шумов и физического исследования свойств можно сделать выводы о состоянии исследуемой системы и процессах, которые в ней протекают.

Спектральная плотность мощности (СПМ) НЧ шума P описывается зависимостью вида $P \sim 1/f^\beta$, где f – частота, β – показатель формы спектра. Повышение СПМ НЧ шума исследуемого объекта свидетельствует об увеличении разупорядоченности системы [1].

Целью настоящей работы явилось исследование взаимосвязи площади пятен контактной эрозии на поверхности магнитоуправляемых контактов после многократных коммутационных испытаний с показателем формы β спектра НЧ шума.

Методика эксперимента

В работе исследованы параметры магнитоуправляемых контактов (герконов) МКА-14103, предназначенных для коммутации цепей постоянного и переменного токов. Контактные пластины герконов изготовлены из сильномагнитного низконикелевого пермаллоя – сплава железа и никеля. Часть образцов имела золото-рутениевое гальваническое покрытие контактных пластин, которое применяется с целью повышения надёжности геркона и сни-

жения значения переходного сопротивления за счет обеспечения химической инертности и стабильности во времени рабочей контактирующей поверхности. Для исследования и прогнозирования потенциальной надежности магнитоуправляемых контактов были проведены многократные коммутационные испытания – искусственный износ.

Параметры спектров НЧ шума герконов определены с помощью разработанных автоматизированного измерительно-аналитического комплекса и специального программного обеспечения [2]. Величина контактного сопротивления приборов R_k определялась по результатам измерений в схеме четырёхполюсника по методике, описанной в [3].

После вскрытия исследуемых образцов изучали структуру, морфологию и химический состав поверхности с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6610LV, оснащенного приставкой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа INCA X-Max20. Морфологию поверхности образцов изучали в режиме вторичной электронной визуализации (SEI) с ускоряющим напряжением 30 кВ.

Экспериментальные результаты

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие задачи.

- Измерение спектров низкочастотного шума образцов магнитоуправляемых контактов до коммутационных испытаний с последующей математической обработкой.
- Многократная коммутация контактов при различных режимах работы для создания искусственного износа.
- Измерение спектров низкочастотного шума образцов магнитоуправляемых контактов после искусственного износа с последующей математической обработкой.
- Исследование особенностей поверхности материала магнитоуправляемых контактов при помощи растровой электронной микроскопии (РЭМ).

Ранее опубликованные данные [4] свидетельствуют о том, что в процессе эксплуатации герконов контактные пластины подвергаются электрической эрозии, степень которой влияет на величину контактного сопротивления R_k , являющегося важнейшим параметром геркона.

Эрозия контактных пластин герконов происходит за счет теплового действия дуги: в точках контакта локальные зоны поверхности в стадии размыкания разогреваются до температуры плавления, что приводит к интенсивному испарению материала. В результате на поверхности образуются кратеры, размеры которых определяются током разряда и теплофизическими свойствами контактного материала.

На спектрах химического состава контактных пластин, полученных с помощью рентгеновского энергодисперсионного микроанализа, на соответствующих образцах обнаружены пики, соответствующие наличию на поверхности контактных пластин золота и рутения.

Для каждого образца при помощи растрового электронного микроскопа были исследованы поверхности анода и катода, а также измерены площади контактной эрозии. После многократных циклов переключения постоянного тока (коммутационных испытаний) в результате мостикового переноса на аноде создавался своеобразный кратер, а на катоде — соответствующий ему пик. РЭМ изображения поверхности образца геркона представлены на рисунке 1.

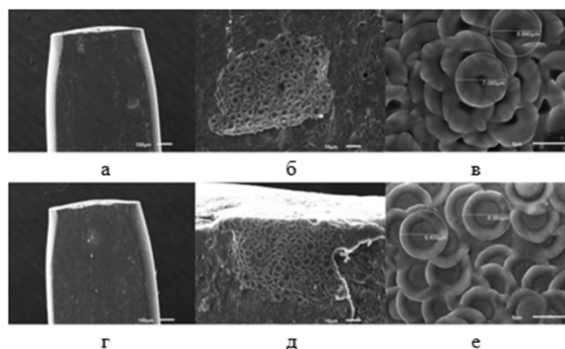


Рис. 1. Изображения контактов, полученные при помощи РЭМ:
а, г – общие виды катода и анода соответственно; б, д – контактные пятна катода и анода соответственно;
в, е – эрозионные образования на поверхности контактов

В таблицах 1 и 2 приведены параметры опытных образцов магнитоуправляемых контактов до и после коммутационных испытаний соответственно. Обозначения в таблицах: S_a и S_k – площади пятен контактной эрозии на аноде и катоде соответственно, полученные и измеренные при помощи РЭМ. Величина контактного сопротивления R_k определялась по результатам измерений по схеме четырёхполюсника в соответствии с методикой, описанной в [3].

Таблица 1. Значение контактного сопротивления и параметры спектров НЧ шума магнитоуправляемых контактов МКА-14103 с покрытием Au-Ru и без покрытия пермаллоевых пластин (сплав Fe-Ni) до коммутационных испытаний

№ образца	R_k , Ом	СПМ, В ² /Гц	β	Материал
1	0,08	$5,64 \cdot 10^{-9}$	1,02	Сплав Fe-Ni с покрытием Au-Ru
2	0,08	$1,78 \cdot 10^{-7}$	0,65	Сплав Fe-Ni с покрытием Au-Ru
3	0,08	$7,93 \cdot 10^{-9}$	0,31	Сплав Fe-Ni с покрытием Au-Ru
4	0,08	$3,21 \cdot 10^{-8}$	1,21	Сплав Fe-Ni с покрытием Au-Ru
5	0,08	$1,97 \cdot 10^{-8}$	1,23	Сплав Fe-Ni с покрытием Au-Ru
6	0,11	$3,27 \cdot 10^{-8}$	0,54	Сплав Fe-Ni
7	0,11	$2,93 \cdot 10^{-9}$	2,02	Сплав Fe-Ni
8	0,16	$5,64 \cdot 10^{-9}$	1,83	Сплав Fe-Ni
9	0,12	$6,52 \cdot 10^{-9}$	1,04	Сплав Fe-Ni

Таблица 2. Параметры спектров НЧ шума магнитоуправляемых контактов МКА-14103 с покрытием Au-Ru и без покрытия пермаллоевых пластин (сплав Fe-Ni) после коммутационных испытаний

№ образца	Кол-во замыканий	S_a	S_k	СПМ, В ² /Гц	β
1	10000	9,6	10,47	$1,42 \cdot 10^{-8}$	2,07
2	2000	6,76	5,75	$3,68 \cdot 10^{-8}$	1,72
3	2000	4,62	4,79	$1,93 \cdot 10^{-8}$	0,37
4	4000	-	-	$2,94 \cdot 10^{-6}$	1,58
5	2000	5,45	5,87	$8,53 \cdot 10^{-8}$	1,34
6	10000	17,74	16,58	$5,76 \cdot 10^{-8}$	1,09
7	4000	10,77	11,67	$2,21 \cdot 10^{-7}$	1,53
8	4000	6,22	6,81	$1,91 \cdot 10^{-8}$	1,27
9	10000	3,72	4,24	$1,83 \cdot 10^{-8}$	1,48

Из данных таблицы 1 следует, что у образцов с покрытием Au-Ru контактное сопротивление R_k ниже, чем у образцов без покрытия. В работе [4] это связывают с образованием полимерных плёнок из адсорбированных на поверхности контактов углерода, кислорода и

водорода. Из-за сложного рельефа углеродистые соединения плохо удаляются растворителями.

Следовательно, стабильность R_k у образцов со специальными покрытиями связана с экранировкой углеводородных загрязнений пластины покрытием Au-Ru.

Из данных таблицы 2 следует, что образцы с покрытием Au-Ru имели больший разброс параметра β . В работах Жигальского Г. П. [1, 6] это объясняется тем, что внутри проводящих плёнок возникает больше механических напряжений, и, чем их больше, тем большее значение параметра β для них характерно.

На рисунках 2 и 3 показана взаимосвязь площади пятен контактной эрозии на аноде с показателем формы спектра β после коммутационных испытаний. Зависимости построены для образцов с покрытием Au-Ru и без него.

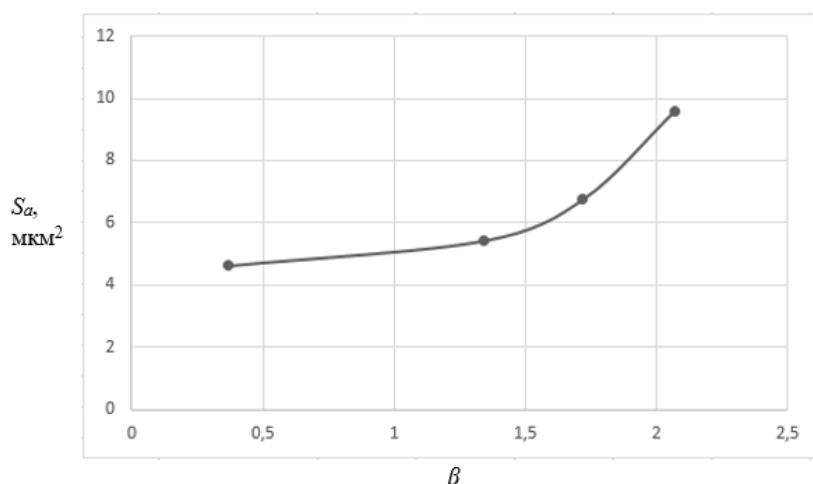


Рис. 2. Зависимость площади пятен контактной эрозии на аноде S_a от показателя формы спектра β для образцов с покрытием Au-Ru (1-5)

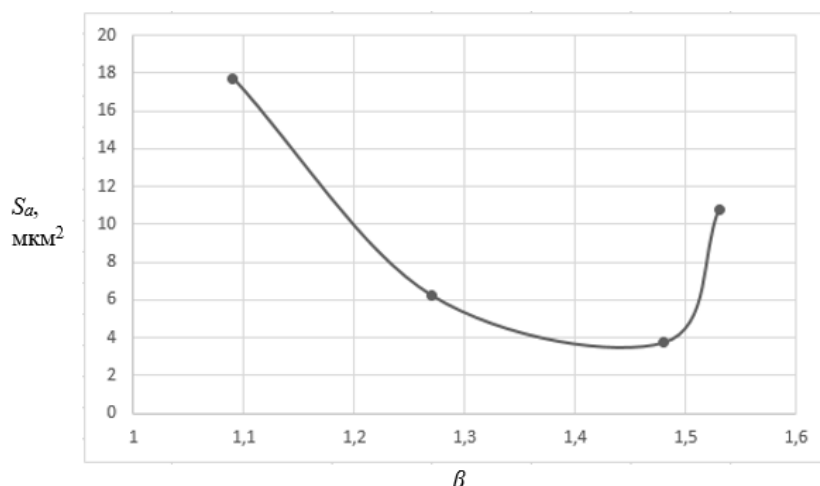


Рис. 3. Зависимость площади пятен контактной эрозии на аноде S_a от показателя формы спектра β для образцов без покрытия (6-9)

Заключение

Анализ экспериментальных результатов показал, что нанесение покрытия Au-Ru снижает как площадь пятен контактной эрозии герконов одной партии, так и разброс площадей по сравнению с образцами без покрытия, в среднем в 1,5-2 раза.

Полученные результаты коррелируют с данными, полученными в работе [5] при исследовании влияния золото-рутениевого покрытия на контактное сопротивление и параметры спектров НЧ шума герконов.

Таким образом, магнитоуправляемые контакты с золото-рутениевым покрытием контактных пластин характеризуются более стабильными характеристиками, что позволяет прогнозировать более высокий ресурс их работы.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования РГРТУ.

Библиографический список

1. Жигальский Г. П., Холомина Т. А. Избыточные шумы и глубокие уровни в детекторах ядерных частиц и ионизирующего излучения на основе GaAs // Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60. № 6. С. 553–581.
2. Логинов Д. С., Холомина Т. А., Литвинов В. Г. Измерительно-аналитический комплекс для автоматизированных испытаний магнитоуправляемых контактов // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 3. С. 134–140.
3. Логинов Д. С., Холомина Т. А., Шерова И. Ф. Исследование влияния условий коммутации на измерение спектра низкочастотного шума магнитоуправляемых контактов // Вестник РГРТУ. 2022. № 82. С. 228–236.
4. Зельцер И. А., Карабанов С. М., Майзельс Р. М., Саблин В. А. Исследование и разработка методов модификации поверхности герметизированных магнитоуправляемых контактов // Сборник трудов второй Международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе», 1-3 октября 2008 г. Под ред. д.т.н. С.М. Карабанова. - Рязань: Изд. «Полиграф», 2009. 35с.
5. Логинов Д. С., Рыбин Н. Б., Холомина Т. А., Шерова И. Ф. Исследование влияния Au-Ru покрытий магнитоуправляемых контактов на параметры спектров низкочастотного шума // Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2023. Сборник трудов VI Международного научно-технического форума: в 10 т. Т.2 / под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2023. С. 64–69.
6. Жигальский Г. П. Шумы вида $1/f$ и нелинейные эффекты в тонких металлических плёнках // УФН. 1997. Т. 167. № 6. С. 623–647.

УДК 621.315.592; ГРНТИ 47.09.29

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И ТИПЫ ДЕФЕКТОВ С ГЛУБОКИМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УРОВНЯМИ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Д.Р. Горячкин, В.Г. Литвинов

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

Аннотация. Статья посвящена дефектам, образующим глубокие энергетические уровни в полупроводниках, их формированию и влиянию на свойства материалов. Рассмотрены механизмы возникновения таких дефектов, включая примеси, комплексы дефектов. Описаны типы дефектов (акцепторные, донорные, рекомбинационные центры) и их влияние на рекомбинацию, пробой p-n-переходов и температурную стабильность.

Ключевые слова: глубокие энергетические уровни, дефекты в полупроводниках, рекомбинационные центры.

FORMATION AND TYPES OF DEEP ENERGY LEVELS DEFECTS IN SEMICONDUCTORS

D.R. Goryachkin, V.G. Litvinov

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

Abstract. The article is devoted to defects with deep energy levels in semiconductors, their formation and influence on the properties of materials. The mechanisms of occurrence of such defects, including impurities, defect complexes are considered. The types of defects (acceptor, donor, recombination centers) and their influence on recombination, breakdown of p-n junctions and temperature stability are described.

Keywords: deep energy levels, defects in semiconductors, recombination centers.

Полупроводники являются основой современной электроники, и их свойства во многом определяются наличием дефектов в кристаллической решетке. Дефекты с глубокими энергетическими уровнями играют особую роль в полупроводниковых материалах, так как они могут существенно влиять на электрические, оптические и рекомбинационные свойства. В данной статье рассматриваются механизмы формирования таких дефектов, их типы и влияние на свойства полупроводников.

Дефекты в полупроводниках можно разделить на точечные (вакансии, межузельные атомы, примеси), линейные (дислокации), поверхностные и объемные. Наиболее значимыми для электронных свойств являются точечные дефекты, которые могут создавать энергетические уровни в запрещенной зоне полупроводника. Эти уровни могут быть мелкими (близкими к зоне проводимости или валентной зоне) или глубокими (расположенными ближе к середине запрещенной зоны).

Глубокие энергетические уровни образуются из-за сильного локального нарушения кристаллической решетки, что приводит к значительному изменению потенциала в области дефекта. Основные механизмы формирования таких уровней включают образование следующих видов дефектов.

- *Примесные атомы:* например, атомы переходных металлов (Fe, Cu, Au) в кремнии или арсениде галлия создают глубокие уровни из-за сильного взаимодействия с окружающими атомами [1].
- *Комплексы дефектов:* взаимодействие вакансий, межузельных атомов и примесей может приводить к образованию сложных дефектов с глубокими уровнями. Например, комплекс вакансия-кислород (V-O) в кремнии [2].
- *Радиационные повреждения:* воздействие ионизирующего излучения может создавать дефекты с глубокими уровнями, такие как пары Френкеля (вакансия + межузельный атом) [3].

Дефекты с глубокими уровнями также можно классифицировать по их природе и влиянию на свойства полупроводника.

- *Акцепторные дефекты:* эти дефекты захватывают электроны из валентной зоны, создавая положительно заряженные состояния. Примером является медь в кремнии (Cu_Si) [4].
- *Донорные дефекты:* такие дефекты отдают электроны в зону проводимости, создавая отрицательно заряженные состояния. Например, золото в кремнии (Au_Si) [5].
- *Рекомбинационные центры:* дефекты с глубокими уровнями часто выступают в роли центров рекомбинации, уменьшая время жизни носителей заряда. Это характерно для дефектов, создаваемых переходными металлами [6].
- *Ловушки для носителей заряда:* глубокие уровни могут захватывать электроны или дырки, что приводит к их временному удержанию и влияет на проводимость материала [7].

Дефекты с глубокими уровнями оказывают значительное влияние на электронные и оптические свойства полупроводников.

- *Рекомбинация носителей заряда:* глубокие уровни увеличивают скорость рекомбинации, что снижает эффективность светодиодов и солнечных элементов [8].
- *Пробой p-n-переходов:* наличие глубоких уровней может приводить к преждевременному пробое из-за ударной ионизации [9].
- *Температурная стабильность:* дефекты с глубокими уровнями могут вызывать нестабильность параметров полупроводниковых приборов при изменении температуры [10].

Виды известных дефектов в кремнии (Si)

Дефекты с глубокими уровнями в полупроводниках характеризуются специфическими параметрами: энергетическим положением в запрещенной зоне, сечениями захвата электронов и дырок, а также их влиянием на электрические свойства материалов. Ниже приведена таблица с ключевыми дефектами в кремнии (Si).

Таблица. Дефекты с глубокими уровнями в кремнии [5]

Тип дефекта	Вид дефекта	Энергетический уровень	Сечение захвата	Метод исследования
Точечные дефекты	Отсутствие атома в узле кристаллической решетки	$E_c - 0.05$ эВ (нейтральная вакансия) $E_v + 0.21$ эВ (заряженные состояния)	$\sigma_n \approx 10^{-15} \text{ см}^2$, $\sigma_p \approx 10^{-16} \text{ см}^2$	DLTS
	Межузельные атомы	$E_c - 0.3$ эВ	$\sigma_n \approx 10^{-14} \text{ см}^2$	DLTS, TSC
Примесные дефекты	Железо (Fe)	$E_c - 0.4$ эВ (акцептор), $E_v + 0.32$ эВ	$\sigma_n \approx 10^{-15} \text{ см}^2$, $\sigma_p \approx 10^{-16} \text{ см}^2$	DLTS, EPR
	Медь (Cu)	$E_c - 0.24$ эВ, $E_v + 0.15$ эВ	$\sigma_n \approx 10^{-14} \text{ см}^2$	DLTS, EPR
	Золото (Au)	$E_c - 0.55$ эВ (донор), $E_v + 0.35$ эВ (акцептор)	$\sigma_n \approx 10^{-15} \text{ см}^2$, $\sigma_p \approx 10^{-16} \text{ см}^2$	DLTS, EPR
	Бор (B)	$E_v + 0.045$ эВ (акцептор)	$\sigma_p \approx 10^{-16} \text{ см}^2$	DLTS, C-V
	Фосфор (P)	$E_v - 0.045$ эВ (донор)	$\sigma_n \approx 10^{-16} \text{ см}^2$	DLTS, C-V
Комплексные дефекты	Комплекс вакансия-кислород (А-центр, V-O)	$E_c - 0.17$ эВ	$\sigma_n \approx 10^{-16} \text{ см}^2$	DLTS, TEM
	Комплекс вакансия-фосфор (Е-центр, V-P)	$E_c - 0.44$ эВ	$\sigma_p \approx 10^{-15} \text{ см}^2$	DLTS, TEM
	Комплекс углерод-кислород (C-O)	$E_c - 0.1$ эВ	$\sigma_n \approx 10^{-17} \text{ см}^2$	DLTS, TEM
Радиационные дефекты	Пары Френкеля	$E_c - 0.2-0.6$ эВ	$\sigma_n \approx 10^{-14} \text{ см}^2$, $\sigma_p \approx 10^{-15} \text{ см}^2$	DLTS, TEM
	Дефекты смещения	$E_c - 0.5$ эВ	$\sigma_n \approx 10^{-15} \text{ см}^2$, $\sigma_p \approx 10^{-16} \text{ см}^2$	DLTS, TEM

Методы исследования параметров дефектов

Исследование дефектов в кремнии является важной задачей для понимания их влияния на электронные и оптические свойства материала. Для этого используются различные экспериментальные методы, каждый из которых позволяет определить специфические параметры дефектов, такие как энергетическое положение в запрещенной зоне, концентрацию, сечения захвата электронов и дырок, а также их роль в рекомбинационных процессах.

Приведем основные методы исследования дефектов в полупроводниках.

1. DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy) – Спектроскопия глубоких уровней

Принцип работы: метод основан на анализе переходных процессов в емкости p-n-перехода или структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП), металл-полупроводник при изменении температуры. Дефекты захватывают и освобождают носители заряда, что вызывает изменение электрической емкости, тока или заряда.

Исследуемые параметры:

- энергетическое положение уровня в запрещенной зоне (E);

- сечение захвата электронов (σ_n) и дырок (σ_p);
- концентрация дефектов (N_t).

Преимущества: высокая чувствительность и возможность одновременного анализа нескольких уровней [5].

2. C-V-измерения (*Capacitance-Voltage*) – измерение емкости в зависимости от напряжения

Принцип работы: метод основан на измерении емкости р-п-перехода или МДП-структуры, структуры металл-полупроводник при изменении приложенного напряжения. Дефекты влияют на распределение заряда в обедненной области.

Исследуемые параметры:

- профиль концентрации носителей заряда;
- наличие заряженных дефектов.

Примеры дефектов:

- дефекты, связанные с примесями (например, бор, фосфор).
- комплексы дефектов, например, такие как V-O.

Преимущества: простота интерпретации и возможность анализа распределения дефектов по глубине [11].

3. Фотолюминесценция (*Photoluminescence, PL*)

Принцип работы: образец облучается светом с энергией, превышающей ширину запрещенной зоны, что приводит к генерации электронно-дырочных пар. При рекомбинации излучается свет, спектр которого анализируется.

Исследуемые параметры:

- Энергетические уровни дефектов.
- Интенсивность рекомбинации через дефекты.

Преимущества: высокая чувствительность к оптически активным дефектам [12].

4. Спектроскопия термостимулированных токов (*Thermally Stimulated Current, TSC*)

Принцип работы: образец охлаждается до низких температур, а затем нагревается. При этом дефекты освобождают захваченные носители, что вызывает ток, который регистрируется.

Исследуемые параметры:

- энергетическое положение уровня;
- сечение захвата носителей.

Преимущества: возможность анализа дефектов с низкой концентрацией [13].

5. Электронный парамагнитный резонанс (*ЭПР, EPR*)

Принцип работы: метод основан на измерении резонансного поглощения электромагнитного излучения неспаренными электронами в дефектах.

Исследуемые параметры:

- структура дефектов;
- состояние окисления примесей.

Преимущества: прямое определение структуры дефектов [14].

6. Метод спектроскопии времени жизни носителей заряда (*Lifetime Spectroscopy*)

Принцип работы: измеряется время жизни неосновных носителей заряда, которое зависит от концентрации рекомбинационных центров.

Исследуемые параметры:

- время жизни носителей;
- концентрация рекомбинационных центров.

Преимущества: прямая связь с рекомбинационными свойствами материала [15].

Дефекты с глубокими энергетическими уровнями играют важную роль в полупроводниковых материалах, влияя на их электронные и оптические свойства. Понимание механизмов формирования и типов таких дефектов позволяет разрабатывать более эффективные полупроводниковые приборы с улучшенными характеристиками. Поэтому исследования глубоких энергетических уровней в структурах, являющихся основой современных элементов микро- и наноэлектроники, позволяет понять физику процессов, происходящих в них, и выбрать режимы технологического процесса для уменьшения дефектообразования [16]. Дальнейшие исследования в этой области будут способствовать развитию новых технологий в микроэлектронике и оптоэлектронике.

Библиографический список

1. Schröter, W., & Kronewitz, J. "Deep levels in silicon introduced by transition metals //Materials Science and Engineering; B, 1991. 10, P. 1-8.
2. Watkins G.D. The lattice vacancy in silicon // Defects in Semiconductors, (1986). 12, P. 1-22.
3. Pons D., Bourgoin J.C. Radiation-induced defects in semiconductors// Journal of Physics C: Solid State Physics, 1985. 18(20), P. 3839.
4. Kimerling L.C. Recombination properties of deep level defects in semiconductors. //Solid-State Electronics, 1978. 21(11-12), P. 1391-1404.
5. Lang D.V. Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors // Journal of Applied Physics, 1974. 45(7), P. 3023-3032.
6. Shockley W., Read W.T. Statistics of the recombinations of holes and electrons // Physical Review, 1952. 87(5), P. 835.
7. Sah C.T., Shockley W. Electron-hole recombination statistics in semiconductors through flaws with many charge conditions // Physical Review, 1958. 109(4), P. 1103.
8. Henry C.H., Lang D.V. Nonradiative capture and recombination by multiphonon emission in GaAs and GaP // Physical Review B, 1977. 15(2), P. 989.
9. Sze S.M., Ng K.K. Physics of Semiconductor Devices. John Wiley & Sons. 2006.
10. Bourgoin J.C., Lannoo M. Point defects in semiconductors II: Experimental aspects. Springer-Verlag. 1983.
11. Blood P., Orton J.W. The electrical characterization of semiconductors: Majority carriers and electron states. Academic Press. 1992.
12. Pankove J.I. Optical processes in semiconductors. Dover Publications. 1971.
13. Bube R.H. Photoelectronic properties of semiconductors. Cambridge University Press. (1992).
14. Watkins G.D. The lattice vacancy in silicon. // Defects in Semiconductors, 1986. 12, P. 1-22.
15. Schroder D.K. Semiconductor material and device characterization. John Wiley & Sons. 2006.
16. Гудзев В.В. Исследование глубоких энергетических уровней в барьерных структурах на основе кристаллического и аморфного гидрогенизированного кремния / Дисс. канд. физ. мат. наук: Рязань, 2015. 168 с.

УДК 621.383; ГРНТИ 47.14.07

РАЗРАБОТКА ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ НАНОСТРУКТУРЫ С КВАНТОВОЙ ЯМОЙ ДЛЯ ИЗЛУЧАТЕЛЯ СИНЕ-ЗЕЛЁНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

А.И. Макаров, Н.В. Вишняков

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, alexey.makarov.03@gmail.com

Аннотация. В данной работе проведен обзор существующих квантоворазмерных структур с квантовой ямой, обозначены их достоинства и недостатки. Рассмотрены материалы, наиболее подходящие для реализации излучателя сине-зеленой области спектра, с учетом их физических и технологических характеристик. В результате проведенного анализа была предложена структура, обеспечивающая излучение с требуемой длиной волны.

Ключевые слова: кванторазмерная структура, квантовый излучатель, двойная гетероструктура, уровни размерного квантования.

DEVELOPMENT OF A SEMICONDUCTOR NANOSTRUCTURE WITH A QUANTUM WELL FOR AN EMITTER IN THE BLUE-GREEN REGION OF THE SPECTRUM

A.I. Makarov, N.V. Vishnyakov

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, alexey.makarov.03@gmail.com

The summary. In this paper, we review the existing quantum dimensional structures with a quantum well, and identify their advantages and disadvantages. The materials that are most suitable for the implementation of a blue-green spectral region emitter, taking into account their physical and technological characteristics, are considered. As a result of the analysis, a structure has been proposed that provides radiation with the required wavelength

Keywords: quantum-sized structure, quantum emitter, double heterostructure, quantization levels of size.

Полупроводниковые излучатели на основе квантоворазмерных структур

Инжекционные лазеры на основе двойной гетероструктуры (ДГС) имеют узкозонный активный слой, с обеих сторон заключенный между широкозонными слоями. На рис. 1 приведен пример лазера на ДГС, где активная среда представляет собой тонкий слой (0,1-0,2 мкм) материала GaAs. Арсенид галлия GaAs является первым материалом, из которого в 1962 г. был создан инжекционный лазер, работающий на основе генерации когерентного излучения с помощью р-н-перехода [1]. При оптимизации пороговая плотность тока при комнатной температуре в такой диодной структуре может быть уменьшена практически на два порядка (т. е. до 10^3 А/см²) по сравнению с соответствующими устройствами на гомопереходах, что позволяет без труда осуществить непрерывную лазерную генерацию при комнатной температуре.

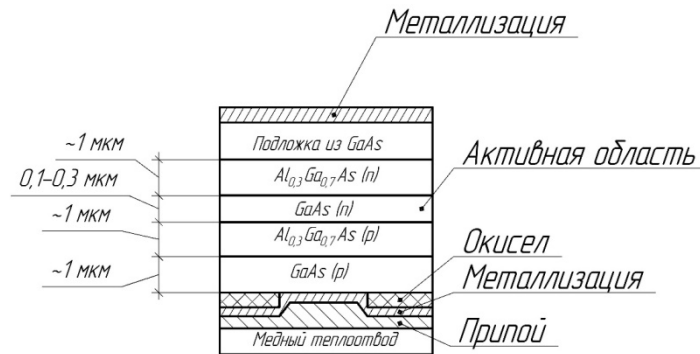


Рис. 1. Схематическое представление полупроводникового лазера с двойным гетеропереходом

Основные достоинства ДГС:

- высокая эффективность излучения;
- низкая пороговая плотность тока;
- возможность работы при комнатной температуре.

Недостатки:

- сложность изготовления из-за необходимости точного согласования постоянных решеток материалов;
- ограниченный диапазон длин волн, в котором могут работать такие структуры.

Для создания двойной гетероструктуры и реализации всех ее преимуществ должно выполняться очень важное требование, а именно: период решетки активного слоя должен совпадать (с точностью до ~0,1%) с периодом решетки внешних слоев. Если это условие не выполняется, результирующее механическое напряжение на двух граничащих поверхностях

будет приводить к возникновению нежелательных дефектов решетки (дислокаций). Каждая дислокация действует как активный центр для электронно-дырочной безызлучательной рекомбинации.

Полосковые лазеры. Лазеры на ДГС или квантовых ямах весьма часто используются в конфигурации с так называемой полосковой геометрией (рис. 2), где активная среда может быть либо двойной гетероструктурой, либо структурой с отдельным ограничением и с одиночными или множественными квантовыми ямами. По сравнению с устройствами на широких переходах, рассмотренное устройство с полосковой геометрией имеет в качестве преимущества значительно меньшую площадь перехода, через который протекает ток. Таким образом, требуемый полный ток оказывается меньше. Недостатком активной волноводной структуры является то, что невозбужденные области активного слоя сильно поглощают излучение, и ограничение пучка в этих областях приводит к дополнительным потерям.

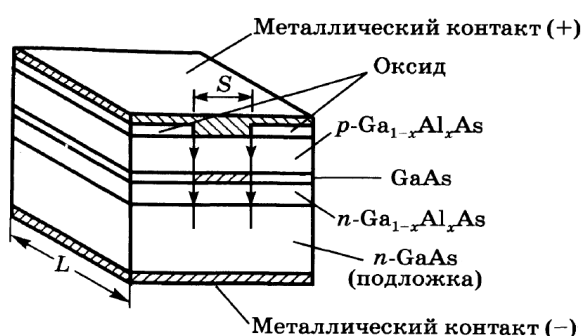


Рис. 2. Фрагмент полупроводникового лазера с полосковой геометрией

При использовании для формирования полосы оксидных высокоомных слоев достигается локализация оптической мощности или носителей тока. При этом ток локализуется в полоске шириной менее 10 мкм. Такие приборы носят название лазеров с «волноводным усилением» (gain guided), поскольку свет локализуется в области с максимальной инверсией населенности, которая в свою очередь определяется распределением плотности тока [2].

Достоинства:

- Увеличение дифференциального усиления.
- Уменьшение зависимости усиления от температуры.
- Возможность работы на недоступных ранее длинах волн.

Недостатки:

- Уменьшение фактора локализации пучка.
- Необходимость использования структур с отдельным ограничением для управления пучком.

Лазеры с распределенной обратной связью (РОС-лазер). Наиболее эффективным способом формирования требуемой оптической обратной связи является использование обратного рассеяния Брэгга при периодическом изменении коэффициента преломления и усиления в лазерном волноводе. Такие изменения могут быть получены за счет травления периодической рифленой структуры на границе между активным p-GaAs слоем и p-GaAlAs слоем в односторонней гетероструктуре (рис. 3). Из особенностей лазеров с распределенной обратной связью следует отметить волновую селективность, возможность контроля продольных мод, хорошо скоординированные выходные лучи, а также согласование оптических эффектов, обусловленных периодической структурой и резонаторами типа Фабри-Перо. Расчеты показывают, что расходимость луча в ортогональном к плоскости рифления направлении составляет около десяти градусов. Необходимость изготовления сверхтонких слоев (~0,01...1,0 мкм) для создания активных структур в лазерах с отдельным ограничением предъявляет

очень высокие требования к технологии изготовления и к контрольно-измерительной технике.

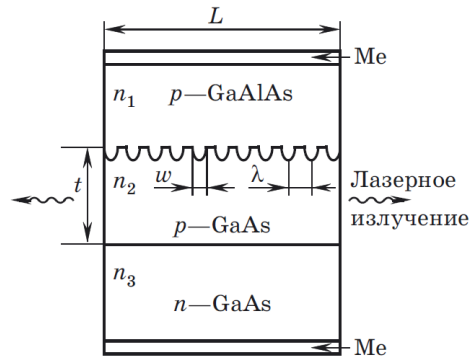


Рис. 3. Схема полупроводникового РОС-лазера

Материалы для лазеров с распределенной обратной связью: $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}$, AsyP_{1-y} , $\text{PbSn}_x\text{Te}_{1-x}$ и им подобные. Структуру, дающую распределенную обратную связь, выращивают непосредственно на активном слое способом эпитаксии в жидком газе. На эпитаксильную пленку наносят фоторезист, а в качестве фотошаблона решетки используют картину интерференции лазерного света. Травлением делают выступы и после этого изготавливают лазерную структуру, нанося сверху необходимые слои способом эпитаксии в жидкой фазе. Лазер со структурой, показанной на рис. 3, дает непрерывное излучение [3].

Достоинства:

- Высокая стабильность длины волны.
- Хорошая селективность мод.

Недостатки:

- Сложность изготовления сверхтонких слоев.
- Высокие требования к технологии производства.

Лазеры с вертикальным резонатором (ЛВР) излучают в направлении, перпендикулярном плоскости перехода. Эти устройства обычно называются лазерами поверхностного излучения и изготавливаются с учетом одного из двух следующих принципов:

1. Использование обычной геометрии с торцевым излучением, но с установкой дополнительных оптических элементов, расположенного под углом 45° зеркала, для того чтобы вертикально отклонить выходной пучок (рис. 4,а).

2. Лазеры поверхностного излучения с вертикальным резонатором, созданные путем нанесения высокоотражающих покрытий на внешние области активного слоя, что приводит к формированию вертикального резонатора, из которого выходной пучок распространяется перпендикулярно плоскости перехода (рис. 4,б).

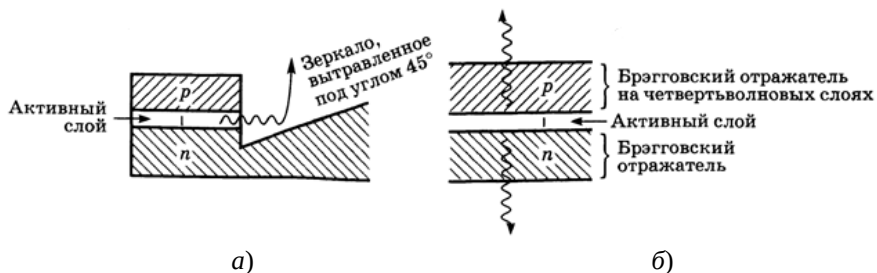


Рис. 4. Схематичное представление: (а) – лазера поверхностного излучения, в котором свет, выходящий из торца резонатора, отклоняется вертикально зеркалом, расположенным под углом 45° ; (б) – лазера поверхностного излучения с вертикальным резонатором

В таких лазерах можно достичь очень высоких значений дифференциального КПД (до 50%), сравнимых с КПД лазеров с торцевым излучением. Выходная мощность отдельного лазера поверхностного излучения с вертикальным резонатором весьма ограничена (около 1 мВт). Это связано с возникновением термических проблем, обусловленных введением высоких мощностей накачки в такой малый объем активной среды. Одной из главных проблем таких лазеров является высокая точность изготовления резонатора требуемой длины, так чтобы только одна продольная мода попадала точно в центр полосы высокого отражения зеркал [4].

Достоинства:

- Высокий дифференциальный КПД.
- Компактность.

Недостатки:

- Ограниченная выходная мощность.
- Высокая точность изготовления резонатора.

Таким образом, в современных лазерах используются слои с отдельным ограничением на одиночных или множественных квантовых ямах в конфигурации как с активной, так и зачастую с пассивной волноводной структурой.

Заключение

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что наиболее перспективным прототипом для разработки излучателя сине-зеленой области спектра является лазер на квантовых ямах с использованием двойной гетероструктуры. Такие структуры позволяют достичь высокой эффективности излучения и точного управления длиной волны. В качестве материалов для создания наноструктуры были выбраны соединения на основе ZnCdSe/ZnSe, которые обеспечивают необходимую ширину запрещенной зоны и совместимость постоянных решеток. Для изготовления наноструктуры можно предложить технологию молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Этот метод обеспечивает высокую точность и контроль над толщиной слоев, что критически важно для создания качественных квантовых ям.

Таким образом, полупроводниковая наноструктура с квантовой ямой на основе ZnCdSe/ZnSe является перспективным решением для создания высокоэффективных излучателей сине-зеленой области спектра. Такие устройства могут найти применение в лазерных проекторах, медицинских приборах, системах оптической связи и других областях, где требуется компактный и энергоэффективный источник света.

Работа выполнена с использованием научного потенциала РЦЗМкп РГРТУ при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

Библиографический список

1. Марков В.Ф. Материалы современной электроники: учебное пособие / под ред. В. Ф. Маркова Екатеринбург: Издательство «Урал», 2014. 272 с.
2. Звелто О. Принципы лазеров / Пер. под науч. ред. Т. А. Шмаонова. 4-е изд. СПб.: Издательство «Лань», 2008. 720 с.
3. Игнатов А.Н. Оптоэлектроника и нанофотоника : учебное пособие / А. Н. Игнатов. — 4-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — ISBN 978-5-8114-5149-4. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/133479> (дата обращения: 20.03.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей. — С. 176.
4. Родионов Ю.А. Технологические процессы в микро- и нано электронике: учебное пособие. М., Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. 352 с.

УДК 621.383; ГРНТИ 47.14.07

РАЗРАБОТКА ИСТОЧНИКА УФ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ

П.И. Бугаков, Н.В. Вишняков

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, bugakov.p@inbox.ru*

Аннотация. В данной работе рассмотрены излучатели на основе квантовой ямы, их преимущества, характеристики и области применения. Детально проанализированы физические эффекты, возникающие в полупроводниковых гетероструктурах. Определены основные параметры, влияющие на эффективность излучателей с квантовой ямой. Особое внимание уделено светодиодам (LED) на основе квантовых ям и перспективам их применения.

Ключевые слова: квантовая яма, полупроводниковая гетероструктура, параметры излучателей, светодиоды на основе квантовых ям.

DEVELOPMENT OF A UV RADIATION SOURCE BASED ON A SEMICONDUCTOR HETEROSTRUCTURE

P.I. Bugakov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, bugakov.p@inbox.ru*

Annotation. In this paper, we consider quantum well-based radiators, their advantages, characteristics, and applications. The physical effects occurring in semiconductor heterostructures are analyzed in detail. The main parameters affecting the efficiency of quantum well radiators have been determined. Special attention is paid to LEDs based on quantum wells and the prospects of their application.

Keywords: quantum well, semiconductor heterostructure, emitter parameters, LEDs based on quantum wells.

Введение

Светодиод – полупроводниковый прибор, преобразующий электрический ток в световое излучение. Цвет светодиода определяется типом используемых материалов. Краткая историческая справка:

- 1907 г. - английский инженер и изобретатель Г.Д. Раунд впервые обнаружил слабое излучение кристалла карбида кремния;
- 1923 г. - русский инженер и изобретатель О. Лосев так же зафиксировал это свечение при проведении своих опытов;
- 1962 г. - группа американских ученых под руководством Ника Холоньяка продемонстрировала работу первого светодиода красного цвета (это событие многие считают открытием привычного нам светодиода);
- 1973 г. - были разработаны светодиоды желтого и зеленого цветов;
- 1993 г. - Суджи Накамура получил первый сверхъяркий светодиод, после этого были созданы RGB-устройства на основе светодиодов;
- 1996 г. - разработан первый «белый» светодиод, что явилось сильнейшим толчком в развитии светодиодной отрасли [1].

Полупроводниковые излучатели на основе квантоворазмерных структур

Квантовая яма (quantum well) – структура, состоящая из материалов (полупроводники, диэлектрики) с разной шириной запрещенной зоны, причем область из материала с меньшей шириной запрещенной зоной выполнена наноразмерной и находится между областями из материала с большей шириной запрещенной зоны. Материал с меньшей шириной запрещенной зоны образует потенциальную яму, а с большей – потенциальный барьер. При протекании электрического тока через такую структуру электроны и дырки инжектируются в кван-

товую яму, где происходит их рекомбинация с излучением кванта света длины волны, соответствующему этому переходу.

Излучатели на квантовой яме делятся на светодиоды и лазеры.

Принцип работы светодиодов на квантовой яме относительно прост: тонкий слой квантовой ямы образует в себе квантовую яму для электронов (рис. 1).

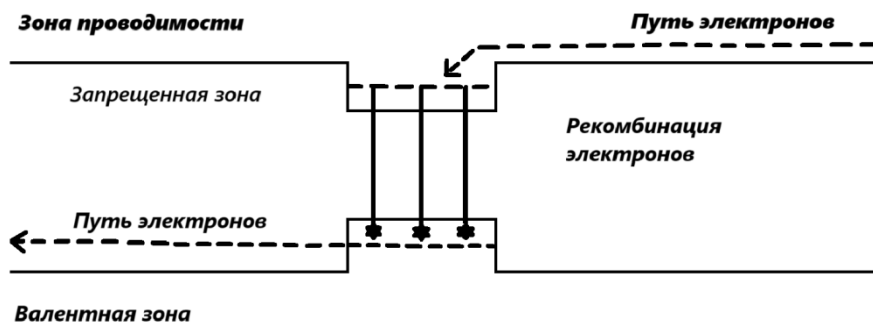


Рис. 1. Энергетическая диаграмма светодиода на основе квантовой ямы [2]

Электроны, попадая в квантовую яму, принимают наименьший энергетический уровень зоны проводимости (ближе к дну ямы), после чего не могут свободно преодолеть потенциальный барьер и вынуждены излучательно рекомбинировать в данной области. Такая структура имеет преимущества относительно обычных светодиодов на р – п переходе: увеличенная концентрация рекомбинирующих электронов за счет уменьшения объема, что уменьшает вероятность безизлучательной рекомбинации; возможность регулировать длину волны излучения толщиной слоя [3].

Физические эффекты в полупроводниковых гетероструктурах с квантовыми ямами и методы их исследования

Простейшая квантовая структура, в которой движение электрона ограничено в одном направлении, – это тонкая пленка или просто достаточно тонкий слой полупроводника (рис. 2). Для электронов, движущихся в узкозонном полупроводнике и имеющих энергию меньше E_c^2 , гетероструктура будет играть роль потенциального барьера. Два гетероперехода ограничивают движение электрона с двух сторон и как бы образуют потенциальную яму.

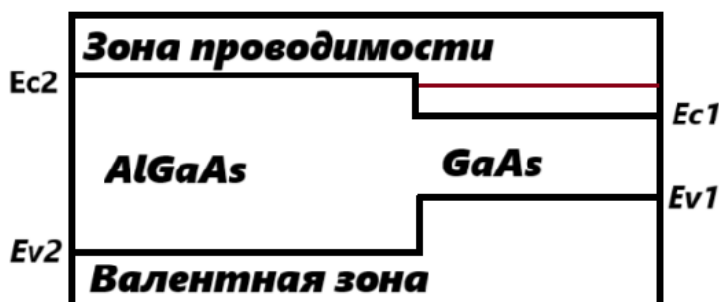


Рис. 2. Энергетические зоны на границе двух полупроводников – гетероструктуре

В результате электрон оказывается запертым в одном направлении, что и приводит к квантованию энергии поперечного движения. В то же время в двух других направлениях движение электронов будет свободным, поэтому можно сказать, что электронный газ в кван-

товой яме становится двумерным. Таким же образом можно приготовить и структуру, содержащую квантовый барьер, для чего следует поместить тонкий слой полупроводника с широкой запрещенной зоной между двумя полупроводниками с узкой запрещенной зоной [1].

К основным способам получения квантовых ям относят молекулярно – лучевую эпитаксию и химическое осаждение из газовой фазы [4].

Основные параметры излучателей с квантовой ямой

Основные параметры излучателей на квантовой яме определяют свойства излучателя как эффективного источника квантов света. Этими параметрами являются:

- напряжение питания;
- рабочий ток;
- мощность излучения;
- длина волны излучения;
- срок службы излучателя.

Напряжение питания излучателя – это напряжение, при котором устройство работает в режиме его нормальной эксплуатации.

Рабочий ток определяет мощность потребления излучателя, и, соответственно, их экономичность и эффективность. Излучатели на квантовой яме потребляют мало тока.

Мощность излучения определяет мощность потока света, испускаемого излучателем. На практике мощность излучателя выражается в виде светового потока, силы света и световой отдачи лампы.

Световой поток – величина, характеризующая количество световой энергии, переносимая излучением в единицу времени на единицу площади и измеряется в люменах.

Сила света количественно равна отношению светового потока, распространяющегося в некотором углу, к этому углу и измеряется в канделах.

Длина волны излучения определяет область применения данного излучателя.

КПД излучателя определяет эффективность излучателя как преобразователя энергии.

Светодиоды на основе квантовых ям

Светодиоды, сделанные из непрямозонных полупроводников, свет практически не излучают. Поэтому лучшие светодиоды (на сегодняшний день) делаются из прямозонных полупроводников (т.е. в которых возможен переход зона-зона) типа $A^{III}B^V$ и $A^{II}B^{VI}$.

Среди полупроводников типа $A^{III}B^V$, используемых в изготовлении светодиодов, основными являются триплеты арсенид алюминия-галлия (AlGaAs), галлия арсенид-фосфид (GaAsP, может добавляться InP), нитрид алюминия-галлия [13]. Среди группы $A^{II}B^{VI}$ основными являются сульфид кадмия-цинка (CdZnS), селенид цинка-кадмия (ZnCdSe) и теллурид цинка-кадмия (ZnCdTe).

Светодиоды красного цвета изготавливаются либо на арсениде алюминия-галлия, либо на галлия арсенид-фосфиде, оранжевого – на фосфиде-арсениде галлия либо на арсениде алюминия-галлия, желтого- на фосфиде-арсениде галлия, зеленого – на нитриде индия-галлия и фосфиде алюминия-галлия, синего- на нитриде индия-галлия и селениде цинка-кадмия, фиолетового – на нитриде индия-галлия.

Арсенид алюминия-галлия (AlGaAs) выглядит как темно-серый кристалл с красноватым отливом и является тройным соединением типа $Al_xGa_{1-x}As$. Кристаллическая решетка данного материала кубическая (тип цинковая обманка, или сфалерит) с постоянной решетки 0,3565 нм. AlGaAs является широкозонным полупроводником, причём ширина запрещенной зоны при 300 К плавно изменяется от 1,42 эВ до 2,16 эВ в зависимости от концентрации компонентов. Тонкие пленки этого материала получают либо MOCVD методом, либо методом мо-

лекулярно-лучевой эпитаксии. Применяется этот материал для производства красного светодиода и для создания полупроводниковых лазеров с длиной волны излучения 1,064 мкм.

Галлия арсенид-фосфид ($\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$) – полупроводниковый материал с кристаллической решетки типа сфалерита, используется для производства красных, оранжевых и желтых светодиодов.

Нитрид индия-галлия ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$) – полупроводниковый материал, у которого ширина запрещенной зоны колеблется в пределах от 0,69 эВ до 3,4 эВ. Применяется для производства синего и зеленого светодиодов.

Фосфид индия-галлия ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$) – полупроводниковый материал, квантовые ямы на его основе производятся МOCVD методом, на его основе делаются светодиоды оранжевого-красного, красного и желтого и зеленого цветов.

Нитрид алюминия-галлия ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$) – полупроводниковый материал, у которого ширина запрещенной зоны колеблется в пределах от 4,3 эВ до 6,2 эВ. Применяется для производства ультрафиолетовых светодиодов.

Заключение

В ходе выполнения данной работы, рассмотрены ключевые разновидности твердотельных излучающих устройств, полупроводниковые гетероструктуры, физические явления, наблюдаемые в полупроводниковых гетероструктурах с квантовыми ямами, а также методики их изучения.

В качестве материалов для создания наноструктуры УФ полупроводникового излучателя были выбраны соединения на основе GaN/AlGaIn, так как они демонстрируют высокую эффективность и стабильность в ультрафиолетовом спектре. Использование материалов с разными соотношениями компонентов позволяет достигать необходимых оптических свойств, а также широкой настройки длины волны.

Применение GaN/AlGaIn в устройствах УФ светодиодов открывает новые возможности для различных областей, таких как стерилизация, медицинская диагностика и аналитическая химия. Учитывая перспективные характеристики данной гетероструктуры, дальнейшие исследования могут привести к улучшению производительности и снижению затрат на производство, что сделает технологии более доступными.

Таким образом, гетероструктура GaN/AlGaIn имеет значительный потенциал для дальнейшего коммерческого применения и научных исследований в области оптоэлектроники и фотоники.

Работа выполнена с использованием научного потенциала РЦЗМкп РГРТУ при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

Библиографический список

1. Рябов А. Что такое светодиод? [Электронный ресурс]. – URL: <http://radiodetali.com/article/all/led-faq.htm>.
2. Квантовые ямы, нити, точки. Что это такое? [Электронный ресурс] – URL: <http://nature.web.ru/db>.
3. Кастнер М.А. Искусственные атомы. Изд. "Phys. Today", 1993.
4. Евсеев В.А., Крутогин Д.Г., Рабинович О.И. Методы контроля в установках молекулярно-лучевой эпитаксии. Методические указания к лабораторным работам. М: Изд. НИТУ МИСиС, 2013.

УДК 621.389; ГРНТИ 47.14.07

РАЗРАБОТКА СТАБИЛИЗАТОРА НАПЯЖЕНИЯ В ГИБРИДНОМ МИКРОЭЛЕКТРОННОМ ИСПОЛНЕНИИ

Н.А. Андреев, Н.В. Вишняков

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина,
Россия, Рязань, rcpm@rsreu.ru

Аннотация. В работе на основе расчета тонкоплёночных элементов разработана топология стабилизатора напряжения в микроэлектронном исполнении в корпусном варианте.

Ключевые слова: стабилизатор напряжения, гибридная интегральная микросхема

DEVELOPMENT OF A VOLTAGE STABILIZER IN A HYBRID MICROELECTRONIC DESIGN

N.A. Andreev, N.V. Vishnyakov

Ryazan State University named after Vladimir Fyodorovich Utkin,
Russia, Ryzan, rcpm@rsreu.ru

Abstract. The topology of a microelectronic voltage stabilizer in a housing version has been developed, based on the calculation of thin-film elements.

Ключевые слова: voltage stabilizer, hybrid integrated circuit

Основная функция стабилизатора заключается в обеспечении стабильности электрического питания, что позволяет предотвратить повреждение чувствительных электронных компонентов и улучшить общую надежность работы системы. Для достижения этого эффекта стабилизаторы используют различные методы регулирования, такие как линейные, импульсные или комбинированные схемы. Процесс стабилизации напряжения осуществляется за счет использования обратной связи, которая контролирует изменения входного напряжения и корректирует его до заданного значения на выходе. В некоторых случаях стабилизаторы также могут содержать элементы фильтрации и защиты, которые обеспечивают дополнительную защиту от перенапряжений, коротких замыканий и других внешних воздействий.

Исходные данные для разработки стабилизатора в интегральном исполнении: рабочий диапазон температур $-30 - +60$ °C, напряжение питания +3 В. Принципиальная схема представлена на рисунке 1.

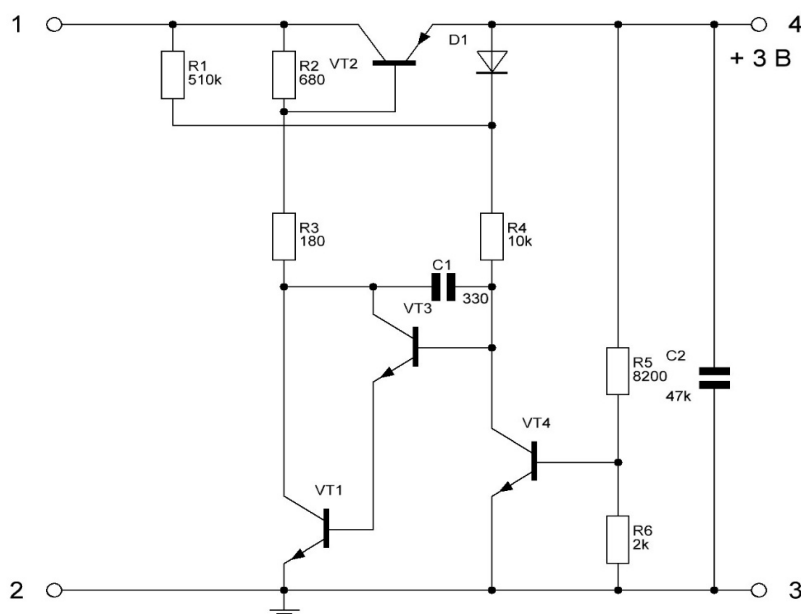


Рис. 1. Принципиальная схема стабилизатора напряжения

Расчет пассивных элементов

Проектирование конструкции тонкопленочных резисторов начинается с расчета мощности, выделяемой на каждом резисторе:

$$P_i = \frac{E_{\Pi}^2}{R_i}; \quad (1)$$

Далее нужно определить оптимальное значение удельного поверхностного сопротивления резистивной пленки:

$$\rho_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n R_i}{\sum_{i=0}^n \frac{1}{R_i}}}. \quad (2)$$

Выбираем материал резистивной пленки с удельным сопротивлением, ближайшим по значению к вычисленному. Проводим проверку правильности выбранного материала резистивной пленки с точки зрения точности изготовления резисторов. Полная относительная погрешность изготовления пленочного транзистора состоит из суммы погрешностей:

$$\gamma_R = \gamma_{K\Phi} + \gamma_{\rho_s} + \gamma_{Rt} + \gamma_{Rct} + \gamma_{Rk}, \quad (3)$$

где $\gamma_{K\Phi}$ – погрешность коэффициента формы;

γ_{ρ_s} – погрешность воспроизведения величины ρ_s резистивной пленки;

γ_{Rt} температурная погрешность;

γ_{Rct} – погрешность, обусловленная старением пленки;

γ_{Rk} – погрешность переходных сопротивлений контактов.

Погрешность воспроизведения удельного поверхностного сопротивления γ_{ρ_s} зависит от условий напыления и материала резистивной пленки. В условиях серийного производства её значение не превышает 5%.

Температурная погрешность зависит от ТКР материала пленки:

$$\gamma_{Rt} = \alpha_R (T_{max} - T_{min}), \quad (4)$$

где α_R – температурный коэффициент сопротивления материала пленки,

$T_{max} - T_{min}$ – рабочий диапазон температур.

Погрешность γ_{Rct} , обусловленная старением пленки, вызвана медленным изменением структуры пленки во времени и её окислением. Она зависит от материала пленки и эффективности защиты, а также от условий хранения и эксплуатации. Обычно для ГИМС γ_{Rct} не превышает 3%.

Погрешность переходных сопротивлений контактов γ_{Rk} зависит от технологических условий напыления пленок, удельного сопротивления резистивной пленки и геометрических размеров контактного перехода: длины перекрытия контактирующих пленок, ширины резистора. Обычно $\gamma_{Rk} = 1...2\%$, но если материал контактов выбирается из рекомендованного списка, то γ_{Rk} можно принять равным нулю.

Определяем конструкцию резисторов по значению коэффициента формы $K_{\phi i}$:

$$K_{\phi i} = \frac{R_i}{\rho_s}. \quad (5)$$

Если $1 < K_{\phi i} < 10$, то рекомендуется конструировать резистор прямоугольной формы; при $0,1 < K_{\phi i} < 1$ – использовать резистор прямоугольной формы, у которого длина меньше ширины; если $K_{\phi i} > 10$ – рекомендуется использовать резистор сложной формы.

Пленочный конденсатор состоит из трёхслойной конструкции, нанесенной на диэлектрическую основу. Первый слой – это проводящий материал, который служит нижней обкладкой конденсатора. Второй слой образует однослойный или многослойный диэлектрик. Третий слой также выполнен из проводящего материала и выполняет функцию верхней обкладки конденсатора. Выбираем материал диэлектрика по рабочему напряжению $U_{\text{раб}} = 3\text{В}$.

Определяется минимальная толщина диэлектрика:

$$d_{\min} = \frac{k_3 * U_{\text{раб}}}{E_{\text{пр}}}, \quad (6)$$

где k_3 – коэффициент запаса электрической прочности.

Рассчитываем удельную емкость конденсатора по формуле:

$$C_{0v} = \frac{0.0885 * \varepsilon}{d}. \quad (7)$$

Определение относительной температурной погрешности производится из выражения:

$$\gamma_{Ct} = \alpha_C * (T_{\max} - T_{\min}), \quad (8)$$

где α_C – температурный коэффициент емкости материала диэлектрика.

Определение допустимой относительной погрешности активной площади конденсатора осуществляется по формуле:

$$\gamma_{S\text{доп}} = \gamma_C - \gamma_{C0} - \gamma_{\text{ст}} - \gamma_{Ct}, \quad (9)$$

где γ_{C0} – относительная погрешность удельной емкости, характеризующая воспроизводимость удельной емкости в условиях данного производства (зависит от материала и погрешности толщины диэлектрика и составляет 3 – 5 %);

$\gamma_{\text{ст}}$ – относительная погрешность, обусловленная старением пленок конденсатора (зависит от материала и метода защиты, и обычно не превышает 2 – 3%).

Определяем удельную емкость конденсатора C , для обкладок квадратной формы с учетом точности изготовления:

$$C_{0\text{точн}} = C * \left[\frac{\gamma_{S\text{доп}}}{2\Delta L} \right]^2. \quad (10)$$

Точность изготовления линейных размеров пленочных элементов и расстояний между ними $\Delta l, \Delta b, \Delta L, \Delta B$ выбирается с учетом метода формирования элемента. Нанесение конденсаторов будет проводиться по методу фотолитографии, следовательно, $\Delta L = 0,01\text{мм}$.

Определяем, какой должна быть удельная емкость конденсатора с учетом технологических возможностей изготовления по площади перекрытия обкладок и толщине диэлектрика. Принимаем $S_{\min} = 1\text{мм}^2$:

$$C_{0min} = \frac{C}{S_{min}}. \quad (11)$$

Выбор минимального значения удельной емкости конденсатора с учетом электрической прочности и точности изготовления:

$$C_0 \leq \min\{C_{0v}; C_{0точн}; C_{0min}\}. \quad (12)$$

Учитываем краевой эффект:

$$K = \begin{cases} 1, \frac{C}{C_0} \geq 5\text{мм}^2 \\ 1.3 - 0.06 \frac{C}{C_0}, 1 \leq \frac{C}{C_0} \leq 5\text{мм}^2 \end{cases}. \quad (13)$$

Определение площади верхней обкладки конденсатора:

$$S = \frac{C}{C_0 K}. \quad (14)$$

Определение размеров верхней обкладки конденсатора при $K\phi = 1$:

$$L = B = \sqrt{S}. \quad (15)$$

Вычисление размеров нижней обкладки конденсатора с учетом допусков на перекрытие:

$$L_H = B_H = L + 2g. \quad (16)$$

Определение размеров диэлектрика:

$$L_d = B_d = L_H + 2f. \quad (17)$$

Определение площади, занимаемой конденсатором:

$$S_d = L_d B_d. \quad (18)$$

Конденсатор спроектирован правильно при выполнении приведенных ниже условий: рабочая напряженность $E_{\text{раб}}$ не должна превышать $E_{\text{пр}}$ материала диэлектрика, погрешность активной площади конденсатора не превышает допустимую.

Финальным шагом является создание топологического чертежа, который является документом, определяющим расположение, форму и размеры элементов на подложке. Для формирования соединительной схемы на основной электрической схеме выделяют пленочные и навесные компоненты, а также устанавливают порядок их размещения. Это первый этап в процессе создания эскиза топологии микросхемы.

Площадь всех компонентов и элементов:

$$S = K (S_R + S_C + S_{\text{КП}} + S_{\text{НК}}), \quad (19)$$

где $K = 2 \div 3$.

Далее на основании площади всех компонентов и элементов выбирается подложка типового размера и выполняется чертёж топологии. Корпус выбирается исходя из ближайшего подходящего размера его монтажной площадки.

Заключение

Результаты работы демонстрируют возможность создания стабилизатора напряжения в микроэлектронном исполнении с высокими показателями точности и стабильности. Разработанная конструкция может быть использована в различных электронных системах, требующих стабильного питания, что повышает надёжность и долговечность работы электронных устройств.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию топологии для уменьшения площади занимаемой подложки, а также на изучение возможности применения новых материалов с улучшенными температурными и временными характеристиками.

Стабилизатор напряжения в гибридном микроэлектронном исполнении обладает рядом значительных преимуществ, таких как компактность, высокая точность, низкий уровень шума и высокая надёжность. Однако он также имеет ряд ограничений, связанных с мощностью, сложностью проектирования и чувствительностью к технологическим погрешностям. Эти недостатки могут быть частично компенсированы за счёт оптимизации технологических процессов и использования новых материалов, что делает ГИМС-стабилизаторы перспективными для применения в современных электронных системах, особенно в условиях, где важны миниатюризация и стабильность работы.

Работа выполнена с использованием научного оборудования РЦЗМкп РГРТУ при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

Библиографический список

1. Меркулов А.И. Меркулов В.А. «Основы конструирования интегральных микросхем». Самара: издательство СГАУ, 2013г. 270 с.
2. Коледов Л.А. «Конструирование и технология микросхем». Москва: издательство «Высшая школа», 1984г. 232 с.

УДК 681.2.089; ГРНТИ 90.03.21

ОСОБЕННОСТИ КАЛИБРОВКИ СКАНИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА

В.В. Куклев, Н.В. Вишняков

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

Аннотация. В работе обсуждаются особенности процесса калибровки сканирующего устройства атомно-силового микроскопа. Приводятся основные сведения об атомно-силовом микроскопе, его принципе работы, а также сведения о сканирующем устройстве. Рассмотрены особенности калибровки сканера. Было проведено сравнение топографических изображений калибровочных решеток до и после калибровки. Проведена оценка изменения погрешности вносимой сканером в каждой проекции.

Ключевые слова: сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ), атомно-силовая микроскопия (АСМ), калибровка сканера

CALIBRATION FEATURES OF THE ATOMIC FORCE MICROSCOPE SCANNING DEVICE

V.V. Kuklev, N.V. Vishnyakov

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

The summary. This paper discusses the specifics of the calibration process of an atomic force microscope scanning device. The basic information about the atomic force microscope, its principle of operation, as well as information about the scanning device is given. The specifics of the scan-

ner calibration are considered. The topographic images of the calibration grids were compared before and after calibration. An assessment of the change in error introduced by the scanner in each projection was carried out.

Keywords: scanning probe microscopy (SPM), atomic-force microscopy (AFM), the scanner calibration.

Атомно-силовая микроскопия (АСМ), как одна из разновидностей сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), - это один из измерительных методов высокого разрешения, который применяется для исследования топологии, электрических, магнитных и трибологических параметров поверхности микро- и наноструктур. Методы АСМ имеют широкий спектр применений, начиная с возможности исследования физических свойств и построения топологических карт полимеров, металлов, пористых материалов и прочих, заканчивая исследованием биологических полимеров – ДНК и РНК, а также исследованием археологических образцов.

Принцип действия основан на регистрации силового взаимодействия между зондом и поверхностью образца [1]. При сближении зонда с образцом в начале на него действуют силы притяжения, называемые силами Ван-дер-Ваальса. При достаточно малом расстоянии, а именно, когда оно будет меньше среднего межатомного расстояния, будут преобладать отталкивающие кулоновские силы. При измерении сил кантилевер, на конце которого расположен зонд, в зависимости от расстояния до поверхности будет отклоняться от положения равновесия. Это отклонение регистрируется оптическим датчиком. Для получения изображения поверхности образца, необходимо провести измерения во множестве точек. Этого можно достигнуть с помощью устройства прецизионного смещения зонда - сканера.

На данный момент наиболее широко используемым видом сканера является трубчатый сканер. Он представляет собой четыре электрода, находящихся по бокам трубки, с помощью которых осуществляется управление сканером вдоль осей ОХ и ОУ. За вертикальное смещение сканера отвечает электрод, расположенный внутри или снизу трубки. Таким образом, обеспечивается растр сканирования с достаточно высокой точностью. Однако существует ряд проблем, возникающих в ходе эксплуатации атомно-силового микроскопа.

Одной из главных проблем АСМ является деградация пьезокерамических элементов сканера, вследствие чего, на изображении топологии поверхности будут наблюдаться различного рода артефакты и искаженные значения геометрии образца. Чтобы исключить неточности при сканировании требуется регулярно проверять и калибровать сканер. Для получения достоверных результатов к этой процедуре следует подходить с особым вниманием. Особенности калибровки пьезосканера будем рассматривать на примере трубчатого сканера, расположенного в универсальной измерительной головке ACM Solver-Pro (Ntegra-Aura).

Калибровка сканера ACM Solver-Pro

Калибровка сканера заключается в сравнении данных сканирования топологии поверхности эталонной решетки с параметрами указанных для них в паспорте, с дальнейшим внесением поправочных коэффициентов. При этом отклонение измеренного значения, в большинстве случаев, не должно превышать 3-5% от эталона. Однако, в зависимости от задачи и объекта сканирования, это допущение может быть и меньше. Выбор калибровочной решетки зависит от образца и максимального размера области сканирования, шага сканера. Для сканера в измерительной головке АСМ, имеющего область сканирования 30х30 мкм с шагом 0,052 мкм рекомендуется использовать решетки: TGQ1 с периодом решетки $3,00 \pm 0,05$ мкм и TGZ2 с высотой выступа $107 \pm 1,8$ нм.

При калибровке существует ряд особенностей:

- на полученные результаты влияет качество и параметры кантилевера;

- изменение температуры, влажности, давления окружающей среды может повлиять на данные калибровки, внося дополнительную погрешность;
- скорость сканирования должна быть как можно меньше, чтобы добиться высокой точности изображения и избегания артефактов.

Эти факторы необходимо учитывать, тщательно подбирая кантилевер, стабилизируя параметры внешней среды и выбирая оптимальную скорость сканирования. От того, как будут соблюдены эти условия, зависит качество калибровки и достоверность получаемых результатов АСМ. Из банка кантилеверов в работе использовался зонд DCP 20 со следующими параметрами:

Таблица 1. Параметры зонда DCP 20

Длина кантилевера, мкм	Ширина кантилевера, мкм	Толщина кантилевера, мкм	Частота резонанса, кГц	Постоянная силы, Н/м
90±5	60±5	1,7-2,3	260-630	28-91

Результаты калибровки пьезосканера ACM Solver-Pro

На рисунках 1 - 3 представлены результаты сканирования калибровочных решеток TDQ1 и TDZ2 до и после проведения калибровочных процедур. Изображение отсканированной поверхности было обработано с использованием программы для работы с СЗМ изображениями Gwyddion (<https://gwyddion.net/download.php>).

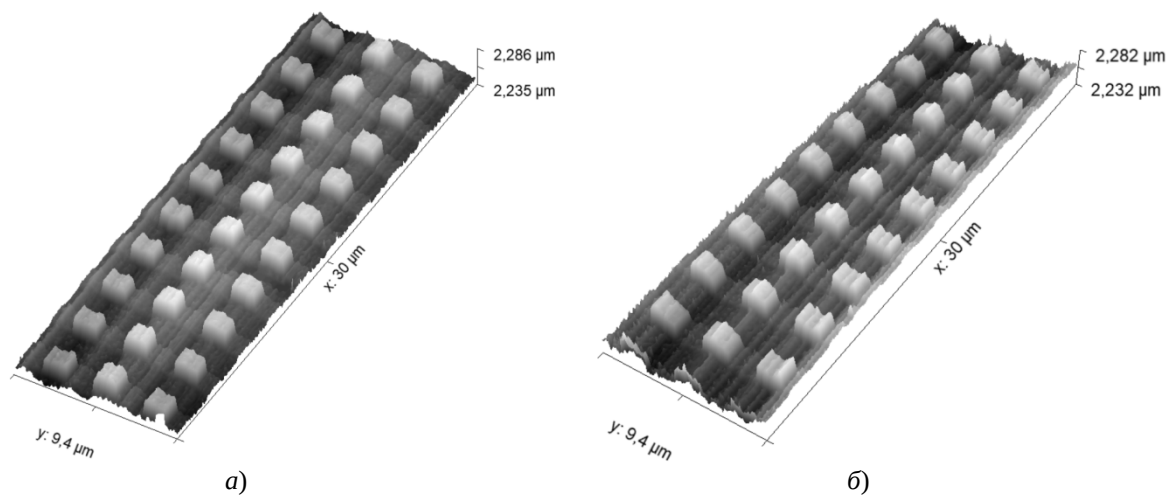


Рис. 1. Изображение тестовой решетки TDQ1 при калибровке оси X: а) – до калибровки; б) – после калибровки

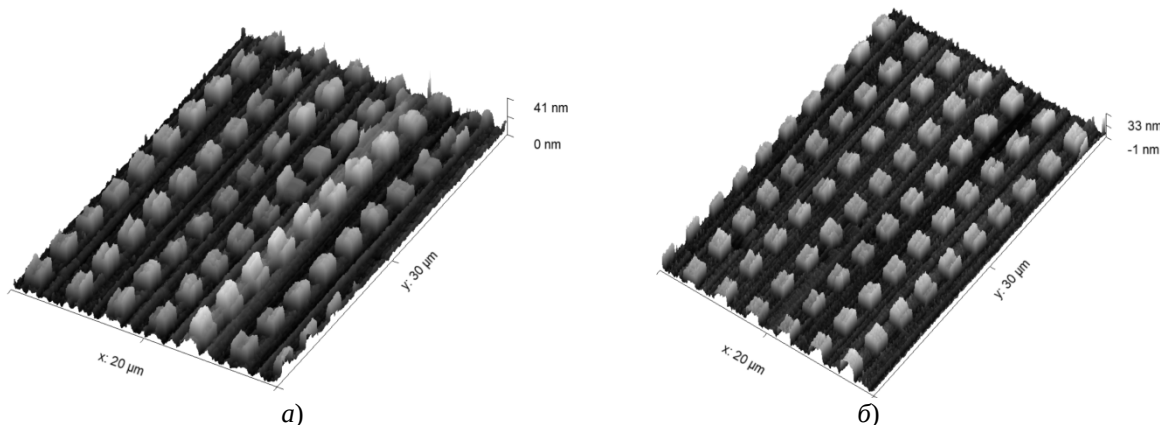


Рис. 2. Изображение тестовой решетки TDQ1 при калибровке оси Y: а) – до калибровки; б) – после калибровки

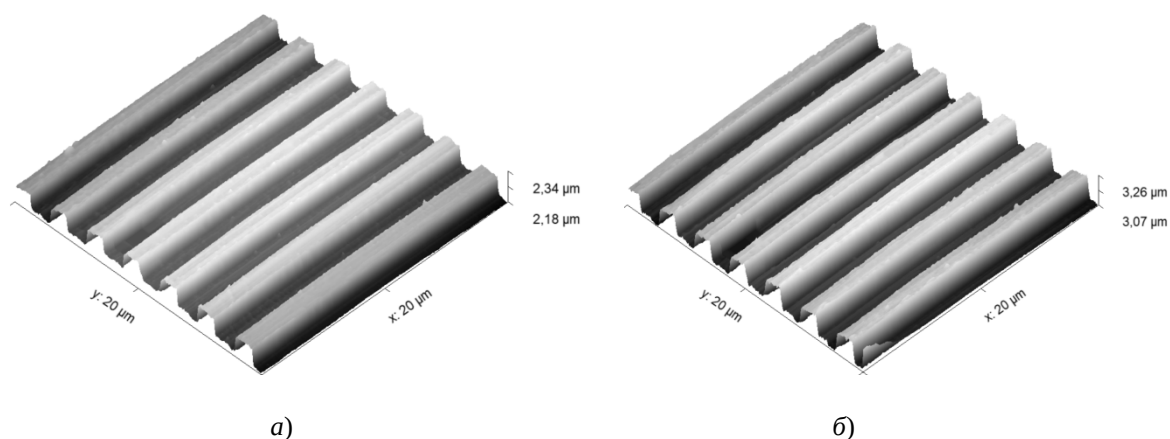


Рис. 3. Изображение тестовой решетки TDZ2 при калибровке оси Z:
а) – до калибровки; б) – после калибровки

Данные, представленные в таблице 1, получены с помощью Фурье-анализа в программе Gwyddion.

Таблица 2. Результаты калибровки пьезосканера

Ось сканирования	OX	OY	OZ
Период решетки до калибровки, мкм	3,12315	3,14935	-
Период решетки после калибровки, мкм	3,02183	2,99787	-
Период эталонной тестовой решетки, мкм	3 ± 0.05	3 ± 0.05	-
Высота рельефа решетки до калибровки, нм	-	-	76,6
Высота рельефа решетки после калибровки, нм	-	-	106
Высота рельефа эталонной тестовой решетки, нм	-	-	$107 \pm 1,8$

Заключение

Из полученных данных (таблица 1) следует, что до калибровки погрешности составляли: по оси X 4,105 %; по оси Y 4,978%; по оси Z 28,411%. После калибровки по оси X 0,728 %; по оси Y 0,071%; по оси Z 0,934%. Наибольшую погрешность вносил сканер по оси Z, однако погрешности других осей оставались в допустимых пределах.

Работа выполнена с использованием научного оборудования РЦЗМкп РГРТУ при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

1. Быков В. А. Приборы и методы сканирующей зондовой микроскопии для исследования и модификации поверхностей: дисс. д.т.н.: 05.27.01, 01.04.01. Москва, 2000. 402 с.

УДК 621.315.592; ГРНТИ 29.19.16

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ТОНКИХ ПЛЕНОК ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ, СФОРМИРОВАННЫХ МЕТОДОМ АНОДНОГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ

А.М. Горохова¹, В.В. Трегулов², А.И. Иванов², В.В. Куклев¹, В.Г. Литвинов¹

¹Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина, Российская Федерация, Рязань, amgor2836@gmail.com, kuklewadim@yandex.ru, vglit@yandex.ru

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

Аннотация. Полупроводниковые структуры Ag/por-Si/n-Si представляют интерес для использования в качестве активных подложек, обеспечивающих эффект гигантского комбинационного рассеяния света. В работе представлены методики формирования структур Ag/n-Si, Ag/por-Si/n-Si и por-Si/n-Si, включающие электрохимическое травление пористого кремния и осаждение серебра химическим методом. Проведен анализ морфологических характеристик полученных структур, включая распределение профиля и шероховатость поверхности, а также изучены параметры границы раздела por-Si/кремниевая подложка с использованием атомно-силовой микроскопии.

Ключевые слова: пористый кремний, электрохимическое травление, осаждение серебра, топология поверхности.

INVESTIGATION OF THE TOPOLOGICAL FEATURES OF THIN POROUS SILICON FILMS FORMED BY THE ANODIC ELECTROCHEMICAL ETCHING METHOD

A.M. Gorokhova¹, V.V. Tregulov², A.I. Ivanov², V.V. Kuklev¹, V.G. Litvinov¹

¹Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin, Russia, Ryazan, amgor2836@gmail.com, kuklewadim@yandex.ru, vglit@yandex.ru

²Ryazan State University named after S.A. Yesenin, Russia, Ryazan, trwww@yandex.ru

The summary. Semiconductor structures Ag/por-Si/n-Si are of interest for use as active substrates enabling the effect of surface-enhanced Raman scattering (SERS). This study presents the methodologies for the formation of Ag/n-Si, Ag/por-Si/n-Si, and por-Si/n-Si structures, including electrochemical etching of porous silicon and chemical deposition of silver. An analysis of the morphological characteristics of the obtained structures was carried out, including profile distribution and surface roughness, as well as an investigation of the interface parameters of por-Si/silicon substrate using atomic force microscopy.

Keywords: porous silicon, electrochemical etching, silver deposition, surface topology.

Полупроводниковые структуры Ag/por-Si/n-Si актуальны для применения в качестве активных подложек, реализующих интересный физический эффект гигантского комбинационного рассеяния света (ГКРС) известный в англоязычной литературе как SERS [1]. Эффект ГКРС позволяет использовать изучение спектроскопии комбинационного рассеяния света для исследования молекулярных спектров в сверхмалом количестве сложных органических соединений, микрообъектов, микро- и наносистем [1, 2].

При изготовлении экспериментальных образцов в качестве подложки использовалась монокристаллическая кремниевая пластина типа КЭФ4,5 с ориентацией (100).

Образцы №1, №2 представляют собой структуры Ag/por-Si/n-Si с различной толщиной слоя пористого кремния (por-Si). Подложкой служила кремниевая пластина типа КЭФ4,5 с ориентацией поверхности (100). Формирование слоя por-Si осуществлялось методом анодного электрохимического травления в электролите, состоящем из HF (46%) и C₂H₅OH (92%) в соотношении 1:1. Кремниевая пластина использовалась в качестве анода, а катод представлял собой стержень из спектрально чистого графита. Рост слоя por-Si происходил при освещении поверхности галогенной лампой мощностью 100 Вт при плотности тока 20 мА/см². Длительность электрохимического травления составляла 30 секунд для образца №1 и 5 ми-

нут для образца №2. После травления образцы промывались в дистиллированной воде для удаления остатков электролита и высушивались в сушильном шкафу. Осаждение слоя серебра (Ag) осуществлялось химическим методом из раствора, содержащего Ag_2SO_4 (0,01 М), HF (46%) и $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (92%) в соотношении 1:0,1:0,3. Длительность процесса составляла 20 секунд. После формирования слоя серебра образец подвергался промывке в дистиллированной воде для удаления остатков реакционного раствора и высушивался в сушильном шкафу.

Толщина слоя por-Si для образцов №1 и №2 составила 0,43 мкм и 9,1 мкм, соответственно. Значения толщины определены по результатам анализа поперечного скола образцов с использованием растровой электронной микроскопии.

Образец №3 представляет собой структуру por-Si/n-Si . Формирование слоя por-Si осуществлялось аналогично методике, использованной для образцов №1 и №2. Время электрохимического травления составило 30 секунд. Толщина слоя por-Si составила 0,43 мкм, что было установлено на основе анализа поперечного скола образца с применением растровой электронной микроскопии.

В ходе проведения исследования топографической организации поверхностных структур образцов был осуществлен инструментальный анализ с применением атомно-силового микроскопа NTEGRA Solver. Измерение проводилось в полуконтактном режиме с оптимизированной силой взаимодействия зонд-образец, составляющей 28-91 нм.

В процессе исследования применялись кантилеверные датчики серии Diamond со следующими характеристиками:

- геометрическая высота зондового наконечника: 10-15 мкм
- радиус кривизны концевой элемента: 50-70 нм
- токопроводящее алмазоподобное покрытие (толщина 70 нм) на рабочей поверхности кантилевера.

В процессе исследования топологических характеристик структур данных образцов были получены данные о распределении профиля и параметрах шероховатости поверхности структур, а также о распределении профиля и шероховатости поверхности в области границы раздела структура/кремниевая подложка.

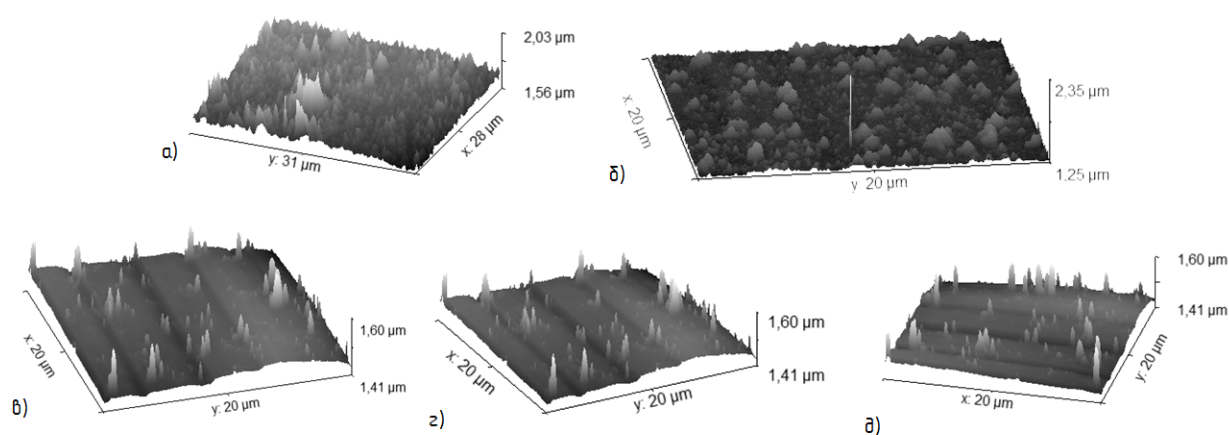


Рис. 2. Распределение профиля структур а) – №1 (1); б) – №1 (2); в) – №2 (1); г) – №2 (2); д) №3

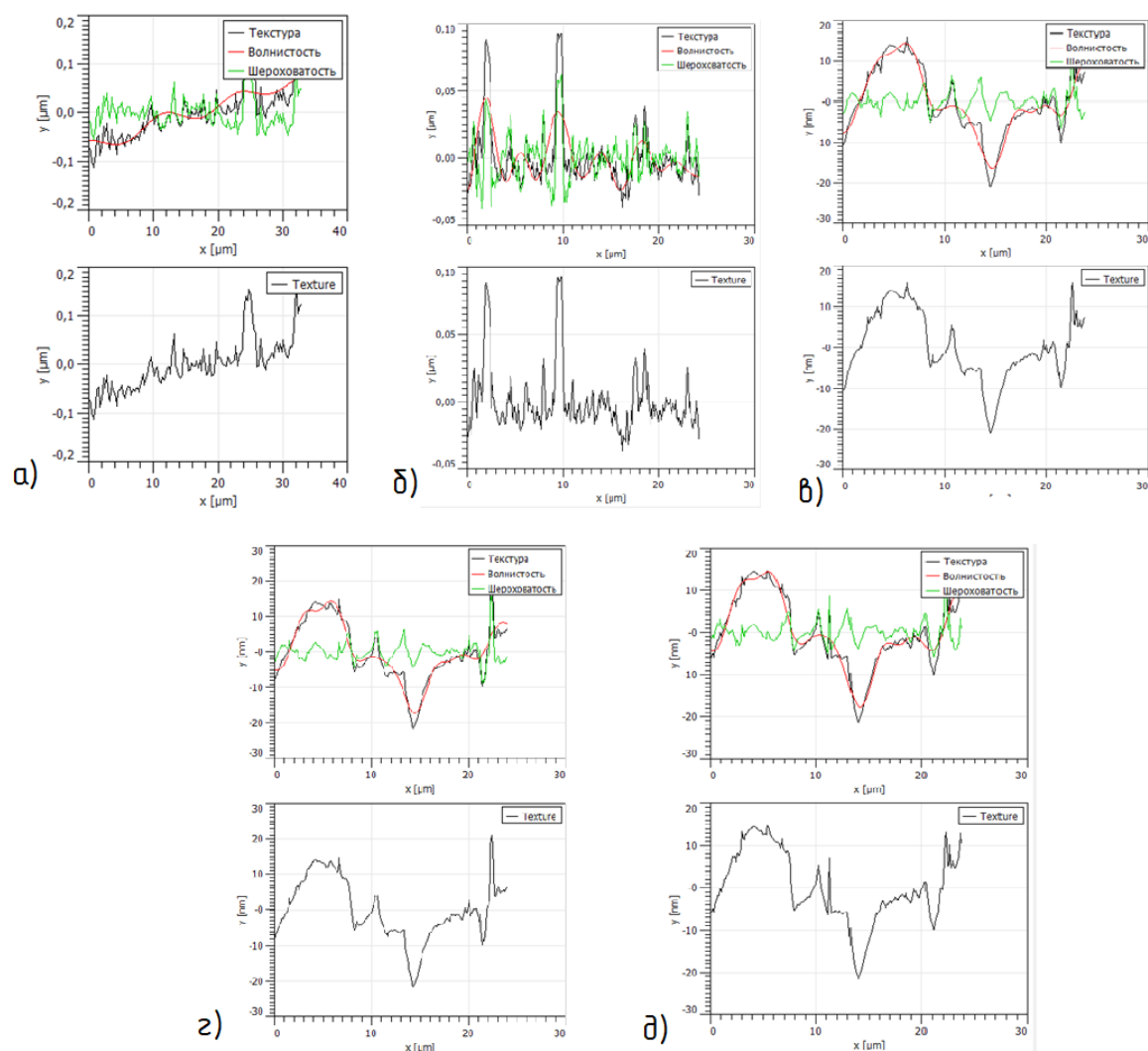


Рис. 3. Параметры шероховатости поверхности структур а) – №1 (1); б) – №1 (2); в) – №2 (1); г) – №2 (2); д) №3

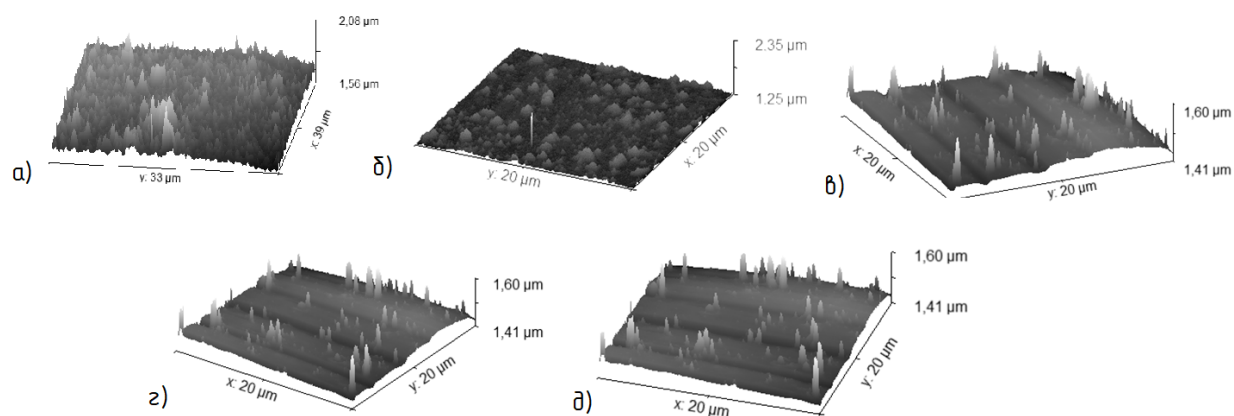


Рис. 4. Распределения профиля в области границы раздела а) – №1 (1) /кремниевая подложка; б) – №1 (2) /кремниевая подложка; в) – №2 (1) /кремниевая подложка; г) №2 – (2) /кремниевая подложка; д) – №3 /кремниевая подложка

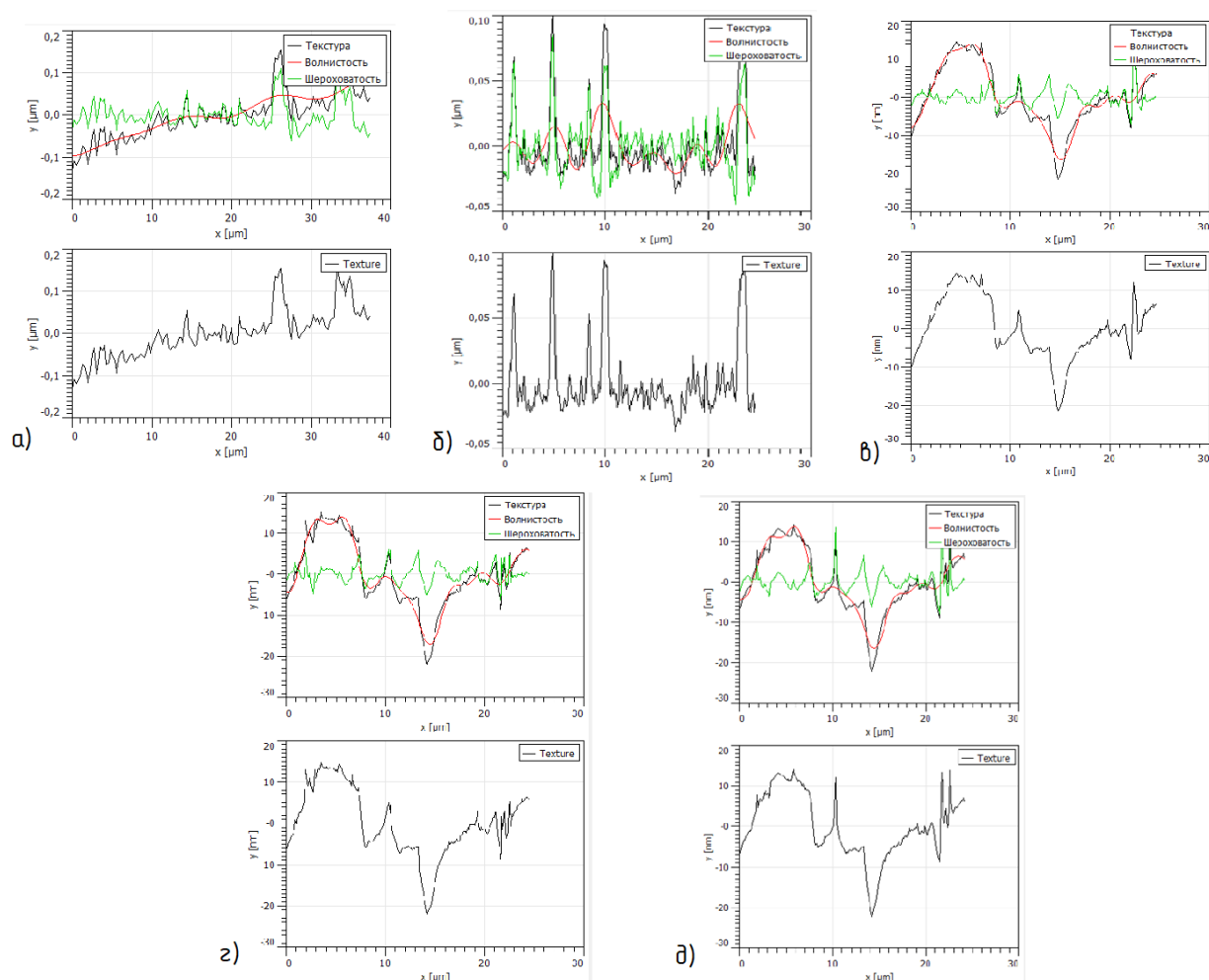


Рис. 5. Параметры шероховатости поверхности в области границы раздела

а) – №1 (1) /кремниевая подложка;
 б) – №1 (2) /кремниевая подложка; в) №2 (1) /кремниевая подложка;
 г) – №2 (2) /кремниевая подложка; д) – №3 /кремниевая подложка

Таблица 1 – Параметры топологии образцов

Параметры топологии, нм	Образец №1	Образец №2	Образец №3
Средняя шероховатость	14,51	1,904	0,56
Максимальная высота шероховатости	130,5	27,40	7,055
Максимальная глубина впадины шероховатости	48,02	6,096	1,883
Максимальная высота пика шероховатости	82,53	21,30	5,172
Средняя максимальная высота шероховатости	71,48	12,32	4,547
Средняя максимальная глубина впадины шероховатости	28,02	3,259	1,455
Средняя максимальная высота пика шероховатости	43,46	9,056	3,092
Средняя волнистость	26,55	2,505	1,492
Максимальная высота волнистости	111,5	9,641	6,991
Максимальная высота профиля	180,3	28,53	9,479

Сравнив параметры топологии образцов, представленных в таблице 1, видно, что образец №1 имеет наибольшую шероховатость и волнистость, что указывает на сильно неровную поверхность. Образец №2 характеризуется средней шероховатостью, образец №3 является наиболее гладким. Исходя из этого, можно сделать вывод, что добавление серебра при-

водит к значительному увеличению шероховатости и волнистости. Минимальные шероховатость и волнистость свидетельствуют о равномерности структуры.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ с использованием научного оборудования РЦЗМкп РГРТУ им. В.Ф. Уткина.

Библиографический список

1. Bandarenka H.V. Surface enhanced raman spectroscopy of organic molecules on metalized porous silicon // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures, pp. 209-215 (June 2017).
2. Мельник Н.Н., Переведенцева Е.В., Трегулов В.В., Скопцова Г.Н., Горбунова Ю.Н., Косцов Д.С. Реализация эффекта гигантского комбинационного рассеяния света в кремниевой полупроводниковой структуре с резонансом Фано // Краткие сообщения по физике ФИАН. № 1, 2025, с. 3-11.

УДК 621.315.592; ГРНТИ 29.19

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ КРАСНОГО ЦВЕТОВОГО ДИАПАЗОНА

А.И. Горохов, В.Г. Литвинов

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, gandry364@yandex.ru*

Аннотация. В статье рассмотрены квантоворазмерные эффекты (КЗЭ) в полупроводниковых структурах, в частности, в квантовых ямах, где размеры структуры сравнимы с длиной волны де Бройля носителей заряда. Обсуждается влияние квантовых ям на дискретизацию уровней энергии и изменение плотности состояний, что приводит к снижению порога генерации лазерного излучения. В работе также представлены результаты экспериментов по измерению спектра излучения для оценки излучающих характеристик лазерных диодов. Использован монохроматор МДР-206 для анализа зависимости интенсивности излучения от длины волны при различных значениях тока. Исследованы лазерные диоды различных производителей, включая компании из Китая, США и Японии. Полученные данные могут быть полезны для улучшения характеристик лазерных диодов и оптимизации их работы в рабочих диапазонах тока.

Ключевые слова: квантоворазмерные эффекты, квантовые ямы, плотность состояний, порог генерации, лазерное излучение, фотолюминесценция, монохроматор МДР-206, лазерные диоды, спектр излучения, лазерные диоды красного диапазона.

RESEARCH OF EMISSION SPECTRA OF SEMICONDUCTOR LASER DIODES IN THE RED COLOR RANGE

A.I. Gorokhov, V.G. Litvinov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, gandry364@yandex.ru*

The summary. The article discusses quantum size effects (QSE) in semiconductor structures, specifically in quantum wells, where the dimensions of the structure are comparable to the de Broglie wavelength of charge carriers. The impact of quantum wells on the discretization of energy levels and the change in the density of states, which leads to a decrease in the threshold for laser emission is examined. The paper also presents the results of experiments measuring emission spectra to evaluate the emitting characteristics of laser diodes. A MDR-206 monochromator was used to analyze the dependence of the emission intensity on the wavelength at different current values. Laser diodes from various manufacturers, including companies from China, the USA, and Japan, were studied. The obtained data may be useful for improving the characteristics of laser diodes and optimizing their performance in operational current ranges.

Keywords: quantum size effects, quantum wells, density of states, threshold of generation, laser emission, photoluminescence, monochromator MDR-206, laser diodes, emission spectrum, red wavelength laser diodes.

Квантоворазмерные эффекты (КЗЭ) проявляются в полупроводниковых структурах, где размеры одного или нескольких измерений становятся сравнимыми с длиной волны де Бройля носителей заряда. В квантовых ямах движение носителей заряда ограничено в одном направлении, что приводит к дискретизации уровней энергии и изменению плотности состояний [1, 2].

Решение одномерного уравнения Шрёдингера для бесконечно глубоких потенциальных ям [1]:

$$E_n = \frac{h^2 n^2}{8m^* L^2}, n = 1, 2, 3, \dots, \quad (1)$$

где E_n – энергия квантованного уровня;

h – постоянная Планка;

n – квантовое число;

m^* – эффективная масса электрона или дырки;

L – ширина квантовой ямы.

При уменьшении уровни энергии сдвигаются вверх, что приводит к увеличению энергии межзонных переходов и синему спектру [3]. В реальных квантовых ямах стенки конечны, и часть волновой функции может проникать в барьеры. В этом случае уровни энергии определяются сложным решением уравнения Шрёдингера [1]:

$$E_n = \frac{h^2}{8m^* L^2} \left(n^2 - \frac{8m^* L U_0}{h^2} \right), \quad (2)$$

где U_0 – высота потенциального барьера.

При малых значениях энергия основного состояния становится больше, чем тепловая энергия, что может привести к снижению заселения верхних уровней.

В квантовой яме появление новых уровней приводит к резкому увеличению плотности состояний. Из-за изменения плотности состояний в квантовых ямах снижается порог генерации лазерного излучения, так как большая часть носителей сосредоточена в узком энергетическом диапазоне [3].

Исследование зависимости спектра излучения является показательным фактором для качественной оценки излучающего спектра лазерных диодов. Суть метода заключается в измерении зависимости интенсивности излучения от длины волны при разных значениях тока, таким методом мы можем качественно оценить стабильность работы лазерного диода в рабочих диапазонах тока. Измерения проводились на монохроматоре МДР-206 оснащенный фотоприемным устройством с фотоэлектронным умножителем R928. В качестве экспериментальных образцов выступают лазерные диоды красного диапазона: №1 – LOS TECH CO (Китай); №2 – Senfeng Laser (Китай); №3 – Фирма MOOG (США); №4 – Фирма Nichia (Япония); №5 – Hongniu (Китай);

На рисунках 1 и 2 представлены фотографии одного из образцов без корпуса.

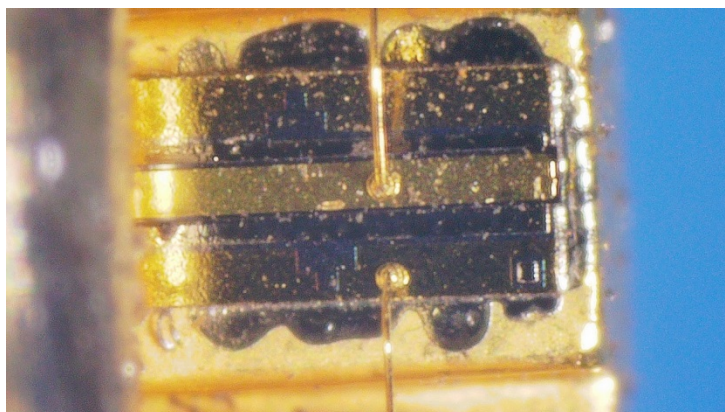


Рис. 6. Фотография лазерного диода сверху

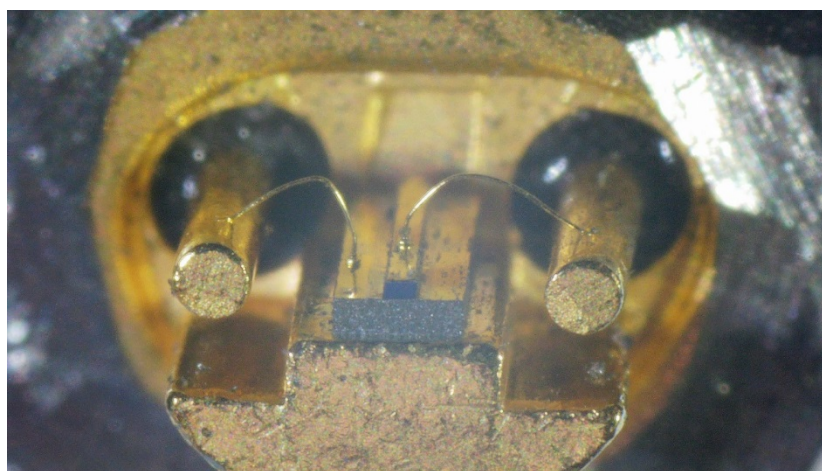


Рис. 7. Фотография лазерного диода спереди

Описание установки на базе монохроматора МДР-206

Монохроматоры предназначены для получения монохроматического излучения в широком спектральном диапазоне. На основе монохроматоров с использованием дополнительных устройств можно собирать автоматизированные спектральные установки для решения конкретных задач. Монохроматоры не являются средством измерения. Они используются в научных и промышленных лабораториях в качестве отдельных приборов или в составе исследовательских комплексов. В таблице приведены технические характеристики монохроматора МДР-206, а на рисунке 3 – структурная схема измерительной установки.

Таблица – Технические характеристики монохроматора МДР-206

Наименование характеристик	Величина
Спектральный диапазон, нм	190-5000
Фокусное расстояние зеркальных объективов, мм	180
Относительное отверстие	1:4
Пределы раскрытия щелей, мм	0 и 4,2
точность отсчета, мм	
при раскрытии от 0 до 0,2 мм	0,001
при раскрытии от 0,2 до 4,2 мм	0,01
Полуширина аппаратного контура (решетка 1200 штр./мм, ширина щели 10 мкм), нм	0,1

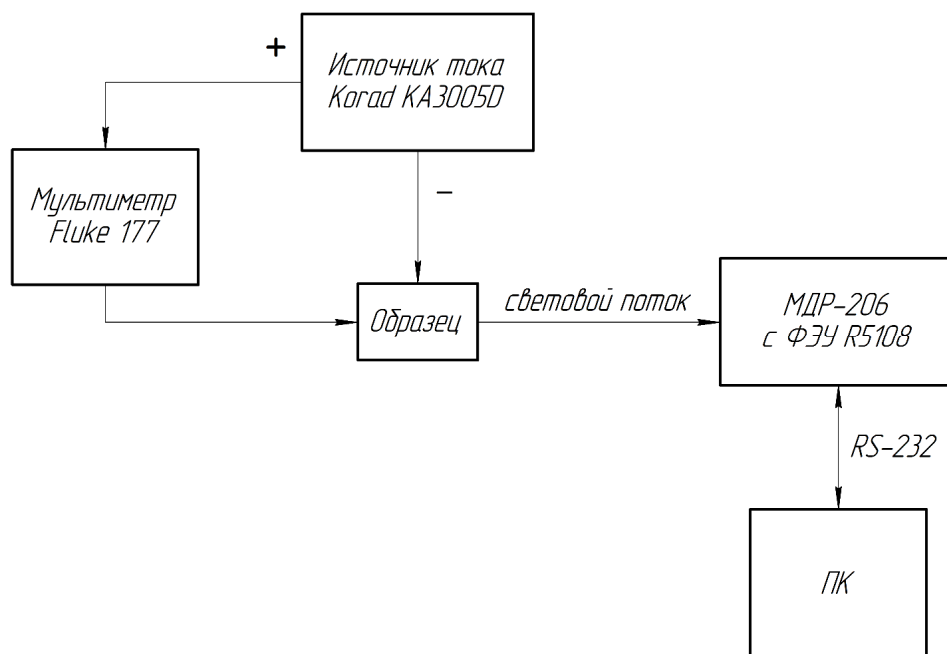


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

Результаты исследования

Исследование проводилось на монохроматоре МДР-206, который оснащен фотоприемным устройством с фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) R5108.

Напряжение ФЭУ равное 700В подобрано экспериментально для снижения искажений при измерении. На всех образцах ток изменяли с помощью лабораторного блока питания KORAD KA3005D с 40мА до 150мА, контроль тока делали с помощью мультиметра Fluke 177. Паспортные данные для всех диодов были следующие.

- Длина волны лазерного света: 658 нм.
- Выходная мощность центрального лазера: 80 мВт.
- Тип корпуса: ТО-18 Диаметр ТО18: 5,6 мм.
- Обратное напряжение: 2 В.
- Фотодиод: 20 В.
- Пороговый ток: 40 мА.
- Максимальный ток: 150мА.
- Рабочее напряжение: 2,4 В.
- Наклонная эффективность: 0,9 мВт/мА.
- Расхождение луча: 9,5 град.

Список исследуемых образцов:

- 1) лазерный диод фирмы LOS TECH CO (Китай);
- 2) лазерный диод фирмы Senfeng Laser (Китай);
- 3) лазерный диод фирмы MOOG (США);
- 4) лазерный диод фирмы Nichia(Япония);
- 5) лазерный диод фирмы Hongniu(Китай).

На рисунках 4-13 представлены результаты измерения спектров излучения пяти образцов.

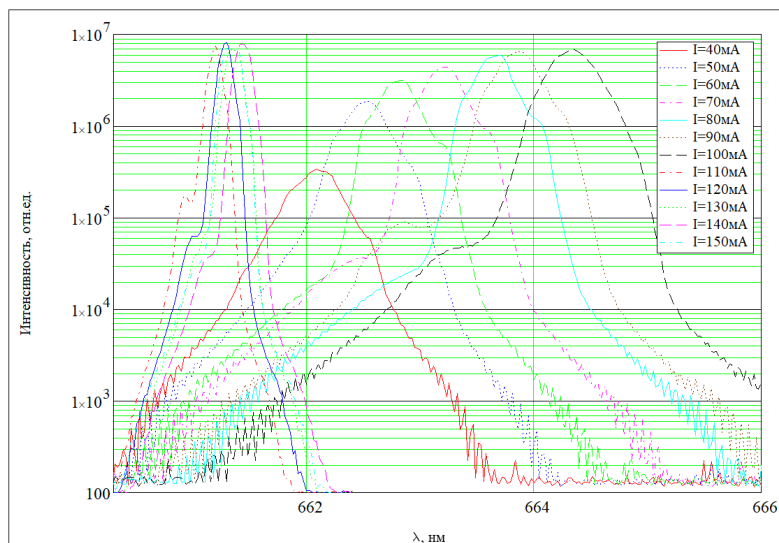


Рис. 4. Зависимость интенсивности светового потока от длины волны, образец №1

Посредством расчета в САПР Mathcad 15, построен график зависимости длины волны на полуширине спектра и на полувывоте, от значений тока питания диода.

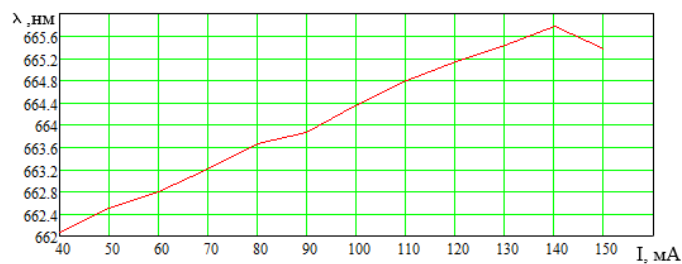


Рис. 5. Зависимость длины волны, соответствующей полуширине на полувывоте пика интенсивности от тока питания лазерного диода, образец №1

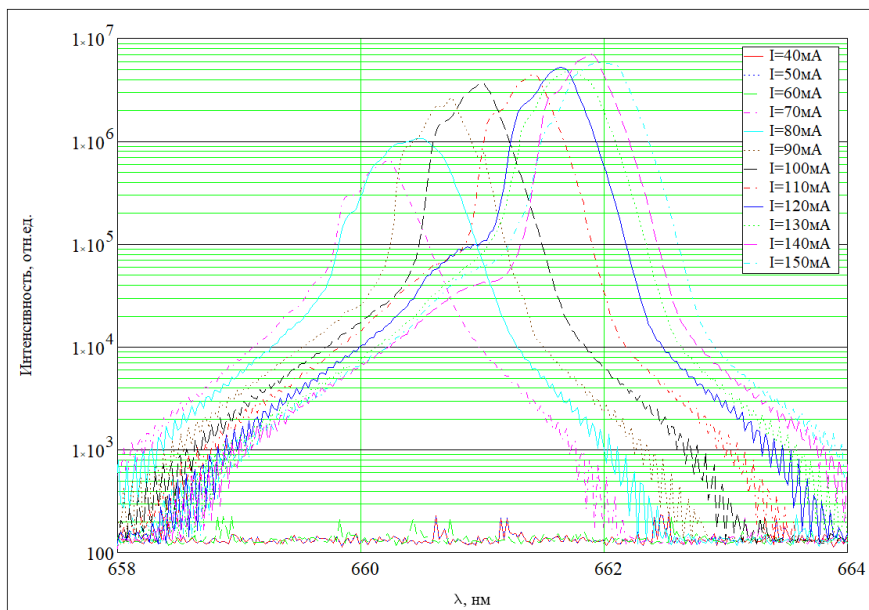


Рис. 6. Зависимость интенсивности светового потока от длины волны, образец №2

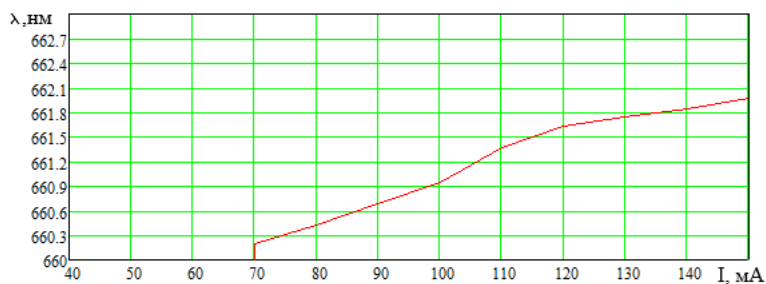


Рис. 7. Зависимость длины волны, соответствующей полуширине на полувысоте пика интенсивности от тока питания лазерного диода, образец №2

Исходя из графиков видно, что лазерный диод начинает излучать с 70мА, так же визу- ально это было видно.

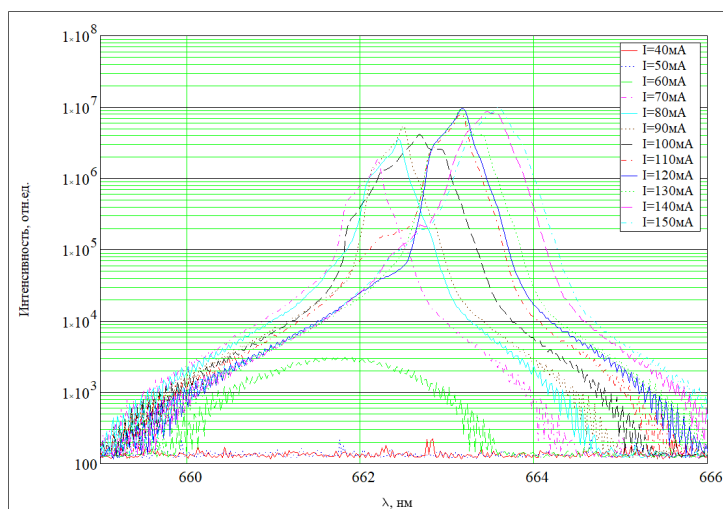


Рис. 8. Зависимость интенсивности светового потока от длины волны, образец №3

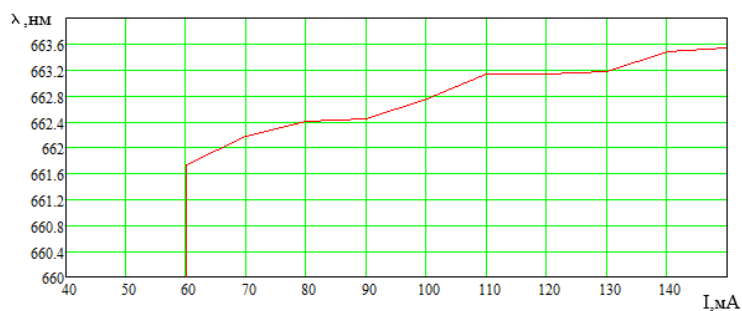


Рис. 9. Зависимость длины волны, соответствующей полуширине на полувысоте пика интенсивности от тока питания лазерного диода, образец №3

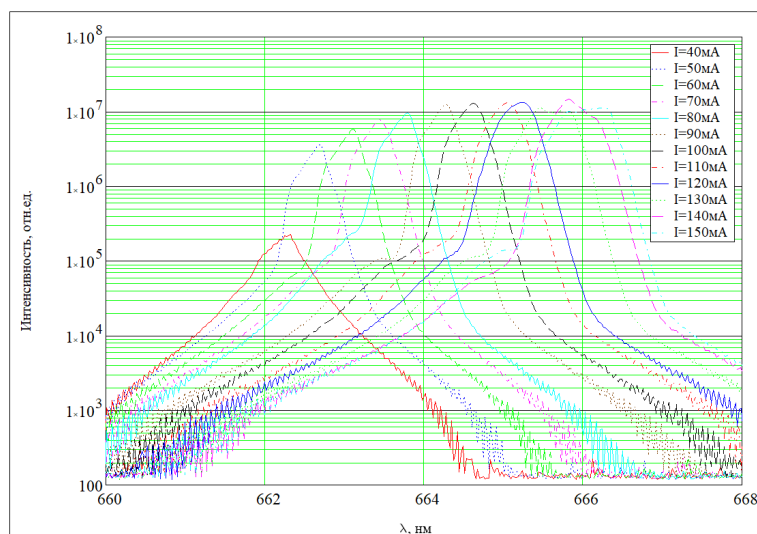


Рис. 8. Зависимость интенсивности светового потока от длины волны, образец №4

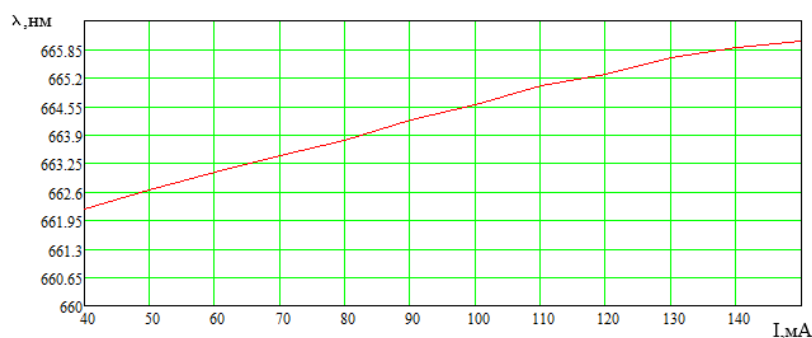


Рис. 11 – Зависимость длины волны, соответствующей полуширине на полувывоте пика интенсивности от тока питания лазерного диода, образец №4

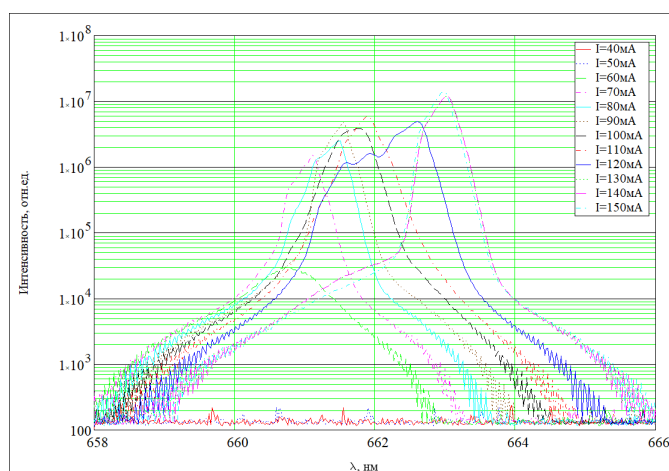


Рис. 12. Зависимость интенсивности светового потока от длины волны, образец №5

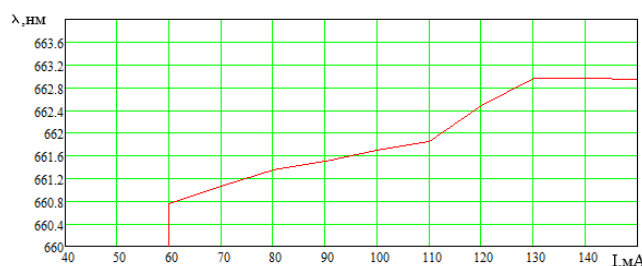


Рис. 13. Зависимость длины волны, соответствующей полуширине на полувывоте пика интенсивности от тока питания лазерного диода, образец №5

Заключение

Изменение длины волны излучения полупроводниковых лазерных диодов при увеличении тока обусловлено несколькими физическими эффектами [4-8].

1. *Термическое сужение запрещенной зоны.* Увеличение тока инжекции приводит к повышению температуры активной области лазерного диода. Это вызывает уменьшение ширины запрещенной зоны полупроводника, что, в свою очередь, приводит к увеличению длины волны излучения. Зависимость энергии запрещенной зоны от температуры можно описать следующей формулой:

$$E_g(T) = E_g(0) - \alpha T, \quad (3)$$

где $E_g(T)$ – ширина запрещенной зоны при температуре T ;

$E_g(0)$ – ширина запрещенной зоны при 0К;

α – температурный коэффициент.

Поскольку длина волны излучения λ связана с энергией фотона, приобретенной при переходе между зонами или уровнями, через соотношение $E = \frac{hc}{\lambda}$, где h – постоянная Планка, а c – скорость света, то уменьшение $E_g(T)$ приводит к увеличению длины волны излучения λ .

2. *Эффект Бурштейна-Мосса.* В полупроводниковых лазерных диодах с КЯ увеличение тока инжекции заполняет нижние энергетические состояния зоны проводимости, смещая эффективный край поглощения и, как следствие, изменяя показатель преломления. Это приводит к изменению длины волны излучения:

$$\lambda = \frac{hc}{E_g + \Delta E}, \quad (4)$$

где ΔE — сдвиг уровня Ферми из-за увеличенной концентрации носителей.

3. *Изменение показателя преломления и оптического пути.* При увеличении тока инжекции концентрация носителей в активной области возрастает, что приводит к изменению показателя преломления n_{eff} . Связь между изменением показателя преломления и концентрацией носителей описывается соотношением:

$$\Delta n_{eff} = -\frac{e^2}{\epsilon_0 m^* \omega^2} \Delta N, \quad (5)$$

где e — заряд электрона;

ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума;

m^* — эффективная масса носителей;

ω — частота оптического излучения;

ΔN — изменение концентрации носителей.

Изменение показателя преломления в свою очередь влияет на фазовый сдвиг внутри резонатора, что выражается как:

$$\Delta \lambda = \lambda_0 \frac{\Delta n_{eff}}{n_{eff}}, \quad (6)$$

где λ_0 — длина волны излучения при начальном значении показателя преломления.

Все эти эффекты совместно приводят к изменению длины волны излучения полупроводникового лазерного диода при увеличении тока инжекции, основным из которых является термическое сужение запрещенной зоны, а совокупность ряда других эффектов делает спектральный сдвиг более выраженным и нелинейным по отношению к току.

Библиографический список

1. Bastard G., Shulman J. Wave Mechanics Applied to Semiconductor Heterostructures. // *Physics Today* 1992. 45 (2). P. 103–105.
2. Esaki, L., & Tsu, R. (1970). *Superlattice and Negative Differential Conductivity in Semiconductors*. // *IBM Journal of Research and Development*, 1970. 14(1), P. 61–65.
3. Arakawa Y. and Sakaki H. Multidimensional Quantum Well Laser and Temperature Dependence of Its Threshold Current. *Applied Physics Letters*, 1982. 40. P. 939-941.
4. Жуков А.Е. Лазеры на основе полупроводниковых наноструктур. Санкт-Петербург: Изд-во «Элмор», 2007. 304 с.
5. Жуков А.Е., Максимов М.В. Современные инжекционные лазеры. СПб.: Изд-во СПб Политехнического ун-та, С-Петербург. 2009. 276 с.;
6. Пихтин А. Н. Оптическая и квантовая электроника. М.: Высшая Школа. 2001. 573 с.
7. Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах. В 2-х т. М.: Мир, 1981.
8. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х т. М.: Мир, 1984.

УДК 621.382.2/.3; ГРНТИ 47.09.29

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСЛОЙНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

Ю.Н. Денисова

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

Аннотация. В данной статье рассматриваются особенности оптических методов диагностики многослойных полупроводниковых квантово-размерных гетероструктур. Описаны теоретические основы и основные оптические методы исследования полупроводниковых структур с несколькими гетеропереходами, их возможности, преимущества и недостатки.

Ключевые слова: полупроводник, гетероструктура, диагностика, спектроскопия, фотолюминесценция, электролюминесценция, эллипсометрия.

OPTICAL METHODS FOR DIAGNOSING THE CHARACTERISTICS OF MULTILAYER SEMICONDUCTOR HETEROSTRUCTURES

J.N. Denisova

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

Annotation. This article discusses the features of optical diagnostic methods for multilayer semiconductor quantum-dimensional heterostructures. The theoretical foundations and basic optical methods for studying semiconductor structures with multiple heterojunctions, their capabilities, advantages and disadvantages are described.

Keywords: semiconductor, heterostructure, diagnostics, spectroscopy, photoluminescence, electroluminescence, ellipsometry.

Одним из ключевых направлений физики полупроводников является физика гетероструктур. В наноструктурах из-за ограничения движения носителей заряда в одном или нескольких направлениях наблюдаются значительные изменения в энергетическом спектре носителей заряда и фоонов. Это, в свою очередь, порождает множество новых физических явлений, что позволяет разрабатывать материалы и устройства с уникальными свойствами и функциональными возможностями [1]. Исследование и моделирование полупроводниковых

гетероструктур имеет важное значение для создания новых технологий и улучшения существующих электронных устройств, способствующих развитию науки и техники.

В настоящее время, по мере усложнения разрабатываемых полупроводниковых приборов и технологий их изготовления, усложняются и экспериментальные методики исследования полупроводников. Для полной характеристики современных полупроводниковых устройств требуется применение комплексных исследований, позволяющих получить информацию о большом количестве параметров, влияющих на работу различных элементов. Это особенно актуально вследствие увеличения роли приборов, работа которых основана на новых физических принципах [2].

В данной статье мы рассмотрим современное состояние оптических методов исследования свойств многослойных полупроводниковых гетероструктур и их особенности.

Теоретические основы

Гетероструктура — это выращенная на подложке структура, состоящая из слоёв различных материалов (полупроводников, диэлектриков), которые различаются шириной запрещённой зоны и/или сродством к электрону [3].

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 [4]. Гетероструктуры дают возможность управления фундаментальными параметрами в полупроводниковых кристаллах и приборах: шириной запрещённой зоны, эффективными массами носителей и их подвижностями, показателем преломления, электронным энергетическим спектром и т. д. [1].

В процессе создания гетероструктур применяют разнообразные методы, среди которых наиболее распространёнными являются молекулярно-лучевая эпитаксия и осаждение из газовой фазы (MOCVD) [5,6].

Оптические методы исследования характеристик полупроводниковых гетероструктур

Современные аспекты исследования многослойных полупроводниковых гетероструктур включают в себя различные оптические методы. Рассмотрим некоторые из них.

Спектроскопия фотолюминесценции

Фотолюминесценция (ФЛ) — это излучение света веществом после поглощения фотонов. Спектроскопия фотолюминесценции — это метод исследования материалов, основанный на измерении и анализе спектров фотолюминесценции. Данный метод позволяет получить ценную информацию о полупроводниковых наноструктурах: их составе, совершенстве структуры, дефектах и оценки резкости границ раздела.

Метод заключается в анализе рекомбинационного излучения полупроводниковых структур, возбуждаемого в результате облучения полупроводника светом с энергией $h\nu_1 \geq \Delta E_g$, превышающей ширину запрещённой зоны этого полупроводника [7].

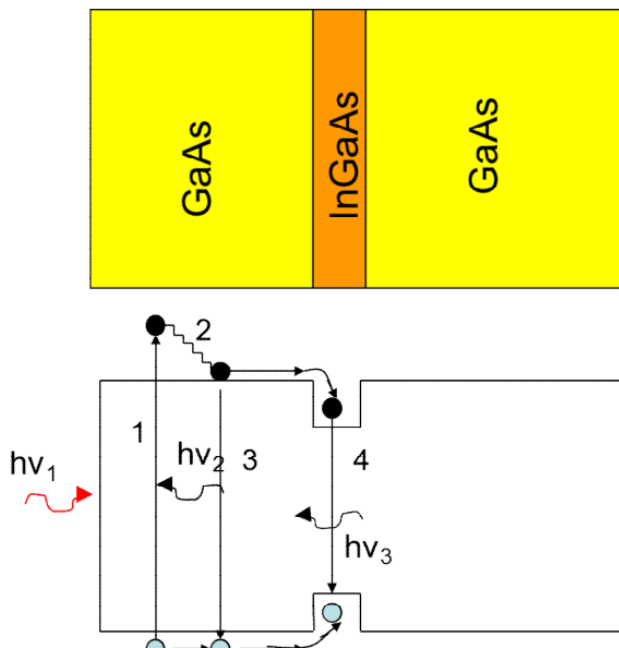


Рис. 1. Схема полупроводниковой гетероструктуры InGaAs/GaAs и соответствующая зонная диаграмма [7]

Характеристики полупроводниковых гетероструктур, которые можно получить и исследовать с помощью метода спектроскопии фотолюминесценции:

- 1) Ширина запрещенной зоны E_g : В случае сравнительно широких эпитаксиальных слоёв однородного полупроводника энергия излучения соответствует ширине запрещённой зоны, что является атрибутом данного конкретного полупроводника, поэтому энергия испускаемого излучения несёт информацию о материале анализируемого полупроводника.
- 2) Качество материала: Интенсивность сигнала ФЛ коррелирует с качеством кристалла и концентрацией дефектов. Высокая интенсивность свидетельствует о высоком качестве материала, а низкая — о наличии дефектов, которые являются центрами нерадиационной рекомбинации. Форма спектра также может указывать на наличие дефектов. Широкие пики говорят о более высоком уровне дефектности.
- 3) Типы дефектов: Наличие дополнительных пиков в спектре ФЛ может указывать на присутствие различных типов дефектов в материале, таких как вакансии, междоузельные атомы или примесные центры. Анализ положения и формы этих пиков позволяет идентифицировать конкретные типы дефектов.
- 4) Процессы рекомбинации: Анализ кинетики затухания ФЛ позволяет изучить процессы рекомбинации носителей заряда. Например, экспоненциальное затухание обычно указывает на мономолекулярную рекомбинацию, а более сложные кинетики — на более сложные процессы.
- 5) Температурная зависимость: Изучение температурной зависимости ФЛ позволяет определить энергию активации различных процессов рекомбинации и получить информацию о взаимодействии носителей заряда с фононами.

Недостатки метода спектроскопии фотолюминесценции заключаются в низкой интенсивности фотолюминесценции в сильно дефектных структурах [8] и непрямозонных полупроводниках (таких как Si и Ge) [9,10], достижении высокой интенсивности фотолюминесценции материалов только при низких температурах.

Спектроскопия электролюминесценции

Электролюминесценция (ЭЛ) — это излучение света материалом в ответ на прохождение через него электрического тока.

Электролюминесцентная спектроскопия (ЭЛ-спектроскопия) предоставляет обширную информацию о параметрах полупроводниковых гетероструктур. Наибольший интерес в методе ЭЛ представляет зависимость мощности излучения от тока диода (ватт-амперная характеристика) [7]. При приложении к гетероструктуре электрического поля возникает ток носителей разных знаков, при этом электроны и дырки инжектируются в область полупроводника, называемую активной. В активной области происходит излучательная рекомбинация и испускается свет. Длина волны излучения соответствует материалу полупроводника в активной области. Метод ЭЛ-спектроскопии обладает высокой чувствительностью и позволяет обнаружить даже слабые сигналы излучения.

Механизм спектроскопии электролюминесценции можно описать следующим образом:

1. Инжекция носителей заряда: При приложении внешнего электрического поля к гетероструктуре, электроны и дырки инжектируются в активную область из соответствующих слоев (n- и p-типа). Эффективность инжекции зависит от конструкции гетероструктуры, в частности, от высоты потенциальных барьеров на границах раздела слоев.

2. Рекомбинация носителей заряда: В активной области электроны и дырки взаимодействуют, приводя к их рекомбинации. В зависимости от механизма рекомбинации (например, излучательная или безызлучательная рекомбинация), выделяется энергия в виде фотонов (электролюминесценция) или тепла.

3. Излучение фотонов: Излучательная рекомбинация приводит к испусканию фотонов с энергией, соответствующей ширине запрещенной зоны материала активной области. Спектр излучения (ЭЛ-спектр) содержит информацию о ширине запрещенной зоны, о состояниях локализации носителей заряда (например, квантовые точки, квантовые ямы), о степени легирования и о наличии дефектов.

4. Детектирование и анализ излучения: Излучение, испускаемое образцом, регистрируется с помощью спектрографа или монохроматора. Полученный ЭЛ-спектр анализируется для определения энергетического положения пиков излучения, их формы и интенсивности. Эти параметры позволяют получить сведения о свойствах материала, геометрии гетероструктуры и о процессах рекомбинации.

Анализируя спектры электролюминесценции, можно получить данные о следующих характеристиках:

- 1) Ширина запрещенной зоны E_g : Положение пика излучения в ЭЛ-спектре непосредственно связано с шириной запрещенной зоны материала активной области гетероструктуры. Изменение положения пика позволяет определить E_g и её зависимость от различных факторов (температура, давление, состав сплава).
- 2) Состав материала: В гетероструктурах, состоящих из твердых растворов полупроводников (например, AlGaAs, InGaAs), состав сплава влияет на ширину запрещенной зоны. Анализ положения пика в ЭЛ-спектре позволяет определить соотношение компонентов в сплаве.
- 3) Толщина квантовых ям (КЯ) и квантовых точек (КТ): В гетероструктурах с КЯ или КТ, квантово-размерный эффект приводит к дискретизации энергетических уровней. Положение пиков в ЭЛ-спектре зависит от размера КЯ или КТ, что позволяет определить их геометрические параметры.
- 4) Качество интерфейса между слоями: Наличие дефектов на границах раздела слоев приводит к появлению нежелательной безызлучательной рекомбинации и, соответственно, уменьшению интенсивности излучения. Анализ формы и интенсивности пиков позволяет оценить качество интерфейса между слоями гетероструктуры.

- 5) Концентрация легирующих примесей: Уровень легирования влияет на эффективность инъекции носителей заряда и, следовательно, на интенсивность электролюминесценции. Анализ интенсивности ЭЛ-сигнала может быть использован для оценки концентрации легирующих примесей.
- 6) Наличие локализованных состояний: Присутствие локализованных состояний (например, дефекты, примеси) в запрещенной зоне приводит к появлению дополнительных пиков в ЭЛ-спектре. Анализ этих пиков позволяет идентифицировать тип и концентрацию локальных дефектов.
- 7) Температура: Ширина запрещенной зоны и интенсивность электролюминесценции зависят от температуры. Изучая температурную зависимость ЭЛ-спектра, можно получить информацию о внутренних механизмах рекомбинации и о термической стабильности гетероструктуры.
- 8) Напряженность: В гетероструктурах с решеткой, отличающейся от решетки подложки, возникают механические напряжения. Эти напряжения могут сдвигать энергетические уровни и изменять ширину запрещенной зоны. ЭЛ-спектроскопия позволяет косвенно оценить уровень напряжения в гетероструктуре.

Несмотря на свою ценность, спектроскопия электролюминесценции имеет ряд недостатков. Спектры электролюминесценции могут быть сложными и содержать множество пиков, которые сложно однозначно интерпретировать. Часто требуется сопоставление результатов с данными других методов исследования. В процессе измерения, особенно при больших токах, образец может подвергаться деградации. Получаемые спектры сильно зависят от условий измерения, таких как температура, приложенное напряжение и геометрия образца. Кроме всего прочего, не все материалы демонстрируют достаточно интенсивную электролюминесценцию для эффективного анализа. Метод наиболее эффективен для материалов с высокой квантовой эффективностью излучения.

Таким образом, ЭЛ-спектроскопия является не просто методом определения ширины запрещенной зоны, а комплексной методикой характеристики полупроводниковых гетероструктур, позволяющей получить многостороннюю информацию о их свойствах и качестве. Метод спектроскопии электролюминесценции является мощным инструментом для анализа параметров работы светодиодов, дисплеев и лазеров.

Эллипсометрия

Эллипсометрия представляет собой оптический метод исследования тонкопленочных структур с субнанометровым разрешением [11]. Суть метода заключается в анализе состояния поляризации светового луча при его отражении от поверхности материала.

На исследуемый образец падает плоско поляризованная волна, которая после отражения становится в общем случае эллиптически поляризованной. Параметры эллипса поляризации, т.е. ориентация его осей и эксцентриситет, определяются оптическими свойствами отражающей структуры и углом падения световой волны. В методе измеряется отношение комплексных коэффициентов отражения для двух типов поляризации: в плоскости падения и перпендикулярно к ней.

Эллипсометрические измерения обладают большей информативностью по сравнению с фотометрическими, поскольку они позволяют одновременно получать данные о двух величинах: амплитудном и фазовом параметрах. В случаях, когда необходимо определить более двух параметров, можно воспользоваться многоугловой эллипсометрией, проводя измерения при различных углах падения света, или спектральной эллипсометрией, осуществляя сканирование длины волны света. В результате такого комплексного подхода становится возможным осуществление неразрушающего и оперативного контроля достаточно сложных слоистых наноструктур.

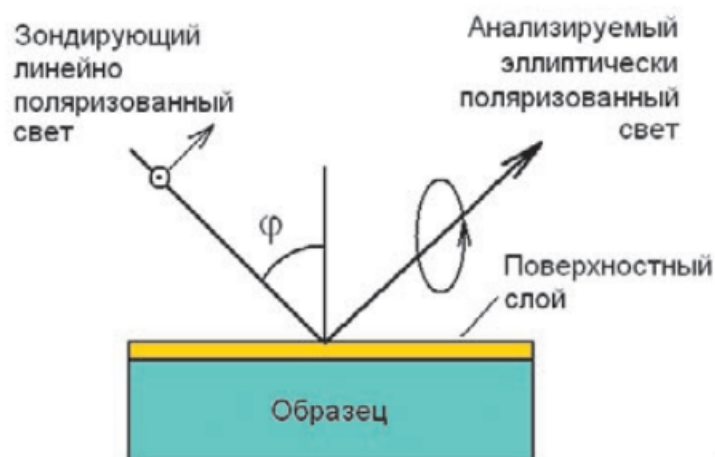


Рис. 2. Схема, поясняющая принцип метода эллипсометрии [11]

Метод эллипсометрии позволяет получить информацию о толщине полупроводниковых и диэлектрических слоев, оптических свойствах и структурных характеристиках [11].

В контексте гетероструктур эллипсометрия может быть использована для определения параметров таких характеристик, как ширина запрещенной зоны, диэлектрическая проницаемость и уровень примесей. Благодаря высокой чувствительности к изменениям в оптических свойствах, этот метод позволяет эффективно контролировать качество выращивания гетероструктур и оптимизировать их для различных приложений в области электроники и фотоники.

Главная особенность метода – отсутствие возмущающего воздействия, что в совокупности с высокой чувствительностью делает его привлекательным для целого ряда применений в различных областях знаний: физике полупроводников, физики и химии поверхности, материаловедении, химии, биологии и других.

Таким образом, эллипсометрия является незаменимым инструментом для глубокого понимания физики и свойств гетероструктур, что открывает новые горизонты в разработке современных материалов и устройств.

Выводы

Одним из ключевых аспектов исследования гетероструктур является использование оптических методов, которые позволяют не только анализировать их структурные характеристики, но и выявлять физические явления на наноразмерных масштабах. Оптические методы обеспечивают возможность точного контроля и анализа основных характеристик гетероструктур, таких как энергетические уровни, ширина запрещенной зоны и динамика рекомбинации носителей заряда.

Перспективы дальнейших исследований в этой области открывают новые горизонты для разработки высокоэффективных и функциональных материалов, что, в свою очередь, может привести к значительным достижениям в электронике, оптоэлектронике и других высоких технологиях. Важно продолжать развивать и совершенствовать оптические методы, что поможет не только углубить понимание гетероструктур, но и создать новые решения для актуальных задач в науке и промышленности.

Библиографический список

1. Ж.И. Алферов История и будущее полупроводниковых гетероструктур // Физика и техника полупроводников. — 1998. — Т. 32, №1 – С. 321–345.
2. Щука, А.А. Нанoeлектроника // М.: Физматкнига. — 2007. — С. 464.

3. Денисова Ю.Н. 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.
4. Спивак Л. В., Щепина Н. Е. Физико-химические основы процессов микро- и нанотехнологии // Электрон. дан. – Пермь. — 2019. — Ч. 2. — С 185.
5. Под ред. Л. Ченга, К. Плога. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры.: Пер. с англ.// М: Мир. — 1989. — С. 584.
6. Chow P. P. Molecular beam epitaxy / Kern W., Vossen J. L. // Thin Film Processes II. – Academic Press, Inc., (USA), 1991. – P. 133 – 175.
7. Дорохин М.В., Кудрин А.В. Гальваномангнитные и оптические методы исследования полупроводниковых наноструктур // Электронное учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет. — 2012. — С 80.
8. О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, П.Б. Дёмина, М.В. Дорохин, Б.Н. Звонков, Ю.Н. Дроздов, М.В. Сапожников Излучательные свойства квантовых ям GaAs/InGaAs с GaAs барьером, δ -легированным атомами Mn // Изв. РАН. Серия физическая. — 2009. — Т.73, №1. — С. 14-17.
9. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов // М.: Мир. — 1984. — Т.1. — С. 456.
10. Шалимова, К.В. Физика полупроводников // М.: Энергия. — 1976. — С. 416.
11. Швец В. А., Спесивцев Е. В., Рыхлицкий С. В., Михайлов Н. Н. Эллипсометрия - прецизионный метод контроля тонкопленочных структур с субнанометровым разрешением // Российские нанотехнологии. — 2009. — Т. 4. № 3-4. — С. 72-84.

УДК 621.315.592: ГРНТИ 29.19.31

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМНОГО ЗАРЯДА В БАРЬЕРНОЙ СТРУКТУРЕ НА ОСНОВЕ A-SI:H

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 пространственного распределения объемного заряда в барьерной структуре на основе a-Si:H. Результаты получены в среде компьютерного моделирования Maple.

Ключевые слова: метод компенсации тока нестационарной фотопроводимости, неупорядоченные полупроводники, барьерная структура, пространственное распределение объемного заряда.

MODELING OF THE SPATIAL DISTRIBUTION OF THE SPACE CHARGE IN BARRIER STRUCTURE BASED ON A-SI:H

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 the spatial distribution of the volume charge in barrier structure based on a-Si:H. The results were obtained in the Maple computer simulation environment.

Keywords: nonstationary photoconductivity current compensation method, disordered semiconductors, barrier structure, spatial distribution of the space charge.

Введение

Пространственное распределение объемного заряда в барьерной структуре во многом определяет электрофизические характеристики контакта: вольт-амперная и вольт-фарадная характеристики, эффективная высота потенциального барьера, влияние эффекта Шоттки и туннелирования носителей на величину обратного тока, коэффициент выпрямления, частотные свойства и др.

В неупорядоченных полупроводниках, таких как аморфный водородизированный кремний (a-Si:H), подвижность носителей заряда относительно низкая. Для электронов она

составляет $1 - 10 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ и $0,1 - 1 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ для дырок [1]. Это позволяет непосредственно измерить распределение внутреннего электрического поля по толщине барьерной структуры, откуда можно рассчитать пространственное распределение плотности объемного заряда, характеристики полупроводникового материала и пр.

Для этого используется разновидность времяпролетного метода – метод компенсации тока нестационарной фотопроводимости (МКТНФ) [2]. Целью данной работы является моделирование результатов МКТНФ-исследований в зависимости от параметров исследуемого материала и визуализация полученных результатов.

Физические основы МКТНФ

Суть МКТНФ заключается в следующем. На исследуемую барьерную структуру одновременно воздействуют импульсом монохроматического оптического излучения и постоянным электрическим полем. При поглощении оптического излучения в приповерхностной области полупроводника генерируются свободные носители заряда, причем их концентрация зависит от интенсивности прошедшего оптического излучения. Распределение фотогенерированных носителей по координате $n(x)$ подчиняется закону Бугера – Ламберта – Бера (рисунок 1) [3]:

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

где I_0 – интенсивность света на поверхности полупроводника, $I(x)$ – на глубине x , α – коэффициент оптического поглощения при освещении светом с данной длиной волны.

На рисунке 1 показано распределение фотогенерированных носителей по координате $n(x)$, где n_0 – концентрация фотогенерированных носителей на поверхности, d – толщина исследуемой структуры, а x_c – координата, по обе стороны от которой находится равное количество фотогенерированных носителей. Координата x_c определяется из численного решения уравнения [2]:

$$x_c \left[1 - \exp\left(-\frac{d}{x_c}\right) \right] = \exp(-\alpha d)(d - x_c) \left[1 - \exp\left(-\frac{d}{d - x_c}\right) \right]. \quad (2)$$

При изменении длины волны падающего излучения изменяется значение коэффициента оптического поглощения α , и, соответственно, положение координаты x_c . При освещении образца коротковолновым излучением координата x_c смещается ближе к поверхности, а при длинноволновом – ближе к середине толщины образца. Таким образом, изменяя длину волны падающего излучения от УФ до ИК можно изменять положение x_c практически от поверхности до середины толщины образца $d/2$ [4].

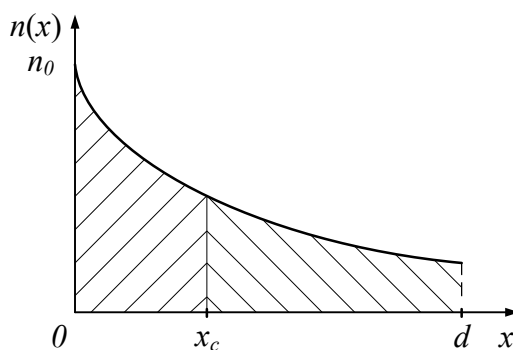


Рис. 1. Распределение концентрации фотогенерированных носителей заряда по толщине исследуемой структуры при освещении монохроматическим светом

Поскольку неупорядоченные полупроводники обладают относительно невысокой электропроводностью, то максвелловское время релаксации $\tau_M = \sigma/\varepsilon\varepsilon_0$ может достигать

значений порядка нескольких десятков мкс, т.е. перераспределение электрического поля в материале происходит достаточно медленно. Это значит, что при подаче напряжения от внешнего источника электрическое поле в образце распределяется равномерно, как в диэлектрике. Это справедливо в течение промежутка времени, не превышающего максвелловского времени релаксации ($t < \tau_M$). Таким образом, напряженность внешнего электрического поля в образце равна

$$E = \frac{V_{\text{внеш}}}{d}, \quad (3)$$

где $V_{\text{внеш}}$ – амплитуда импульса напряжения от внешнего источника.

Результирующее электрическое поле в образце представляет собой суперпозицию встроенного контактного электрического поля барьерной структуры и электрического поля от внешнего источника. В отличие от традиционного времяпролетного метода в МКТНФ поле от внешнего источника подается навстречу внутреннему. В некоторой точке внешнее поле полностью компенсирует внутреннее, так что напряженность результирующего электрического поля равна нулю $E_{\text{рез}} = 0$, а значение электростатического потенциала принимает минимальное значение (рисунок 2, б).

Фотогенерированные носители под действием суперпозиции внутреннего и внешнего электрических полей двигаются в сторону точки с наименьшим потенциалом. Если минимум потенциала совпадает с координатой x_c , то результирующий заряд, протекающий через исследуемую структуру, равен нулю, т.е. имеет место полная компенсация токов переходной фотопроводимости.

Изменяя длину волны монохроматического света и, соответственно, положение координаты x_c , и подбирая значение внешнего напряжения, при котором происходит компенсация переходного фототока, получают распределение внутреннего электрического поля по толщине. Координата x_c рассчитывается с помощью выражения (2) при условии, что известны толщина образца d и спектральная зависимость оптического коэффициента поглощения $\alpha(\lambda)$. Напряженность внутреннего электрического поля определяется из выражения (3), где $V_{\text{внеш}}$ – амплитуда импульса напряжения от внешнего источника, при которой имеет место полная компенсация токов переходной фотопроводимости.

Моделирование распределения объемного заряда в аморфном гидрогенизированном кремнии

Поскольку аморфный гидрогенизированный кремний является довольно распространенным материалом при изготовлении фотоэлектрических преобразователей различных типов (тонкопленочных солнечных элементов, НИТ-структур и т.д.), он был выбран в качестве объекта для моделирования пространственного распределения объемного заряда в барьерной структуре. При моделировании были использованы следующие параметры а-Si:H, взятые из литературных источников [2 – 4]:

1. элементарный заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл;
2. диэлектрическая проницаемость среды $\epsilon = \epsilon_{\text{Si}} = \epsilon_{\text{a-Si:H}} = 11,7$;
3. диэлектрическая постоянная $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-14}$ Ф/см;
4. наклон аппроксимирующей прямой в полулогарифмических координатах $\beta = 1$ (параметр аппроксимации распределения локализованных состояний в щели подвижности а-Si:H по энергии);
5. плотность энергетических состояний вблизи уровня Ферми $g_{F0} = 10^{16}$ см⁻³эВ⁻¹;
6. характеристическая длина экранирования электрического поля в ОПЗ барьерной структуры $L_S = 8,9 \cdot 10^{-6}$ м;
7. контактная разность потенциалов а-Si:H была задана равной $\phi_0 = 0,5$ В;
8. отсчет координаты x в ОПЗ производится от поверхности в глубь полупроводника.

Ширина ОПЗ в отсутствии внешнего напряжения, приложенного к барьерной структуре, определяется выражением

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{e^2 g_{F0}}} \arccos \left[\exp \left(-\frac{\beta e \varphi_0}{2} \right) \right]. \quad (4)$$

Пространственное распределение электростатического потенциала внутреннего электрического поля описывается выражением

$$\varphi_{\text{внут}}(x) = -\frac{2}{\beta e} \ln \left| \cos \left(\frac{W-x}{\sqrt{2}L_s} \right) \right|. \quad (5)$$

Электростатический потенциал электрического поля от внешнего источника изменяется по линейному закону, как в диэлектрике, при условии, что время измерения меньше максвелловского времени релаксации ($t < \tau_M$)

$$\varphi_{\text{внеш}}(x) = V_{\text{внеш}} \left(1 - \frac{x}{d} \right). \quad (6)$$

При этом напряженность электрического поля от внешнего источника $E_{\text{внеш}} = \frac{V_{\text{внеш}}}{d} = \text{const}$.

Результирующий потенциал $\varphi_{\text{сумм}}(x)$ определяется как алгебраическая сумма электростатических потенциалов внутреннего $\varphi_{\text{внут}}(x)$ и внешнего $\varphi_{\text{внеш}}(x)$ электрических полей. На рисунке 2 представлены результаты моделирования хода потенциалов в ОПЗ в зависимости от координаты и величины внешнего напряжения.

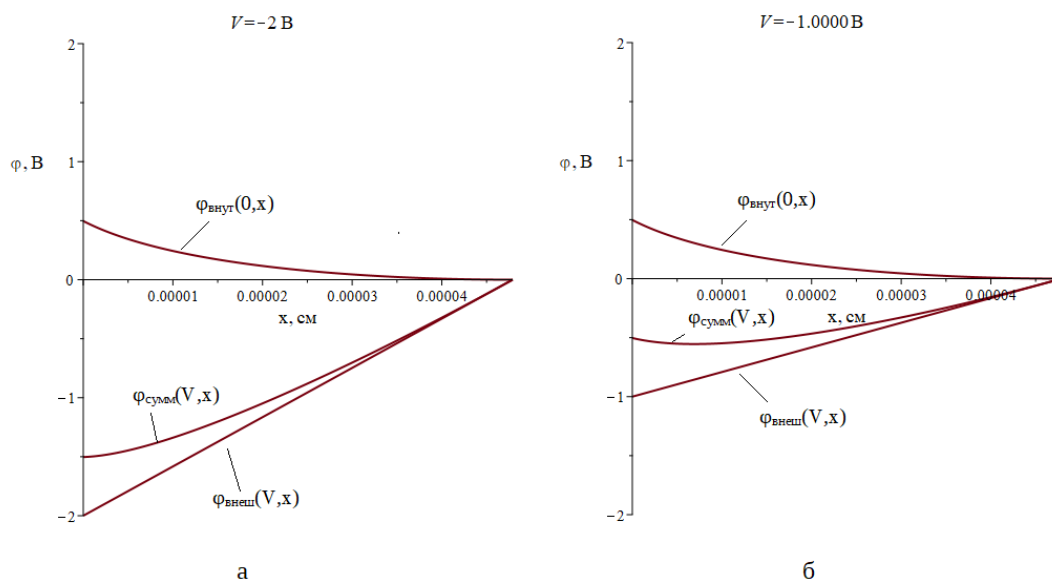


Рис. 2. Зависимость ходов потенциалов от координаты в α -Si:H при разном прикладываемом внешнем напряжении V : а – $V = -2$ В; б – $V = -1$ В

Моделирование пространственного распределения объемного заряда было проведено в программной среде Maple, которая позволяет реализовать динамическое изменение зависимостей от внешнего приложенного напряжения.

Заключение

Моделирование пространственного распределения объемного заряда в ОПЗ полупроводниковой барьерной структуры необходимо при планировании МКТНФ измерений, анализе экспериментальных данных, а также может быть использовано в учебном процессе (дисциплина «Методы исследования наноматериалов, микро- и наносистем») для студентов, обучающихся по направлению 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

Работа выполнена с использованием научного оборудования Рязанского центра зондовой микроскопии коллективного пользования РГРТУ им. В.Ф. Уткина.

Библиографический список

1. Айвазов А.А., Будагян Б.Г., Вихров С.П. и др. Неупорядоченные полупроводники М.: Издательство МЭИ. 1995. 352 с.
2. Мишустин В.Г. Исследование влияния локализованных состояний на распределение пространственного заряда в барьерных структурах на основе неупорядоченных полупроводников / Дисс. канд. физ.-мат. наук: Рязань, 2008. 185 с.
3. Гудков Ю.Д., Мишустин В.Г. Развитие методики исследования многослойных барьерных наноструктур при оптическом и электрическом возбуждении структур // В сборнике: Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2023. Сборник трудов VI Международного научно-технического форума: в 10 т. Том 2. Рязань, 2023. С. 76-81.
4. Вишняков Н.В, Гудков Ю.Д., Мишустин В.Г. Моделирование оптического поглощения в многослойных полупроводниковых структурах// В сборнике: Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2024. Сборник трудов VII Международного научно-технического форума: в 10 т. Рязань, 2024. С. 110-113.

УДК 621.315.592; ГРНТИ 29.05.15

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОН-ЭЛЕКТРОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В НИЗКОРАЗМЕРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВЫХ СТРУКТУРАХ

Д.Д. Артемьев, А.Б. Дюбуа, А.С. Сафoshкин*

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, safoshkin.a.s@rsreu.ru*

Аннотация. В работе рассмотрено совместное решение уравнений Шредингера и Пуассона для двумерного полупроводникового гетероперехода. Обосновано применение треугольной аппроксимации потенциальной ямы для расчета времени электрон-электронного взаимодействия. Рассмотрены различные типы электрон-электронных взаимодействий для сильнолегированного гетероперехода. Получены аналитические температурные зависимости времени электрон-электронного взаимодействия в сильнолегированном гетеропереходе.

Ключевые слова: электрон-электронные взаимодействия, гетеропереходы, метод хаотических фаз.

RESEARCH OF ELECTRON-ELECTRON INTERACTIONS IN LOW-DIMENSION SEMICONDUCTORS QUANTUM STRUCTURES

D.D. Artemiev, A.B. Dubois, A.S. Safoshkin*

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, *safoshkin.a.s@rsreu.ru*

The summary. The paper considers a joint solution of the Schrodinger and Poisson equations for a two-dimensional semiconductor heterojunction. The application of a triangular approximation of a potential well for calculating the electron-electron interaction time is substantiated. Various types of electron-electron interactions for a heavily doped heterojunction are considered. Analytical

temperature dependences of the electron-electron interaction time in a heavily doped heterojunction are obtained.

Keywords: electron-electron interactions, heterojunctions, random phase method.

В ряде работ (например, [1-6]) по исследованию многочастичных взаимодействий в гетероструктурах, в том числе и графеновых, была показана подавляющая роль электрон-электронных взаимодействий, которые уже при низких температурах (2-30 К) играют определяющую роль по сравнению с остальными процессами. В настоящей работе в качестве объекта исследований была принята гетероструктура $Al_xGaAs_{1-x}(Si)/GaAs$, однако приведенные расчеты позволяют определить кинетические зависимости и для других структур, например $InAs/GaSb$.

Поведение электронной жидкости в пределе очень большой концентрации упрощается, потому что в этом случае кулоновское взаимодействие оказывается относительно малым возмущением: средняя потенциальная, пропорциональная e^2/r_0 , где r_0 – межэлектронное расстояние, мала по сравнению с кинетической энергией, пропорциональной $\hbar^2/m^*r_0^2$. Свойства системы хорошо описываются в так называемом приближении хаотических фаз (ПХФ) [7-9]. Это приближение справедливо при достаточно высоких концентрациях электронов, когда их средняя кинетическая энергия значительно превышает среднюю энергию их взаимодействия. Это условие обычно записывается в виде $r_s \ll 1$, где параметр r_s в трехмерной системе определяется отношением радиуса сферы, окружающей один электрон, к эффективному боровскому радиусу a^* , который определен соотношением $a^* = \epsilon_m \hbar^2 / m^* e^2$. Соответствующий вывод справедлив и для двумерных систем, поэтому использование ПХФ считается вполне обоснованным для описания двумерных систем в полупроводниках с узкой запрещенной зоной, например, таких, как $InSb$ и $InAs$, характеризующихся малыми эффективными массами носителей и большими диэлектрическими проницаемостями. В настоящей работе $\epsilon_m \approx 13$ – статическая диэлектрическая проницаемость полупроводника ($GaAs$), m^* – эффективная масса, которая для $GaAs$ равна $m^* = 0.067m_e$ [2]. Тогда выражение для r_s будет иметь вид:

$$r_s = \frac{m^* e^2}{\epsilon_m \hbar^2 \sqrt{\pi \cdot n_s}} \approx 0.67 \lesssim 1,$$

т.е. ПХФ применимо для исследуемых в работе структур. В качестве исходной модели рассмотрим потенциальную яму гетероперехода, рассчитанную в [3] и представленную на рис. 1. Зависимость внешнего потенциала $E(z)$ в области i -GaAs аппроксимируем треугольным профилем с изломами в $E_m = E(d_m)$ и $E_p = E(d_p)$, как это ранее использовалось в [3]. При достаточно высоком уровне легирования имеет место заполнение одновременно с первой (основной) подзоны и второй (возбужденной) подзоны размерного квантования [4-6].

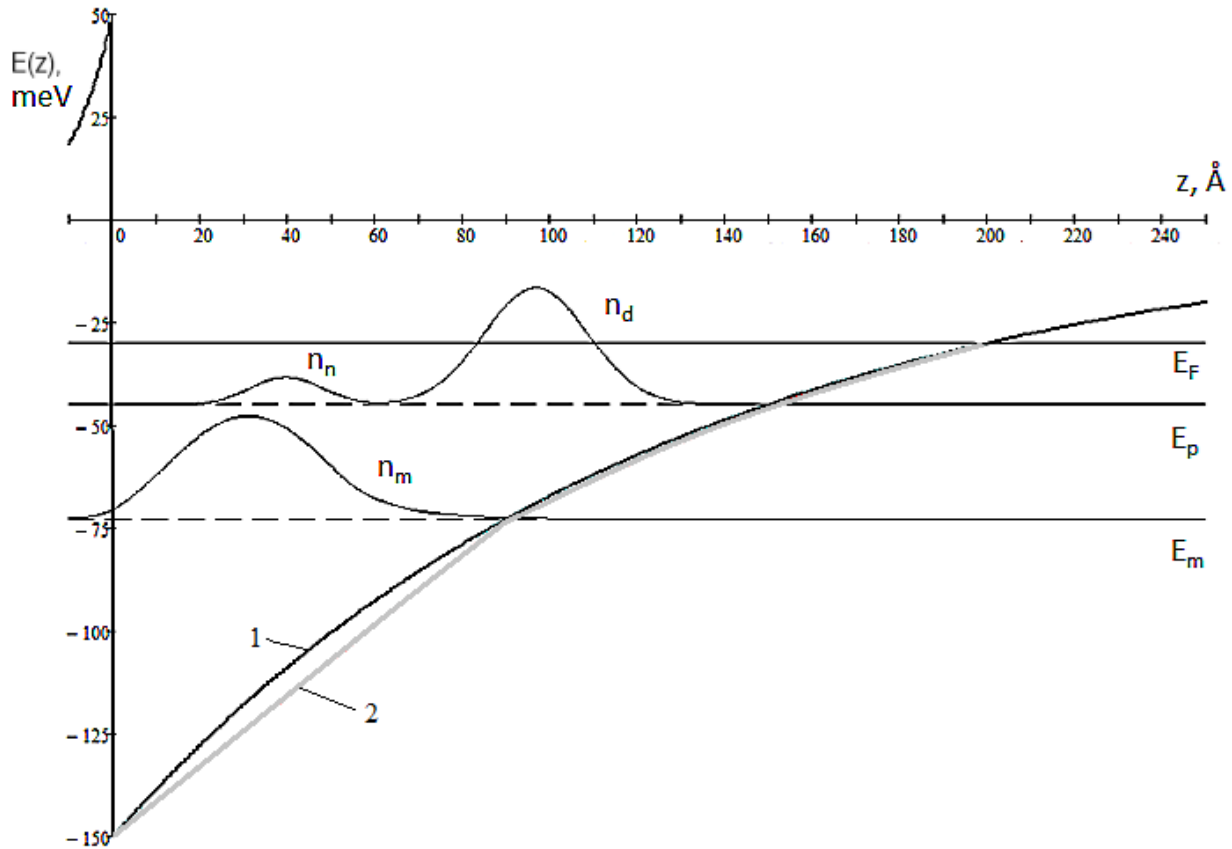


Рис. 1. Энергетическая диаграмма зоны проводимости $E(z)$ гетероперехода с двумя заполненными подзонами размерного квантования E_m и E_p и волновыми функциями $\psi\psi^*$; n_m и $n_{n,d}$ — поверхностные концентрации 2D электронов, E_F — энергия Ферми. (1) – реальный профиль, (2) – аппроксимация.

Для полного Гамильтониана взаимодействия [7]:

$$H = H_0 + H_{\text{int}}^{ijkl}$$

где H_0 - Гамильтониан невзаимодействующей системы, гамильтониан взаимодействия:

$$H_{\text{int}}^{ijkl}(t) = \sum_{\mathbf{q}} g(\mathbf{q}) V_{\text{tot}}^{ijkl}(\mathbf{q}, \omega) a_{\mathbf{p}+\mathbf{q}}^+(t) a_{\mathbf{p}}(t) + \sum_{\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_j, \mathbf{q}_i, \mathbf{q}_j} V_{ijkl}(\mathbf{q}, \omega) \delta(\mathbf{p}_i + \mathbf{q}_i - \mathbf{p}_j - \mathbf{q}_j) a_{\mathbf{p}}(t) a_{\mathbf{p}+\mathbf{q}}^+(t) \quad (1)$$

С точностью до второго члена разложения внешнего возмущающего потенциала теории возмущений выражение для времени электрон-электронного взаимодействия может быть представлено в виде [10]

$$\frac{1}{\tau_{ij}^{ee}} = \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \sum_{k,l} \sum_{\mathbf{q}} |V_{\text{tot}}^{ijkl}(\mathbf{q}, \omega)|^2 \times \sum_{\mathbf{k}, \mathbf{p}} \delta(E_j(\mathbf{k} + \mathbf{q}) + E_l(\mathbf{p} - \mathbf{q}) - E_i(\mathbf{k}) - E_k(\mathbf{p})) f_{\mathbf{k}} f_{\mathbf{p}} (1 - f_{\mathbf{k}+\mathbf{q}}) (1 - f_{\mathbf{p}-\mathbf{q}}) \quad (2)$$

где $V_{\text{tot}}^{ijkl}(\mathbf{q}, \omega)$ — матричный элемент полного потенциала экранирования, который является Фурье-образом внешнего потенциала экранировки $E_{\text{ext}}(z)$, f — функция распределения

Ферми — Дирака. Индексы i, j, k, l обозначают следующее: электрон находящийся в состоянии i взаимодействует с электроном в состоянии k , в результате чего происходят переходы соответственно в состояния j и l .

В декартовой системе координат, выражение для внешнего потенциала, аппроксимированного двойным треугольным профилем, будет иметь вид:

$$E_{ext}(z) = \begin{cases} \frac{E_m - E_0}{d_m} z + E_0, & z < d_m, \\ \frac{E_p - E_m}{d_p - d_m} (z - d_m) + E_m, & d_m < z < d_p, \\ \frac{E_F - E_p}{d_F - d_p} (z - d_p) + E_p, & d_p < z < d_F, \\ E_0 \exp\left[-z \frac{\ln(E_0 / E_F)}{d_F}\right], & z > d_F, \end{cases} \quad (3)$$

где $E_0 = E(0)$, $E_m = E(d_m)$, $E_p = E(d_p)$.

Тогда Фурье-образ кулоновского потенциала с учетом ослабления примет вид:

$$V_{tot}(\mathbf{q}, \omega) = \frac{1}{(2\pi)^2 \varepsilon_{nn}} \int_0^\infty E_{ext}(\mathbf{r}) \exp[-(\mathbf{q}\mathbf{r} - \omega t)] d^2\mathbf{r}. \quad (4)$$

Используя тождественные преобразования, (2) преобразуем к виду

$$\frac{1}{\tau_{ij}^{ee}} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\omega}{\cosh^2(\beta\hbar\omega/2)} \sum_{k,l} \sum_{\mathbf{q}} |V_{tot}^{ijkl}(\mathbf{q}, \omega)|^2 \Pi_{ik}(\mathbf{q}, \omega) \Pi_{jl}^*(\mathbf{q}, \omega) \quad (5)$$

где $\beta = 1/k_B T$, k_B - постоянная Больцмана. Поляризационная функция в приближении хаотических фаз описывается выражением [8]

$$\Pi_{ik}(\mathbf{q}, \omega) = \frac{e^2}{q^2} \lim_{\alpha \rightarrow 0} \sum_{\mathbf{k}} \frac{f(\mathbf{k}) - f(\mathbf{k} + \mathbf{q})}{E(\mathbf{k} + \mathbf{q}) - E(\mathbf{k}) - \hbar\omega - i\hbar\alpha} \quad (6)$$

откуда следует:

$$\begin{aligned} \Pi_{ik}(\mathbf{q}, \omega) = & \\ = & \frac{\gamma\sqrt{n_i}}{q} \left\{ \frac{q}{\sqrt{n_i}} - \left[\sqrt{2\pi} - \left(\frac{q}{2\sqrt{n_i}} - \frac{m^*\omega}{\hbar\sqrt{n_i}q} \right)^2 \right]^{1/2} - \left[\sqrt{2\pi} - \left(\frac{q}{2\sqrt{n_i}} + \frac{m^*\omega}{\hbar\sqrt{n_i}q} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} + \\ & + \frac{\gamma\sqrt{n_k}}{q} \left\{ \frac{q}{\sqrt{n_k}} - \left[\sqrt{2\pi} - \left(\frac{q}{2\sqrt{n_k}} - \frac{m^*\omega}{\hbar\sqrt{n_k}q} \right)^2 \right]^{1/2} - \left[\sqrt{2\pi} - \left(\frac{q}{2\sqrt{n_k}} + \frac{m^*\omega}{\hbar\sqrt{n_k}q} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

где $\gamma = 2m^*S/\pi\hbar^2$, $S = L^2$ - площадь двумерного электронного газа.

Матричные элементы потенциала полной экранировки с учетом параметров энергетической диаграммы для первого и второго типов переходов приводятся к виду

$$V_{tot}^{mmmm}(\mathbf{q}, \omega) = \frac{V_{ext}^{mm}(\mathbf{q})}{\Pi_{mm}(\mathbf{q}, \omega)} = \frac{E_m}{2d_m S (q^3 + 2\pi e^2 q^4 \Pi_{mm}(\mathbf{q}, \omega))} \quad (8)$$

а для третьего и четвертого типов

$$V_{tot}^{mmp}(\mathbf{q}, \omega) = \frac{E_p(1 - qd_m) - E_m(1 + qd_p)}{2S(d_p - d_m)(q^3 + 2\pi e^2 q^4 \Pi_{mp}(\mathbf{q}, \omega))} \quad (9)$$

На рисунке 2 показаны фейнмановские диаграммы для различных видов электрон-электронного взаимодействия.

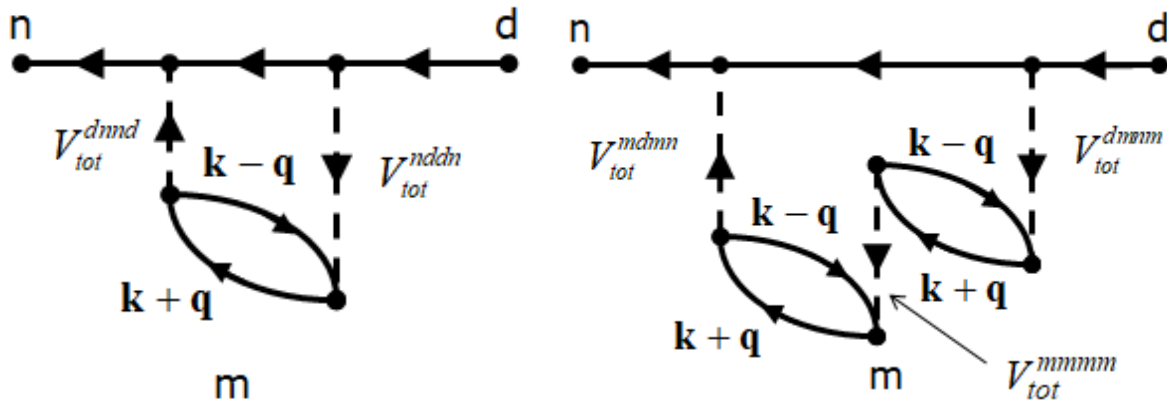


Рис. 2. Фейнмановские диаграммы различных видов электрон-электронного взаимодействия.

Слева – межподзонное взаимодействия с межподзонами переходами, справа – межподзонное взаимодействие с внутривидовыми переходами.

Времена релаксации в виде, удобном для вычислений первого и второго типов переходов, имеют вид функций

$$\frac{1}{\tau_{intra}} = \frac{E_m^2 m^{*2} S}{d_m^2 \hbar^4 n_s^2} P_{-n}(T) \zeta(T, n_m) \quad (10)$$

а для третьего и четвертого типов

$$\frac{1}{\tau_{inter}} = \frac{m^{*2} S}{(d_n - d_p)^2 \hbar^4} \left\{ \frac{(E_p - E_m)^2}{8\pi} Q_{-n}(T) \zeta(T, n_m) - \frac{(E_n - E_m)^{3/2}}{\sqrt{8\pi}} W_{-n}(T) \zeta(T, n_n) \right\} \quad (11)$$

где $P_{-n}(T)$, $Q_{-n}(T)$ и $W_{-n}(T)$ в (10) и (11) – полиномы степени « $-n$ »:

$$P_{-n}(T) = \frac{B_1}{T} + \frac{B_2}{T^2} + \frac{B_3}{T^3} + \dots,$$

$$Q_{-n}(T) = \frac{B_1}{T} - \frac{B_2}{T^2} + \frac{B_3}{T^3} - \dots,$$

$$W_{-n}(T) = \frac{B_2}{T^2} + \frac{B_4}{T^4} + \dots$$

с коэффициентами B_n , определяемыми зета-функцией Римана $\zeta(z, v)$.

$$\zeta(z, v) = \frac{1}{\Gamma(z)} \int_0^\infty \frac{x^{z-1} \exp(-vx)}{1 - \exp(-x)} dx, \quad (12)$$

где $z = \frac{d_m}{d_m + d_p}$, $v = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^* k_B T} \left(\frac{n_m n_n n_d}{n_m + n_n + n_d} \right)^{1/2}$.

Произведение $Q_{-n}(T)$, $P_{-n}(T)$ и $W_{-n}(T)$ с зета-функцией $\zeta(z, v)$ определенным образом зависит от концентрации в подзонах размерного квантования. Например, для $n_m > 8 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, $n_d = 0.1 n_m$, $n_n = 0.1 n_d$ функция $\zeta(z, v)$ в формуле (11) обнаруживает немонокотное поведение, тогда как при $n_m < 8 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ кривая $\tau_{ee}^{-1}(T)$ не содержит каких-либо особенностей [11-13].

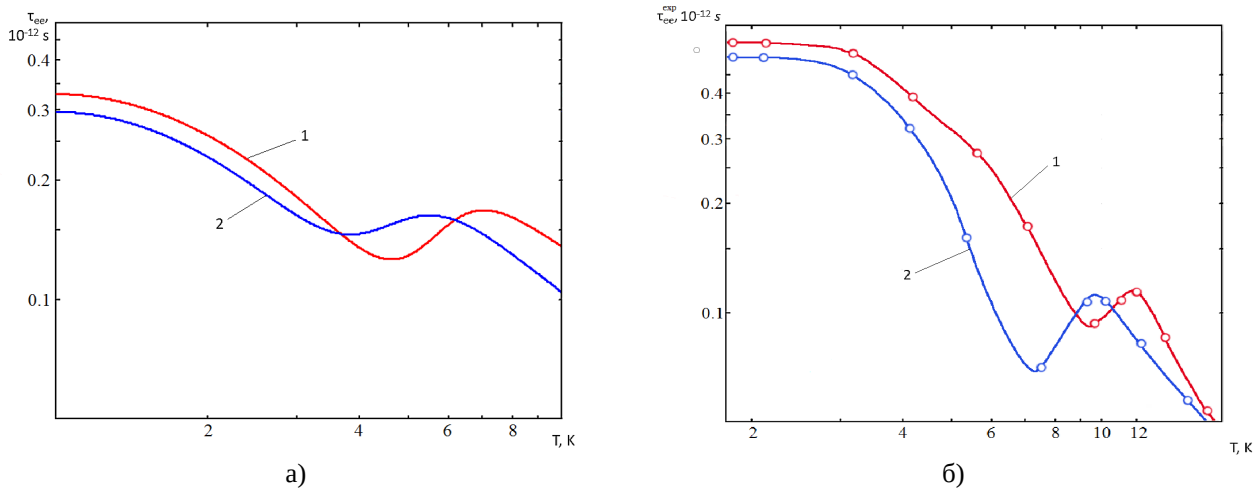


Рис. 3. Сравнение теоретических кривых $\tau_{ee}^{th}(T)$ (а) и экспериментальных кривых $\tau_{ee}^{exp}(T)$ (б) для различных концентраций плотности электронов m - подзоны: 1 - $9,1 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, 2 - 10^{12} cm^{-2} .

На рисунках 3а и 3б представлено сравнение экспериментальных [3] и рассчитанных кривых времени разрушения квантования Ландау для двух гетероструктур в которых заполнены две нижние зоны размерного квантования. Следует отметить качественное согласие расчетов с экспериментом в температурном интервале $2 \leq T \leq 12 \text{ K}$ для реальных плотностей $n_m \approx 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $n_d = 0.1 n_m$, $n_n = 0.01 n_m$ и $d_p / d_m = 3$.

Выполнен спектральный анализ дисперсионных выражений (8) для различных каналов «е-е» взаимодействий, показанных на рис. 2, для различных концентраций n_m и n_d в случае заполнения двух подзон размерного квантования. Условие существования частоты плазменных осцилляций ω_r , определяется дисперсионным выражением $\varepsilon(\mathbf{q}, \omega) = 0$ [8-10].

На рисунке 4 показано влияние степени заполнения второй подзоны размерного квантования на спектр коллективных колебаний системы 2D электронов различных каналов. С увеличением концентрации n_m , резонансная частота смещается на область меньших величин в интервале температур 4-8 K.

Как видно из рисунка 4, при увеличении концентрации резонансная частота уменьшается. Кроме того, каждой резонансной частоте можно поставить в соответствие температуру, при которой будет наблюдаться изменение механизма экранировки, следовательно, будет нарушаться монотонность температурной зависимости времени электрон-электронного взаимодействия. Таким образом, нами была предложена процедура нахождения температурной и концентрационной зависимостей времени электрон-электронного взаимодействия в сильнолегированном гетеропереходе $\text{Al}_x\text{GaAs}_{1-x}(\text{Si})/\text{GaAs}$ с учетом ослабления кулоновско-

го потенциала в следствии поляризации полупроводника. Отметим, что предложенная теория не налагает каких-либо принципиальных условий ни на геометрию, ни на составляющие гетероструктуры, т.е. полученные соотношения могут быть использованы для исследования кинетических процессов в схожих структурах.

Следует также отметить, что несмотря на некоторое различие теоретических и экспериментальных зависимостей, вполне допустимое в подобных решениях, предложенная теория возбуждения плазменных колебаний (плазмонов) в двумерном электронном газе, достаточно убедительно объясняет наблюдаемые аномалии в температурных и концентрационных зависимостях электрон-электронного взаимодействия.

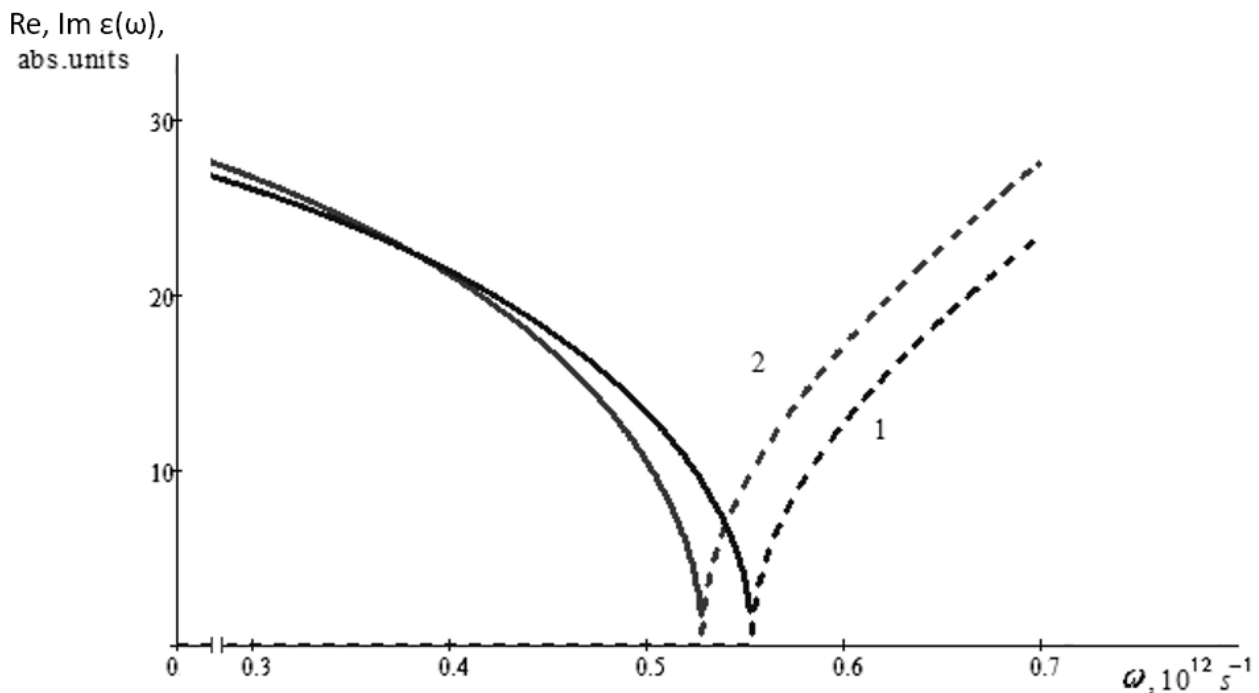


Рис. 4. Частотная зависимость поляризационной функции для канала взаимодействия основной подзоны с n -спутником: n_m , 10^{11} cm^{-2} : (1) – 9.1, (2) – 10, $d_p/d_m = 3.5$.

Сплошные линии – $\text{Re } \chi(\omega)$, пунктирные линии – $\text{Im } \chi(\omega)$.

Библиографический список

1. Levitov L.S., Shtyk A.V., Feigelman M.V. // Electron electron interactions and plasmon dispersion in graphene // Phys. Rev. B. 2013. Vol.88, P.2035-403.
2. Glazov S.Yu., Kurbakova E.S., Meshcheryakova N.E. Electron systems with a superstructure under stark quantization conditions // Phys. Of Wave Phenomena, 2010, Vol. 18, P. 313.
3. Дюбуа А.Б., Кадушкин В.И. Электронное «узкое горло» затухания квантования Ландау // Радиоэлектроника. 2002. №5.
4. Berk Y., Entin-Wohlman O., Palevski A., Shtrikman H., Slutzky M. Electron-electron scattering in coupled quantum wells // Phys. Rev. B. 1996. Vol.53, P.4065.
5. Дюбуа А.Б. Электрон-электронные взаимодействия в умеренно легированном гетеропереходе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{GaAs}$ // Радиоэлектроника. 2006. №5.
6. Dubois A.B., Kadushkin V.I "Bottleneck" in electron-electron interactions and anomalies in the Landau quantization damping // Phys. Low – Dim. Struct. 2003. Vol.7/8. P.7 – 24.
7. Абрикосов А.А., Горьков Л.П., Дзялошинский И.Е. Методы квантовой теории поля в статической физике. М.: ГИФМЛ, 1962. 444 с.
8. Андо Т., Стерн Ф., Фаулер А. Электронные свойства двумерных систем. М.: Мир, 1985. 416 с.
9. Нозьер Ф., Пайнс Д. Теория квантовых жидкостей. М.: Мир, 1967. 382 с.
10. Толмачев В.В. Теория ферми-газа. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1973. 353 с.

11. Дюбуа А.Б., Зилотова М.А., Кучерявый С.И., Сафoshкин А.С. Кинетические процессы в умеренно легированном гетеропереходе // Вестник РГРТУ. 2013. №3(45). С.88-92.

12. Ambartsumyan V.A., Andryushchenko E.A., Bukhensky K.V., Dubois A.B., Dvoretzkova E.A., Gordova T.V., Kucheryavy S.I., Mashnina S.N., Safoshkin A.S. Channels of electron-electron interactions in highly doped heterojunction // Nanosystems: physics, chemistry, mathematics. 2014. Vol.5(3). P.343-353.

13. Baukov A.A., Bukhensky K.V., Dubois A.B., Kucheryavy S.I., Mashnina S.N., Safoshkin A.S., Shchigorev E.Yu. Temperature dependences of the time of electron-electron interactions in two-dimensional heterojunction // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 941. P. 012059.

УДК 621.373.8: ГРНТИ 29.19.31

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СТРУКТУРЫ С КВАНТОВОЙ ЯМОЙ ДЛЯ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

В.В. Глущенко, В.Г. Мишустин

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

Аннотация. В работе показаны перспективы перестраиваемых оптических излучателей на основе полупроводниковых структур с квантовой ямой. Проведен расчет и моделирование на примере структуры с квантовой ямой для работы в сине-зеленой области спектра.

Ключевые слова: перестраиваемые излучатели, барьерные структуры, структуры с квантовой ямой.

SEMICONDUCTOR STRUCTURES WITH A QUANTUM WELL FOR TUNABLE EMITTERS

V.V. Glushchenko, V.G. Mishustin

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkina,
Russian Federation, Ryazan, glushchenko.v.v@rsreu.ru*

Abstract. The paper shows the prospects of tunable optical emitters based on semiconductor structures with a quantum well. The calculation and modeling are carried out using the example of a structure with a quantum well for operation in the blue-green region of the spectrum.

Keywords: tunable emitters, barrier structures, quantum well structures.

Введение

Одной из перспективных технологий, позволяющих управлять световыми потоками, являются полупроводниковые структуры с квантовой ямой, на основе которых изготавливают перестраиваемые оптические излучатели. Это направление микро- и оптоэлектроники критически важно для создания эффективных оптических систем, обладающих большим потенциалом как с технической, так и экономической точек зрения.

Квантовые ямы представляют собой наноразмерные структуры, образованные слоями полупроводниковых материалов, в которых носители заряда (электроны и дырки) «заперты» в направлении, перпендикулярном поверхности кристалла. Такая конфигурация полупроводниковых слоев приводит к появлению дискретных энергетических уровней и ограничивает движения носителей заряда. Квантовые ямы обеспечивают множество уникальных электрических и оптических свойств, таких как продолжительное время жизни возбужденного состояния, широкий энергетический диапазон в экситонных уровнях, что позволяет достигать высокой эффективности генерации света.

Традиционные полупроводниковые лазеры и диоды обычно способны генерировать только одну длину волны оптического излучения. Перестраиваемые излучатели, использующие полупроводниковые квантовые ямы, лишены этого ограничения, поэтому находят более широкое применение в различных областях:

- 1) коммуникационные технологии;
- 2) терагерцовая спектроскопия (управление частотой излучения за счет изменения рабочих температур позволяет контролировать перестройку частоты лазеров);
- 3) треккер-указатели (мощные полупроводниковые лазеры, работающие в средней области инфракрасного излучения);
- 4) различное промышленное применение (квантовые каскадные лазеры применяются для обнаружения утечек газа).

Способность излучателя изменять длину волны света с высокой точностью и быстротой создает возможности для создания многофункциональных оптических устройств для передачи и обработки информации. Эффективность таких полупроводниковых структур с квантовыми ямами определяется их способностью реагировать на внешние воздействия. Так использование электрического и/или оптического возбуждения для управления энергетическими уровнями позволяет динамически настраивать параметры излучения. Ограничением развития данного направления являются очень высокие требования к технологическому оборудованию и чистоте используемых материалов, что, в свою очередь, приводит к дороговизне конечных изделий. Таким образом, поиск материалов, разработка конструкций и технологии изготовления перестраиваемых излучателей на основе полупроводниковых структур с квантовой ямой является актуальной задачей.

Материалы для оптических излучателей с квантовой ямой

Для изготовления оптических излучателей применяют следующие полупроводниковые соединения: ZnSe, SiC, GaN. Выбор материала для изготовления оптических излучателей зависит главным образом от требований, предъявляемым к конечному устройству, и условий его эксплуатации [1]. Для гетероструктур, излучающих в сине-зеленой области длин волн, обычно используют полупроводниковые соединения ZnSe, SiC, GaN, а в качестве подложки – GaAs [2].

Для создания гетероструктуры излучателя сине-зеленой области спектра использовано соотношение энергии и длины волны излучения в нанометрах:

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{1240}{500} = 2,48 \text{ эВ.} \quad (1)$$

где h — постоянная Планка, c — скорость света.

Для получения излучательного перехода с такой энергией требуется полупроводник с близкой по значению шириной запрещенной зоны. Наиболее подходящими являются двух- и трехкомпонентные соединения, такие как ZnSe и $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Se}$ [3], поскольку данные соединения позволяют получать ширину запрещенной зоны в диапазоне от 1,76 до 2,82 эВ.

Расчет параметров структуры с квантовой ямой для оптических излучателей

Для квантовой ямы используем $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Se}$, а для барьерного слоя ZnSe. Примем $x = 0,73$, тогда стехиометрический состав материала слоя квантовой ямы: $\text{Zn}_{0,73}\text{Cd}_{0,27}\text{Se}$. Расчет выполняется на основе приближения твердого тела и математического аппарата [5].

Находим постоянную кристаллической решетки для ZnCdSe:

$$\alpha_{0\text{ZnCdSe}} = \alpha_{0\text{ZnSe}} \cdot x + \alpha_{0\text{CdSe}} \cdot (1-x) = 5,778 \text{ Å.} \quad (2)$$

Вычисляем ширину запрещенной зоны для тройного соединения:

$$E_{g\text{ZnCdSe}} = E_{g\text{ZnSe}} \cdot x + E_{g\text{CdSe}} \cdot (1-x) = 2,449 \text{ эВ.} \quad (3)$$

Энергии уровней размерного квантования микрочастицы в потенциальной яме для четных и нечетных состояний определяют из следующих соотношений:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{L_w}{2 \cdot \hbar} \sqrt{2 \cdot q \cdot m_{0eZnCdSe} \cdot E}\right) = \sqrt{\frac{m_{0eZnSe} \cdot (\Delta E_c - E)}{m_{0eZnCdSe} \cdot E}}, \quad (4)$$

$$\operatorname{tg}\left(\frac{L_w}{2 \cdot \hbar} \sqrt{2 \cdot q \cdot m_{0eZnCdSe} \cdot E}\right) = \sqrt{\frac{m_{0eZnCdSe} \cdot E}{m_{0eZnSe} \cdot (\Delta E_c - E)}}, \quad (5)$$

где q – заряд электрона, а E – энергия уровня размерного квантования.

Получаем следующие четный E_{e1} и нечетный E_{e2} уровни энергий:

$$E_{e1} = 0,038 \text{ эВ},$$

$$E_{e2} = 0,142 \text{ эВ}.$$

Получаем два четных E_{hh1} , E_{hh3} и один нечетный E_{hh2} уровни энергий размерного квантования в валентной зоне для тяжелых дырок:

$$E_{hh1} = 0,012 \text{ эВ};$$

$$E_{hh2} = 0,048 \text{ эВ};$$

$$E_{hh3} = 0,102 \text{ эВ}.$$

Получаем один четный E_{lh1} и один нечетный E_{lh2} уровни энергий размерного квантования в валентной зоне для легких дырок:

$$E_{lh1} = 0,033 \text{ эВ};$$

$$E_{lh2} = 0,117 \text{ эВ}.$$

Для учета влияния упругих напряжений в квантово-размерной структуре на зонную диаграмму был проведен расчет разрыва валентной зоны при наличии таких упругих напряжений по следующим выражениям. Вычисляем разрывы валентной зоны тяжелых и легких дырок в напряженной наноструктуре:

$$\Delta E_{vhh} = \chi_{cZnSe} + E_{gZnSe} - E_{vhh} = 0,167 \text{ эВ}; \quad (6)$$

$$\Delta E_{vlh} = \chi_{cZnSe} + E_{gZnSe} - E_{vlh} = 0,084 \text{ эВ}. \quad (7)$$

В ходе выполнения расчетов получены оптимальные значения для разных длин волн с учетом упругих напряжений. Рассчитанные параметры структуры приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры гетероструктуры с учетом упругих напряжений

Параметр	490 нм	500 нм	510 нм
ΔE_c , эВ	0,192	0,193	0,195
ΔE_{vhh} , эВ	0,164	0,167	0,171
ΔE_{vlh} , эВ	0,080	0,084	0,088
ΔE_{cl} , эВ	2,487	2,499	2,501
E_{e1} , эВ	0,033	0,036	0,041
E_{e2} , эВ	0,121	0,133	0,138
E_{hh1} , эВ	0,01	0,013	0,015
E_{hh2} , эВ	0,048	0,049	0,053
E_{hh3} , эВ	0,105	0,107	0,109
E_{lh1} , эВ	0,023	0,028	0,031
E_{lh2} , эВ	0,078	0,083	0,088
λ , нм	489	497	511

Заключение

Полупроводниковые структуры с квантовой ямой очень важны для таких областей как микро- и нанoeлектроника, оптоэлектроника, фотоники и др. Они являются важным шагом к созданию новых высокоэффективных перестраиваемых оптических излучателей, которые могуткратно расширить возможности технических систем в области телекоммуникаций и информационных технологий, а также других важных технических направлениях (системы безопасности, анализ и обработка материалов и др.). Данные структуры обладают еще нераскрытым потенциалом в области улучшения существующих технологий и внедрения новых решений, и результаты поисковых и исследовательских работ могут стать основой для будущих прорывных разработок.

Работа выполнена с использованием научного оборудования Рязанского центра зондовой микроскопии коллективного пользования РГРТУ им. В.Ф. Уткина.

Библиографический список

1. В погоне за синим светодиодом: [Электронный ресурс] // Хабр: [сайт] — URL: <https://habr.com/ru/articles/364387/> (Дата обращения 25.02.2025).
2. Иванов С.В., Торопов А.А., Сорокин С.В. и др. Сине-зеленые лазеры на основе ZnSe с новым типом активной области // ФТП, Т. 33. Вып. 9, 1999. С. 1115–1119.
3. Нагорный А.В. Оптические свойства лазерных гетероструктур на основе твердых растворов цинк-кадмий-селен: автореферат на соискание уч. ст. маг. техн. наук. Минск, 2018.
4. Лозовая Е.А., Литвинов В.Г. Моделирование квантово-размерной структуры с энергией перехода синей области видимого света: // Межвузовский сборник научных трудов Физика полупроводников. Микроэлектроника. Радиоэлектронные устройства. Рязань, РГРТУ, 2020. С. 104–111.
5. Шиляев П.А., Павлов Д.А. Полупроводниковые гетероструктуры: гетеропереход. Учебно-методическое пособие. Н.Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2009. 18 с.
6. Иванов С.В., Торопов А.А., Сорокин С.В. и др. Сине-зеленые лазеры на основе ZnSe с новым типом активной области // ФТП, Т. 33. Вып. 9, 1999. С. 1115–1119.

УДК 621.373.8: ГРНТИ 29.19.31

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.В. Слугин

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, s.anton03.2002@yandex.ru

Аннотация. В работе рассматриваются основные программные методы анализа поверхности твердотельных материалов. Приводятся основы таких методов, как Фурье-анализ, фрактальный анализ, флуктуационный анализ, вейвлет-анализ и другие, а также особенности, характеристики, получаемые с их помощью.

Ключевые слова: Фурье-анализ, фрактальный анализ, флуктуационный анализ, вейвлет-анализ, шероховатость поверхности, автокорреляционная функция.

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@yandex.ru

Annotation. The paper discusses the main software methods for analyzing the surface of solid-state materials. Their main features and characteristics obtained with their help are given, as well as the principle of operation of these methods.

Keywords: Fourier analysis, fractal analysis, fluctuation analysis, Wavelet, Surface roughness, autocorrelation function.

На сегодняшний день, по мере уменьшения функциональных элементов электроники, растёт необходимость в разработке и исследовании новых материалов. Благодаря бурному развитию химии и материаловедения, человечество получило возможность выбора из почти неограниченного числа различных материалов, каждый из которых обладает своими, часто уникальными для выбранных условий свойствами. На характеристики материалов влияют, в числе прочих, и структурные особенности поверхности этих материалов. Поверхность материалов нередко представляет собой сложную систему, имеющую длинный список характеристик, которые необходимо исследовать. Применение программных методов анализа поверхности позволяет упростить и систематизировать процесс изучения сложных структур, а следовательно, и повысить качество и скорость исследования материалов и их структуры.

Фурье-анализ

Фурье-анализ [1] — это математический метод, который позволяет разложить сложные функции или сигналы на более простые гармонические составляющие, представленные синусоидами различных частот и амплитуд. Если сигнал, представляющий собой зависимость высоты профиля поверхности от координаты $x(r)$, удовлетворяет условию абсолютной интегрируемости $\int_{-\infty}^{+\infty} x^2(r) dr < \infty$, то его можно представить в виде интеграла Фурье

$$X(r) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{j2\pi fr} df, \quad (1)$$

где $X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(r) e^{-j2\pi fr} dr$.

Фурье-анализ поверхности твёрдого тела включает в себя преобразование данных о поверхности в частотное пространство. Суть метода заключается в том, чтобы представить поверхность в виде суммы гармонических функций, каждая из которых характеризуется определённой частотой и амплитудой. Изучая спектр этих гармоник, можно понять, как распределяются неровности и дефекты на поверхности. На рисунке (1) представлен типичный Фурье спектр для поверхности аморфной плёнки кремния.

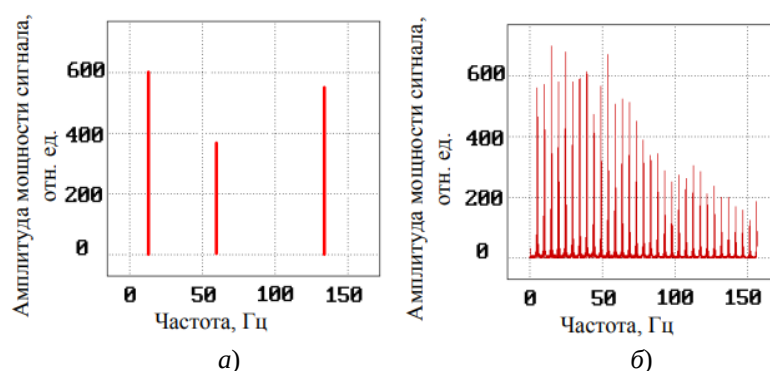


Рис. 1. Типичный Фурье-спектр: а) – для линейной системы; б) – для поверхности неупорядоченного материала [2]

Используя Фурье-анализ, можно получить несколько важных характеристик и свойств поверхности твёрдого тела: 1) частоты, которые связаны с масштабом неровностей; 2) амплитуда каждой гармоники показывает, насколько сильно поверхность на данном масштабе отличается от средней; 3) фаза гармоник определяет взаимосвязь локальных элементов поверхности между собой. Фурье-анализ позволяет не только исследовать поверхность твёрдого тела, но и проводить её математическое моделирование, предсказывая, как она будет изменяться

под воздействием различных факторов (например, при нагрузке, износе или изменении температуры).

Фрактальный анализ

Поверхности твёрдых тел часто имеют сложную, нерегулярную структуру, которая может быть описана с помощью фрактальных методов. Фрактальный анализ позволяет количественно оценивать эту сложность, используя понятие фрактальной размерности.

Наиболее распространённым методом мультифрактального анализа является метод ММВП – «максимумов модулей вейвлет-преобразования». Исследование поверхности при помощи данного метода проходит в 2 этапа.

На первом этапе осуществляется вейвлет преобразование по формуле (2)

$$W(a, x_0) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{(x - x_0)}{a} g(x) dx, \quad (2)$$

где a – параметр масштаба, а x_0 – точка, в которой функция $g(x)$ является n раз дифференцируемой. Результат вейвлет-преобразования можно интерпретировать как поверхность в трехмерном пространстве (рис. 2). Наиболее важная информация о ней содержится в линиях локальных экстремумов поверхности коэффициентов $W(a, x_0)$ (на рисунке 2, б светлые кружки соответствуют минимумам, темные кружки – максимумам).

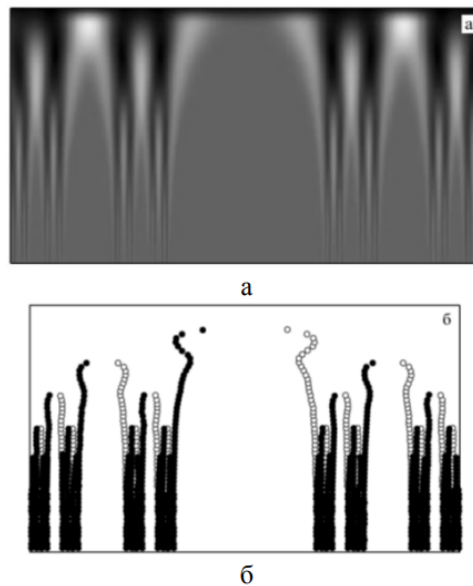


Рис. 2. Результат вейвлет-преобразования в проекции на плоскость ax (а) и линии локальных экстремумов поверхности коэффициентов $W(a, x)$ (б) [1]

Второй шаг метода ММВП состоит в построении частичных функций. Выбирается максимальное значение коэффициентов вейвлет-преобразования (по модулю) на масштабах, меньших заданного числа “ a ” вдоль каждой линии. Должна выполняться зависимость: $Z(q, a) \sim a^{\tau(q)}$, где $\tau(q)$ – скейлинговая экспонента.

Фрактальный анализ позволяет получить следующие характеристики поверхности твёрдого тела:

1. Фрактальная размерность: она указывает на степень "сложности" поверхности.
2. Поверхности твёрдых тел, которые обладают фрактальной природой, имеют самоподобие на разных уровнях масштаба, это свойство важно для понимания того, как поведение материала может зависеть от масштаба.

3. Фрактальный анализ позволяет количественно оценить характер и масштаб неровностей.

4. Фрактальный анализ может также быть использован для изучения влияния фрактальности на взаимодействие материала с внешними факторами, такими как адгезия, коррозия или фазы взаимодействия с окружающей средой.

Флуктуационный анализ

Первичная цель флуктуационного анализа - преобразовать спадающую АКФ в некоторую возрастающую функцию, которая будет менее чувствительна к статистическим ошибкам. Данный метод позволяет выявлять длительные корреляции в исследуемом процессе. Наиболее распространен метод флуктуационного анализа с исключенным трендом или DFA.

Метод DFA базируется на идеологии перехода от исходного временного ряда к обобщенной модели одномерных случайных блужданий [3]. Пример реализации модели случайного процесса с различными корреляционными свойствами представлен на рисунке 3.

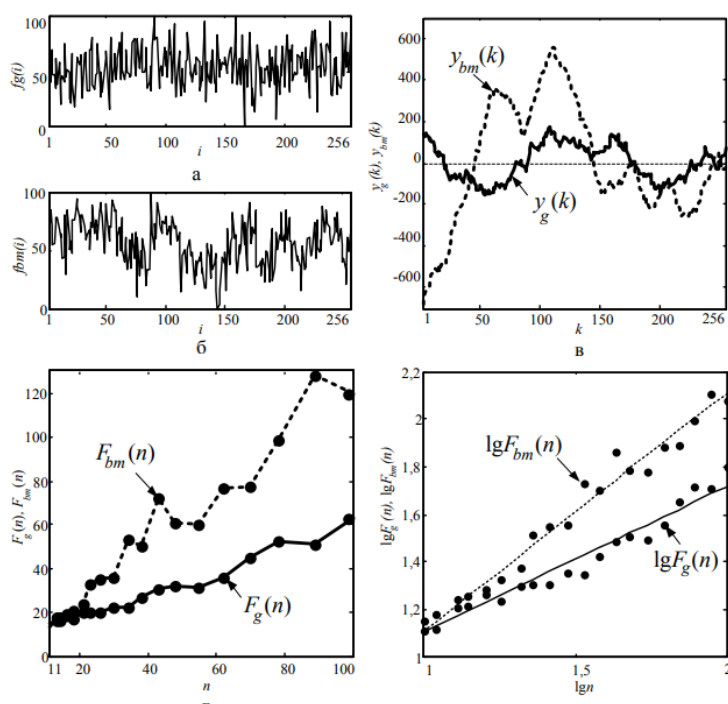


Рис. 3. Иллюстрация работы алгоритма DFA на моделях гауссова шума и одномерного броуновского движения: а – профиль гауссова шума; б – профиль броуновского шума; в – суммированный сигнал гауссова $y_g(k)$ и броуновского шума $y_{bm}(k)$; г – среднеквадратическая ошибка линейной аппроксимации гауссова $F_g(n)$ и броуновского шума $F_{bm}(n)$; д – логарифмическое представление флуктуационной функции [4]

При использовании метода исследуются следующие свойства поверхности твердых материалов:

1) высотные флуктуации, которые могут быть связаны с дефектами, нарушениями периодичности в кристаллической решётке или физико-химическими процессами на поверхности;

2) дефекты поверхности, такие как вакансии, междоузельные атомы, границы зерен, дислокации и другие структурные нарушения;

3) метод позволяет исследовать энергетические состояния и потенциалы взаимодействия атомов на поверхности, включая силы притяжения/отталкивания и энергию активации для различных процессов (например, адсорбции или диффузии атомов по поверхности).

Вейвлет-анализ

Вейвлет преобразование применяется для фильтрации изображений поверхности, заранее полученными при её исследовании другими методами, таким образом улучшая читаемость данных. Пример использование вейвлет преобразования представлен на рисунке 4

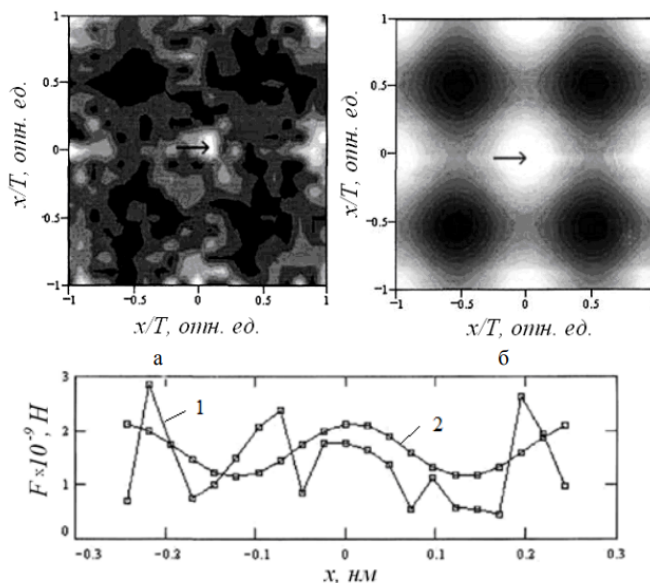


Рис. 4. Изображение условной решетки атомов углерода, полученное численным моделированием, и результат ее вейвлет-фильтрации: а) – искаженное шумом изображение модельной решетки атомов углерода; б) – изображение, полученное после построчной вейвлет-фильтрации; в) – силовые сигналы вдоль отдельных линий сканирования для исходного (1) и обработанного (2) сигналов [5]

Метод позволяет получить следующие данные об исследуемой поверхности: 1) локальные изменения и аномалии в данных; 2) выделение текстурных элементов поверхности; 3) работа с нелинейными сигналами и сложными зависимостями, которые могут возникать на поверхности материала при воздействии внешних факторов (например, при механическом напряжении или в условиях эксплуатации); 4) фильтрация высокочастотного шума в данных, оставляя только важные и значимые характеристики, что особенно полезно при работе с реальными экспериментальными данными, которые могут быть загрязнены шумом.

Шероховатость поверхности

Шероховатость поверхности – это характеристика неровности, она описывает изменения высоты поверхности в разных точках и играет важную роль в механических свойствах материала, таких как трение, износ, коррозионная стойкость, а также в технологических процессах, например, при сборке или обработке материалов.

На практике наиболее часто применяют расчет среднего арифметического из абсолютных значений отклонений профиля поверхности $h(x)$ в пределах базовой длины l :

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |h_i| dx \quad (3)$$

и сумму пяти средних значений наибольших выступов и глубин наибольших впадин профиля в пределах базовой длины:

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |H_{i \max}| + \sum_{i=1}^5 |H_{i \min}|}{5}. \quad (4)$$

Исследование шероховатости поверхности позволяет получить следующую информацию о материалах:

- 1) средняя арифметическая высота неровностей;
- 2) среднеквадратичное отклонение высоты;
- 3) профильное отклонение, которое отражает максимальное отклонение между самыми высокими и самыми низкими точками на участке поверхности;
- 4) глубина максимальных пиков и падений.

Автокорреляционная функция

Автокорреляционная функция (АКФ) — это метод, используемый в анализе поверхности твердых материалов для изучения их топографических и структурных свойств. Он основывается на измерении и оценке того, как значения высоты поверхности изменяются друг относительно друга. Сначала проводится сканирование поверхности с использованием различных методов, таких как атомно-силовая микроскопия (AFM) или сканирующая туннельная микроскопия (STM). Это позволяет получить данные о высоте поверхности. На основе полученных данных высоты рассчитывается автокорреляционная функция, которая определяет, насколько сильно значение высоты в одной точке связано с высотой в другой, удалённой на заданное расстояние. АКФ показывает корреляцию между исходным распределением высоты профиля по поверхности $F(r)$ и тем же распределением, сдвинутым в пространстве горизонтальной плоскости на вектор r_0 :

$$R = \frac{\int F(r) F(r - r_0) dr}{\int F^2(r) dr}. \quad (5)$$

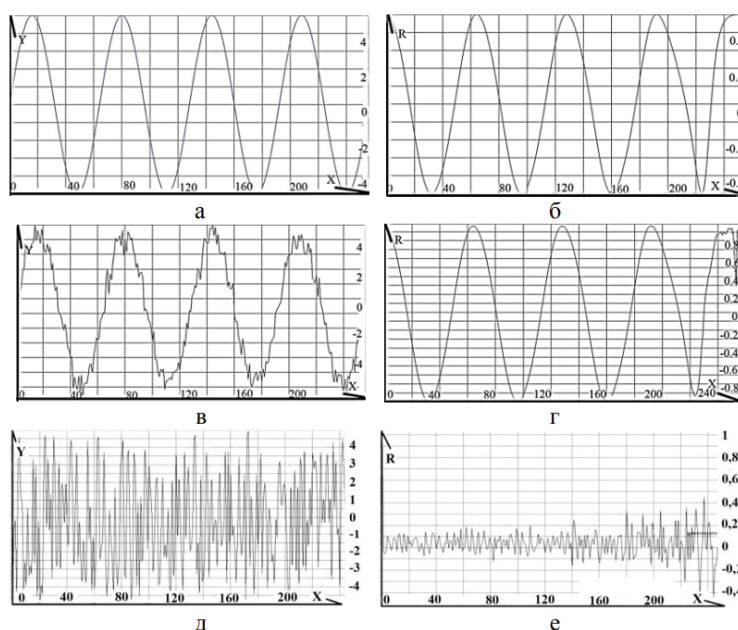


Рис. 5. Примеры одномерных сигналов и соответствующих им АКФ: периодический сигнал (синусоида) (а, б); синусоида с шумом (в, г); равномерный шум (д, е) [4]

Использовании автокорреляционной функции позволяет получить следующие характеристики и свойства поверхности: 1) характерные длины и масштабы колебаний поверхности, а также степень её однородности; 2) статистические параметры, такие как среднее значение высоты, стандартное отклонение, и коэффициенты асимметрии, размеры микронеровностей, которые дают представление о распределении высот; 3) размеры характерных структур и порядок в структуре поверхности.

Выводы

Подводя итог, можно сделать вывод о том, что существует множество методов, позволяющих исследовать поверхности материалов, но среди них нет универсального. Каждый метод позволяет исследовать определённые характеристики поверхностей, следовательно, для комплексного исследования свойств и структуры материалов, необходимо использование комбинации из нескольких методов.

Библиографический список

1. Павлов А.Н. Методы анализа сложных сигналов. - Саратов: Научная книга, 2008. - 120 с.
2. Авачёва Т.Г., Бодягин Н.В., Вихров С.П., Мурсалов С.М. Процессы самоорганизации в неупорядоченных материалах: учеб. пособие. - Рязань: РГРТУ, 2007. - 56 с
3. Ben-Avraham D., Halvin Sh. Diffusion and reactions in fractals and disordered systems. Cambridge University Press, 2005. 332 p.
4. Рыбина Н.В., Рыбин Н.Б. управление свойствами наноматериалов и наноструктур: учеб. пособие. - Рязань: РГРТУ, 2022. - 160 с.
5. Рехвиашвили С.Ш. Применение вейвлет-преобразования для обработки изображений в атомно-силовом микроскопе // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 6. С. 46-50.

УДК 621.382; ГРНТИ 47.09.29

ОЦЕНКА ПОЛОЖЕНИЯ УРОВНЕЙ ДОНОРОВ И АКЦЕПТОРОВ В ФАЗОПЕРЕМЕННЫХ МАТЕРИАЛАХ СИСТЕМЫ GST

Е.П. Трусов^{1*}, Ю.В. Воробьев^{1,2}, А.В. Ермачихин^{1,3}, В.Г. Литвинов¹

¹Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, ertrusov@yandex.ru,

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

³НПК «Технологический центр»,
Российская Федерация, г. Москва, г. Зеленоград

Аннотация. Анализ температурной зависимости электропроводности в рамках упрощенной модели распределения плотности состояний показал, что положение глубоких доноров и акцепторов в материалах системы GeTe-Sb₂Te₃ играет ключевую роль. Эти уровни влияют на концентрацию и подвижность носителей заряда в аморфном и кристаллическом состояниях полупроводника, что позволяет глубже понять физику материалов с фазовым переходом. В аморфном состоянии глубокие уровни локализуют носители заряда, увеличивая сопротивление. Понимание влияния глубоких уровней на электрофизические свойства помогает оптимизировать использование этих материалов в высокоскоростных и энергоэффективных устройствах, таких как фазопеременная память и оптоэлектронные компоненты.
Ключевые слова: фазопеременные материалы, GeTe-Sb₂Te₃, уровень Ферми, плотность состояний, донорные и акцепторные уровни.

ASSESSMENT OF THE POSITION OF DONOR AND ACCEPTOR LEVELS IN PHASE-CHANGING MATERIALS OF THE GST SYSTEM

E.P.Trusov^{1*}, Yu.V. Vorobyov^{1,2}, A.V. Ermachikhin^{1,3}, V.G. Litvinov¹

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

*Russia, Ryazan, * eptrusov@yandex.ru,*

2 National research university of Electronic Technology,

Russia, Moscow, Zelenograd

3 Scientific-Manufacturing Complex "Technological Centre»

Russia, Moscow, Zelenograd

The summary. An analysis of the temperature dependence of electrical conductivity within the framework of a simplified model of the density of states distribution has shown that the position of deep donors and acceptors in the materials of the GeTe-Sb₂Te₃ system plays a key role. These levels affect the concentration and mobility of charge carriers in amorphous and crystalline states of a semiconductor, which allows for a deeper understanding of the physics of phase transition materials. In the amorphous state, deep levels localize charge carriers, increasing resistance. Understanding the influence of deep levels on electrophysical properties helps optimize the use of these materials in high-speed and energy-efficient devices such as phase-change memory and optoelectronic components..

Keywords: phase-changing materials, GeTe-Sb₂Te₃, Fermi level, density of states, donor and acceptor levels.

Введение

Фазопеременные материалы на основе системы GeTe-Sb₂Te₃ используются для создания запоминающих устройств, работающих путем переключения между аморфным и кристаллическим состояниями. Аморфное состояние характеризуется высоким электрическим сопротивлением, тогда как кристаллическое состояние имеет низкое сопротивление [1]. Эта бинарность (0 и 1) делает фазопеременную память (Phase Change Memory – PCM) подходящей для изготовления цифровой памяти. Кроме того, фазопеременная память на основе системы Ge-Sb-Te обладает определенной радиационной стойкостью [2], что делает ее перспективным материалом для использования в условиях космоса. В работе рассматриваются три материала: GeTe, Ge₂Sb₂Te₅, GeSb₂Te₄. Материал Ge₂Sb₂Te₅ – один из основных фазопеременных материалов, используемый в настоящее время, GeTe и GeSb₂Te₄ располагаются рядом с ним на линии квазибинарного среза GeTe-Sb₂Te₃.

Фазопеременная память имеет несколько преимуществ.

1. РСМ обладает способностью к быстрому переключению, что делает ее подходящей для высокоскоростных операций [3].
2. Фазопеременные материалы демонстрируют высокую долговечность, выдерживая большое количество циклов записи [3]. Это особенно важно для приложений искусственного интеллекта (ИИ), требующих частого обновления весов.
3. Возможность создания нескольких уровней сопротивления в одной ячейке памяти [4] позволяет значительно увеличить плотность записи, снижая физические затраты и энергопотребление систем ИИ.
4. Многоуровневая и аналоговая память, реализованная на основе фазопеременных материалов, обеспечивает снижение энергопотребления, необходимого для операций чтения и записи, по сравнению с традиционной памятью [5].
5. Аналоговая память на основе фазопеременных материалов, также известная как многозначная или память с непрерывным состоянием, позволяет использовать непрерывный набор состояний сопротивления. Это особенно полезно в приложениях ИИ, где веса в нейронных сетях часто представляются в виде действительных чисел, а не двоичных значений. Аналоговая память может более эффективно сохранять значения весов нейронных сетей [6], сокращая вычислительную нагрузку и повышая скорость обучения.

6. Выполнение вычислений непосредственно в памяти позволяет значительно сократить время передачи данных и потребление энергии, что является критическим фактором для эффективной работы систем ИИ [7].

Знание положения энергетических уровней доноров и акцепторов в фазопереходных материалах системы $\text{GeTe-Sb}_2\text{Te}_3$ критически важно по нескольким причинам.

1. Положение этих уровней напрямую влияет на проводимость материала. При переходе от аморфного к кристаллическому состоянию эти уровни изменяются, что влияет на концентрацию и подвижность свободных носителей заряда, а следовательно, и на проводимость. Знание положения этих уровней позволяет определить основной тип носителей заряда (электроны или дырки) и их концентрацию, что критически важно для проектирования и оптимизации устройств на основе этих материалов.

2. Знание параметров энергетических уровней помогает оценивать концентрацию дефектов в материале, что важно для улучшения его характеристик и надежности. Разные типы дефектов (например, образующих глубокие и мелкие энергетические уровни) по-разному влияют на электрические и оптические свойства материала. Управление энергетическим спектром дефектов и примесей позволяет оптимизировать характеристики материала.

3. Экспериментальные данные о характеристиках энергетических уровней необходимы для уточнения имеющихся и построения адекватных физических моделей, проведения моделирования характеристик полупроводниковых приборов. Эти модели помогают исследователям лучше понять поведение материала и направляют экспериментальные исследования. С помощью теоретических моделей можно предсказать свойства новых составов материалов, что ускоряет разработку и внедрение новых технологий.

Оценка положения уровней доноров и акцепторов

Для оценки положения уровней доноров и акцепторов необходимо вывести формулу для плотности ионизированных акцепторов, плотности ионизированных доноров, заполнения состояний «хвостов» зоны проводимости и валентной зоны, энергии Урбаха, ширины запрещенной зоны. Для нахождения всех этих параметров необходимо знать положение уровня Ферми. При этом нахождение выражений для данных параметров в общем виде не представляется возможным, и решение получают с использованием численных методов [8].

Энергию Ферми возможно определить, используя уравнение электронейтральности и применяя численные методы:

$$p_0 - n_0 + p_t - n_t + q_D - q_A = 0, \quad (1)$$

где p_0, n_0 — концентрации свободных дырок и электронов;

p_t, n_t — концентрации дырок и электронов на ловушках в «хвостах» валентной зоны и зоны проводимости;

q_D, q_A — концентрации ионизированных донорных и акцепторных дефектов.

Таким образом, температурная зависимость положения уровня Ферми включает в себя много параметров. Моделирование положения уровня требует привязки результатов расчетов к экспериментальным результатам. Для этого использовались данные измерения температурной зависимости электропроводности $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$.

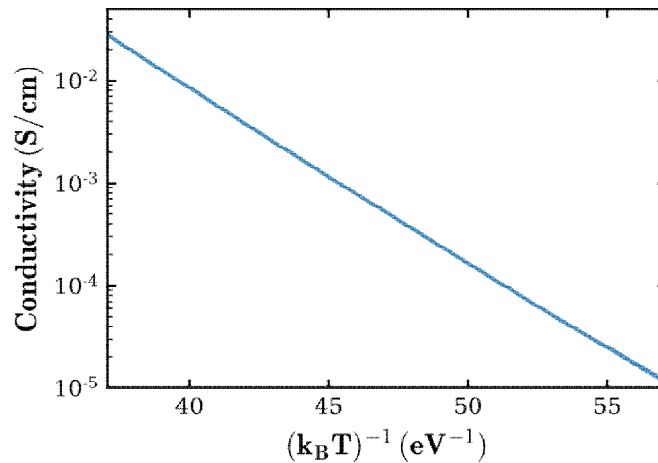


Рис. 9. Результаты измерения температурной зависимости электропроводности $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, используемые для расчетов положения уровня Ферми [8]

Для температурной зависимости электропроводности имеем следующее:

$$E_F - E_V = k_B T \exp\left(\frac{\sigma_0}{\sigma}\right). \quad (2)$$

На основе этого становится возможным оценить положение уровня Ферми, используя выражение:

$$\sigma = \sigma_0 \ln\left(-\frac{E_F - E_V}{k_B T}\right). \quad (3)$$

Тут также необходимо делать допущения при рассмотрении значения предэкспоненциального множителя σ_0 , (диапазон 100-600 См/см выбирался, исходя из полученных ранее результатов [9]).

Так в первом приближении были приравнены величины эффективной плотности состояний для зоны проводимости и для валентной зоны $N_c = N_v = N_{eff}$, величины плотности состояний на краю валентной зоны и зоны проводимости $g_0^c = g_0^v = g_0$. Концентрации глубоких доноров и акцепторов также были приравнены $N_A = N_D = N$ (N – концентрация глубоких дефектов).

Таким образом, вследствие принятых допущений осталось четыре неопределенных параметра: N — концентрация глубоких дефектов, g_0 — плотность состояний на краю разрешенных зон, E_D и E_A — положения донорных и акцепторных энергетических минизон для температуры 300 К (далее будем говорить об уровне находящемся в середине минизоны).

Аппроксимация экспериментальных данных

Для аппроксимации экспериментальных данных электропроводности в координатах Аррениуса, аналогичных данным, представленным на рисунке 1, использовались характеристические параметры материалов, такие как N_{eff} , g_0^c , g_0^v , N_A , N_D , E_D , E_A с помощью модели температурной зависимости уровня Ферми и для набора значений предэкспоненциального множителя σ_0 получим картину, представленную ниже на рисунке 2. Здесь сплошные линии – экспериментальные данные, а точки соответствуют модели. Результаты аппроксимации показывают хорошее соответствие экспериментальным данным, что подтверждает

применимость модели распределения плотности состояний включающей в себя разрешенные зоны, сужающиеся к запрещенной зоне, глубокие минизоны образованные дефектами и располагающиеся ближе к середине запрещенной зоны.

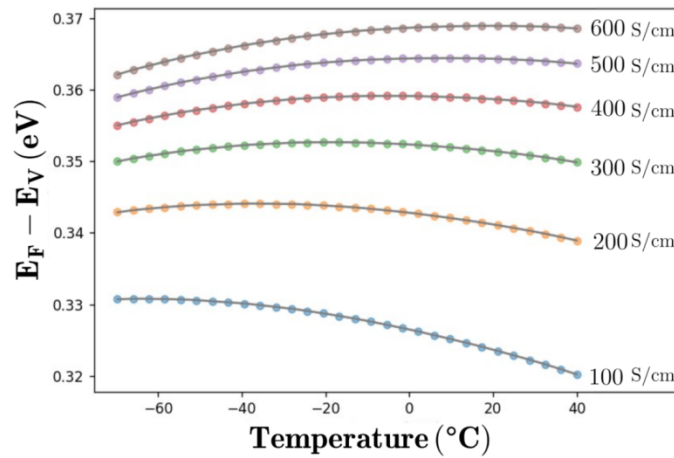


Рис. 10. Результаты аппроксимации экспериментальных данных моделью температурной зависимости уровня Ферми для материала $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$

Зависимость параметров аппроксимационной функции от предполагаемого значения предэкспоненциального множителя σ_0 (рисунок 3) показывает, что энергетическое расположение зон дефектов и для доноров и для акцепторов практически не зависит от значения σ_0 . Однако параметры N и g_0 имеют сильную зависимость от величины предэкспоненциального множителя.

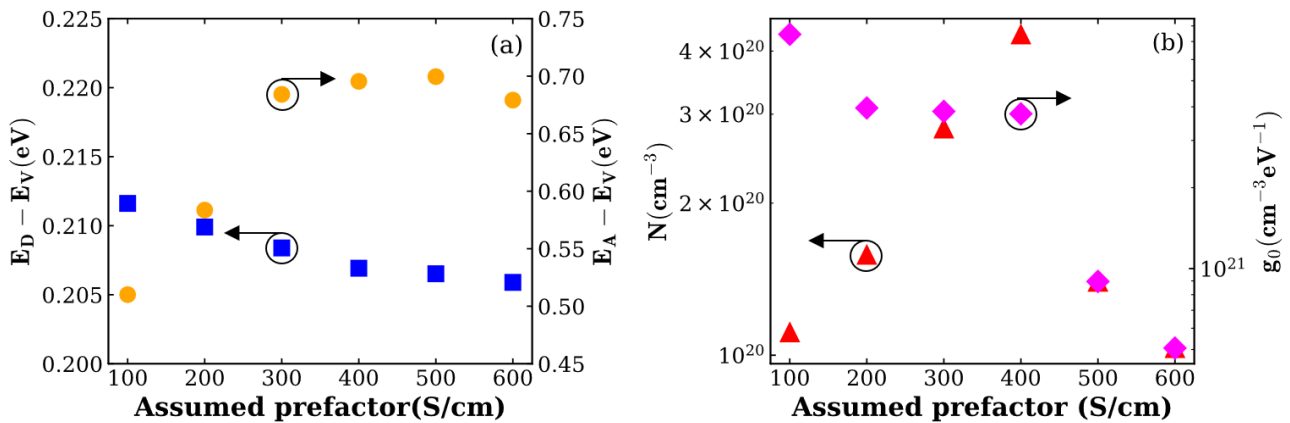


Рис. 11. Зависимость параметров аппроксимационной функции распределения плотности разрешенных состояний от предполагаемого значения предэкспоненциального множителя для материала $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$

Результаты моделирования для GeTe

С использованием характеристических параметров материала GeTe был выполнен расчет и построен график температурной зависимости положения уровня Ферми (рисунок 4). Положение донорных уровней относительно потолка валентной зоны слабо зависит от предэкспоненциального множителя в отличие от акцепторных уровней. Концентрация глубоких дефектов и плотность состояний на краю разрешенных зон имеют сильную зависимость от σ_0 .

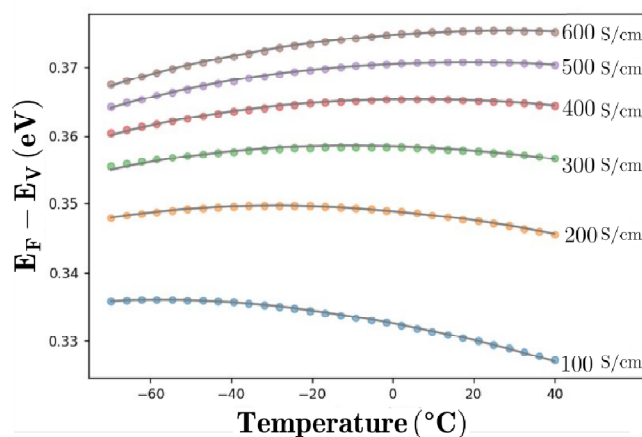


Рис. 12. Результаты аппроксимации экспериментальных данных моделью температурной зависимости уровня Ферми для материала GeTe (для σ_0 от 100 См/см до 600 См/см)

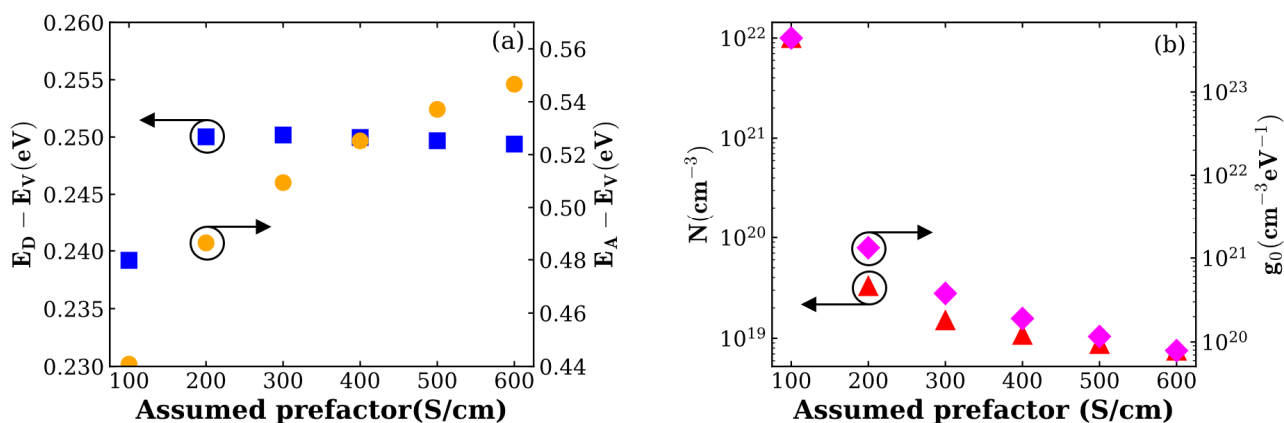


Рис. 13. Зависимость параметров аппроксимационной функции распределения плотности состояний от предполагаемого значения предэкспоненциального множителя для материала GeTe

Аналогично для материала GeSb_2Te_4 был выполнен расчет и построен график температурной зависимости положения уровня Ферми (рисунок 6). Положение донорных и акцепторных уровней слабо зависит от предэкспоненциального множителя. Концентрация глубоких дефектов и плотность состояний на краю разрешенных зон имеют схожий характер зависимости (рисунок 7).

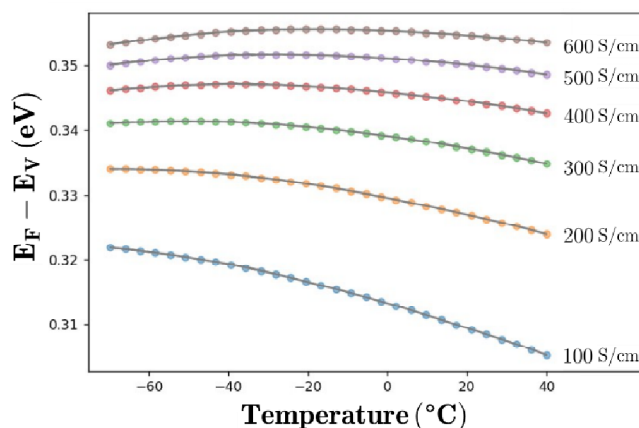


Рис. 14. Результаты аппроксимации экспериментальных данных моделью температурной зависимости уровня Ферми в материале GeSb_2Te_4 (для σ_0 от 100 См/см до 600 См/см)

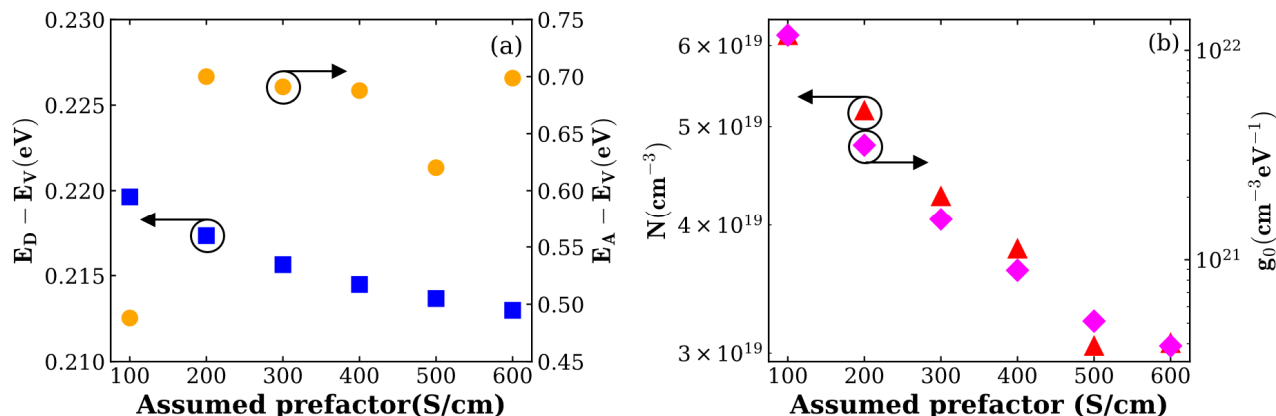


Рис. 15. Зависимость параметров аппроксимационной функции распределения плотности состояний от предполагаемого значения предэкспоненциального множителя для материала GeSb₂Te₄

Заключение

Выполнена оценка положения уровней доноров и акцепторов относительно потолка валентной зоны в фазопеременных материалах GeTe, Ge₂Sb₂Te₅, GeSb₂Te₄. Для всех трех материалов показано хорошее соответствие температурной зависимости рассчитанного из экспериментальных данных и смоделированного положения уровня Ферми относительно потолка валентной зоны. Характер зависимостей плотности донорных и акцепторных состояний для исследуемых материалов имеют схожий характере (практически нет зависимости от величины предэкспоненциального множителя). Для параметров плотности состояний на краю зоны и концентрации дефектов для всех материалов наблюдается существенная зависимость от σ_0 .

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-79-10137 (<https://rscf.ru/en/project/24-79-10137/>). Подготовка образцов проводилась на оборудовании научно-исследовательской лаборатории “Активные фотонные материалы и приборы” МИЭТ. Измерения электропроводности и ее температурной зависимости проводились с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования РГРТУ.

Библиографический список

- 1 Juarez L. F. Da Silva, Aron Walsh, Hosun Lee. Insights into the structure of the stable and metastable (GeTe)_m(Sb₂Te₃)_n compounds // Phys Rev B Condens Matter Mater Phys. 2008. Vol. 78, № 22. P. 224111.
- 2 Wu Liang-Cai et al. Total Dose Radiation Tolerance of Phase Change Memory Cell with GeSbTe Alloy // Chinese Physics Letters. 2006. Vol. 23. P. 2557–2559.
- 3 Шерченков А.А. и др. Электрофизические свойства и механизмы переноса в тонких пленках материалов фазовой памяти на основе халькогенидных полупроводников квазибинарного разреза GeTe-Sb₂Te₃ // Физика и техника полупроводников. Ioffe Institute Russian Academy of Sciences, 2017. Vol. 51, № 2. С. 154–160.
- 4 Nirschl T. et al. Write Strategies for 2 and 4-bit Multi-Level Phase-Change Memory // IEEE International Electron Devices Meeting. Washington, DC, USA 2007. P. 461–464.
- 5 Parkinson Ward, Benn Allen. ANALOG PHASE CHANGE MEMORY: pat. 20050030788A1. USA, 2005.
- 6 Suri M. et al. Phase change memory as synapse for ultra-dense neuromorphic systems: Application to complex visual pattern extraction // Technical Digest - International Electron Devices Meeting, IEDM., 2011. P. 441–444.
- 7 Pirovano A et al. Low-field amorphous state resistance and threshold voltage drift in chalcogenide materials // IEEE Trans Electron Devices. 2004. Vol. 51, № 5. P. 714–719.

8 Vorobyov Y. V., Ermachikhin A. V., Trusov E. P. Relationship between statistical shift of the Fermi level and activation energy of conductivity in phase-change materials // Journal of Physics: Conference Series. : IOP Publishing Ltd, 2021. P. 012008.

9 Vorobyov Y. et al. Temperature activated conductivity of Ge₂Sb₂Te₅: Connection to the variation of Fermi level and implications on resistance drift // J Phys D Appl Phys. IOP Publishing Ltd, 2021. Vol. 54, № 31. P. 315302.

УДК 621.315.592 ГРНТИ 29.19.31

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА ЭКСТРАКЦИИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА ЛИНЕЙНО ВОЗРАСТАЮЩИМ НАПРЯЖЕНИЕМ

В.С. Филяревич, В.Г. Литвинов

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, Filyarevichv95@mail.ru*

Аннотация. В работе описаны особенности метода вытягивания носителей заряда линейно-возрастающим напряжением и его возможности для измерения подвижности носителей заряда тонких пленок. Представлена структурная схема установки для реализации метода.

Ключевые слова: метод экстракции носителей заряда линейно-возрастающим напряжением, неупорядоченный полупроводник, подвижность носителей заряда.

MEASURING SETUP FOR CHARGER EXTRACTION BY LINEARLY INCREASING VOLTAGE REALIZATION

V.S. Filyarevich, V.G. Litvinov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russian Federation, Ryazan, Filyarevichv95@mail.ru*

Abstract. The work describes the features of the method of charge extraction by linearly increasing voltage and its capabilities for studying the mobility of charge carriers in thin films. The block diagram of the method's implementation is presented.

Keywords: Charge Extraction by Linearly Increasing Voltage (CELIV), disordered semiconductor, charge carrier mobility.

Введение

В настоящее время существует достаточно большое количество методов определения подвижности носителей заряда, но большинство из них не подходит для исследования неупорядоченных полупроводников. В первую очередь это касается исследования тонких пленок толщиной менее 100 нм.

Эти особенности обусловлены принципиальными отличиями между кристаллическими и неупорядоченными материалами, а также существенным изменением электрофизических свойств при переходе от объемных материалов к тонкопленочным структурам [1].

Одним из методов, подходящим для исследования подвижности равновесных носителей заряда в пленках с толщиной менее 100 нм, является метод экстракции носителей заряда линейно-возрастающим напряжением. Первоначально данный метод был разработан для экстракции собственных равновесных носителей заряда, но затем был адаптирован для экстракции носителей, которые генерируются под действием импульса света, что позволило использовать его для измерения подвижности носителей заряда в органических полупроводниках. Его преимущество заключается в возможности использования непосредственно на рабочих устройствах, таких как солнечные элементы и диоды, для одновременного определения концентрации и подвижности носителей заряда [2].

Физический смысл метода представлен на рисунке 1. При подаче двух последовательных импульсов (рисунок 1, а) линейно-возрастающего напряжения производится регистра-

ция переходного тока (рисунок 1, б). Вытягиваемый заряд в этом случае будет определяться различием этих двух нестационарных процессов при малом времени задержки t_d между этими импульсами. Второй импульс необходим для контроля качества блокирующего контакта, а изменение t_d позволяет оценить время релаксации заряда в экспериментальной структуре.

Преимущество метода состоит в том, что вместо генерации носителей заряда световым импульсом, как в случае времяпролетного метода, в нем используются равновесные носители заряда.

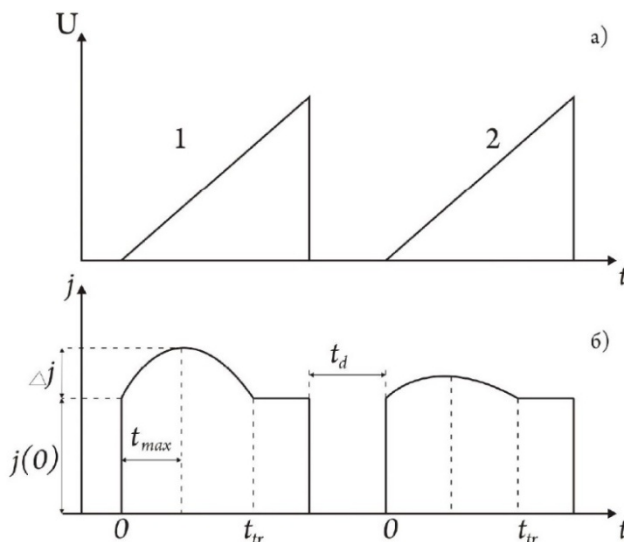


Рис. 1. Схематичное изображение метода экстракции носителей заряда линейно возрастающим напряжением. U – прикладываемый импульс напряжения, t_d – время задержки.

При использовании линейно возрастающего напряжения нет больших начальных всплесков тока смещения, за счет резкого увеличения напряжения на образце до включения светового импульса, которая обычно затрудняет измерения в времяпролетном методе [3].

Экспериментальный измерительный комплекс, реализующий метод экстракции носителей заряда линейно возрастающим напряжением

Установка, предназначенная для реализации метода, состоит из специально разработанных блоков, стандартных измерительных приборов и ПК (рис. 2).

Экспериментальный измерительный комплекс состоит из следующих функциональных блоков:

- 1 – генератор прямоугольных импульсов, управляемый с персонального компьютера (ПК);
- 2 – источник питания линейки лазеров;
- 3 – линейка лазеров, обеспечивающая перестройку длины волны (от ИК до УФ области спектра);
- 4 – монохроматор;
- 5 – полупрозрачное зеркало;
- 6 – блок регистрации и питания;
- 7 – измерительная ячейка, в которой размещается исследуемый образец и схема измерительного тракта;
- 8 – прецизионный быстродействующий усилитель — преобразователь ток-напряжение;
- 9 – схема сопряжения с ПК;
- 10 – персональный компьютер.

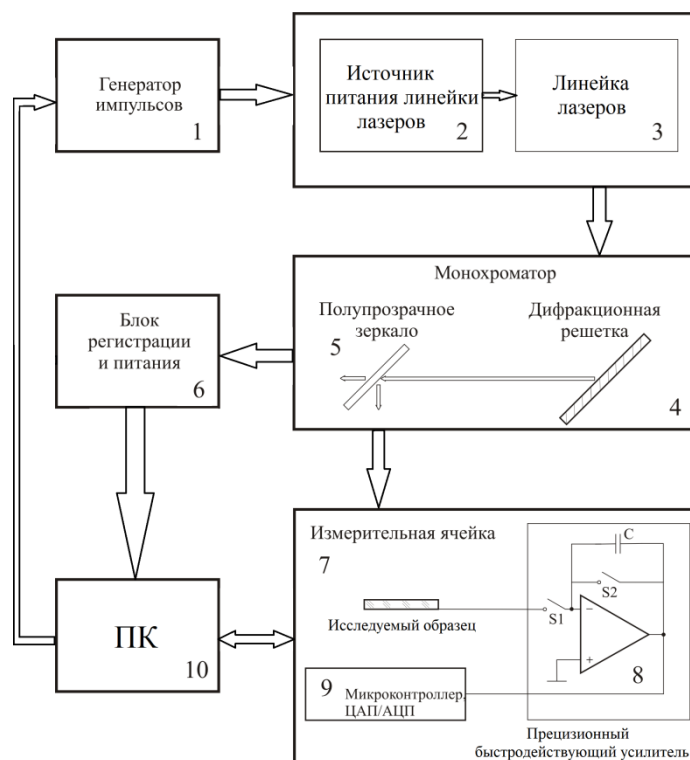


Рис. 2. Структурная схема экспериментального измерительного комплекса

Исследуемый образец помещается в измерительную ячейку, подключённую к ПК через шину сопряжения. Из ПК подается команда на генератор прямоугольных импульсов, которые усиливаются и через определенные промежутки времени и с заданной величиной эти импульсы приходят на линейку лазеров, из которой выбирается один из лазеров с необходимой длиной волны.

Излучение можно дополнительно пропустить через монохроматор с дифракционной решёткой, и далее излучение направляется на полупрозрачное зеркало. Часть излучения попадает на образец и, вызывает в нём переходной процесс протекания электрического тока, который усиливается в усилителе в измерительной ячейке и поступает на плату сбора данных в ПК. Другая часть излучения регистрируется блоком регистрации для синхронизации импульсов света во времени.

Использование линейки лазеров высокого качества позволяет добиться большей интенсивности света в отличие от лампы накаливания или импульсной лампы, а также при желании исключить из системы монохроматор. При использовании линейки лазеров, не обеспечивающей полное исключение нежелательных длин волн, наличие монохроматора в схеме позволяет исключить паразитные гармоники, которые могут неконтролируемо влиять на результаты измерений.

Возможность определения подвижности носителей заряда необходима для разработки электронных устройств. Стоит отметить, что метод представляет много возможностей как для исследователей практиков, так и для ученых теоретиков, работающих с современными и перспективными полупроводниковыми материалами, структурами и электронными компонентами.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ с использованием научного оборудования РЦЗМкп РГРТУ им. В.Ф. Уткина.

Библиографический список

1. Litvinov V.G., Vishnyakov N.V., Mishustin V.G. et. al. Measuring complex for analysis of recombination deep traps in semiconductor solar cells // USB Proceedings 2015 IEEE ICIT, Seville, Spain, 17 – 19 March. 2015. P. 1071 –1074.
2. Мишустин В.Г., Назимов Д.Р. Метод CELIV: перспективы и особенности применения для исследования неупорядоченных полупроводников// В сборнике: Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2020. Сборник трудов III Международного научно-технического форума: в 10 т. Том 2. Рязань, 2020. С. 109-112.
3. Juska G., Arlauskas K., Viliunas M. Extraction Current Transients: New Method of Study of Charger Transport in Microcrystalline Silikon // Phys. Rev. Lett. 2000. V.84. N.21. P. 4946-4949.

УДК 621.315.592; ГРНТИ 47.09.29, 29.19.31

**РАДИАЦИОННЫЕ ДЕФЕКТЫ
В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ И СТРУКТУРАХ**

Д.В. Литвинова¹, В.С. Литвинова²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Российская Федерация, Санкт-Петербург, dv_lit@mail.ru

²Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, varvara_lit@mail.ru

Аннотация. В работе рассматриваются основные типы дефектов в полупроводниковых материалах. Уделено внимание точечным дефектам и их комплексам. Рассмотрены вопросы образования дефектов в полупроводниковых материалах при воздействии различного вида излучениями.

Ключевые слова: дефекты, полупроводники, радиационные дефекты.

**RADIATION DEFECTS
IN SEMICONDUCTOR MATERIALS AND STRUCTURES**

D.V. Litvinova¹, V.S. Litvinova²

¹Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,
Russia, St.Petersburg, dv_lit@mail.ru

²Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, varvara_lit@mail.ru

The summary. The paper discusses the main types of defects in semiconductor materials. Attention is paid to point defects and their complexes. The issues of defect formation in semiconductor materials under the influence of various types of radiation are considered.

Keywords: defects, semiconductors, radiation defects.

Полупроводниковые материалы используются для изготовления электронных приборов благодаря их уникальным свойствам. Возможность управления электрофизическими свойствами осуществляется за счет введения небольших количеств примесных атомов и формирования дефектов с известными энергетическими уровнями. Одни дефекты могут оказаться полезными для изготовления полупроводниковых приборов с заданными параметрами и характеристиками, другие типы дефектов неблагоприятным образом влияют на качественные характеристики приборов. Электрические свойства полупроводника оказываются чувствительны к введению одного примесного атома или дефекта, образующего энергетический уровень в запрещенной зоне, на миллиард собственных атомов. Таким образом, умение контролировать наличие и виды дефектов в электронных материалах связано с уровнем развития технологии роста объемных монокристаллов, формирования микро- и наноструктур.

Рассмотрим классификацию различных типов дефектов, встречающихся в полупроводниках. Все дефекты можно разделить на две большие группы: 1) мелкие примеси – дефекты, энергия активации которых может быть вычислена в «приближении эффективной массы»; 2) глубокие центры (ГЦ) – дефекты, образующие глубокие энергетические уровни (ГУ) в запрещенной зоне, энергия активации которых может быть вычислена с помощью ме-

тогда функций Грина [1]. Кроме этого, дефекты бывают точечные и линейные. Точечные дефекты образуются отдельными изолированными атомами, а линейные дефекты состоят из рядов атомов. К линейным дефектам относятся, например, дислокации несоответствия. Также рассматривают совокупности точечных взаимодействующих дефектов, называемые комплексами.

Линейные дефекты практически во всех случаях негативно влияют на надежность работы полупроводниковых приборов. При изготовлении полупроводниковых или диэлектрических пластин всегда стремятся минимизировать число линейных дефектов на поверхности, которая, по сути, является двумерным гигантским дефектом с огромным количеством незавершенных связей – уровней Тамма. Электронные состояния, связанные с такими поверхностными уровнями, называются «поверхностными состояниями». Дислокации и поверхностные состояния принято различать друг от друга.

Точечные дефекты в свою очередь разделяются на:

- вакансия, вакансия вследствие отсутствия атома А в узле обозначается как V_A ;
- атом в междоузлии, атом А, находящийся в междоузлии, обозначается как I_A ;
- атом замещения, атом С, замещающий, место собственного атома А, обозначается

СА;

- антисайт, такой вид дефекта замещения, когда собственный атом В занимает «чужое место», место не в своей подрешетке, место другого собственного атома А;
- дефект Френкеля, комплекс V_A-I_A , образованный атомом А, смещенным из узла решетки к ближайшему междоузлию с образованием вакансии.

Вакансии и антисайты практически всегда присутствуют в монокристаллах, что является следствием термодинамических процессов в твердом теле. А, например, междоузлия (атомы в междоузлиях) в кремнии подвижны практически при любой температуре [2]. Их называют также собственными дефектами, не связанными с введением посторонних атомов. Собственные дефекты могут образовывать комплексы, например дивакансии. Введение посторонних атомов, примесей приводит к образованию несобственных дефектов. Дефекты бывают электрически и оптически активными. Дефекты, которые при ионизации создают в материале свободные электроны, называются донорами, а дефекты, создающие свободные дырки называются акцепторами.

Донорами в Si являются атомы замещения из V группы – P, As, Sb. Их также называют мелкими донорами, поскольку при комнатной температуре эти атомы оказываются полностью ионизированными. Атомы замещения из VI группы – S, Se и Te, внедренные в Si, могут отдавать до двух электронов в зону проводимости, поэтому их называют двойными донорами. Акцепторами в Si являются атомы замещения из III группы – B, Al, Ga и In. Атомы замещения из II группы в Si – Be и Zn являются двойными акцепторами.

Использование полупроводниковых приборов в системах специального назначения происходит в условиях воздействия ионизирующего излучения. Источником этого излучения может быть, например, Солнце в космическом пространстве, и радиоактивные элементы, ядерные реакторы на Земле. Отказы в работе электронных элементов и интегральных схем вызывают кванты электромагнитного излучения, элементарные частицы, ионы с энергией более единиц-десятков кэВ, а элементарные частицы в космических лучах могут иметь энергию свыше $3 \cdot 10^{20}$ эВ [3]. Отказы в работе происходят вследствие физических эффектов, вызываемых ионизирующим излучением: генерации неравновесных носителей заряда в активных слоях полупроводниковых приборов, образованию дефектов в полупроводниковых и диэлектрических слоях.

Концентрация образующихся дефектов при облучении пропорциональна дозе облучения и их тип зависит от природы и энергии частиц, используемых при облучении, наличия в облучаемом материале примесей, способных захватывать собственные дефекты, возникающие при облучении.

Возникновение дефектов при облучении возникает за счет смещения первично выбитых атомов. К первичным дефектам относят также так называемые «пары Френеля». Анализ этого процесса приводит к оценке пороговой энергии для смещения атомов. Такая задача была решена Зейтцем [4], Коном [5] и Бауэрлейном [6]. Адиабатическое удаление атома из узла кристаллической решетки по оценкам Зейтца составляет около 25 эВ. Кон и Бауэрлейн изучали образование пары вакансия – междоузельный атом. Наиболее близкие теоретические оценки величины пороговой энергии к эксперименту оказались у Бауэрлейна. Для Si экспериментальное значение пороговой энергии составляет от 11 до 21 эВ, а для GaAs от 7 до 11 эВ [2].

Интересным является явление возникновения дефектов при облучении рентгеновскими лучами или потоком электронов, энергия которых меньше пороговой энергии для выбивания атомов из узлов кристаллической решетки. Дефектообразование в этом случае связано с двумя основными механизмами: при облучении происходит перемещение более легких примесных атомов; облучение приводит к ионизации атомов, что снижает энергию связи и пороговую энергию для смещения атома. Кроме этого нужно принимать во внимание поверхностные эффекты и стимулирование диффузии примесей при облучении и ионизации.

Изучение дефектообразования связано с существенным их влиянием на электрофизические свойства полупроводниковых материалов и структур. Поэтому на практике применяются методы температурной зависимости вольт-амперных, вольт-фарадных характеристик, спектроскопия адмиттанса, релаксационная (нестационарная) спектроскопия глубоких уровней. Например, в работе [7] показаны результаты совместного использования указанных методов для изучения радиационных дефектов в Si и SiC.

По результатам изучения облученного Si обнаружено образование E-центров, представляющих собой комплекс примесного атома V группы и вакансии с энергией активации около 0,27-0,50 эВ [2, 7], а также A-центров, представляющих собой комплекс атома кислорода и вакансии с энергией активации 0,16 эВ [8].

Возникновение E-центров в Si связывают также и с элементами III, IV и VI групп. Комплекс вакансии с атомом Ga, B или Al является акцептороподобным. В таблице представлены данные из нескольких литературных источников о параметрах глубоких центров, образующихся в Si при воздействии различных видов облучения.

Таблица. Энергия активации радиационных дефектов в Si

Энергия активации $E_C - E_T$, эВ	Тип облучения	Литературный источник
0,48	α -частицы	10
0,28	α -частицы	10
0,26	α -частицы	10
0,35	γ -облучение	11
0,235	γ -облучение	11
0,305	γ -облучение	11
0,246	γ -облучение, облучение электронами	12
0,18	γ -облучение	12
0,15	облучение электронами и нейтронами	13-15
0,21	облучение электронами и нейтронами	13-15
0,39	облучение электронами и нейтронами	13-15

Продолжение таблицы

0,43	облучение электронами и нейтронами	13-15
Энергия активации $E_T - E_V$, эВ		
0,33	γ -облучение	11
0,27	γ -облучение, облучение электронами	11
0,15	облучение электронами и нейтронами	13-15
0,34	облучение электронами и нейтронами	13-15
0,45	облучение и нейтронами электронами	13-15

Из литературы также известно, что в процессе облучения могут возникать комплексы дефектов с разными расстояниями между вакансией и атомом в междоузлии. В упругой среде возникает центр сжатия (вакансия) и центр растяжения (атом в междоузлии). Возникающие упругие деформации имеют противоположные знаки, и вследствие этого растет вероятность взаимной миграции друг к другу и дальнейшей аннигиляции вместо удаления дефектов от места образования и друг от друга с разрушением комплекса на отдельную свободную вакансию и атом в междоузлии [9]. В [16] отмечается, что в зависимости от дозы облучение может приводить как к генерации дефектов, так и к уменьшению их концентрации из-за процессов аннигиляции и отжига дефектов.

Библиографический список

1. Ю П., Кардона М. Основы физики полупроводников. М.: Физматлит, 2002. 560 с.
2. Бургуэн Ж., Ланно М. Точечные дефекты в полупроводниках. Экспериментальные аспекты. М.: Мир. 1985. 304 с.
3. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/enc/e083.htm>. Космические лучи. (Дата обращения 18.02.2025 г.)
4. Seitz F. On the disordering of solids by action of fast massive particles // Disc. Faraday Soc. 5. 1949. P. 271.
5. Kohn W., Rostoker N. Solution of the Schrödinger Equation in Periodic Lattices with an Application to Metallic Lithium // Phys. rev. 94. 1954. P.1111-1120.
6. B uerlein R. In: Radiation damage in solids, ed. by D. Billington, Academic Press, New York. 1962. P. 358.
7. Козловский В.В., Емцев В.В., Емцев К.В., Строкан Н.Б., Иванов А.М., Ломасов В.Н., Оганесян Г.А., Лебедев А.А. Влияние электронного облучения на скорость удаления носителей в кремнии и карбиде кремния модификации 4Н // ФТП. Т.42. №2. 2008. С. 243-248.
8. Corbett J.W., Watkins G.D. Production of Divacancies and Vacancies by Electron Irradiation of Silicon // Phys. Rev. A. 138. 1965. A555.
9. Емцев В.В., Машовец Т.В. Примеси и точечные дефекты в полупроводниках. М.: Радио и связь. 1981. 248 с.
10. Indusekhar H., Kumar V., Sengupta D. Investigation of deep defects due to α -particle irradiation in n-silicon // Phys. Stat. Sol. (a). V.93. N. 2. 1986. P. 645.
11. Pearton S.I., Tavendale A.I. The electrical properties of deep copper and nickel centers in silicon // J. Appl. Phys. V. 54. 1983. P. 1375-1379.
12. Brotherton S.D., Bradley P. Defect production and lifetime control in electron and γ -irradiation silicon // J. Appl. Phys. V. 53. 1982. P. 5720-5732.
13. Tokuda Y., Usami A. Deep-level transient spectroscopy studies of minority carrier traps in neutron-irradiated silicon // J. Appl. Phys. V. 57. 1985. P. 2325-2327.
14. Tokuda Y., Usami A. Comparison of Neutron and 2 MeV Electron Damage in N-Type Silicon by Deep-Level Transient Spectroscopy // IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-28. N.3. 1981. P. 3564-3568.
15. Tokuda Y., Usami A. DLTS studies of neutron damage in p-type silicon // IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-29. N.5. 1982. P. 1388-1392.
16. Денисов А.А., Дорджин Г.С. Лактюшкин В.Н., Садофьев Ю.Г. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней (Практическое применение). Обзоры по электронной технике. Серия 7. Технология, организация производства и оборудование. Вып.8 (1202). 1986. 56 с.

УДК 621.315.592: ГРНТИ 29.19.31

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

М.В. Полагин, В.Г. Мишустин

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

Аннотация. В работе рассмотрены перспективы и пути развития солнечной энергетики на основе неупорядоченных полупроводников. Показаны ключевые преимущества, особенности и ограничения применения аморфных полупроводниковых материалов в качестве фоточувствительного элемента. Дана оценка дальнейшего развития отрасли.

Ключевые слова: фотоэлектрические преобразователи; неупорядоченные полупроводники; p-i-n структура; электрофизические свойства.

DEVELOPMENT OF PHOTOVOLTAIC CONVERTER TECHNOLOGY BASED ON DISORDERED SEMICONDUCTORS

M.V. Polagin, V.G. Mishustin

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

The summary. The paper considers the prospects and ways of developing solar energy based on disordered semiconductors. The key advantages, features and limitations of using amorphous semiconductor materials as a photosensitive element are shown. An assessment of the further development of the industry is given.

Keywords: photovoltaic converters; disordered semiconductors; p-i-n structure; electrophysical properties.

Фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) занимают важное место в электроэнергетике и имеют значительные перспективы для дальнейшего развития. Их применение особенно актуально в труднодоступных районах, где прокладка линий электропередачи невозможна или экономически нецелесообразна. В космической отрасли ФЭП являются практически единственным доступным на текущем этапе источником энергии.

Одним из перспективных направлений развития ФЭП является использование неупорядоченных полупроводников. Эти материалы обладают рядом преимуществ, таких как радиационная стойкость, возможность нанесения на искривленные поверхности большой площади, низкотемпературный процесс производства и относительно низкая стоимость. Однако их основной недостаток – более низкий коэффициент полезного действия (КПД) по сравнению с кристаллическими полупроводниками. Для преодоления этого ограничения предлагается использовать многокаскадные тонкопленочные ФЭП на основе неупорядоченных полупроводников с разной шириной запрещенной зоны. Это позволяет расширить спектр поглощаемого излучения и повысить общую эффективность преобразования энергии.

Неупорядоченные полупроводники, такие как аморфный кремний (a-Si), органические полупроводники и другие материалы с неупорядоченной структурой, представляют значительный интерес для использования в солнечных элементах. Их перспективы связаны с рядом уникальных свойств и потенциальных преимуществ, которые могут сделать их конкурентоспособными по сравнению с традиционными кристаллическими материалами, такими как монокристаллический или поликристаллический кремний. Рассмотрим основные аспекты и перспективы их применения:

1. Гибкость и легкость

Неупорядоченные полупроводники, такие как аморфный кремний или органические материалы, могут быть нанесены на гибкие подложки, что открывает возможности для создания гибких и легких солнечных элементов. Это особенно важно для применения в портативной электронике, носимых устройствах, а также для интеграции в строительные материалы (например, солнечные панели в окнах или фасадах зданий).

2. Низкая стоимость производства

Процессы изготовления неупорядоченных полупроводников, такие как напыление или печать, часто требуют меньших затрат энергии и материалов по сравнению с выращиванием кристаллических структур. Это может значительно снизить стоимость производства солнечных элементов.

3. Широкий спектр поглощения

Аморфные и органические материалы могут быть настроены для поглощения света в различных диапазонах спектра, включая видимый и инфракрасный свет. Это позволяет создавать солнечные элементы с более высокой эффективностью преобразования света в электричество.

4. Возможность создания многослойных структур

Неупорядоченные полупроводники могут быть использованы в тандемных (многослойных) солнечных элементах, где каждый слой поглощает свет на разных длинах волн. Это увеличивает общую эффективность устройства.

5. Применение в новых технологиях

Органические солнечные элементы (OPV) и перовскитные солнечные элементы (которые также могут иметь неупорядоченную структуру) активно исследуются как весьма перспективные. Они обладают высоким потенциалом для достижения высокой эффективности при низкой стоимости.

6. Экологичность

Некоторые неупорядоченные материалы, такие как органические полупроводники, могут быть более экологичными в производстве и утилизации по сравнению с традиционными кремниевыми элементами, которые требуют больших затрат энергии и ресурсов.

Особенности неупорядоченных полупроводников

Нарушение трансляционной симметрии в неупорядоченных полупроводниках приводит к отсутствию дальнего порядка, а также уменьшению длины свободного пробега носителей заряда внутри материала. Для них характерно наличие локализованных энергетических состояний, в которых носители заряда могут находиться. Для перемещения между этими состояниями носителям требуется дополнительная энергия. В результате отношение подвижностей носителей заряда в делокализованных и локализованных состояниях может превышать три порядка. Эти особенности описываются с помощью аналога зонной диаграммы для обычных полупроводников, который называется щелью подвижности. Этот термин отражает разделение состояний на те, где носители могут свободно двигаться (делокализованные состояния), и те, где их движение ограничено (локализованные состояния) [1].

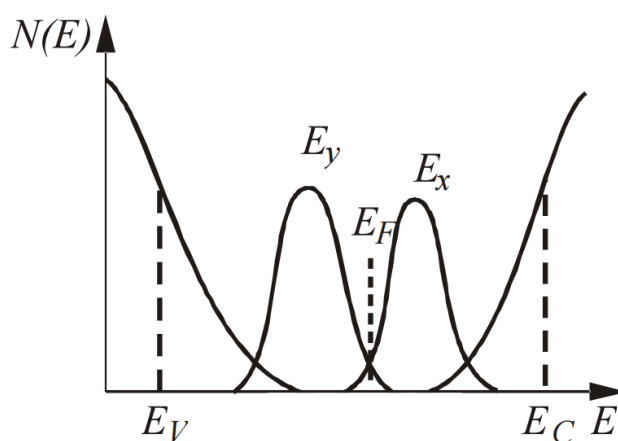


Рис. 1. Модель Мотта - Дэвиса: $E_C - E_V$ - ширина щели подвижности; локализованное состояние донорного (E_y) и акцепторного (E_x) типа одного и того же дефекта [2]

Качественные представления об электронной структуре неупорядоченных полупроводников, включая предположение о наличии хвостов зон в некристаллических материалах, были впервые предложены Губановым А.И. [1] в 1963 году. Согласно исследованиям Мотта [2], в неупорядоченных полупроводниках должны существовать хвосты локализованных состояний на краях валентной зоны и зоны проводимости, а также граничные энергии, разделяющие локализованные состояния от делокализованных. В модели Мотта и Дэвиса (рисунок 1) хвосты локализованных состояний относительно узкие и проникают в запрещенную зону на несколько десятых эВ. Эти хвосты обусловлены разупорядочением структуры материала, и с увеличением степени разупорядоченности их протяженность возрастает, при этом они имеют экспоненциальное распределение.

В модели Мотта-Дэвиса также предполагается, что вблизи середины щели подвижности существуют локализованные состояния, которые фиксируют уровень Ферми в этой области [3]. Это означает, что уровень Ферми в неупорядоченных полупроводниках "закрепляется" вблизи середины запрещенной зоны из-за наличия большого количества локализованных состояний, что существенно влияет на электронные свойства материала.

Солнечные элементы на основе аморфного кремния

Локализованные состояния, через которые могут перемещаться носители заряда, обуславливают особенности электрофизических характеристик а-Si, используемого как основа для создания тонкопленочных солнечных элементов. Так оптическое поглощение в аморфном кремнии в 20 раз выше, чем в монокристаллическом [4, 5]. Кроме того, ширина запрещенной зоны в аморфных материалах может регулироваться в широких пределах за счет введения примесей, что повышает эффективность солнечных элементов, уменьшает их толщину и снижает омические потери, при этом не влияя на напряжение холостого хода. Коэффициент заполнения остается достаточно высоким, а КПД таких элементов всего в 2-3 раза ниже, чем у солнечных элементов на основе кристаллических полупроводников.

Важным преимуществом солнечных элементов из аморфных материалов является возможность их размещения на гибких подложках без значительного ухудшения параметров, влияющих на эффективность. Кроме того, ФЭП на основе неупорядоченных полупроводников экономически более выгодны: их стоимость значительно ниже, а технологический процесс производства проще. В большинстве случаев поглощающие слои таких элементов изготавливаются из аморфного кремния с различными примесями или добавками, что обеспечивает близость кристаллических решеток и надежное соединение слоев. Это делает технологию привлекательной для массового производства и применения в различных условиях.

Способ повышения эффективности солнечных элементов

Одним из способов повышения эффективности солнечных элементов на основе аморфных полупроводников является использование многокаскадной структуры (рисунок 2), где каждая из областей отвечает за свой диапазон поглощений, что позволяет добиться эффективности вплоть до 16,3%, причем его стабильное значение будет равным 13,4%.

При создании кремниевых солнечных элементов с двумя каскадами верхний гетеропереход р-і-п-типа формируют на основе а-Si:H общей толщиной 350 нм (с толщиной і-слоя 250 нм, имеющего ширину запрещенной зоны около 1,7 эВ), а нижний гетеропереход, также р-і-п-типа, формируется на основе mc-Si:H общей толщиной 3 мкм (с толщиной і-слоя 2,5 мкм и значением $E_g = 1,1$ эВ). Данный тип солнечных элементов почти не подвержен световой деградации и характеризуется высоким КПД, равным 12,2%.

Использование в структуре ФЭП материалов а-Si:H и а-SiC:H, обладающих хорошим согласованием «кристаллических» решеток, облегчает нанесение слоев и позволяет уменьшить стоимость производства. Поскольку ширина щели подвижности в а-Si:H и а-SiC:H со-

ставляет 1,75 эВ и 2 эВ, соответственно, это позволяет расширить спектр оптического поглощения.

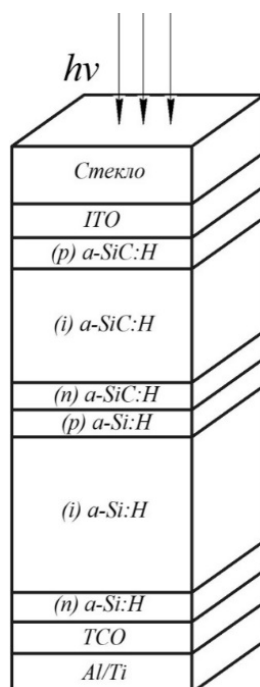


Рис. 2. Структура двухкаскадных ФЭП на основе a-Si:H и a-SiC:H

Перспективы развития

Улучшение стабильности: активные исследования направлены на повышение стабильности и долговечности неупорядоченных материалов.

Гибридные технологии: комбинирование неупорядоченных материалов с традиционными кристаллическими структурами может привести к созданию более эффективных и устойчивых солнечных элементов.

Новые материалы: открытие новых неупорядоченных полупроводников с улучшенными свойствами может значительно расширить их применение.

Неупорядоченные полупроводники имеют большой потенциал для использования в солнечных элементах, особенно в нишевых применениях, где важны гибкость, легкость и низкая стоимость. Однако для широкого внедрения необходимо преодолеть текущие ограничения, связанные с эффективностью и стабильностью.

Таким образом, использование неупорядоченных полупроводников в качестве фоточувствительного элемента солнечных батарей является обоснованным и перспективным путем дальнейшего развития отрасли. Гибкость использования таких структур дает преимущество над «классическими» полупроводниковыми изделиями.

Библиографический список

1. Электронные явления в халькогенидных стеклообразных полупроводниках./ К.Д. Цэндин, Э.А. Сморгонская, Я.П. Серегин и др. СПб.: Наука, 1996. 477 с.
2. Мотт Н., Дэвис Э. Электронные процессы в некристаллических веществах: в 2 т. М.: Мир, 1982. 662 с.
3. Неупорядоченные полупроводники; Учебное пособие/ А.А. Айвазов, Б.Г. Будагян, С.П. Вихров, А.И. Попов; Под ред. А.А. Айвазова. М.: Высшая школа, 1995. 352 с.
4. Афанасьев В. П., Теруков Е. И., Шерченков А. А. Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния. 2-е изд. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2011. 168 с.
5. Hamakawa Y. (Ed.) Thin-Film Solar Cells: Next Generation Photovoltaics and Its Applications Berlin: Springer, 2004. 244 p.

УДК 621.382.2/.3; ГРНТИ 47.09.29

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР

А.В. Васин

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, lexasuper6201@gmail.com

Аннотация. В работе проведен комплексный анализ исследований пористого кремния методами атомно-силовой (АСМ) и сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ). Использование многомодового подхода, включающего контактные, полуконтактные режимы, кельвин-зондовую микроскопию и анализ локальной проводимости, позволило охарактеризовать нанопористую структуру материала с высоким разрешением. Установлена зависимость морфологии и электрофизических свойств от условий синтеза: вариации плотности тока анодирования приводят к изменению топографии поверхности и снижению проводимости наноразмерных пор, обусловленному квантово-размерными эффектами. Выявлена корреляция между распределением поверхностного потенциала и неоднородностью наноструктур. Оптимизация параметров формирования пористого кремния продемонстрировала возможность управления его функциональными характеристиками для применения в электрохимических и фотонных устройствах.

Ключевые слова: пористый кремний, атомно-силовая микроскопия, сканирующая зондовая микроскопия, нанопористые структуры, электрофизические свойства, квантово-размерные эффекты.

INVESTIGATION OF ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF PROMISING SEMICONDUCTOR MICRO- AND NANOSTRUCTURES

A.V. Vasin

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russian Federation, Ryazan, lexasuper6201@gmail.com

Abstract. The paper provides a comprehensive analysis of studies of porous silicon using atomic force (AFM) and scanning probe microscopy (SPM) methods. Using a multimode approach, including contact, semi-contact modes, Kelvin probe microscopy, and local conductivity analysis, it was possible to characterize the nanoporous structure of the material with high resolution. The dependence of morphology and electrophysical properties on synthesis conditions has been established: variations in the anodizing current density lead to a change in surface topography and a decrease in the conductivity of nanoscale pores due to quantum-dimensional effects. A correlation has been revealed between the distribution of the surface potential and the heterogeneity of the nanostructures. Optimization of the parameters of porous silicon formation has demonstrated the possibility of controlling its functional characteristics for use in electrochemical and photonic devices.

Keywords: porous silicon, atomic force microscopy, scanning probe microscopy, nanoporous structures, electrophysical properties, quantum dimensional effects.

Пористый кремний (por-Si, ПК) остается ключевым материалом для микро- и наноэлектроники, сочетая уникальные свойства: регулируемую морфологию, большую удельную поверхность (до 1000 м²/г) и полную совместимость с кремниевыми технологиями.

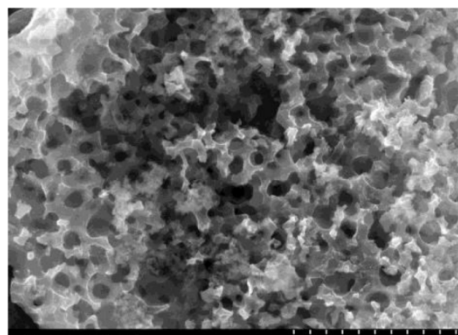


Рис. 1. Структура ПК [1]

Эти особенности делают его незаменимым в разработке сенсоров для детектирования биомолекул, фотонных кристаллов с настраиваемой запрещенной зоной, анодов для высокоёмких литий-ионных батарей и биосовместимых имплантатов. Однако неоднородность структуры (от макропор (>50 нм) до мезопор (2–50 нм)) и сильная зависимость электрофизических свойств от условий синтеза требуют методов, способных одновременно анализировать наноразмерную топографию и локальные электронные характеристики.

Традиционные методы, такие как сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), обеспечивают детальную визуализацию морфологии, но работают в вакууме, что исключает изучение динамики в реальных условиях. Рентгеноструктурный анализ (РСА), хотя и полезен для анализа структуры, не дает информации о локальной проводимости или поверхностных потенциалах. Эти ограничения создают пробел в понимании взаимосвязи «структура-свойства», критичной для оптимизации ПК в экстремальных условиях – от космической электроники до имплантируемых медицинских устройств.

В данной работе продемонстрирован комплексный подход на основе атомно-силовой (АСМ) и сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ). Комбинация режимов контактной АСМ для точной топографии, Кельвин-зондовой микроскопии (КЗМ) для картирования потенциала и токопроводящей АСМ (т-АСМ) для анализа проводимости позволили выявить ключевые корреляции между геометрией пор и их электронными свойствами.

Описание методов и образцов

Исследование ПК методами АСМ и СЗМ базируется на их уникальной способности совмещать наноразмерное разрешение с функциональной диагностикой [1]. В отличие от классических методов (например, СЭМ, ограниченной анализом топографии в вакууме), АСМ/СЗМ позволяют изучать морфологию, электрофизические и механические свойства в условиях, близких к реальным эксплуатационным [2]. Стоит отметить, что авторы [2] правомерно акцентируют преимущества *in-situ*-измерений, однако их анализ ограничивается модельными системами, тогда как данная работа расширяет методологию до структур с аморфной пористостью.

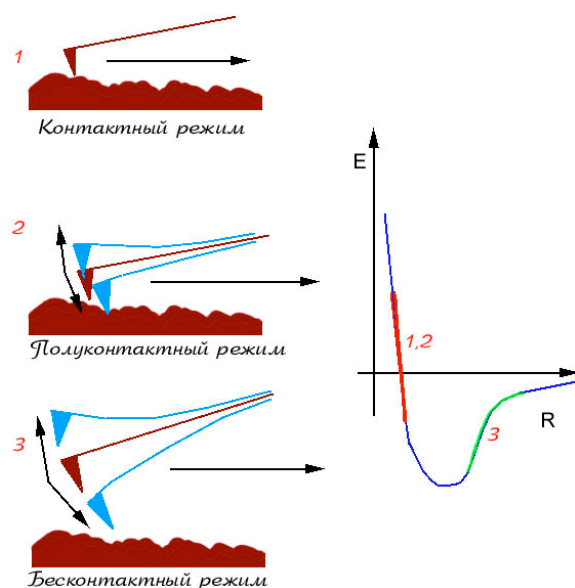


Рис. 2. Методы АСМ и их соотношение с участками кривой действующих сил

Контактный режим АСМ обеспечивает высокоточное картирование рельефа поверхности за счет регистрации сил Ван-дер-Ваальса между зондом и образцом. Этот режим осо-

бенно эффективен для анализа макро- и мезопор (диаметром > 2 нм), но требует осторожности при работе с хрупкими наноструктурами [3]. Несмотря на предупреждения авторов [3] о риске механических повреждений, практические эксперименты показывают, что калибровка силы прижатия зонда (< 1 нН) минимизирует артефакты даже для нанопор с толщиной стенок ~ 5 нм.

Полуконтактный режим минимизирует повреждение образца за счет использования резонансных колебаний кантилевера. Это критично для сохранения целостности нанопор и тонких перегородок в ПК [4].

Кельвин-зондовая микроскопия (КЗМ) является разновидностью бесконтактных методов. Измеряет поверхностный потенциал и работу выхода, выявляя локальные вариации электронных свойств. Для ПК это позволяет связать распределение потенциала с плотностью поверхностных состояний, возникающих из-за окисления или адсорбции молекул [5].

Токопроводящая АСМ (т-АСМ) анализирует распределение проводимости в режиме реального времени. Зонд с проводящим покрытием (Pt/Ir) сканирует поверхность при постоянном смещении, регистрируя ток через каждую нанопору. Это ключевой метод для выявления токовых каналов и зон с повышенным сопротивлением [6].

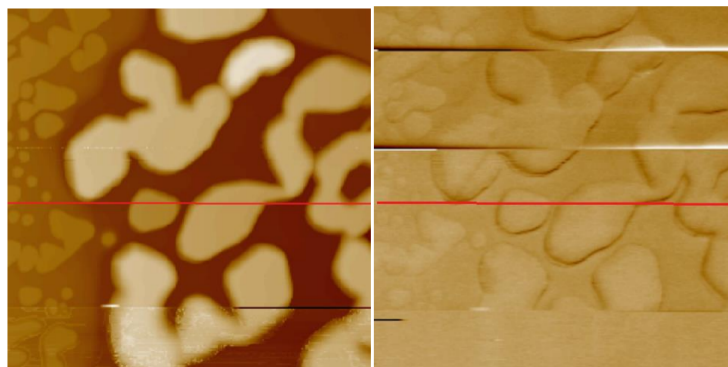


Рис. 3. Пример структуры и карты поверхностных потенциалов ПК, полученных АСМ (КЗМ) [6]

К требуемым преимуществам методов для анализа ПК можно отнести:

- Комплексность. Одновременное получение данных о морфологии (размер пор, шероховатость) и электронных параметрах (проводимость, заряд поверхности). Например, комбинация топографии (АСМ) и карты поверхностного потенциала (КЗМ) выявляет корреляцию между геометрией пор и их электрохимической активностью [7].

- Неразрушающий контроль. Возможность исследования без напыления проводящих покрытий, искажающих структуру ПК. Это критично для изучения нанопор с высоким соотношением поверхность/объем [8].

- Корреляционный анализ. Связь между геометрией пор (например, их диаметром и глубиной) и локальной электронной активностью, что недоступно при использовании СЭМ или рентгеноструктурного анализа (РСА) [9].

Для исследования авторы [9] [10] использовали образцы ПК, полученные электрохимическим анодированием монокристаллического кремния р-типа в растворе HF (48%) с добавлением этанола. Параметры синтеза (плотность тока $10\text{--}100$ мА/см², время травления $5\text{--}30$ мин) варьировались для создания структур с пористостью $50\text{--}85\%$. Отметим, что модель электрохимического травления авторов [9] [10], хотя и полезна для прогнозирования макропор, недооценивает роль поверхностного натяжения электролита в формировании мезопор – это потребовало от них эмпирической коррекции параметров. АСМ/СЗМ-исследования проводились на приборе Bruker Dimension Icon [11] [12] в контролируемой атмосфере (25°C , влажность $< 30\%$). Для т-АСМ использовались зонды SCM-PIT с радиусом острия < 25 нм.

Дополнительная интеграция авторами АСМ/СЗМ с in-situ-методами (например, электрохимическим анодированием) открывает путь к управлению синтезом ПК в реальном времени [13]. Это особенно актуально для создания многослойных структур с заданными свойствами, таких как фотонные кристаллы с регулируемой запрещенной зоной [14] или сенсоры с модифицированной чувствительностью [15].

Результаты и обсуждение

Анализ исследования морфологии и электронных свойств пористого кремния (ПК) методами АСМ/СЗМ позволяет выявить зависимость структуры от параметров синтеза и их влияние на функциональность конкретных устройств.

АСМ-карты образцов, полученных при плотности тока 50 мА/см², демонстрируют биоморфные структуры с порами диаметром 20–50 нм. Увеличение плотности до 100 мА/см² приводит к формированию ветвящихся каналов, что согласуется с моделью электрохимической неустойчивости [15]. Шероховатость (R_q), измеренная методом PeakForce Tapping, возрастает с 1.8 нм (50 мА/см²) до 4.2 нм (100 мА/см²), подтверждая переход от мезопористой к макропористой структуре [16]. Ветвление пор при высокой плотности тока может улучшить ёмкость анодов литий-ионных батарей за счёт увеличения активной поверхности, однако избыточная шероховатость способна привести к механической деградации электрода в ходе циклов заряда-разряда. Это требует оптимизации плотности тока для баланса между ёмкостью и долговечностью.

КЗМ-анализ выявил неоднородность поверхностного потенциала ($\Delta V = 50\text{--}300$ мВ), обусловленную локальными вариациями степени окисления. Области с минимальным потенциалом соответствуют кластерам нанокристаллов Si, выявленным методом ПЭМ [17]. Неравномерность потенциала критична для фотонных кристаллов, где локальные вариации работы выхода могут вызывать неконтролируемое рассеяние света. Это снижает эффективность устройств, таких как оптические резонаторы или светодиоды, требующих однородного распределения электронных свойств. Для минимизации эффекта необходима постобработка поверхности, например, пассивация окислением [17].

Т-АСМ показала, что проводимость пор снижается на порядок при уменьшении их диаметра ниже 10 нм. Это объясняется квантово-размерными эффектами и увеличением поверхностных состояний [8]. В сенсорах на основе ПК, например, для детектирования газов, снижение проводимости нанопор может уменьшить чувствительность. Однако управление размером пор (например, стабилизация диаметра >15 нм) позволяет сохранить высокую проводимость, что важно для создания прецизионных биосенсоров с низким порогом обнаружения.

Сравнение образцов с пористостью 65% и 85% позволяет выявить некоторые корреляции свойств:

- Оптические свойства: Увеличение пористости на 20% снижает отражательную способность в УФ-диапазоне на 40% [11]. Это свойство может быть использовано в УФ-фильтрах для солнечных элементов, где снижение отражения повышает эффективность поглощения света, или в оптических сенсорах для мониторинга УФ-излучения в реальном времени.

- Электрохимическая активность: Плотность тока окисления возрастает с 2.1 до 3.8 мА/см², что связано с увеличением удельной поверхности [9]. Высокая активность делает ПК с пористостью 85% перспективным материалом для суперконденсаторов, где скорость заряда/разряда напрямую зависит от доступной поверхности электрода.

В то же время можно отметить ограничения использованных авторами методов:

- Артефакты АСМ: Игольчатые структуры в макропорах (>100 нм) искажаются из-за конечного радиуса зонда (25 нм) [9] [10]. В производстве нанопористых мембран для филь-

рации наночастиц неточность в определении геометрии пор может привести к дефектам, снижающим селективность разделения. Для коррекции рекомендуется комбинировать АСМ с методами томографии [9].

– Шумы КЗМ: Флуктуации влажности (>50%) вызывают дрейф потенциала на 10–15 мВ/мин [9] [12]. В биосенсорах, работающих в жидких средах (например, для анализа крови), дрейф потенциала может искажать данные о связывании молекул. Решением является интеграция КЗМ с системами контроля микроклимата [9].

Таким образом, полученные результаты демонстрируют, что управление параметрами синтеза ПК (плотность тока, пористость) и коррекция методических ограничений АСМ/СЗМ позволяют оптимизировать материал для конкретных приложений. Например, выбор плотности тока 70–80 мА/см² обеспечивает баланс между шероховатостью и механической стабильностью для анодов батарей, а стабилизация диаметра пор на уровне 15–20 нм повышает точность сенсоров.

Выводы

Проведенный анализ продемонстрировал ключевую роль комбинированного подхода, объединяющего методы атомно-силовой и сканирующей зондовой микроскопии, в изучении взаимосвязи между условиями синтеза, структурой и функциональными свойствами пористого кремния. Использование контактных, полуконтактных режимов и кельвин-зондовой микроскопии позволило не только визуализировать нанометровые особенности морфологии, такие как ветвление пор и распределение нанокристаллических кластеров, но и количественно охарактеризовать их электронные свойства.

Перспективы дальнейшего развития связаны с интеграцией наноструктурированных систем в устройства следующего поколения, включая фотонные кристаллы и гибридные каталитические платформы. Для повышения стабильности материала целесообразно исследовать постсинтетические модификации, такие как осаждение углеродных покрытий или легирование гетероатомами, которые могут нивелировать дефектность и улучшить электронный транспорт. Таким образом, работа не только расширяет фундаментальные представления о взаимосвязи «структура–свойства» в нанопористых системах, но и открывает пути для их практического внедрения в области энергетики, биосенсорики и нанофотоники.

Библиографический список

1. Binnig G., Quate C. F., Gerber Ch. Atomic Force Microscope // *Physical Review Letters*. 1986. Vol. 56, no. 9. P. 930-933.
2. Garcia R. *Scanning Probe Microscopy in Materials Science*. Berlin: Springer, 2020. 478 p.
3. Leite F. L., Santos L. P. Artifacts in AFM Imaging of Biomolecules // *Langmuir*. 2012. Vol. 28, no. 5. P. 2271-2279.
4. Fuchs H., Scharfer P. Dynamic AFM for Nanoscale Material Characterization // *ACS Nano*. 2019. Vol. 13, no. 6. P. 6341-6352.
5. Nonnenmacher M., O'Boyle M. P., Wickramasinghe H. K. Kelvin Probe Force Microscopy // *Applied Physics Letters*. 1991. Vol. 58, no. 25. P. 2921-2923.
6. Kalinin S. V. Local Potential and Polarization Screening in Ferroelectric Thin Films // *Nature Materials*. 2007. Vol. 6, no. 1. P. 21-29.
7. Zhang Y. Correlative AFM and Kelvin Probe Microscopy of Porous Silicon // *Nano Letters*. 2018. Vol. 18, no. 4. P. 2553-2560.
8. Canham L. T. Silicon Quantum Wire Array Fabrication by Electrochemical Dissolution of Wafers // *Applied Physics Letters*. 1990. Vol. 57, no. 10. P. 1046-1048.
9. Lehmann V. *Electrochemistry of Silicon: Instrumentation, Science, Materials and Applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2002. 312 p.
10. Villarrubia J. S. Morphological Estimation of Tip Geometry for Scanned Probe Microscopy // *Surface Science*. 1997. Vol. 321, no. 3. P. 287-300.
11. Bruker Corporation. Nanoscale Roughness Analysis Using PeakForce Tapping Mode: Technical Note. 2023. 15 p.

12. Melitz W. Kelvin Probe Force Microscopy in Ambient Conditions // Surface Science Reports. 2011. Vol. 66, no. 1. P. 1-27.
13. Sailor M. J. Porous Silicon in Practice: Characterization, Chemistry and Applications. Weinheim: Wiley-VCH, 2012. 420 p.
14. Pavesi L. Optical Properties of Porous Silicon: A Review // Materials Today. 2000. Vol. 3, no. 7-8. P. 14-22.
15. Föll H. Formation and Application of Porous Silicon // Materials Science and Engineering: R: Reports. 2002. Vol. 39, no. 4. P. 93-141.
16. Chazalviel J.-N. Electrochemical Principles of Porous Silicon Formation // Journal of The Electrochemical Society. 1999. Vol. 146, no. 9. P. 3307-3315.
17. Bruker Corporation. Quantitative Nanomechanical Mapping of Soft Materials: Application Note. 2021. 12 p.

УДК 621.317.31: ГРНТИ 59.29.35

МОДИФИКАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

В.С. Филяревич, Ю.Д. Гудков

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

Аннотация. В работе рассмотрены особенности методов МКТНФ и Photo-CELIV для исследования полупроводниковых барьерных структур, разработана структурная схема макета модернизированного измерительно-аналитического комплекса для реализации обоих методов, сформулированы требования к отдельным узлам измерительного оборудования.

Ключевые слова: метод МКТНФ, метод Photo-CELIV, неупорядоченные полупроводники, макет измерительно-аналитического комплекса.

MODIFICATION OF THE MEASURING COMPLEX FOR THE STUDY OF FAST-FLOWING TRANSIENT PROCESSES

V.S. Filayrevich, Yu.D. Gudkov

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

Abstract. The paper considers the features of the ICTF and Photo-CELIV methods for the study of superconducting barrier structures, develops a block diagram of the layout of a modernized measuring and analytical complex for the implementation of both methods, and formulates requirements for individual units of measuring equipment.

Keywords: MCCNP method, Photo-CELIV method, disordered semiconductors, a mock-up of a measuring and analytical complex.

Введение

Работа любого полупроводникового прибора определяется происходящими в нем электрофизическими процессами. Активные элементы полупроводниковых структур (диод Шоттки, р-п переход, гетероструктуры и т.д.), определяют технические характеристики как отдельных электронных компонентов, так и конечных устройств в целом.

Электрофизические характеристики активных структур (высота потенциального барьера, профиль распределения электрического поля, емкость и т.д.) определяются распределением пространственного заряда в ОПЗ. Данную информацию можно получить с помощью целого ряда хорошо зарекомендовавших себя экспериментальных методов, таких как ВАХ, ВФХ, РСГУ, АСМ и др.

Однако, данные методики не позволяют получить информацию о непосредственном распределении объемного заряда по ширине ОПЗ. Например, метод ВАХ позволяет определить высоту потенциального барьера, метод ВФХ дает информацию о распределении легирующих примесей по толщине структуры, метод РСГУ позволяет получить распределение

дефектов по энергии и т.д. Объединяя эти результаты, можно получить представление об исследуемой структуре, но полной картины они так и не дают.

Непосредственную информацию о пространственном распределении объемного заряда позволяют получить группа времяпролетных методов. Одним из них является метод компенсации тока нестационарной фотопроводимости (МКТНФ), с помощью которого можно наблюдать переходные процессы в полупроводниковых барьерных структурах. Это единственный экспериментальный метод, который позволяет измерить распределение внутреннего электрического поля в ОПЗ барьерной структуры.

МКТНФ является наиболее точным инструментом для исследования пространственного распределения объемного заряда в барьерных структурах. Это позволяет инженерам и исследователям использовать полученные данные для более глубокого понимания происходящих физических процессов в приборных структурах. В свою очередь, это позволяет вносить корректировки в конструкцию активных элементов и технологию их изготовления. Для реализации данного метода необходимо на исследуемую структуру одновременно воздействовать импульсом монохроматического света и электрическим полем от внешнего источника. При таком включении внутренне контактное поле имеет полярность, противоположную внешнему электрическому полю, в результате происходит компенсация переходного тока [1].

Однако на практике применение данного метода усложняется особенностью неупорядоченных полупроводников. В них нарушена трансляционная симметрия во взаимном расположении атомов, и классическая физика полупроводников работает не в полной мере. Как правило, для описания физических процессов в неупорядоченных полупроводниках используется традиционный математический аппарат, в который вносятся поправочные коэффициенты, которые определяются по результатам анализа большого массива экспериментальных данных [2].

Также важной характеристикой полупроводникового материала является подвижность носителей заряда. В настоящее время существует множество различных методов для ее определения. Но, когда речь идет о тонких плёнках толщиной менее 100 нм, большинство таких методов становятся бесполезными. Одним из наиболее эффективных методов, позволяющих измерить подвижность равновесных носителей заряда в пленках с такой малой толщиной, является метод Photo-CELIV (Charge Extraction by Linearly Increasing Voltage) [3].

Исследования полупроводниковых материалов методом Photo-CELIV проводится следующим образом. Сначала лазерный импульс с соответствующей энергией фотонов возбуждает избыточные носители заряда внутри фотоактивного слоя, а затем они экстрактируются под действием линейно возрастающего напряжения. Для расчета подвижностей носителей заряда измеряется время достижения максимального значения тока [4].

Стоит отметить, что данный метод имеет невысокую воспроизводимость результатов, в первую очередь, из-за сложности объектов исследований – тонкопленочных структур на основе неупорядоченных полупроводников. Экспериментальные структуры должны иметь с одной стороны запирающий контакт, а с другой – омический. Кроме того, определенную трудность представляет обработка экспериментальных данных, результаты которой в значительной степени зависят от параметров, закладываемых в соответствующие математические модели [3].

Оба метода – МКТНФ и Photo-CELIV, – основаны на анализе переходных процессов в исследуемых структурах, происходящих под воздействием оптического излучения и внешнего электрического поля. Они имеют сходство с точки зрения проведения эксперимента, поэтому их можно реализовать на одном измерительно-аналитическом комплексе.

Разработка структурной схемы макета измерительного комплекса для исследования быстропротекающих переходных процессов

На рисунке 1 представлена структурная схема макета измерительно-аналитического комплекса для исследования быстропротекающих переходных процессов.

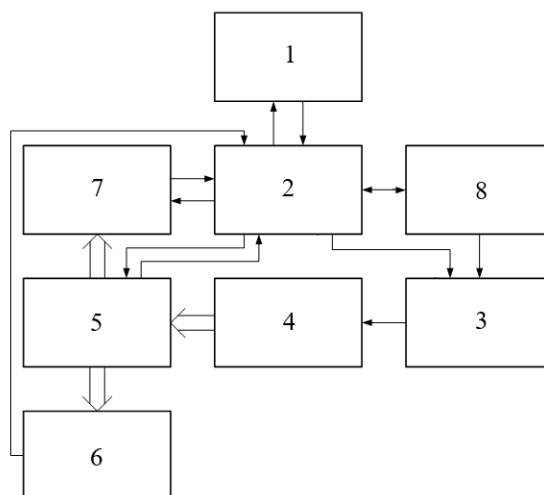


Рис. 1. Структурная схема макета измерительно-аналитического комплекса

В состав структурной схемы входят следующие элементы:

- 1) ЭВМ, оснащенная универсальной интерфейсной платой GPIB и универсальной платой ввода-вывода PCI6361 – предназначена для программного управления измерительными приборами и обработки экспериментальных данных;
- 2) терминальный блок BNC2120 – предназначен для коммутации ЭВМ с измерительными и управляющими цепями;
- 3) высоковольтный источник питания – предназначен для питания импульсного источника света;
- 4) импульсный источник света – предназначен для создания светового потока в видимой, а также ближней УФ и ИК областях спектра;
- 5) монохроматор – предназначен для выделения определенной длины волны из оптического спектра импульсного источника света;
- 6) фотоприемник – предназначен для регистрации и контроля интенсивности монохроматического света;
- 7) измерительная ячейка с прецизионным усилителем – предназначена для размещения образца и усиления измеряемого переходного фототока;
- 8) генератор прямоугольных импульсов – предназначен для процесса отладки макета измерительно-аналитического комплекса МКТНФ/Photo-CELIIV, а также для реализации ручного режима управления экспериментом.

Требования к отдельным узлам измерительного комплекса

Требования к характеристикам отдельных узлов макета измерительно-аналитического комплекса формировались с учетом особенностей физических процессов (поглощение света и процессы переноса зарядов) в тонкопленочных и многослойных полупроводниковых барьерных структурах. Так как большая часть излучения от импульсного источника света не проходит через монохроматор, необходимо разработать импульсный высоковольтный источник питания большой мощности, обеспечивающий генерацию света высокой интенсивности на лампе вспышке. Для эффективного измерения переходного тока нестационарной фотопрово-

димости при методе МКТНФ/ Photo-CELIV по всей толщине структуры необходима лампа вспышка с непрерывным спектром излучения, затрагивающего ультрафиолетовые и инфракрасные области спектра. Быстропротекающие переходный процессы имеют порядок 10 нс, поэтому необходима разработка соответствующей малoshумящей прецизионной измерительной ячейки.

Стоит отметить, что схема измерительной ячейки чувствительна к электромагнитному импульсу, образуемому при срабатывании излучающей лампы и наводкам из городской электросети 50 Гц. Для повышения быстродействия измерительной ячейки важно свести к минимуму значения паразитных емкостей, которые возникают из-за близкого расположения соединительных дорожек между элементами печатной платы. В значительной степени быстродействие измерительной ячейки определяется параметрами усилителя измеряемого сигнала. В данной установке используется прецизионный операционный усилитель AD8066AR, обладающий высоким быстродействием и низким уровнем собственных шумов [5].

Исходя из этого формируются следующие требования к параметрам основных структурных элементов измерительно-аналитического комплекса:

- 1) лампа вспышка – непрерывный спектр излучения в диапазоне 350 – 1250 нм с максимумом интенсивности в красной и ближней ИК областях;
- 2) высоковольтный источник питания – выходное напряжение не менее 10 кВ, пиковая мощность – не менее 150 кВт, средняя мощность – не менее 600 Вт;
- 3) измерительная ячейка – диапазон измеряемых токов 100 пА – 1 мА, длительность нарастания фронта – не более 10 нс [1].

Выводы

Методы МКТНФ и Photo-CELIV имеют общие физические принципы, что делает возможным использование одного универсального измерительно-аналитического комплекса для их экспериментальной реализации. Это существенно упрощает решение поставленной задачи и позволяет получить многофункциональный инструмент для исследования полупроводниковых барьерных структур, в том числе тонкопленочных и многослойных.

Модернизация измерительной ячейки с учетом особенностей объектов исследования существенно повысит технико-эксплуатационные характеристики измерительно-аналитического комплекса, реализующего методы МКТНФ и Photo-CELIV. Новые схемотехнические решения при модернизации измерительной ячейки (оптимизация топологии печатной платы, применение высокоскоростного прецизионного усилителя) позволят повысить ее быстродействие, т.е. появится возможность исследовать более короткие переходные процессы, а значит, расширит номенклатуру исследуемых объектов в сторону более проводящих материалов.

Работа выполнена с использованием научного оборудования Рязанского центра зондовой микроскопии коллективного пользования РГРТУ им. В.Ф. Уткина.

Библиографический список

1. Гудков Ю.Д., Мишустин В.Г. Развитие методики исследования многослойных барьерных наноструктур при оптическом и электрическом возбуждении структур // В сборнике: Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2023. Сборник трудов VI Международного научно-технического форума: в 10 т. Том 2. Рязань, 2023. С. 76-81.
2. В.Г. Мишустин, А.Г. Романов Полупроводниковые барьерные наноструктуры: теория и практика эксперимента // Межвузовский сб. научных трудов «Физика полупроводников. Микро-электроника. Радиоэлектронные устройства». Рязань: РГРТУ, 2018. С. 33– 40.
3. Мишустин В.Г., Назимов Д.Р. Метод CELIV: перспективы и особенности применения для исследования неупорядоченных полупроводников// В сборнике: Современные технологии в науке и образовании - СТНО-

2020. Сборник трудов III Международного научно-технического форума: в 10 т. Том 2. Рязань, 2020. С. 109-112.

4. J. Vazgela, K. Genevicius, G. Juška I-CELIV technique for investigation of charge carriers transport properties // Chemical Physics. Vol. 478, 2016, P. 126-129.

5. Кусакин Д.С., Мишустин В.Г., Романов А.Г. Модернизация измерительно-аналитического комплекса для исследования полупроводниковых барьерных наноструктур // Труды IX Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур»: сборник. Рязань: РГРТУ, 2017. Т. II. С. 19 – 23.

СЕКЦИЯ «ПРОМЫШЛЕННАЯ СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ»

УДК 620.9.001.5; ГРНТИ 44.01.77

АКТИВИЗАЦИЯ БАЗОВОГО ВЕКТОРА ВНУТРИ ПЕРИОДА МОДУЛЯЦИИ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ НА БАЗЕ БЕСКОНТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

О.А. Киселёва, Д.А. Баранников, Д.Д. Киселёва

Воронежский государственный технический университет,
Российская Федерация, Воронеж, kis.ola@mail.ru

Аннотация. В работе рассматривается вопрос активизация базового импульса внутри периода модуляции в электроприводе на базе бесконтактного двигателя постоянного тока. Показано, что применение различных алгоритмов активизации влияет по статические и динамические характеристики электропривода. Приведены результаты исследования электропривода на базе бесконтактного двигателя постоянного тока.

Ключевые слова: электропривод, бесконтактный двигатель постоянного тока, базовый и нулевой импульсы

ACTIVATION OF THE BASIC PULSE WITHIN THE MODULATION PERIOD IN AN ELECTRIC DRIVE BASED ON A NON-CONTACT DC MOTOR

O.A. Kiseleva, D.A. Barannikov, D.D. Kiseleva

Voronezh State Technical University,
Russian Federation, Voronezh, kis.ola@mail.ru

Annotation. The paper discusses the activation of the basic pulse within the modulation period in an electric drive based on a non-contact DC motor. It is shown that the use of various activation algorithms affects the static and dynamic characteristics of the electric drive. The results of the study of an electric drive based on a non-contact DC motor are presented.

Keywords: electric drive, non-contact DC motor, basic and zero pulses

Управление бесконтактным двигателем постоянного тока (БДПТ) строится на чередовании базовых и нулевых векторов, которые формируются инвертором путем переключения силовых транзисторов.

Переключая базовые вектора и чередуя их с ориентированными нулевыми векторами можно получить управляющий вектор напряжения при прохождении ротором одного сигнального сектора, применяя различные алгоритмы управления.

Полученный вектор напряжения формирует токовое вращающееся поле, которое создает электромагнитный момент в двигателе, при этом эффект от сформированного напряжения может отличаться по многим параметрам, таким как:

- количество переключений силовых ключей инвертора за один сигнальный сектор;
- величиной пульсаций электромагнитного момента или тока, создаваемого полем статора;
- степенью симметрии управления фазными токами с помощью инвертора;
- коэффициентом использования ключей инвертора по нагрузочной способности;
- особенностью нагрузки на питающую сеть.

В работе [1] рассмотрены методы для асинхронных электроприводов с позиции обеспечения электромеханической совместимости. Для БДПТ эти исследования не проводились, особенно с позиции анализа процессов за время прохождения ротором сигнального сектора.

Наибольший интерес представляет момент пуска БДПТ, то есть его нахождение в первом сигнальном секторе, когда скорость ротора еще была равна нулю, что является одной из важных характеристик электропривода, применяемого для винтов квадрокоптера [2]. Если за основу анализа процессов взять уравнение механической характеристики БДПТ.

$$M_{эм} = \frac{pmC_e\Phi_0}{\omega^2 L^2 + r^2} [U(r \cos \theta + \omega L \sin \theta) - rC_e\Phi_0\omega]. \quad (1)$$

В формуле (1) обозначено:

$M_{эм}$ – электромагнитный момент, развиваемый двигателем;

C_e, Φ_0, r, L, m – параметры электрической машины;

θ – угол, который влияет на величину электромагнитного момента, зависит от поля ротора по отношению к полю статора.

При формировании пускового момента, когда скорость ещё равна нулю, проявление ускорения (первая производная станет больше нуля) при нахождении вектора поля ротора в сигнальном секторе, продолжается переходный процесс по току в фазах до тех пор, пока ротор не перейдет в следующий сектор.

Электромагнитный момент, при частоте вращения равной нулю, примет вид

$$M_{эм} = \frac{pmC_e\Phi_0}{r} [U(\cos \theta)] \quad (2)$$

Воздействовать на величину электромагнитного момента $M_{эм}$ можно изменением амплитуды напряжения или угла θ . Сигнальный сектор равен 60°, наибольшие значения электромагнитного момента $M_{эм}$ получим при $\theta \in [60^\circ; 120^\circ]$, при сохранении устойчивой работы при $\theta = \frac{\pi}{2} \pm \frac{\phi_0}{2}$.

Если считать, что угол между полем ротора и статора определяет эффективность взаимодействия полей, то в сигнальном секторе при наивыгоднейшем управлении коэффициент эффективности $K_{эф}$ лежит в пределах $0,86 \leq K_{эф} \leq 1$ и выполняется условие устойчивой работы БДПТ.

Проанализируем изменение скорости от амплитуды напряжения

$$\frac{\partial \omega}{\partial U} = - \frac{r \cos \theta - \omega L \sin \theta}{L \cdot U \sin \theta - r \cdot C_e \cdot \Phi_0 - \frac{2\omega L^2 (U \cdot (r \cos \theta + \omega L \sin \theta) - rC_e\Phi_0\omega)}{\omega^2 L^2 + r^2}}. \quad (3)$$

Как видно из уравнений (3) и (4), даже при амплитудной модуляции электромагнитный момент и развиваемая скорость зависит от угла между полем ротора и статора

$$\frac{\partial \omega}{\partial \theta} = - \frac{U(\omega L \cos \theta - r \sin \theta)}{L \cdot U \sin \theta - r \cdot C_e \cdot \Phi_0 - \frac{2\omega L^2 (U \cdot (r \cos \theta + \omega L \sin \theta) - rC_e\Phi_0\omega)}{\omega^2 L^2 + r^2}}. \quad (4)$$

Наибольшая чувствительность БДПТ может быть достигнута при формировании вектора магнитного поля статора перпендикулярно вектору магнитного поля ротора.

При рассмотрении активизацию базового импульса внутри периода модуляции возникает вопрос об оптимизации выбора этого периода. В преобразователях частоты для электродвигателей переменного тока задается диапазон частот модуляции, иногда тот диапазон очень широкий. В этом случае приходится решать вопрос о том, сколько раз один и тот же базовый вектор может повторяться без переключения на другие. На низких скоростях это будет чаще, чем на высоких скоростях. Если активизация базового вектора происходит в одном сигнальном секторе, то пространственное расположение нулевых векторов (двигатель отключен от источника питания с помощью инвертора) будет без изменений. Изменение пространственного положения базовых векторов произойдет только при перемещении рото-

ра в следующий сигнальный сектор, в котором для получения оптимальных режимов, связанных с величиной угла между полем ротора и статора, предполагает переход на новый базовый вектор [3 - 5].

В этих случаях состояние базового вектора можно рассматривать как пульсирующее, но для получения рабочего токового поля, которое создает электромагнитный момент, пульсации необходимо свести к минимальному значению. Отсюда следует, что обмотки двигателя должны выступать в качестве звена, которое преобразует импульсный сигнал напряжения в токовый непрерывный, на базе которого формируется электромагнитный момент.

На рисунке 1 показаны зависимости электромагнитного момента от угла θ между полем ротора и статора, а на рисунке 2 – зависимость скорости от расположения базового вектора. На рисунке 3 показана зависимость оптимального угла опережения поля ротора от момента нагрузки.

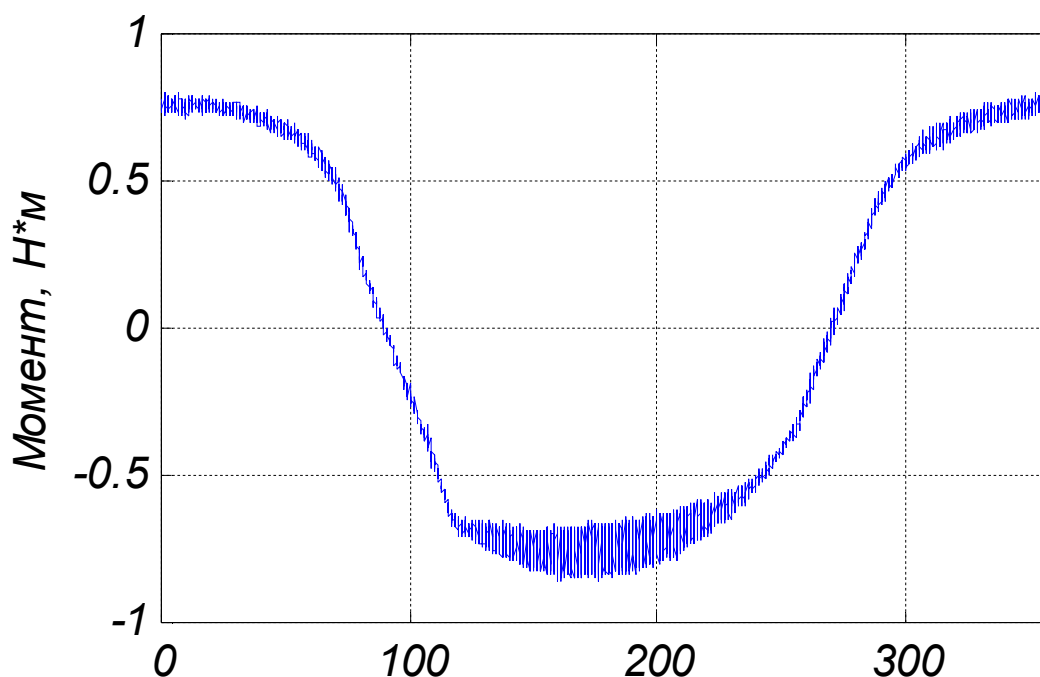


Рис. 1. Зависимость момента от угла

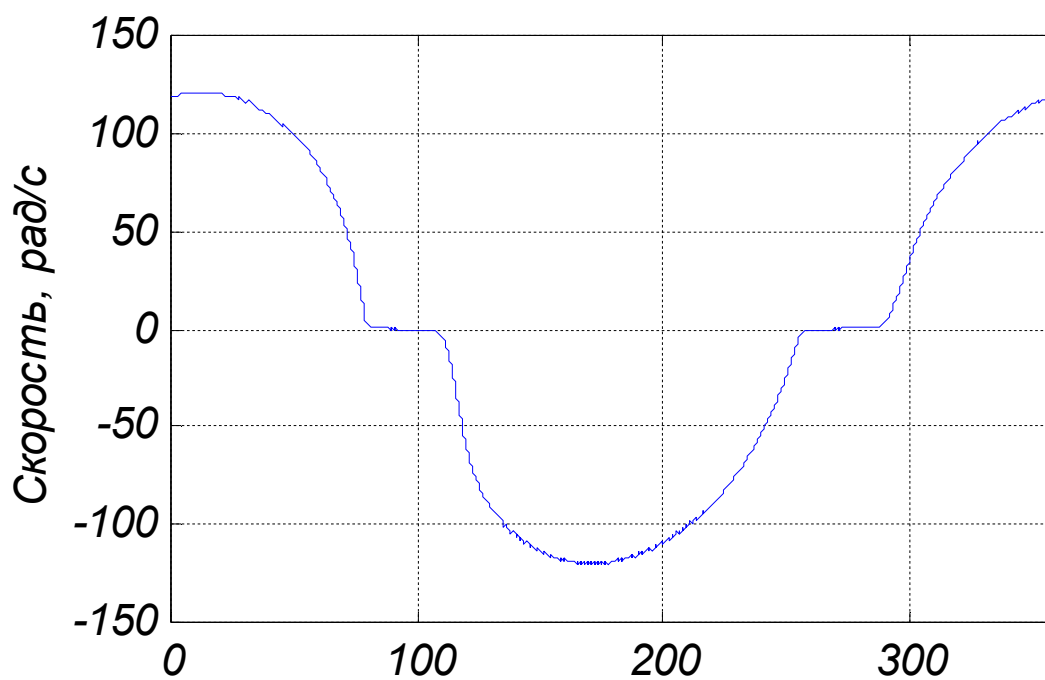


Рис. 2. Зависимость скорости от расположения базового вектора

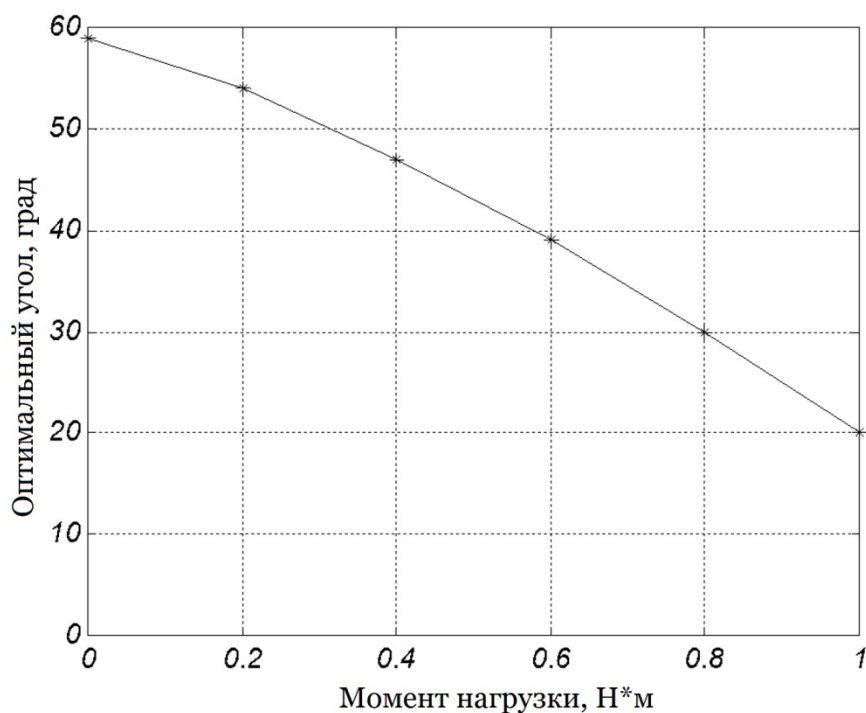


Рис. 3. Зависимость оптимального угла опережения поля ротора от момента нагрузки

Нулевой вектор не использует энергию источника, за время его существования рассеивается электромагнитная энергия, накопленная в индуктивностях.

Скорость рассеивания зависит от активного сопротивления и индуктивности контура, предусмотренного для протекания тока при отключении обмоток от источника питания.

Отсюда следует, что процесс управления током, протекающим в обмотках БДПТ, может также определяться процессом рассеивания накопленной электромагнитной энергии при пульсации базового вектора и определять стабильность мгновенной скорости вращения.

Библиографический список

1. Татаринов, Д.Е., Козярук, А.Е. Алгоритмические методы обеспечения электромеханической совместимости асинхронных электроприводов при питании от преобразователей частоты / Д.Е. Татаринов, А.Е. Козярук // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 77-83. DOI: 10.14529/power160410
2. Киселёва Д.Д., Баранников Д.А., Лебедева А.В., Киселёва О.А. Система управления в электроприводе с бесконтактным двигателем постоянного тока для электрической тяги беспилотного летающего аппарата. Студент и наука. 2023. № 1 (24). С. 76-79.
3. Киселёва, О.А., Винокуров, С.А., Киселёва, Д.Д. Позиционно-следающая 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://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=xxx> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.32.1.xxx
5. Киселёва Д.Д., Баранников Д.А., Лебедева А.В., Киселёва О.А. Система управления в электроприводе с бесконтактным двигателем постоянного тока для электрической тяги беспилотного летающего аппарата. Студент и наука. 2023. № 1 (24). С. 76-79.

УДК 621.311; ГРНТИ 44.29.29.

РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В СЕТИ 6-35 КВ

В.В. Комаров, Е.В. Сливкин

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

Аннотация. В работе рассматриваются основные методы расчетов токов короткого замыкания в сети с изолированной нейтралью. Приводятся эквивалентные схемы и пример расчетов.

Ключевые слова: ток короткого замыкания, изолированная нейтраль, схема замещения, расчет.

CALCULATION OF SHORT CIRCUIT CURRENTS IN 6-35 KV NETWORK

V.V. Komarov, E.V. Slivkin

*Ryazan State Radiotechnical University named after V.F. Utkin,
Russian Federation, Ryazan, vladmirkomarovrza@gmail.com*

Annotation. The paper discusses the main methods for calculating short-circuit currents in a network with an isolated neutral. Equivalent diagrams and an example of calculations are given.

Key words: short circuit current, isolated neutral, equivalent circuit, calculation.

Расчет токов короткого замыкания является важным этапом, по результатам которого выбирается первичное оборудование подстанции и осуществляется расчет уставок релейной защиты.

Наиболее распространёнными сетями класса напряжения 6-35 кВ на территории Российской Федерации являются сети с изолированной нейтралью. Для данных сетей короткими замыканиями являются только трехфазные и двухфазные замыкания. Однофазные замыкания, в свою очередь, можно назвать «длинными», их токи в разы меньше, чем при двухфазных и трехфазных коротких замыканиях.

Существует множество методик осуществления расчетов ТКЗ в сети 6-35 кВ. В данной работе представлен результат анализа многих методик, а также представлен многолет-

ний опыт практических расчетов, накопленных в филиале ПАО «Россети Центр и Приволжье» - «Рязаньэнерго». Представленная методика является наиболее полной, что позволяет полностью осуществить расчет токов короткого замыкания с учетом состояния системы, а также положения устройств РПН и ПБВ с различными их модификациями.

Схема замещения

Перед расчетом токов коротких замыканий для любого присоединения необходимо составить схему замещения. Расчет параметров необходимо осуществлять в именованных величинах. В качестве примера рассмотрим элемент системы на рисунке 1.

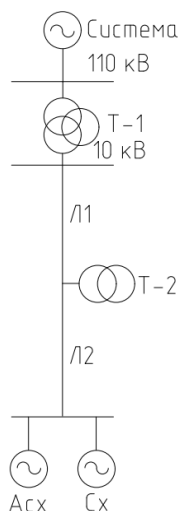


Рис. 1. Расчетная схема

В таблице 1 зададим параметры каждого элемента схемы.

Таблица 1. Параметры элементов схемы

Элемент	Тип	Параметры
Система	ЕЭС РФ	Максимум: $U=121,5$ кВ $R=5,364$ Ом $X=12,215$ Ом Минимум: $U=115$ кВ $R=20,212$ Ом $X=36,204$
Т-1	ТДТН-25000/110	$U_{кзвн-нн}=17\%$ $R_{кз}=140$ кВт РПН ± 9 на $1,78\%$
Л1	АС-70	$l=3$ км $x=0,275$ Ом $r=0,46$ ом
Т-2	ТМ-1000	$U_{кз}=6\%$
Л2	АС-50	$l=2$ км $x=0,362$ Ом $r=0,592$ Ом
Асх	Асинхронный двигатель	$S=1250$ кВА $Kп=6,48$
Сх	Синхронный двигатель	$S=630$ кВА $Kп=7$

Для энергосистемы характерны два крайних состояния – минимальное и максимальное. Состояние зависит от количества введенного электрооборудования. При расчетах важно учесть оба состояния, так как уставки релейной защиты рассчитываются для наихудших вариантов. Максимальный режим используется для отстройки максимальных токовых защит, минимальный режим используется для проверки чувствительности защиты.

Система имеет как активное, так и реактивное сопротивление. Активным сопротивлением, при расчете токов короткого замыкания, допустимо пренебрегать, так как они оказывают малое влияние на результаты расчетов, но в данной работе они будут учтены.

Силовой трансформатор ТДТН-25000/110 является трехобмоточным. Схемы замещения силовых трансформаторов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Схемы замещения силовых трансформаторов

Трансформатор	Графическое обозначение	Схема замещения
Двухобмоточный		
Трехобмоточный с СН		
Двухобмоточный с расщепленной обмоткой по стороне НН		

Составим схему замещения для показанной системы электроснабжения, отобразим ее на рисунке 2.

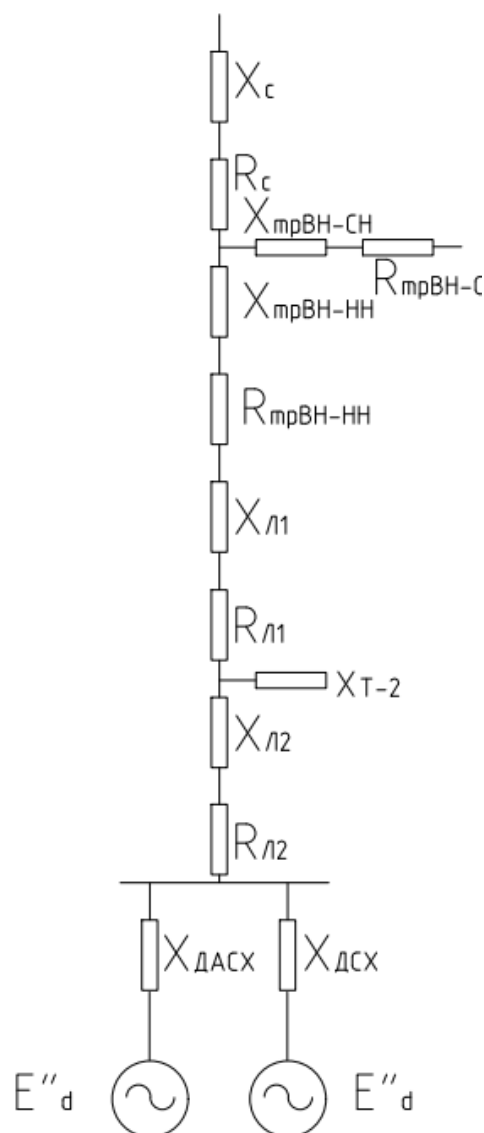


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения

Выполним расчет параметров.

1. Расчет реактивного сопротивления силового трансформатора 110/35/10 кВ

При расчете важно учитывать место установки устройства РПН и ПБВ.

Выполним расчет по методике М.А. Шабада. Расчет осуществляется по формуле 1.

$$x_{\text{тр ном}} = \frac{U_{\text{кз ном}} \cdot U_{\text{номВН}}^2}{100 \cdot S_{\text{ном}}}, \quad \#(1)$$

где $U_{\text{кз ном}}$ – номинальное значение напряжение короткого замыкания;

$U_{\text{номВН}}$ – номинальное значение стороны высокого напряжения;

$S_{\text{ном}}$ – значение полной мощности трансформатора.

Осуществим расчет для трансформатора ТДТН-25000/110.

$$x_{\text{тр ном}} = \frac{17 \cdot 115^2}{100 \cdot 25} = 89,93 \text{ Ом}.$$

Для трансформаторов, у которых устройство РПН установлено по стороне высокого напряжения, справедливы следующие выражения.

Если нам известны значения $U_{\text{кзmax}}$ и $U_{\text{кзmin}}$, то расчет можно произвести по формулам 2 и 3.

$$x_{\text{тр мин}} = \frac{U_{\text{кз мин}} \cdot [U_{\text{номВН}} \cdot (1 - \Delta U)]^2}{100 \cdot S_{\text{ном}}}; \quad \#(2)$$

$$x_{\text{тр макс}} = \frac{U_{\text{кз макс}} \cdot [U_{\text{номВН}} \cdot (1 + \Delta U)]^2}{100 \cdot S_{\text{ном}}}, \quad \#(3)$$

где ΔU – положение РПН.

Если значения $U_{\text{кзmax}}$ и $U_{\text{кзmin}}$ неизвестны, а РПН имеет значения $\pm 9\text{X}1,78\%$, то расчет можно осуществить по формулам 4 и 5.

$$x_{\text{тр мин}} = x_{\text{тр ном}} \cdot (1 - \Delta U)^3, \quad \#(4)$$

$$x_{\text{тр макс}} = x_{\text{тр ном}} \cdot (1 + \Delta U)^3. \quad \#(5)$$

Значение 3 степени справедливо только для трансформаторов с глубоким регулированием ($\pm 9\text{X}1,78\%$), для всех остальных необходимо применять 2 степень.

$$x_{\text{тр макс}} = 89,93 \cdot 1,16^3 = 121 \text{ Ом}.$$

$$x_{\text{тр мин}} = 89,93 \cdot 0,84^3 = 63,45 \text{ Ом}.$$

Согласно книге [2] Шабад М.А. ограничивает верхнее положение РПН на уровне 126 кВ.

В филиале ПАО «Россети Центр и Приволжье» - «Рязаньэнерго» введено ограничение на отпайку РПН на уровне $+3 \text{ X } 1,78$, а расчет необходимо производить по рекомендациям Федорова по формулам 6 и 7. По стороне низшего напряжения ограничений нет.

$$x_{\text{тр мин}} = x_{\text{тр ном}} \cdot K_{\text{рпн}}, \quad \#(6)$$

$$x_{\text{тр макс}} = x_{\text{тр ном}} \cdot K_{\text{рпн}}. \quad \#(7)$$

где $K_{\text{рпн}}$ – коэффициент положения РПН.

$$x_{\text{тр мин}} = 89,93 \cdot 0,69 = 62,05 \text{ Ом};$$

$$x_{\text{тр макс}} = 89,93 \cdot 1,13 = 101,62 \text{ Ом}.$$

В случае, если РПН или ПБВ установлено по стороне низкого напряжения, то расчет сопротивлений с учетом данных устройств не осуществляется, задается значение сопротивления трансформатора по формуле 1.

2. Расчет активного сопротивления силового трансформатора.

Расчет осуществляется по формуле 8. Активным сопротивлением трансформатора допустимо пренебрегать.

$$R_{\text{тр ном}} = \frac{\Delta P_{\text{кз}} \cdot U_{\text{номВН}}^2}{S_{\text{ном}}^2}, \quad \#(8)$$

$$R_{\text{тр ном}} = \frac{140 \cdot 115^2}{25^2} = 2,96 \text{ Ом}.$$

3. Расчет сопротивлений воздушных линий.

Расчет необходимо осуществлять по формулам 9 и 10.

$$X_{\text{л}} = x_0 \cdot l, \quad \#(9)$$

$$R_{\text{л}} = r_0 \cdot l. \quad \#(10)$$

Для линии 1:

$$X_{\text{л1}} = 0,275 \cdot 3 = 0,825 \text{ Ом}.$$

$$R_{\text{л1}} = 0,46 \cdot 3 = 1,38 \text{ Ом}.$$

Для линии 2:

$$X_{\text{л2}} = 0,362 \cdot 2 = 0,764 \text{ Ом}.$$

$$R_{\text{л2}} = 0,592 \cdot 2 = 1,184 \text{ Ом}.$$

4. Расчет сопротивления трансформатора Т-2.

Данный трансформатор является двухобмоточным, следовательно, для расчета применима формула 1.

$$x_{\text{тр ном}} = \frac{6 \cdot 10^2}{100 \cdot 1} = 6 \text{ Ом}.$$

5. Расчет сопротивления и параметров электродвигателей.

Выполним расчет сверхпереходного сопротивления по формуле 11.

$$x''_d = \frac{1}{K_{\text{п}}}, \quad \#(11)$$

где $K_{\text{п}}$ – коэффициент кратности пуска.

$$x''_{d\text{ACX}} = \frac{1}{6,48} = 0,154,$$

$$x''_{d\text{CX}} = \frac{1}{7} = 0,143.$$

Выполним расчет сопротивления электродвигателей по формуле 12.

$$X_{\text{дв}} = x''_d \cdot \frac{U^2}{P}, \quad \#(12)$$

$$X_{\text{дв ACX}} = 0,154 \cdot \frac{10^2}{1,43} = 10,77 \text{ Ом},$$

$$X_{\text{дв CX}} = 0,143 \cdot \frac{10^2}{0,724} = 19,75 \text{ Ом}.$$

Выполним расчет эквивалентного сопротивления электродвигателей по формуле 13.

$$X_{\text{экв дв}} = \frac{X_{\text{дв ACX}} \cdot X_{\text{дв CX}}}{X_{\text{дв ACX}} + X_{\text{дв CX}}}, \quad \#(13)$$

$$X_{\text{экв дв}} = \frac{10,77 \cdot 19,75}{10,77 + 19,75} = 6,96 \text{ Ом}.$$

Выполним расчет сверхпереходной ЭДС по формуле 14.

$$E''_d = E''_{d*} \cdot U_{ном}, \quad \#(14)$$

$$E''_{d*} = \frac{\left(\frac{E''_{dACX}}{x''_{dACX}} \right) + \left(\frac{E''_{dCX}}{x''_{dCX}} \right)}{\frac{1}{X_{эв дВ}}},$$

где $E''_{dACX} = 0,9$, $E''_{dCX} = 1,1$

$$E''_{d*} = \frac{\left(\frac{0,9}{10,77} \right) + \left(\frac{1,1}{19,75} \right)}{\frac{1}{6,96}} = 1,03,$$

$$E''_d = 1,03 \cdot 10000 = 10300 \text{ В}.$$

Расчет токов короткого замыкания.

1. Расчет токов короткого замыкания на шинах подстанции по стороне низшего напряжения.

Составим эквивалентную схему, представим ее на рисунке 3.

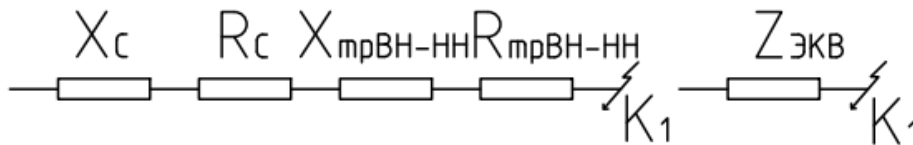


Рис. 3. Схема замещения для точки K1

Выполним расчет трехфазного тока короткого замыкания для максимального и минимального режимов по формулам 15 и 16.

$$I_{кз max}^{(3)} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(X_{сmax} + X_{трmin})^2 + (R_{сmax} + R_{тр})^2}}, \quad \#(15)$$

$$I_{кз min}^{(3)} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(X_{сmin} + X_{трmax})^2 + (R_{сmin} + R_{тр})^2}}, \quad \#(16)$$

$$I_{кз max}^{(3)} = \frac{121,5}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(12,215 + 62,05)^2 + (5,364 + 2,92)^2}} = 937 \text{ А},$$

$$I_{кз min}^{(3)} = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(36,204 + 101,62)^2 + (20,212 + 2,92)^2}} = 475,1 \text{ А}.$$

Данные значения получены для напряжения 115 кВ, необходимо привести их к напряжению 11 кВ по формулам 17 и 18. Значения напряжения необходимо брать из паспортных данных трансформатора.

$$I_{кз max11}^{(3)} = \frac{U_{minBH}}{U_{HH}} \cdot I_{кз max110}^{(3)}, \quad \#(17)$$

$$I_{кз min11}^{(3)} = \frac{U_{maxBH}}{U_{HH}} \cdot I_{кз min110}^{(3)}, \quad \#(18)$$

$$I_{\text{кз max11}}^{(3)} = \frac{96,6}{11} \cdot 937 = 8228,56 \text{ A},$$

$$I_{\text{кз max11}}^{(3)} = \frac{121,5}{11} \cdot 475,1 = 5247,7 \text{ A}$$

В связи с преобладанием в системе реактивного сопротивления, для дальнейших расчетов зададим значения $x_{\text{сmax}}$ и $x_{\text{сmin}}$ по формулам 19 и 20:

$$x_{\text{с max}} = \frac{U_{\text{с.ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{кз max}}^{(3)}}, \quad \#(19)$$

$$x_{\text{с min}} = \frac{U_{\text{с.мин}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{кз min}}^{(3)}}, \quad \#(20)$$

где $U_{\text{с.ном}}$ – номинальное напряжение системы;

$U_{\text{с.мин}}$ – реальное значение напряжения системы в минимальном режиме.

$$x_{\text{с max}} = \frac{11000}{\sqrt{3} \cdot 8228,56} = 0,7727 \text{ Ом},$$

$$x_{\text{с min}} = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 5247,7} = 1,01 \text{ Ом}.$$

2. Выполним расчет токов короткого замыкания на отпайке сетевого трансформатора. Составим эквивалентную схему, представим ее на рисунке 4.

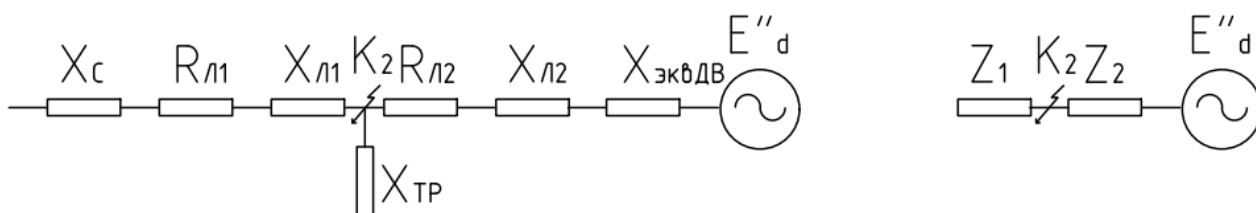


Рис. 4. Схема замещения для точки К2

Выполним расчет токов трехфазного короткого замыкания.

$$I_{\text{кз max}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(X_{\text{сmax}} + X_{\text{Л1}})^2 + R_{\text{Л}}^2}} = \frac{11000}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(0,772 + 0,825)^2 + 1,38^2}} = 3008,96 \text{ A},$$

$$I_{\text{кз min}}^{(3)} = \frac{U_{\text{мин}}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(X_{\text{сmin}} + X_{\text{Л1}})^2 + R_{\text{Л}}^2}} = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(1,1 + 0,825)^2 + 1,38^2}} = 2437,56 \text{ A}.$$

Электродвигатели при потере напряжения сохраняют остаточное напряжение на линии, это необходимо учитывать.

Рассчитаем значения токов короткого замыкания с учетом подпитки от электродвигателей.

$$Z_{\text{экв}} = \sqrt{((X_{\text{ДВ}} + X_{\text{Л2}})^2 + R_{\text{Л}}^2)} = \sqrt{((6,96 + 0,764)^2 + 1,184^2)} = 7,814 \text{ Ом},$$

$$I_{\text{кз подпитки}}^{(3)} = \frac{E''d}{\sqrt{3} \cdot Z_{\text{экв}}} = \frac{10300}{\sqrt{3} \cdot 7,814} = 761,03 \text{ A}$$

С учетом тока подпитки:

$$I_{\text{кз max}}^{(3)} = 3008,96 + 761,03 = 3769,99 \text{ А.}$$

Для системы с изолированной нейтралью справедливо выражение 21, согласно которому ток двухфазного короткого замыкания равен 0,87 от значения трехфазного тока короткого замыкания.

$$I_{\text{кз}}^{(2)} = 0,87 \cdot I_{\text{кз}}^{(3)}. \quad \#(21)$$

Библиографический список

1. Небрат И.Л. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты.
2. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. – 3-е изд., перераб. И доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1985 – 296 с., ил.

УДК 621.386.22; ГРНТИ 29.31.15

ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ ТРЕНИРОВКА МИКРОФОКУСНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКИ

Е.А. Козлов, Е.Ю. Грачев

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

Аннотация. В работе приводятся основные характеристики различных диэлектрических материалов, используемых в промышленности для электрической высоковольтной изоляции. Рассматриваются методы высоковольтной изоляции рентгеновской трубки на основе твердых компаундов и жидких диэлектриков. В работе описана процедура тренировки рентгеновской трубки с применением высоковольтного генератора Spellman XRF160. Приведены результаты тренировки микрофокусной рентгеновской трубки.

Ключевые слова: микрофокусная рентгеновская трубка, изоляционный кремнийорганический компаунд, иммерсионная жидкость, высоковольтная тренировка.

HIGH VOLTAGE TRAINING OF MICROFOCUS X-RAY TUBE

E.A. Kozlov, E.Yu. Grachev

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

The summary. The paper describes the procedure of high-voltage training of an X-ray tube. The main characteristics of various dielectric materials used in industry for high-voltage electrical insulation are given. Methods of high-voltage insulation of an X-ray tube based on solid compounds and liquid dielectrics are considered. The paper describes the design of a stand for training an X-ray tube based on a Spellman XRF160 high-voltage generator. The results of training a microfocus X-ray tube are given.

Keywords: microfocus x-ray tube, insulating organosilicon compound, immersion liquid, high voltage training.

Рентгеновские трубки являются вакуумными необслуживаемыми приборами. Поддержание приемлемого уровня вакуума в трубках обеспечивается за счет герметичности сварных и паяных соединений, а также за счет тщательного подбора и подготовки используемых материалов. После завершения процессов откачки внутреннего объема и его изолирования от внешней среды, трубка подлежит обязательным испытаниям. Целью данных испытаний является проверка параметров трубки на соответствие заявленным характеристикам и заключение о годности или негодности прибора к эксплуатации. При проведении испытаний рентгеновские трубки в первую очередь проходят длительную процедуру высоковольт-

ной тренировки, в ходе которой добиваются получения высокого пробивного напряжения. В течение тренировки вакуумный участок катод-анод трубки испытывает большое количество тренировочных пробоев – разрядов с резкопадающей вольт-амперной характеристикой. В местах возникновения пробоя и протекания межэлектродного тока происходит нагрев, плавление и испарение вещества. В результате этих процессов изменяется микрорельеф и другие свойства поверхности электродов. Наиболее сильные изменения происходят в местах, где электрическая прочность минимальна (микроострия на поверхности). Поэтому пробой может способствовать ликвидации слабых мест на поверхности электродов и повышать электрическую прочность вакуумной изоляции рентгеновской трубки [1].

Конструкция микрофокусной рентгеновской трубки

В данной работе рассматриваются вопросы электрической изоляции и высоковольтной тренировки микрофокусной рентгеновской трубки изготовленной по металло-кермической технологии [2]. Трубка представляет собой герметичный вакуумный объем выполненный из цилиндрического керамического изолятора (рисунок 1). Катодно-модуляторный узел, находящийся под высоким напряжением, расположен внутри изолятора на опоре. Анодный узел трубки заземлен и представляет собой пролетную трубу с вольфрамовой мишенью.

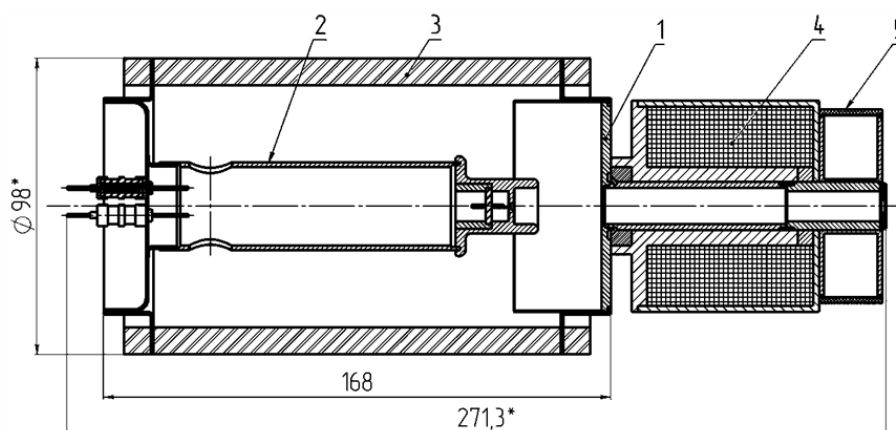


Рис. 1. Конструкция микрофокусной рентгеновской трубки: 1 – анодный узел; 2 – катодно-модуляторный узел; 3 – керамический корпус; 4 – магнитная линза; 5 – система охлаждения

Номинальное ускоряющее напряжение, на которое проектировалась трубка, составляет 100 кВ. Для данного значения была рассчитана геометрия катодно-модуляторного узла и выбрана длина ускоряющего промежутка катод-анод внутри трубки.

В качестве изолятора и корпуса трубки использовался цилиндр с внешним диаметром 78 мм и длиной 135 мм, выполненный из керамики ВК 94-1. Согласно литературным источникам [3] для устойчивой работы без пробоев рекомендуется не превышать напряженность на поверхности изолятора (со стороны атмосферы) более 10 кВ/см. В таком случае для размера 135 мм предельным допустимым значением напряжения является 135 кВ, что превышает электрическую прочность вакуумного промежутка катод-анод и является избыточным. Здесь стоит отметить, что выбор длины изолятора был основан не только на необходимости получения требуемой электрической прочности, но и на возможностях производителя керамики и типовых размерах имеющихся в наличии. Поэтому при согласовании геометрии с предприятием-изготовителем выбор был сделан в сторону большей длины изолятора.

Твердотельная высоковольтная изоляция рентгеновской трубки

Для проведения процедуры тренировки трубки использовался генератор Spellman XRF 160 с возможностью подачи высокого напряжения без питания накала. Для подключения трубки к генератору использовался высоковольтный кабель Claymount R24 и специализированная высоковольтная розетка.

При подготовке к испытаниям трубки в первую очередь решался вопрос электрической изоляции высоковольтной части (катодного узла) и места соединения трубки с розеткой. В качестве первого варианта изоляции использовался силиконовый компаунд Силагерм 2112Б [4]. Основные характеристики компаунда приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики компаунда Силагерм 2112Б

Характеристика	Ед. изм.	Значение
Плотность	г/см ³	1,3-1,4
Время жизни	мин	10-30
Удельное объемное электрическое сопротивление (20±5) °С	Ом·см	10 ¹⁵
Диэлектрическая проницаемость при частоте 10 ⁶ Гц	не более	3,2
Электрическая прочность	кВ/мм, не менее	29,5

Для герметизации трубки и высоковольтной розетки была выполнена объемная заливка изделий компаундом по всей длине. Подготовка и смешивание частей компаунда проводилось в соответствии с требованиями производителя, для удаления пузырьков дополнительно каждая порция готового компаунда подвергалась вакууммированию. Результат заливки показан на рисунке 2.

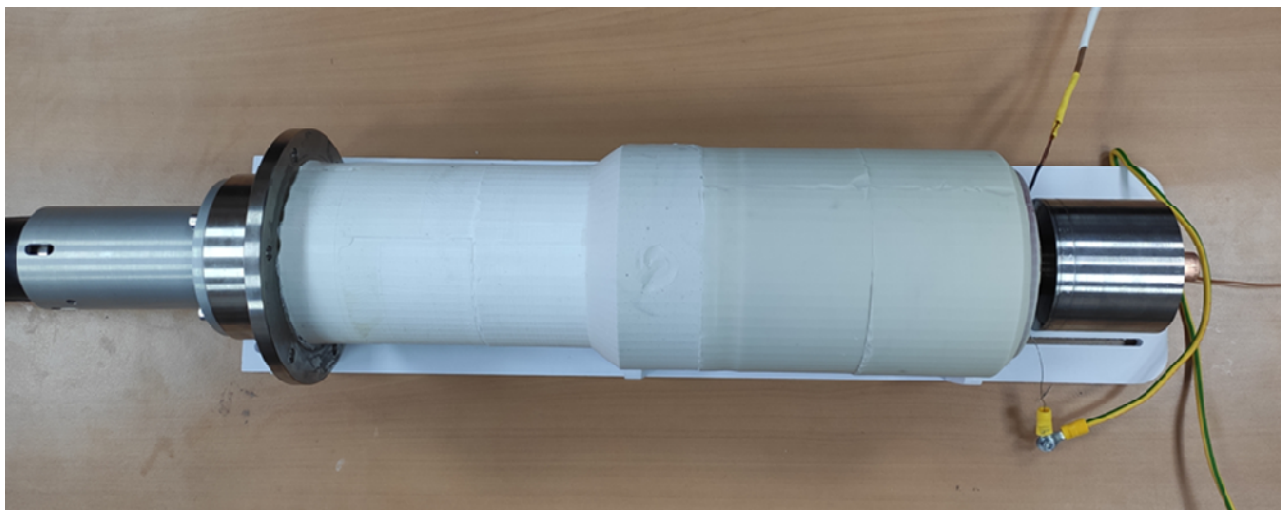


Рис. 2. Электроизоляция компаундом Силагерм 2112Б рентгеновской трубки и высоковольтной розетки

После выполнения электроизоляции трубка была помещена в рентгенозащитную камеру и подключена с помощью высоковольтного кабеля к генератору для проведения процедуры тренировки. Процесс тренировки заключался в последовательном ступенчатом задании высокого напряжения и выдержке с регистрацией тока в цепи катод-анод. Если на заданном напряжении происходил пробой, тренировка возобновлялась с предыдущего значения напряжения. Под пробоем в данном случае считался пробой вакуумного промежутка, определяющийся блоком Spellman XRF160 как резкое изменение анодного тока. В результате проведенной тренировки было достигнуто значение напряжения 70 кВ с током утечки порядка

30 мкА. На рисунке 3 представлен график подъема напряжения на рентгеновской трубке, демонстрирующий один из этапов процедуры тренировки.

Дальнейшая тренировка при напряжении выше 70 кВ оказалась затруднительной. При поднятии напряжения до значения 72-75 кВ и выдержке в течении 1-3 минут ток утечки резко возрастал до среднего значения 70-90 мкА, с периодическими скачками до 150-200 мкА. При дальнейшем увеличении напряжения происходил внешний пробой с прожигом твердотельной изоляции в месте соединения катодно-модуляторного узла и керамического изолятора. Так как данное место имеет минимальный изолирующий слой (около 20 мм), была выполнена дозаливка и утолщение диэлектрического слоя до значения 35 мм. Однако эти изменения не дали сильного положительного эффекта, и пробой диэлектрика в данной области происходил при 80 кВ. В связи с чем было высказано предположение о наличии в области возникновения пробоя локального увеличения напряженности поля до величины превышающей максимально допустимое значение для выбранного твердотельного диэлектрика. Поэтому дальнейшая тренировка на более высоких напряжениях проводилась с применением жидкого диэлектрика, имеющего большее значение пробивного напряжения.

Жидкостная высоковольтная изоляция рентгеновской трубки

В качестве жидких диэлектриков в промышленности обычно используется трансформаторное масло. Однако данный диэлектрик несмотря на хорошие диэлектрические свойства является достаточно агрессивным по отношению к резиновым уплотнениям и насыщается влагой. Чтобы избежать негативных последствий применения трансформаторного масла было предложено использовать иммерсионную жидкость. Данный диэлектрик успешно используется для охлаждения ASIC-майнеров путем их полного погружения в данную жидкость. Основные характеристики используемой в данной работе иммерсионной жидкости приведены в таблице 2 [5].

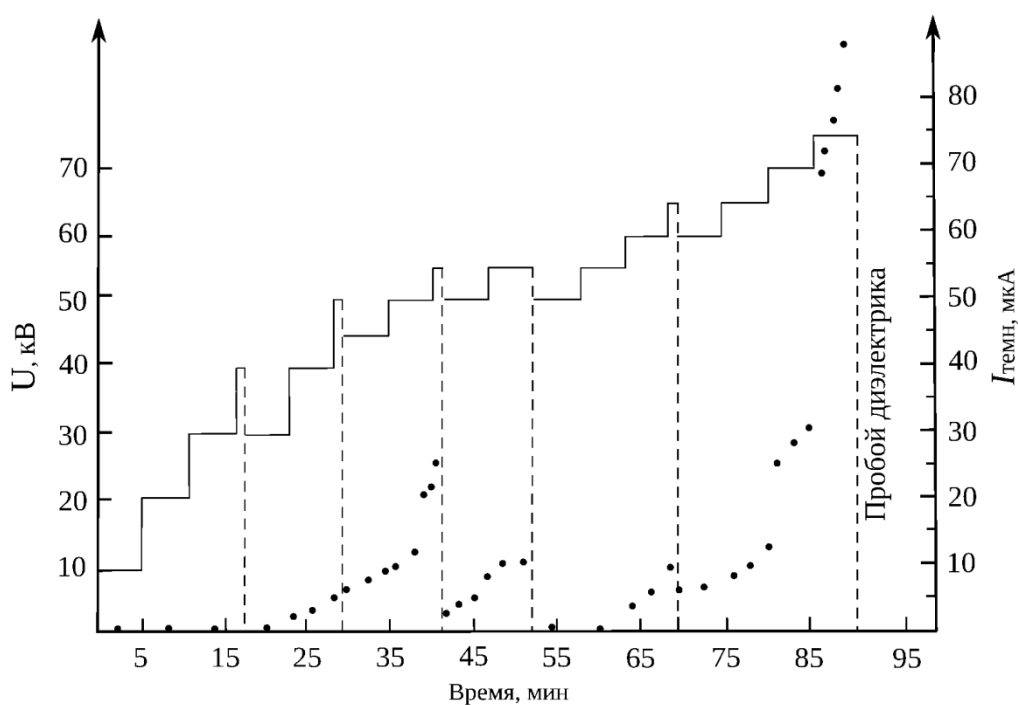


Рис. 3. График тренировки рентгеновской трубки с твердой изоляцией

Для выполнения электрических испытаний и тренировки трубки была изготовлена емкость из оргстекла, представляющая собой герметичный резервуар и позволяющая соосно

установить высоковольтную розетку и рентгеновскую трубку. Внешний вид ванны с подключенной рентгеновской трубкой показан на рисунке 4.

Таблица 2. Характеристики иммерсионной жидкости

Характеристика	Ед. изм.	Значение
Основа		нефтяной дистилят
Плотность	г/см ³	0,824-0,830
Удельное объемное электрическое сопротивление (20±5) °С	Ом·см	10 ¹³
Диэлектрическая проницаемость при частоте 10 ³ Гц	не более	2,0-2,4
Гигроскопичность		отсутствует
Температура вспышки	°С	228
Реакционная способность		стабильна, не окисляется
Электрическая прочность	кВ/мм, не менее	50

Процесс тренировки, также как и в случае с твердым диэлектриком, заключался в последовательном ступенчатом задании высокого напряжения и выдержке с регистрацией тока в цепи катод-анод. Тренировка проводилась с установки напряжения 50 кВ. На рисунке 5 представлен график, иллюстрирующий процесс тренировки рентгеновской трубки.

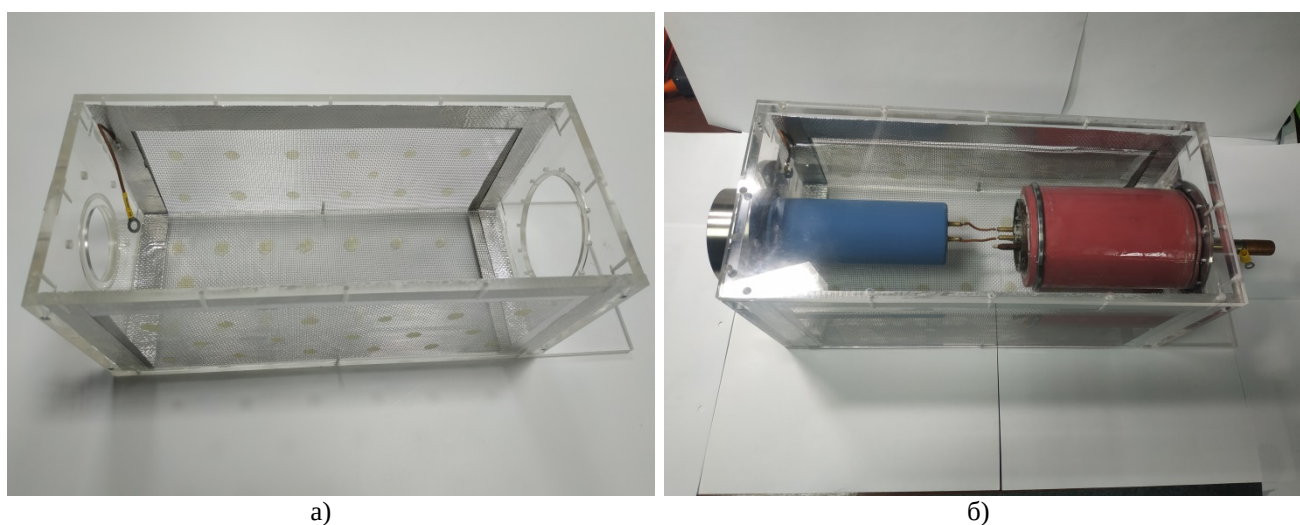


Рис. 4. Емкость для тренировки рентгеновской трубки с жидким диэлектриком:
а) – корпус ванны, б) – установленная трубка и розетка

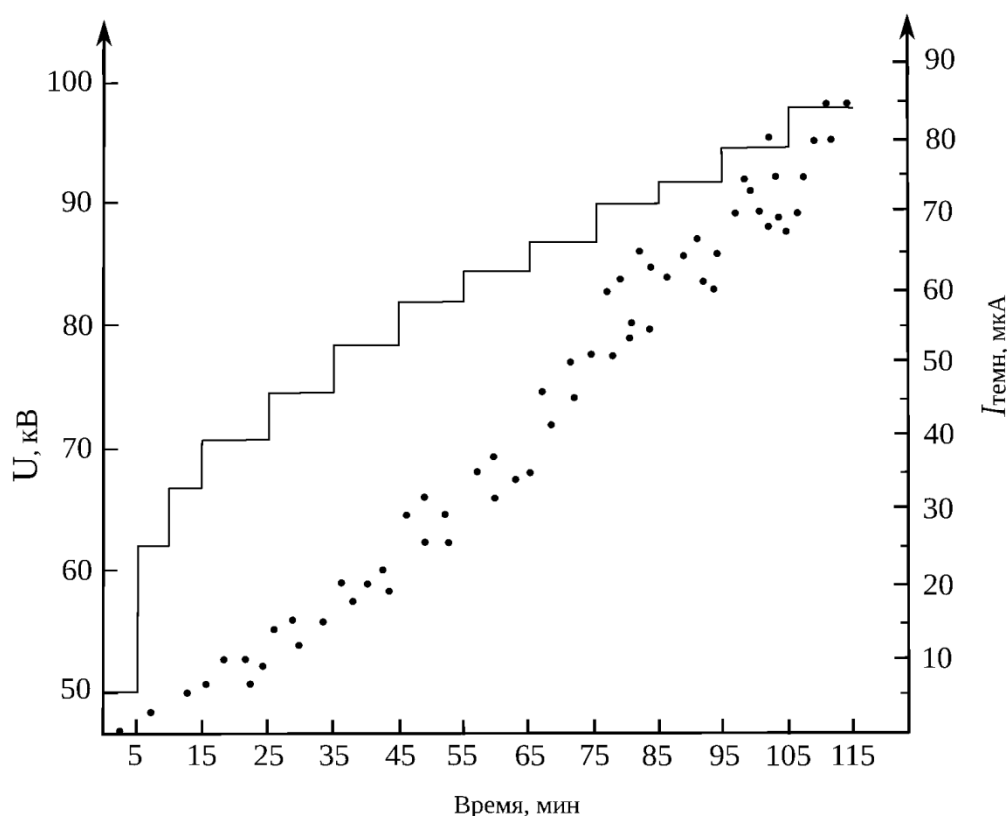


Рис. 5. График тренировки рентгеновской трубки с твердой изоляцией

Как видно на рисунке 5 процесс тренировки характеризуется отсутствием пробоев вакуумного промежутка. При повышении напряжения темновой ток в цепи катод-анод возрастал пропорционально с подъемом напряжения, причем разброс в значениях сильно увеличивался. Дополнительно при подъеме напряжения регистрировался уровень рентгеновского излучения, который был выше величины фона. Важно отметить, что с увеличением темнового тока регистрировалось пропорциональное увеличение уровня рентгеновского излучения. Данный факт указывает на автоэмиссионную природу регистрируемого тока и наличие большого количества микроострий на поверхности металлических электродов катод-анодного промежутка, которые не удалось удалить в процессе тренировки. Дальнейшее повышение напряжения не проводилась, так как анодный ток достиг значения порядка 120 мкА и не уменьшался. При длительной выдержке (около 1 часа) такая постоянная величина тока приводила к сильному разогреву анодного узла и могла снизить электропрочность трубки, из-за бомбардировки электронами металлического тела анода и его распыления на керамический изолятор.

Выводы

Высоковольтная тренировка является обязательным этапом подготовки новых вакуумных приборов к эксплуатации. Тренировка помогает улучшить поверхность электродов вакуумного прибора для стабильной работы при высоких напряжениях и снизить величину темнового тока. В ходе выполнения работы было показано преимущество применения жидких диэлектриков перед твердыми кремний-органическими для использования в высоковольтной тренировке. Была проведена апробация иммерсионной жидкости в качестве жидкого диэлектрика для стенда высоковольтной тренировки и подтверждена возможность ее применения. По результатам тренировки получены зависимости темнового тока от напряжения на рентгеновской трубке, позволяющие учесть его величину при дальнейшей работе. Выпол-

ненная в работе высоковольтная тренировка позволила определить диапазон значений ускоряющих напряжений (до 70 кВ) для рентгеновской трубки с приемлемой для последующей работы величиной темнового тока 30 мкА.

Финансирование работы

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

Библиографический список

1. Сливков И. Н., Электроизоляция и разряд в вакууме. – М., Атомиздат, 1972, 304 с.
2. Козлов, Е. А. Разработка микрофокусной рентгеновской трубки повышенной мощности : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Козлов Евгений Александрович, 2023. – 176 с.
3. Батыгин, В.Н. Вакуумно-плотная керамика и ее спаи с металлами. Под ред. Н.Д. Девяткова / В.Н. Батыгин, И.И. Метелкин, А.М. Решетников // М.: Энергия. – 1973. – 408 с.
4. Силагерм 2112: [Электронный ресурс] // Производственное объединение "Технология-пласт". URL: <https://silagerm.com/products/25782100> (Дата обращения: 27.02.2025).
5. Иммерсионная жидкость: [Электронный ресурс] // Майнинг оборудование и комплектующие. Иммерсионное и водяное охлаждение асиков. URL: https://minecool.ru/catalogue/immersion_liquid (Дата обращения: 27.02.2025).

УДК 621.311; ГРНТИ 44.29.29.

РАССМОТРЕНИЕ АСПЕКТОВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДИЛЕРСКОГО ЦЕНТРА

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 разбор различных аспектов системы электроснабжения. Приведены рекомендации по итогам разбора.

Ключевые слова: система электроснабжения, система освещения, система передачи.

CONSIDERATION OF ASPECTS OF THE ELECTRICAL SUPPLY SYSTEM OF A DEALER CENTER

D.S. Samokhina, E.V. Slivkin

*Ryazan State Radiotechnical University named after V.F. Utkin,
Russian Federation, Ryazan, dasha.schestavina@yandex.ru*

Annotation. The work examines the analysis of various aspects of the power supply system. Recommendations based on the results of the analysis are given.

Key words: power supply system, lighting system, transmission system.

Система электроснабжения – это система передачи и распределения электрической энергии, главной целью которой является обеспечение надежного электроснабжения зданий, сооружений, различных приемников и потребителей электрической энергии.

Система электроснабжения включает в себя следующие подсистемы:

- Подсистема передачи электроэнергии;
- Подсистема преобразования электроэнергии;
- Подсистема устройств релейной защиты, автоматики, а также прочих устройств защиты;
- Подсистема учета электроэнергии;
- Подсистема защитного заземления;

- Подсистема освещения.

Рассмотрим различные подсистемы и выделим наиболее актуальные решения.

Подсистема заземления в электроустановках

Система заземления играет решающую роль в защите людей и оборудования от поражения электрическим током в случае возникновения различных типов повреждений, а также в случае ухудшения изоляции.

Система TN, означает то, что нейтральная точка силового трансформатора 6(10)/0,4 кВ глухозаземлена, а корпуса различных устройств соединены с нейтралью трансформатора. Подразделяется на TN-C (1,а), TN-S(1,б) и TN-C-S (1,с). В данной системе буква С означает combine (совмещенный), защитный (PE) и нейтральный (N) соединены в один PEN. В системе S означает separate (раздельно), защитный и нейтральный проводники разделены. В системе TN-C-S часть проводника объединена, а вторая часть, на вводе в здание, разделены и повторно заземлены. Они показаны на рисунке 1 [1].

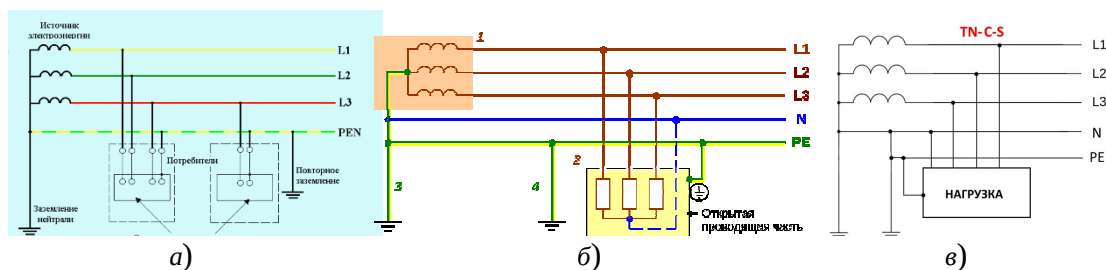
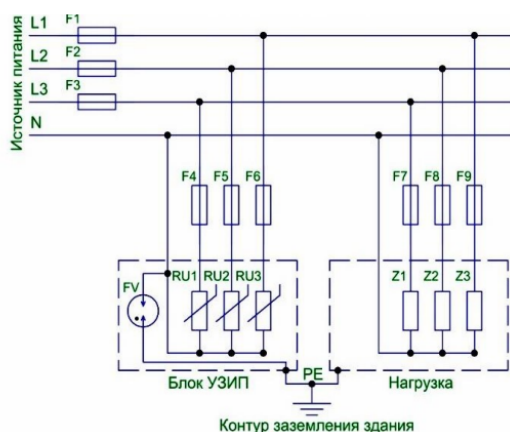


Рис. 1. Системы заземления TN

Система TT (terra-terra) представляет собой заземление как нейтрали силового трансформатора, так и металлических конструкций зданий и сооружений. Эта система имеет более высокий уровень безопасности, чем система TN. Система показана на рисунке 2.



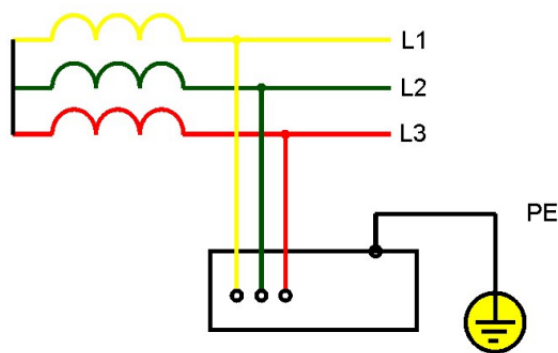


Рис. 3. Система IT

Согласно ГОСТ Р 50571 [2] и обновленной редакции ПУЭ [3], при капитальном обновлении здания, а также новом строительстве необходимо использовать систему TN-S.

Подсистема распределения электроэнергии

Большая часть современных силовых сетей выполнена кабелем марки ВВнГ. Это кабель, имеющий медную жилу, изоляция выполнена из ПВХ пластиката, без защитного покрова, не распространяет горение при групповой прокладке, с пониженным дымо- и газовыделением, внешний вид показан на рисунке 4. [4]

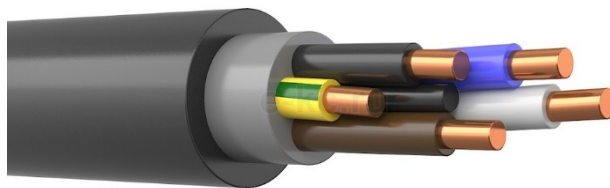


Рис. 4. Кабель ВВнГ

NYM – силовой кабель, негорючий. Состоит из однопроволочных или многопроволочных медных жил. Изоляция выполнена из поливинилхлоридного пластика. Конструкция предусматривает дополнительную оболочку из мелонаполненной резины, применение которой облегчает монтажные работы, повышает пожаробезопасность и увеличивает гибкость. Внешняя оболочка состоит из самозатухающего и трудновоспламеняющегося поливинилхлоридного пластиката. NУМ показан на рисунке 5.

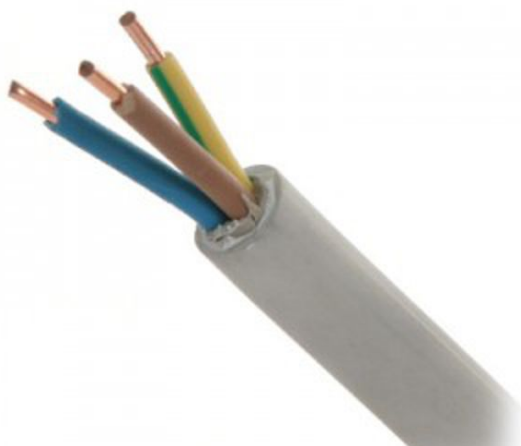


Рис. 5. Кабель NYM

При проведении реконструкции системы электроснабжения допустимо использовать как кабель марки ВВнГ, так и марки NYM. Кабель марки NYM имеет большую пожарную безопасность в связи с тем, что в нем предусмотрена дополнительная мелонаполненная изоляция.

Подсистема защиты

Автоматический выключатель – это аппарат, который предназначен для коммутации (включения и отключения) электрической цепи, защиты отходящих линий и различных приемников от коротких замыканий и перегрузок сети. Главным фактором при выборе автоматических выключателей является выбор характеристики.

По конструктивному исполнению выпускаются три основных типа автоматических выключателей:

- воздушные (применяются в цепях с большими токами);
- в литом корпусе (они рассчитаны на большой рабочий диапазон токов);
- модульные (широко применяются в быту).[5]

Автоматический выключатель показан на рисунке 6.



Рис. 6. Автоматический выключатель

Электрический предохранитель – это устройство, предназначенное для защиты электрической сети. Он размыкает электрическую сеть при повышении номинального тока цепи. Плавкой вставкой называются элемент предохранителя, осуществляющий размыкание цепи, при появлении сверхтоков. Плавкая вставка показана на рисунке 7.



Рис. 7. Плавкая вставка

Автоматические выключатели являются более предпочтительными устройствами защиты, так как после их срабатывания их можно использовать повторно, однако, встречаются

случаи, когда необходимо использовать предохранители в связи с обеспечением селективности.

Подсистема освещения

Светодиодное освещение — одно из перспективных направлений технологий искусственного освещения, основанное на использовании светодиодов в качестве источника света. Светодиодные лампы тратят значительно меньше энергии, чем стандартные формы освещения.

Интеллектуальная система освещения – это комплекс устройств, который позволяет системам освещения работать как автономно, так и с дистанционным управлением.

Используем протокол DALI (Digitally Addressable Lighting Interface).

Особенности протокола:

1. Открытый прокол для всех;
2. Протокол разработан для управления освещением;
3. Является децентрализованной шиной;
4. Необходима установка двух проводов;
5. Позволяет производить коммутацию, уменьшать яркость;
6. Опрос состояния светильников.

Совместное использование светодиодного освещения и системы умного управления позволит существенно экономить электрическую энергию и снизить затраты предприятия.

Подсистема учета

Интеллектуальная система учета (ИСУ) - совокупность устройств, предназначенных для сбора, обработки, передачи показаний приборов учета электрической энергии, обеспечивающая информационный обмен и удаленное управление потреблением электрической энергии.

Использование ИСУ позволяет более точно учитывать потребление электрической энергии, а также позволит выбрать более удачный тариф, для минимизации затрат предприятия.

Подсистема преобразования электроэнергии

На распределительные трансформаторы приходится 25–30% всех технических потерь в энергосистемах. Полностью устранить эти потери невозможно.

Аморфный сплав – это определенный вид прецизионного сплава. Его отличительной характеристикой от сплавов кристаллической структуры, является целый комплекс физических и химических свойств. Данные сплавы более устойчивы к коррозии и обладают большей прочностью.

Аморфное состояние достигается подбором химического состава сплава и использованием специальной технологии сверхбыстрого охлаждения.

Применение трансформаторов с сердечником из аморфных сплавов позволяет уменьшить технические потери, тем самым снизить затраты.

В результате, можно выделить следующие аспекты, на которые стоит обратить внимание при создании проекта реконструкции.

Выводы

Исходя из представленного разбора, можно выделить следующие итоги:

Согласно ГОСТ Р 50571 и обновленной редакции ПУЭ, при капитальном обновлении здания, а также новом строительстве необходимо использовать систему TN-S.

При проведении реконструкции системы электроснабжения допустимо использовать как кабель марки ВВнг, так и марки NYM. Кабель марки NYM имеет большую пожарную безопасность в связи с тем, что в нем предусмотрена дополнительная мелонаполненная изоляция.

Автоматические выключатели являются более предпочтительными устройствами защиты, так как после их срабатывания их можно использовать повторно, однако, встречаются случаи, когда необходимо использовать предохранители в связи с обеспечением селективности.

Совместное использование светодиодного освещения и системы умного управления позволит существенно экономить электрическую энергию и снизить затраты предприятия.

Использование ИСУ позволяет более точно учитывать потребление электрической энергии, а также позволит выбрать более удачный тариф, для минимизации затрат предприятия.

Библиографический список

1. «Реконструкция систем электроснабжения», Журавлев В.А., Зубова Р.А., «Научно-образовательный потенциал молодежи в решении актуальных проблем XXI века», № 17, 2021 год.
2. ГОСТ Р 50571
3. Правила устройства электроустановок
4. Пожарная безопасность при эксплуатации кабеля ВВГ-нг-LS, Любимов В.В., Сурович П.В., Филянович Л.П., Новые материалы и технологии их обработки, Минск, 2022 г.
5. Использование и принцип работы автоматического выключателя Курильщикова П.В., Пионтовская С.А., ЗА НАМИ БУДУЩЕЕ: взгляд молодых ученых на инновационное развитие общества, Казань, 2022

УДК 621.317; ГРНТИ 58.33.81.

ПРИМЕНЕНИЕ УНИФИЦИРОВАННОГО КОНТРОЛЛЕРА ПОТОКА МОЩНОСТИ (УКПМ) ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ПЕРЕГРУЗОК В СЕТЯХ 500/230 КВ

А.В. Несудимов, В.С. Иванов

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

Аннотация. В данной работе рассматривается применения унифицированного контроллера потока мощности (УКПМ) для устранения перегрузки в сети 500/230 кВ. Перегрузка мощности возникает, когда спрос на электроэнергию превышает пропускную способность сети, что приводит к потенциальным проблемам со стабильностью сети и колебаниям напряжения. УКПМ — это гибкое в своей настройке и продвинутое силовое электронное устройство, которое может регулировать поток мощности и уровни напряжения в режиме реального времени, тем самым предлагая потенциальное решение для устранения перегрузки. Рассматривается принцип работы УКПМ, его технология управления и влияние установки на стабильность и надежность энергосистемы.

Ключевые слова: унифицированный контроллер потока мощности (УКПМ), перегрузка мощности, стабильность сети, регулирование напряжения, надежность энергосистемы

UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER (UPFC) USED TO RELIEVE POWER CONGESTION ON A 500/230 KV GRID

A.V. Nesudimov V.S. Ivanov

Ryazan State Radio Engineering University,
Russian Federation, Ryazan, zapasnouadres@gmail.com

Annotation. This paper examines the application of a Unified Power Flow Controller (UPFC) for alleviating congestion in a 500/230 kV grid. Power congestion occurs when the demand for electricity exceeds the transmission capacity of the network, leading to potential issues with grid stability and voltage fluctuations. The UPFC is a highly configurable and advanced power electronic device capable of regulating power flow and voltage levels in real time, thereby offering a potential solution for mitigating congestion. The paper discusses the operating principle of the UPFC, its control technology, and the impact of its installation on the stability and reliability of the power system.

Keywords: unified power flow controller (UPFC), power congestion, grid stability, voltage regulation, power system reliability

Постоянно растущий спрос на электроэнергию в последние десятилетия оказывает значительное давление на системы передачи электроэнергии. Рост спроса не только вызывает опасения по поводу надежности сети, но и приводит к серьезным проблемам, таким как перегрузка линий, что, в свою очередь, негативно сказывается на стабильности системы и вызывает колебания напряжения. В ответ на это разрабатываются современные методики управления и смягчения перегрузок, среди которых перспективным решением является унифицированный контроллер потока мощности (далее УКПМ) - это ключевой элемент устройств гибких систем передачи переменного тока и известен своей способностью регулировать как поток мощности, так и уровни напряжения на линии передачи в режиме реального времени. Благодаря своей конструкции способен вводить в систему последовательное напряжение (V_s) и модулировать переключающий ток (I_{sh}), что позволяет осуществлять динамическое управление как активной, так и реактивной мощностью [1].

Технология управления основана на точном измерении тока, напряжения и фазового угла в линии. На основе этих измерений параметры инъекции (V_s и I_{sh}) постоянно подстраиваются для достижения поставленных задач, таких как поддержание стабильности напряжения, обеспечение эффективной передачи электроэнергии и снижение перегрузок. Таким образом, УКПМ не только способствует устранению перегрузок, но и повышает общую стабильность сети за счет поддержания уровней напряжения в допустимых пределах [2].

УКПМ состоит из последовательного трансформатора и шунтирующего инвертора, подключенных в цепи постоянного тока. Функция последовательного трансформатора – управление активными и реактивными мощностями, шунтирующего инвертора – регулирование уровня напряжения [3].

Функционирует посредством инъекции управляемого напряжения и тока в линию передачи. Способность активно регулировать поток мощности и уровни напряжения в сети обусловлена тем, что он контролирует как вводимое напряжение, так и ток.

Управление напряжением обеспечивает поддержание уровней напряжения в допустимых пределах. Отслеживая напряжения в различных точках сети и соответствующей регулировки вводимого напряжения, УКПМ способствует предотвращению провалов напряжения и повышению надежности системы [4].

Управление мощностью позволяет активно контролировать ее распределение в линиях передачи. Регулируя фазовый угол и величину вводимого тока, перенаправляется поток мощности, чем снижаются перегрузки в определенных зонах.

Соответственно, установка УКПМ в системе передачи электроэнергии оказывает значительное положительное влияние на её стабильность и надёжность. Способствует снижению колебаний напряжения в сети, уменьшая вероятность серьезных отказов и повышая об-

щую эффективность за счёт уменьшения перегрузок и потерь в линиях передачи переменного тока [5].

Технология

УКПМ является устройством семейства гибкой системы передачи тока, которое позволяет одновременно контролировать величину напряжения и фазовый угол в точках подключения. Он состоит из шунтирующего преобразователя, подключённого параллельно линии передачи посредством шунтирующего трансформатора, и последовательного преобразователя, соединённого через последовательный трансформатор [6].

Шунтирующий преобразователь обменивается реактивной мощностью с линией передачи и поддерживает напряжение на звене постоянного тока, в то время как последовательный преобразователь вводит переменное напряжение с регулируемой величиной и фазовым углом последовательно с линией. Это позволяет независимо управлять активными и реактивными потоками мощности линии передачи в соответствии с заданными уравнениями (1,2) [7].

$$P = V_1 I_1 \cos(\theta_1 - \theta_2); \quad (1)$$

$$Q = V_1 I_1 \sin(\theta_1 - \theta_2), \quad (2)$$

где: P и Q - активная и реактивная мощность соответственно;

V_1 и I_1 - амплитуды напряжения и тока;

θ_1 и θ_2 - фазовые углы напряжения и тока.

Для устранения перегрузки УКПМ будет работать следующим образом:

- Обнаруживать линии, перегруженные сверх их тепловых пределов, с использованием измерений линейного тока.
- Вычислять необходимую корректировку угла $\Delta\theta$ для устранения перегрузок с помощью уравнений потока мощности.
- Вводить $\Delta\theta$ в линию через последовательный преобразователь для эффективного увеличения пропускной способности передачи без строительства новых линий.

Этот процесс повторяется итеративно в режиме замкнутого управления в сочетании с алгоритмом оптимального распределения мощности для достижения глобального оптимального баланса мощности в сети. Правильное размещение может максимально снизить перегрузку, минимизируя затраты на установку. Текущие достижения в технологиях биполярных транзисторов с изолированным затвором сделали УКПМ более экономичными и подходящими для широкого распространения в сетях передачи электроэнергии [8].

Для линии 500 кВ применяют УКПМ, состоящий из двух инверторов напряжения мощностью 160 МВА, которые генерируют требуемые напряжения переменного тока для последовательных и шунтирующих трансформаторов.

Последовательный трансформатор имеет коэффициент трансформации 1:10 для подачи напряжения 50 кВ в линию. Шунтирующий трансформатор имеет коэффициент трансформации, соответствующий напряжению линии, для обеспечения обмена реактивной мощностью. Последовательно введенное напряжение определяется уравнением (3).

$$V_{inj} = V_{dc} \times M \sin(\omega t - \theta), \quad (3)$$

где: V_{dc} - напряжение постоянного тока – 320 кВ;

M - индекс модуляции (0-1);

ωt - частота в рад/с;

θ - фазовый угол в радианах.

Это позволяет динамически изменять V_{inj} в диапазоне ± 50 кВ при 50 Гц для управления как активными, так и реактивными потоками мощности.

Управление потоком мощности достигается путем изменения фазового угла θ , который изменяет вектор линейного тока, как в уравнениях (4) и (5).

$$\Delta P = VL \cdot IL \cdot \cos(\theta_l - \theta_{inj}), \quad (4)$$

$$\Delta Q = VL \cdot IL \cdot \sin(\theta_l - \theta_{inj}), \quad (5)$$

где: $VL = 500$ кВ, $IL = 1000$ А и θ_l - начальный фазовый угол.

Прибор обнаруживает перегрузку, когда ΔP или ΔQ превышают тепловые пределы ± 400 МВт или ± 200 МВАр. Затем вычисляются оптимальные значения $\theta_{inj} \pm 20^\circ$, которые вводятся для равномерного распределения потоков по линии в пределах номинальных значений [9].

На рисунке 1 изображена кольцевая схема, состоящая из пяти шин (B1 до B5) и линий передачи (L1, L2 и L3), а также двух трансформаторов (Tr1 и Tr2).

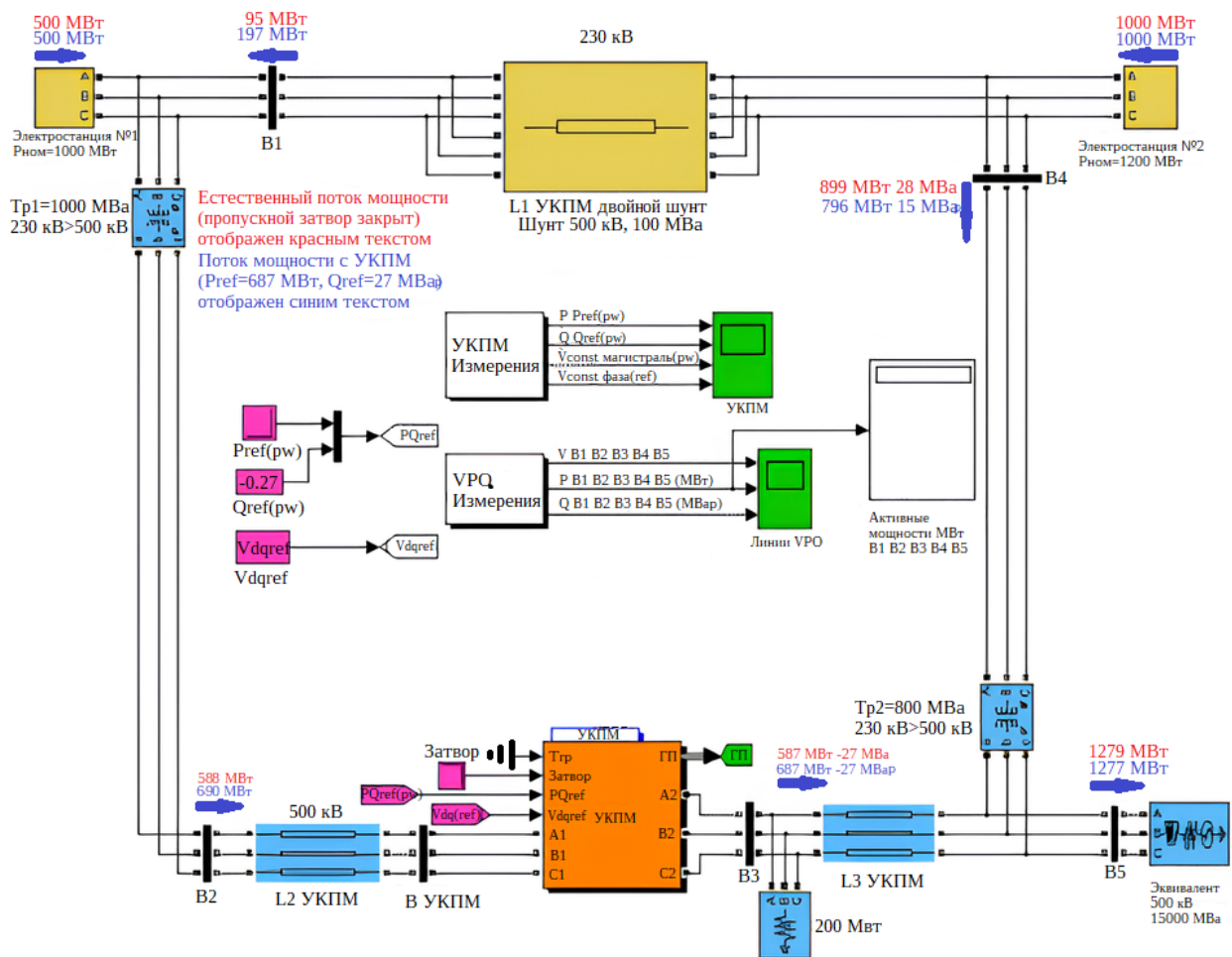


Рис. 1. Управление потоком мощности с применением УКПМ

В наличии две электростанции, отдающие в эту сеть суммарно 1500 мегаватт с магистральным напряжением 500 кВ. К шине B3 подключена нагрузка мощностью 200 МВт. При нормальной работе большая часть мощности, вырабатываемой электростанцией 2, поставляется через три трансформатора между шинами B4 и B5. В экстренной ситуации доступны только два трансформатора, в следствии этого мощность ограничивается до 800 МВА, по наименьшей пропускной способности. Большая часть мощности, вырабатываемой электростанцией 2, передается через трансформатор Tr2. Соответственно этот трансформатор перегружен на 99 МВА. Поскольку остальная мощность направляется в контур, контроллер

УКПМ, расположенный справа от линии L2, может помочь в регулировании активной и реактивной мощности на шине ВЗ и напряжения на шине В УКПМ. Он состоит из двух инверторов на основе из биполярных транзисторов с изолированным затвором, подключенных последовательно шунтом с реакторами и трансформаторами для соединения. Основная цель использования УКПМ заключается в изменении потока мощности, что помогает снять перегрузку в системе.

Заключение

Эта технология позволяет обеспечить быстрое, гибкое и стабильное управление разветвленными системами передачи тока в многоузловых высоковольтных системах передачи без необходимости модернизации инфраструктуры, что демонстрирует техническую и экономическую эффективность УКПМ в рамках современного управления перегрузками в энергосистеме.

Исходя из ограничений и возможных вопросов, перспективные будущие направления исследований:

Улучшить расположение УКПМ в сети - можно сосредоточиться на оптимизации размещения с использованием многокритериальных алгоритмов, чтобы максимизировать эффективность доставки мощности и работы системы с учетом практических ограничений.

Разрабатывать динамические алгоритмы наблюдения - позволяющих быстро реагировать на изменяющиеся условия в сети и повышать их способность к оперативному отклику, что улучшит общую производительность сети.

Интегрировать с совместными платформами - проведение многомодульного моделирования, обеспечивающего интеграцию с существующими системами и моделями электромагнитных преобразований и сетей, для повышения их эффективности в условиях неопределенности; технически это предполагает проведение экспериментального обновления, которое предоставит жизненно важные данные для совершенствования структуры сети.

Условные испытания - проведение испытаний на реальных распределительных системах для оценки возможностей УКПМ по расширению функционала и работы в более широком диапазоне конфигураций сети и возможных эксплуатационных сценариев.

Сочетание с возобновляемыми источниками энергии - исследование интеграции с возобновляемыми источниками энергии и технологиями переменной генерации для улучшения управления потоками энергии и повышения стабильности сети в современных энергосистемах.

Сосредоточившись на этих направлениях, будущие исследования смогут расширить понимание и применение технологии УКПМ в управлении и эксплуатации энергосистем, проложив путь к более эффективным, надежным и устойчивым решениям для управления электрическими сетями.

Библиографический список

1. Hingorani, N.G., Gyugyi, L. (2020). Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. Wiley-IEEE Press.
2. Edris, A. A. (2017). Proposed terms and definitions for flexible ac transmission system (FACTS). IEEE Transactions on Power Delivery, 12(4): 1848-1853. <https://doi.org/10.1109/61.634216>
3. Pereira, M., Zanetta, L.C. (2013). A current based model for load flow studies with UPFC. IEEE Transactions on Power Systems, 28(2): 677-682. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2206409>
4. Robak, S., Rasolomampionona, D.D. (2009). Interactions analysis of UPFC multifunction controller. In 2009 IEEE Bucharest PowerTech, Bucharest, Romania, pp. 1-7. <https://doi.org/10.1109/PTC.2009.5281943>
5. Zang, H.X., He, T.Y., Liu, J.K. (2016). Linear optimal power flow model with unified power flow controller in hot-start environment. Power System Technology, 40(11): 3517-3523. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/69/1/012152>
6. Sharafi, F. (2020). Enhancement and efficiency improvement the power systems by using unified power flow controller. In 4th International Conference on Applied Researches in Science and Engineering.

7. Yu, Q., Cao, N., Guo, J. (2012). Analysis on influence of load rate on power system self-organized criticality. *Dianli Xitong Zidonghua/Automation of Electric Power Systems*, 36(1): 24-27, 37. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1026.2012.01.005>
8. Bhowmick, S., Das, B., Kumar, N. (2008). An indirect UPFC model to enhance reusability of newton power-flow codes. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23(4): 2079-2088. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.923105>
9. Lei, X.Z., Lerch, E.N., Povh, D. (2001). Optimization and coordination of damping controls for improving system dynamic performance. In 2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262), Vancouver, BC, Canada. <https://doi.org/10.1109/PESS.2001.970147>

УДК 681.3; ГРНТИ 50.43

РЕАЛИЗАЦИЯ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПО ИНТЕРФЕЙСУ RS-485 В МИКРОКОНТРОЛЛЕРАХ K1896BE92QI

А.А. Связов, А.А. Трофимов

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

Аннотация. В работе рассматривается организация передача данных по интерфейсу RS-485 в микроконтроллерах K1896BE92QI. Приемопередатчик интерфейса выполнен на микросхеме K5559ИН86SI. Обмен данными осуществляется по протоколу WAKE Разработана программа обмена на языке программирования C в среде программирования KeilVision v5.30 и протестирована на отладочных платах LDM-BB-K1896BE92QI. Приведены осциллограммы с передачей и приемом данных в эхо-режиме между двумя микроконтроллерами. *Ключевые слова:* интерфейс RS-485, микроконтроллер K1896BE92QI, отладочная плата LDM-BB-K1896BE92QI, приемопередатчик K5559ИН86SI, протокол WAKE.

IMPLEMENTATION OF DATA TRANSMISSION VIA THE RS-485 INTERFACE IN K1896BE92QI MICROCONTROLLERS

A.A. Sviyazov, A.A. Trofimov

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

Annotation. The paper considers the organization of data transmission over the RS-485 interface in K1896BE92QI microcontrollers. The interface transceiver is made on a K5559IN86SI chip. Data exchange is carried out using the WAKE protocol. An exchange program has been developed in the C programming language in the KeilVision v5.30 programming environment and tested on LDM-BB-K1896BE92QI debugging boards. Waveforms with data transmission and reception in echo mode between two microcontrollers are shown. *Keywords:* RS-485 interface, K1896BE92QI microcontroller, LDM-BB-K1896BE92QI debugging board, K5559IN86SI transceiver, WAKE protocol.

Интерфейс RS-485 (другое название – EIA/TIA-485) использует дифференциальную передачу сигналов по витой паре проводов, что обеспечивает высокую устойчивость к синфазной помехе. Для организации передачи данных по интерфейсу RS-485 необходимо использовать дополнительную микросхему приемопередатчика, подключаемую к микроконтроллеру по протоколу UART. Компания АО «ПКК Миландр» выпускает микросхему приемопередатчика K5559ИН10BSI [1] со скоростью передачи данных до 2,5 Мбит/с и K5559ИН86SI [2] со скоростью до 30 Мбит/с.

Выводы DI и RO приемопередатчика RS-485 подключаются к любому свободному порту UART (универсальный асинхронный приемопередатчик) микроконтроллера. Цифровой выход приемника (RO) подключается к порту приемника UART (RX). Цифровой вход передатчика (DI) к порту передатчика UART (TX).

Поскольку на дифференциальной стороне приемник и передатчик соединены, то во время приема нужно отключать передатчик, а во время передачи – приемник. Для этого служат управляющие входы – разрешение приемника (RE) и разрешения передатчика (DE). Так

как вход RE инверсный, то его можно соединить с DE и переключать приемник и передатчик одним сигналом с любого порта контроллера. При уровне “0” – работа на прием, при “1” – на передачу.

Связь по интерфейсу RS-485 организована между двумя отладочными платами LDM-BB-K1986BE92QI с микроконтроллерами K1896BE92QI через платы приемопередатчика с микросхемой K5559ИН86SI. Одна плата выполняет роль Master, а другая - Slave. Отладочные платы сконфигурированы на языке C для обмена по интерфейсу RS-485, используя функции из библиотек компании Миландр. Подключение к приемопередатчику осуществляется через порты PB5 (TX) и PB6 (RX).

Обмен данными осуществляется по протоколу WAKE, являющийся логическим уровнем интерфейса управления оборудованием с помощью асинхронного последовательного канала [3]. Основой протокола WAKE является протокол SLIP (UNIX™ Serial Link Interface Protocol). Передача данных осуществляется в двоичном виде. Структура пакета WAKE следующая (рис. 1): пакет всегда начинается управляющим кодом FEND (C0h). Затем следует необязательный байт адреса, после которого идет байт команды. За ним следует байт количества данных и собственно байты данных. Завершает пакет необязательный байт контрольной суммы CRC.

FEND	ADDR	CMD	N	DATA	CRC
------	------	-----	---	------	-----

Рис. 1. Структура пакета WAKE

Код FEND (Frame End) является признаком начала пакета и имеет значение C0h.

Байт адреса ADDR, передаваемый мастером, в старшем разряде содержит логическую единицу. Для адресации используются 7 бит и максимальное количество адресуемых устройств равно 127. Передаваемый подчиненным устройством адрес содержит в старшем разряде логический ноль.

Байт команды CMD всегда должен иметь нулевой старший бит. Таким образом, код команды занимает 7 бит, что позволяет передавать до 128 различных команд. Байт количества данных N имеет значение, равное количеству передаваемых байт данных.

Байты данных DATA, количество которых определяется значением N, могут иметь любое значение, кроме FEND (C0h) и FESC (DBh). Если возникает необходимость передать одно из этих значений, то производится стаффинг.

Байт контрольной суммы CRC рассчитывается перед операцией для всего пакета, начиная с байта FEND и заканчивая последним байтом данных. Может отсутствовать в некоторых реализациях протокола. При расчете контрольной суммы CRC-8 используется полином $X^8 + X^5 + X^4 + 1$. Если в пакете передается адрес, то при вычислении контрольной суммы используется его истинное значение, т.е. единичный старший бит не учитывается. Значение CRC-8 перед вычислением инициализируется числом DEh.

При расчете контрольной суммы CRC-16 используется полином $X^{16} + X^{12} + X^5 + 1$. При вычислениях используется значение адреса вместе со старшим битом. Значение CRC-16 перед вычислением инициализируется числом 0xFFFF.

Протокол реализован программно на микроконтроллерах следующим образом. В протоколе WAKE происходит передача данных кадрами между мастером и подчиненным устройством в виде запрос-ответ. Программно задается адрес подчиненного устройства, к которому будет обращаться мастер. Далее идет байт команды, которая показывает, какое действие должно выполнить подчиненное устройство. Все возможные команды для протокола WAKE и команды ошибок приведены в спецификации [3].

Последовательный канал сконфигурирован следующим образом:

- число байт в посылке – 8;
- количество стоп-бит – 1;
- бит чётности – нет;

- скорость обмена – $1200 \div 921600$ бит/сек

Кадр ответа независимо от принятых данных отправляет такую же преамбулу, означающую начало передачи кадра. Свой собственный адрес, но уже без содержания единицы в старшем бите, и текущую команду, которую подчиненное устройство приняло. Следующие байты будут зависеть уже от того какую команду принял подчиненное устройство, а также была ли ошибка при передаче данных. В случае ошибки при приеме в байте данных отправляется команда ошибки.

Разработана программа обмена на языке C в среде программирования KeilVision v5.30 и протестирована на отладочных платах LDM-BB-K1986BE92QI.

Для проверки работы протокола между двумя микроконтроллерами были сняты осциллограммы с передачей и приемом данных в эхо-режиме. Осциллограммы с приемом и передачей данных по линии А относительно земли представлены на рисунке 2. На осциллограмме видно, что отправляемый мастером кадр не совпадает с отправленным кадром подчиненным устройством. В этот момент времени происходит передача адресов. Разница в передаче байтов адреса происходит из-за того, что отправляемый мастером адрес содержит в старшем бите значение логической единицы, а подчиненное устройство отправляет истинный собственный адрес, в старший бит содержит логический ноль.



Рис. 2. Осциллограммы с приемом и передачей данных по линии А относительно земли

Реализация с отдельной платой позволяет проводить тестирование различных приемопередатчиков передачи данных по интерфейсу RS-485. Осциллограммы подтверждают правильность функционирования предложенной схемы и программного обеспечения.

Библиографический список

1. https://ic.milandr.ru/products/interfeysnye_mikroskhemy/k5559in10bu_so_8/
2. Д. Колесников, Е. Сухотерин, В. Богданов, Ю. Павлюк, А. Тучин. Новая микросхема приемопередатчика для интерфейса RS-485 компании АО «ПКК Миландр». ЭЛЕКТРОНИКА наука | технология | бизнес, №4, 2021, с. 80-87.
3. <http://digit-el.com/files/open/wake/wake.html>

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИЯ О VIII МЕЖДУНАРОДНОМ ФОРУМЕ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» СТНО-2025».....	3
МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ. РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА».....	6
Секция «МИКРОВОЛНОВАЯ, ОПТИЧЕСКАЯ И КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА».....	6
Климаков В.В., Сафронов С.А., Фефелов А.А., Чувилин А.Н. Моделирование применения пьезоохладителя для интенсификации теплообмена в герметичных корпусах приборов.....	6
Филин Ю.Ю., Морев С.П., Коломийцева Н.М. Разработка МПФС с 3-ей гармоникой и магнитным полем на катоде для ЛБВ X-диапазона.....	14
Моисеев А.С., Арефьев А.С., Пугнин В.И., Юнаков А.Н. Разработка ЭОС для многолучевого клистрона С-диапазона с выходной непрерывной мощностью не менее 200 кВт.....	17
Базылев В.К., Жидков А.М., Коротченко В.А. Источник электронов для широкодиапазонного манометрического преобразователя.....	21
Крачковская Т.М., Ржевин Н.В., Журавлев С.Д., Богачев Р.Ю., Тихомиров Д.А. Испытания на долговечность катода М-типа, модифицированного нанокремнеземом, в составе мощной импульсной ЛБВ.....	28
Морев С.П., Сычев Н.А. МПФС для СВЧ усилителя терагерцового диапазона.....	32
Галдецкий А.В., Голованов Н.А., Морев С.П. Магнитная фокусирующая система для многолучевого СВЧ усилителя W-диапазона.....	36
Томилов И.М., Кулешов Г.Е. Электромагнитные параметры композиционных материалов на основе эпоксидной смолы и стеклянных сфер.....	40
Чистяков И.А., Золотых Д.Н., Медведков И.П. Оптимизация электронно-волнового взаимодействия в лампе бегущей волны Ka-диапазона частот со спиральной замедляющей системой.....	45
Чигуров И.О., Рахматулин М.В., Шалашова Д.Л. Влияние несоосностей элементов конструкции многолучевой электронной пушки на формирование электронного потока.....	51
Галдецкий А.В. Группировка электронного потока в цилиндрическом диоде с СВЧ модуляцией вторичной эмиссии.....	56
Трубицын А.А., Грачев Е.Ю., Кочергин Э.Г. Исследование электронно-оптических свойств катодной линзы в телескопическом и коллиматорном режимах.....	66
Королев А.О., Климаков В.В. Применение материалов для аддитивной технологии в СВЧ-технике и оптике.....	71
Горлин О.А., Климаков В.В. Метод моделирования тепловых характеристик коаксиального циркулятора высокого уровня мощности.....	77
Горлин О.А., Яшин Д.А. Увеличение полосы частот развязывающих устройств.....	82

Секция «ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ, МИКРО-И НАНОЭЛЕКТРОНИКА» 87

Ефимкин А.С., Логинов Д.С., Холомина Т.А., Рыбин Н.Б. Исследование поверхности магнитоуправляемых контактов при помощи растровой электронной микроскопии.....	87
Горячкин Д.Р., Литвинов В.Г. Особенности формирования и типы дефектов с глубокими энергетическими уровнями в полупроводниках.....	91
Макаров А.И., Вишняков Н.В. Разработка полупроводниковой наноструктуры с квантовой ямой для излучателя сине-зелёной области спектра.....	95
Бугаков П.И., Вишняков Н.В. Разработка источника УФ излучения на основе полупроводниковой гетероструктуры.....	100
Андреев Н.А., Вишняков Н.В. Разработка стабилизатора напряжения в гибридном микроэлектронном исполнении.....	104
Куклев В.В., Вишняков Н.В. Особенности калибровки сканирующего устройства атомно-силового микроскопа.....	108
Горохова А.М., Трегулов В.В., Иванов А.И., Куклев В.В., Литвинов В.Г. Исследование топологических особенностей тонких пленок пористого кремния, сформированных методом анодного электрохимического травления.....	112
Горохов А.И., Литвинов В.Г. Исследование спектров излучения полупроводниковых лазерных диодов красного цветового диапазона.....	116
Денисова Ю.Н. Оптические методы диагностики характеристик многослойных полупроводниковых гетероструктур.....	124
Гудков Ю.Д., Мишустин В.Г. Моделирование пространственного распределения объемного заряда в барьерной структуре на основе a-Si:H.....	130
Артемьев Д.Д., Дюбуа А.Б., Сафoshкин А.С. Исследование электрон-электронных взаимодействий в низкоразмерных полупроводниковых квантовых структурах.....	134
Глушченко В.В., Мишустин В.Г. Полупроводниковые структуры с квантовой ямой для перестраиваемых излучателей.....	141
Слугин А.В. Комплексный подход к исследованию структурных свойств поверхностей твердотельных материалов.....	144
Трусов Е.П., Воробьев Ю.В., Ермачихин А.В., Литвинов В.Г. Оценка положения уровней доноров и акцепторов в фазопеременных материалах системы GST.....	150
Филяревич В.С., Литвинов В.Г. Измерительный комплекс для реализации метода экстракции носителей заряда линейно возрастающим напряжением.....	157
Литвинова Д.В., Литвинова В.С. Радиационные дефекты в полупроводниковых материалах и структурах.....	160
Полагин М.В., Мишустин В.Г. Развитие технологии фотоэлектрических преобразователей на основе неупорядоченных полупроводников.....	164
Васин А.В. Исследование электрофизических свойств перспективных полупроводниковых микро- и наноструктур.....	168
Филяревич В.С., Гудков Ю.Д. Модификация измерительного комплекса для исследования быстропротекающих переходных процессов.....	173

Секция «ПРОМЫШЛЕННАЯ СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ»..... 178

Киселёва О.А., Баранников Д.А., Киселёва Д.Д. Активизация базового вектора внутри периода модуляции в электроприводе на базе бесконтактного двигателя постоянного тока.....178

Комаров В.В., Сливкин Е.В. Расчет токов коротких замыканий в сети 6-35 кВ..... 182

Козлов Е.А., Грачев Е.Ю. Высоковольтная тренировка микрофокусной рентгеновской трубки..... 190

Самохина Д.С., Сливкин Е.В. Рассмотрение аспектов системы электроснабжения дилерского центра..... 196

Несудимов А.В., Иванов В.С. Применение унифицированного контроллера потока мощности (УКПМ) для устранения перегрузок в сетях 500/230 кВ..... 201

Связов А.А., Трофимов А.А. Реализация передачи данных по интерфейсу RS-485 в микроконтроллерах K1896BE92QI..... 206

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ**Научное издание****В 10 томах****Том 2**

Под общей редакцией О.В. Миловзорова.

Подписано в печать 15.06.25. Формат 60х84 1/8.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

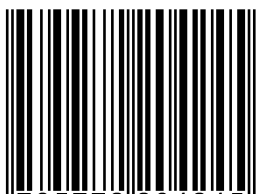
Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л..

Тираж 100 экз. Заказ №.

Рязанский государственный радиотехнический университет,
Редакционно-издательский центр РГРТУ,
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

ISBN 978-5-7722-0424-5



9 785772 204245 >