

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-2024

**VII МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-
ТЕХНИЧЕСКИЙ ФОРУМ**

Сборник трудов

Том 2

Рязань
2024

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

Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2024 [текст]: сб. тр. VII международ. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.2./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2024.

ISBN 978-5-7722-0401-6

Т.2: – 180 с.,: ил.

ISBN 978-5-7722-0403-0

Сборник включает труды участников VII Международного научно-технического форума «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2024.

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 978-5-7722-0401-6

ISBN 978-5-7722-0403-0

© Рязанский государственный
радиотехнический университет, 2024

ИНФОРМАЦИЯ О VII МЕЖДУНАРОДНОМ ФОРУМЕ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» СТНО-2024

VII Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2024 состоялся 04.03.2024-06.03.2024 в г. Рязань в Рязанском государственном радиотехническом университете имени В.Ф. Уткина.

В рамках форума «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2024 состоялась работа четырех Международных научно-технических конференций:

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

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

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

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

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

- Современные технологии электронного обучения;
- Иностранный язык в техническом вузе;
- Лингвистика и межкультурная коммуникация;
- Направления и формы гуманитаризации высшего образования и гуманитарная подготовка студентов;
- Методы преподавания и организация учебного процесса в вузе;
- Физико-математическая подготовка студентов;
- Вопросы воспитательной работы в высшей школе;
- Особенности военного образования на современном этапе.

Организационный комитет Форума:

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

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

Корячко А.В., проректор по учебной работе, к.т.н., доц. – зам. председателя;

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

Миронов В.В., 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.;

Карпунина Е.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.;

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.;

Никифоров М.Б., доцент кафедры электронных вычислительных машин, к.т.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.;

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

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

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

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;

Цветков А.А., проректор по молодежной политике;

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

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

Щевьев А.И., 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 621.385.632.12; ГРНТИ 29.35.45

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ЛБВ Ku-ДИАПАЗОНА С НИЗКОВОЛЬТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ПО ФОКУСИРУЮЩЕМУ ЭЛЕКТРОДУ

В.И. Роговин^{1,2}, И.А. Чистяков^{1,2}

¹Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Алмаз»,
Российская Федерация, Саратов

²Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
Российская Федерация, Саратов, ChistyakovIA@almaz-rpe.ru

Аннотация. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований выходных характеристик импульсной ЛБВ, работающей в коротковолновой части Ku-диапазона. Осуществлена адаптация численной модели под технологические допуски, после чего проведена корректировка пространства взаимодействия (ПВ) по 2D нелинейной модели. В результате чего показано приемлемое с практической точки зрения совпадение расчета и эксперимента. Исследованы режимы включения и выключения в электронно-оптической системе с низковольтной модуляцией по фокусирующему электроду. Найдены оптимальная конфигурация и местоположение коллиматора, обеспечивающие надежную защиту спиральной ЗС от повышенного токооседания в момент включения и выключения ЛБВ.

Ключевые слова: лампа бегущей волны (ЛБВ), электродинамические характеристики, пространство взаимодействия, электронно-оптическая система (ЭОС), низковольтное бессеточное управление, эксперимент, Ku-диапазон.

DESIGN FEATURES OF Ku-BAND PULSED TWT WITH LOW-VOLTAGE MODULATION ON THE FOCUSING ELECTRODE

V.I. Rogovin^{1,2}, I.A. Chistyakov^{1,2}

¹Stock Company «Research-and-Production Enterprise «Almaz»,
Russia, Saratov

²Saratov State University,
Russia, Saratov, ChistyakovIA@almaz-rpe.ru

Annotation. The results of theoretical and experimental studies of the output characteristics of a pulsed TWT operating in the shortwave part of the Ku band are presented. The numerical model was adapted to the technological tolerances, after which the interaction space was adjusted according to the 2D nonlinear model. As a result, the coincidence of calculation and experiment is shown to be acceptable from a practical point of view. The modes of switching on and off in an electron-optical system with low-voltage modulation using a focusing electrode are investigated. The optimal configuration and location of the collimator have been found, providing reliable protection of the helix SWS from increased current loss at the time of switching on and off the TWT.

Keywords: traveling wave tube, electrodynamic characteristics, interaction space, electron-optical system (EOS), low-voltage gridless control, experiment, Ku-band.

Введение

Лампы бегущей волны (ЛБВ) работающие в непрерывном режиме нашли широкое применение в радиопередающих системах Ku-диапазона – спутников связи. Для применения их в системах дистанционного зондирования Земли необходим импульсный режим работы. Обычно для реализации низковольтного импульсного режима используются сеточные элек-

троды: одинарные или двойные. Однако они сильно возмущают электронные потоки, уменьшают токопрохождение, КПД и долговечность. Альтернативой использования сеточных электродов является модуляция по фокусирующему электроду, который возмущает электронный поток только на фронтах включения и выключения и при их значительном уменьшении с использованием специальных коллиматоров позволяет иметь токопрохождение через СЗС на уровне 98-99%, что обеспечивает большее время работы ЛБВ.

Известно, что одним из требований, предъявляемых к электронно-оптической системе (ЭОС) формирования и транспортировки электронного потока, является обеспечение работы в режиме модуляции, при котором происходит частичная или полная отсечка тока пучка за счет подачи соответствующих потенциалов на электроды пушки. Подобная отсечка тока в ЛБВ происходит в процессе включения и выключения прибора [1]. Существенным недостатком такой модуляции является то, что при определенных значениях модулирующих напряжений, в которых имеет место локальный максимум токооседания на СЗС, может произойти преждевременный выход прибора из строя [2].

Целью настоящей работы являлось рассмотрение особенностей проектирования импульсной узкополосной ЛБВ в коротковолновой части Ку-диапазона в части вопросов электронно-волнового взаимодействия и траекторного анализа ЭОС.

Электродинамические характеристики и электронно-волновое взаимодействие

Одной из основных задач при проектировании ЛБВ со спиральной заземляющей системой (СЗС) является определение с высокой точностью электродинамических характеристик (ЭДХ) и, впоследствии, получение достоверных выходных параметров ЛБВ. На сегодня одной из распространенных программ расчета ЭДХ является ANSYS Electronics Suite (HFSS). В HFSS учитывая периодичность структуры, рассматривался отрезок СЗС длиной, равной шагу спирали, и, следовательно, соответствующий одному периоду с периодическими граничными условиями и заданным фазовым сдвигом ВЧ-поля на его торцах [3].

Выбранная конструкция спиральной заземляющей системы состояла из медного экрана (рис. 1 (1)), плющенной микроленты (материал МАГТ-02) (рис. 1 (2)), трех трапециевидных опорных диэлектрических стержня из BeO (рис. 1 (3)). Данная конфигурация ВЧ-пакета и подбор оптимального закона изменения шага спирали вдоль длины пространства взаимодействия позволили эффективно усилить СВЧ-сигнал в выбранном диапазоне частот.

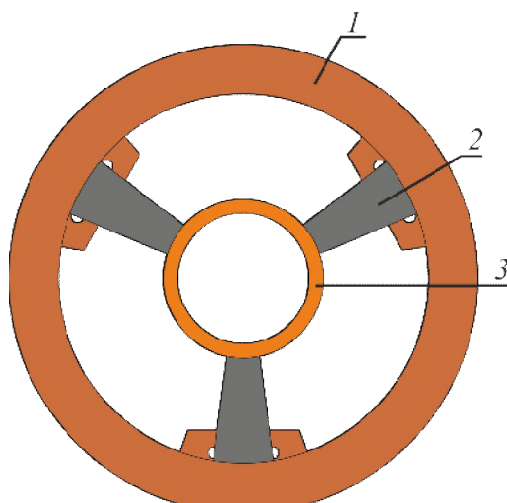


Рис. 1. Поперечное сечение СЗС

На рисунке 2 представлены расчетные частотные зависимости (а) замедления, (б) сопротивления связи и (в) затухания.

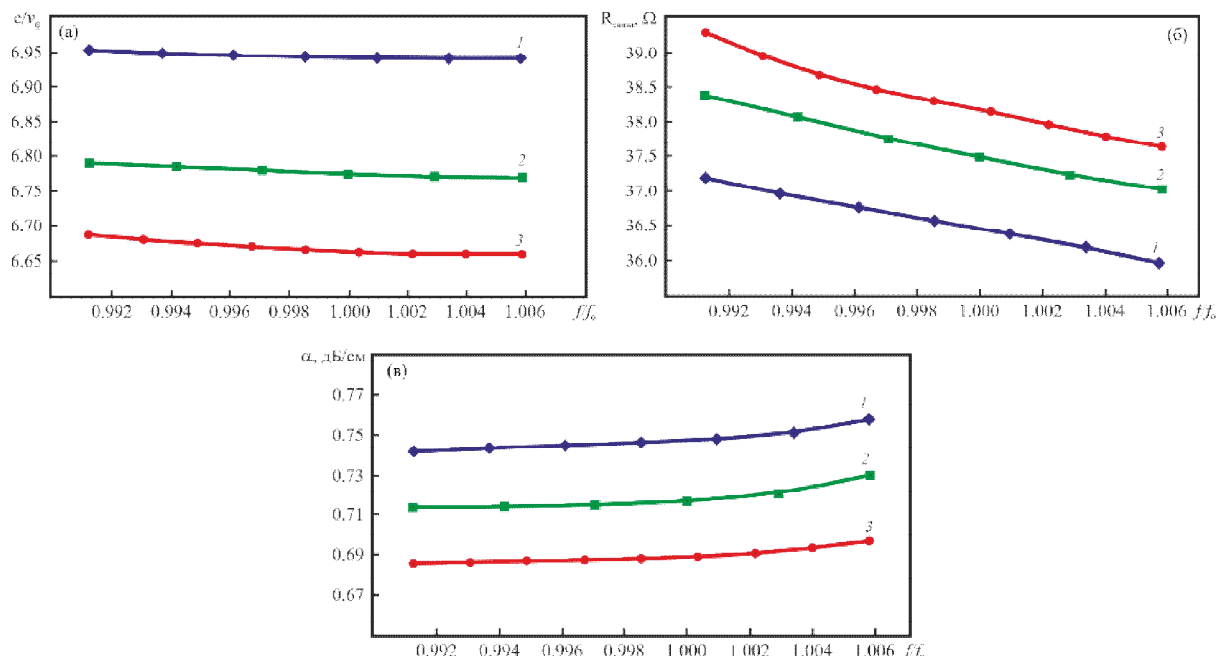


Рис. 2. Частотные зависимости (а) – замедления, (б) – сопротивления связи и (в) – затухания для различных шагов спирали, где (1) – $0.96h_0$, (2) – $0.98h_0$, (3) – h_0 .

На основе полученных в HFSS ЭДХ были рассчитаны выходные характеристики ЛБВ Ку-диапазона (см. рис. 3 (а)) и собран экспериментальный макет с законом изменения шага спирали с ускоряющим напряжением 7.4 кВ и конфигурацией локальных поглотителей СВЧ-энергии, представленным на рис. 3 (1) и (3) соответственно.

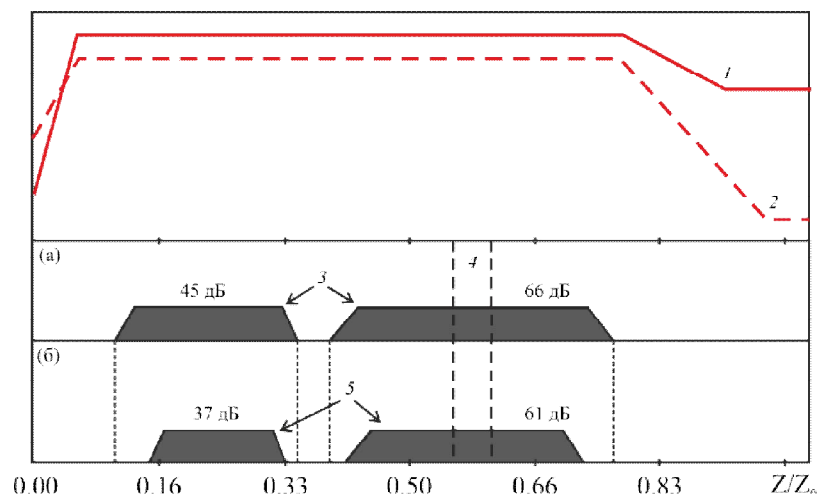


Рис. 3. Конфигурация пространства взаимодействия, где (1) – закон изменения шага СЗС до корректировки, (2) – закон изменения шага СЗС после корректировки, (3) – локальные поглотители СВЧ-энергии до корректировки, (4) – разрыв, (5) – локальные поглотители СВЧ-энергии после корректировки

Исследованы экспериментальные выходные характеристики ЛБВ (см. рис. 4 (а)), которые ранее были представлены в работе [4]. Анализ результатов показал относительное расхождение расчета и эксперимента по выходной мощности на 25%, а по коэффициенту усиления на 45%. Подобное расхождение было обусловлено неучетом шероховатости и тех-

нологических допусков, обусловленных конечным значением проводимости используемых материалов. Для адаптации численной модели был проведен поиск корректировочных множителей (параметрическая оптимизация) для ЭДХ с целью получения приемлемого с практической точки зрения совпадения расчета и эксперимента.

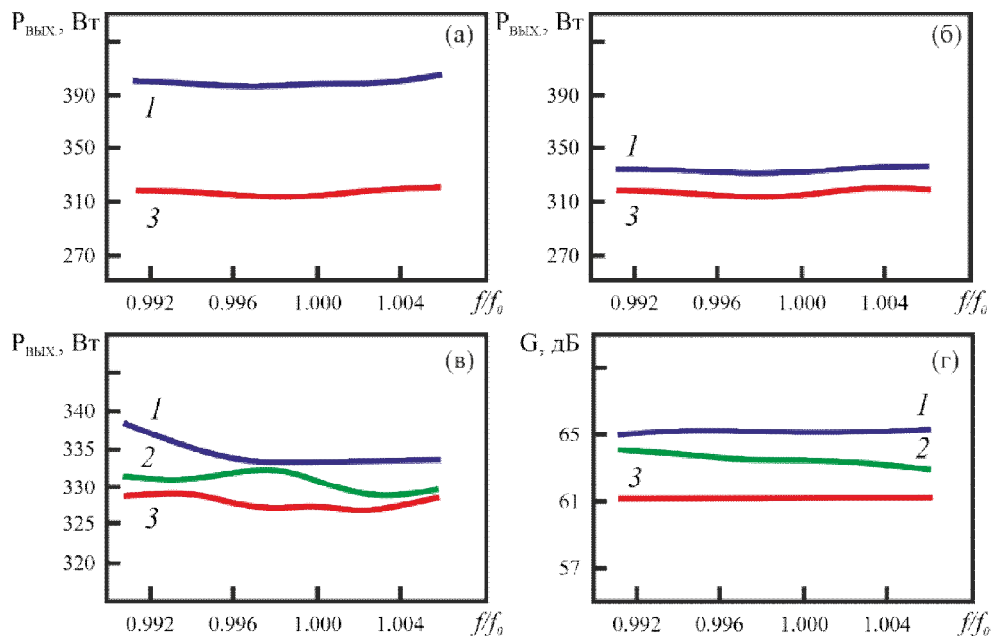


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики, где (а) – зависимость $P_{\text{вых}}$ от f/f_0 для первоначального варианта конструкции ПВ; (б) – зависимость $P_{\text{вых}}$ от f/f_0 для первоначального варианта конструкции ПВ с учетом адаптации численной модели; (в) – зависимость $P_{\text{вых}}$ и (г) – коэффициента усиления от f/f_0 (в) по результатам разработки с учетом адаптации численной модели; f/f_0 – нормированная частота; (1) – расчет 1D, (2) – расчет 2D, (3) – эксперимент

Параметрическая оптимизация ЭДХ: изменение сопротивления связи в интервалах $[0.75 \dots 1.00]$ с шагом 0.05 и затухания $[1.00 \dots 2.00]$ с шагом 0.25 показала соответствие теории и эксперимента с максимальным относительным отклонением по выходной мощности (см. рис. 4 (б)) 5%, а по коэффициенту усиления 12% при уменьшении сопротивления связи на 10% и увеличении затухания в 1.5 раза относительно HFSS.

С целью увеличения коэффициента усиления по результатам изготовления экспериментального макета осуществлена корректировка ПВ: уменьшено ускоряющее напряжение до 7.0 кВ (см. рис. 3 (2)), увеличены длины «чистых» секций между поглотителями (рис. 3 (б)) и уменьшено суммарное затухание на 13 дБ. Проведены соответствующие расчеты по 1D [5] и 2D [6] программам и сопоставлены с экспериментом. Исходя из рис. 4 (в-г) видно, что относительное отклонение от эксперимента по выходной мощности показал расчет по 1D модели – 3%, 2D – 1.71%, по коэффициенту усиления 1D – 6.8%, 2D – 4.8%.

Для определения влияния взаимодействия на характеристики электронного потока: его размер, пульсации и торможение для последующего расчёта многоступенчатого коллектора с рекуперацией и уточнения выходных характеристик, проведен расчёт по программе, основанной на 2D нелинейной модели взаимодействия.

В статическом режиме (рис 5 (а)) огибающая электронного потока хорошо соответствует расчёту пучка в МПФС по программе [7], результаты расчёта по которой также хорошо совпадают с экспериментом. В динамическом режиме (рис. 5 (б)) при входном сигнале наблюдается расфокусировка электронного потока, которая принимает максимальное значение

в области максимума гармоники ВЧ тока (до заполнения потоком электронов пролётного канала порядка 0.85). При уменьшении гармоники ВЧ тока и увеличении электронного КПД заполнение остается практически на том же уровне.

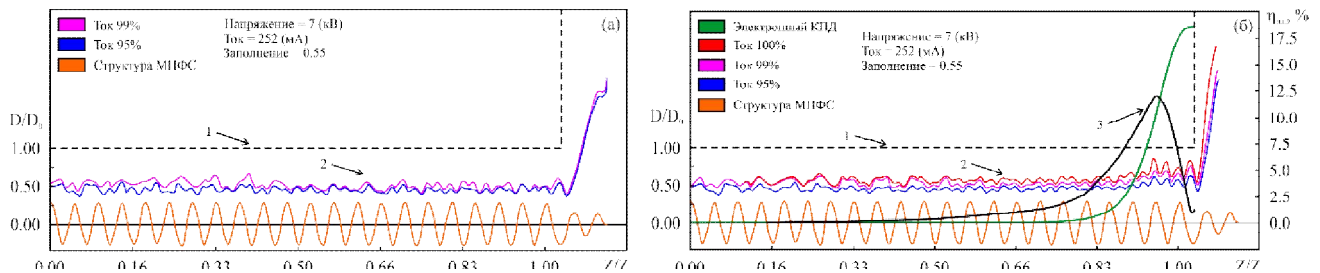


Рис. 5. Результат расчета по 2D программе, где (а) – статический режим без входного сигнала; (б) – динамический режим насыщения выходной мощности; (1) – граница пролетного канала; (2) – огибающая электронного потока; (3) – гармоника ВЧ тока

Электронно-оптическая система

Разработанная электронно-оптическая система (см. рис. 8) с помощью комплекса программ [8] обеспечила для данной ЛБВ получение электронного потока с микроперевансом $0.444 \text{ мкА/В}^{3/2}$ при ускоряющем напряжении 7.0 кВ и заполнении пролетного канала 0.55 в пролетном канале замедляющей системы с диаметром равным 1 мм. В связи с тем, что рабочий режим импульсный со скважностью $Q=5$, модулирующим электродом был выбран фокусирующий. По сравнению с сеточными электродами: одинарным перехватывающим или двойным тневым и управляющим, фокусирующий электрод обладает большими значениями модулирующего напряжения, однако токооседание на корпус ЛБВ и замедляющую систему просиходит только на фронтах импульса во время отпирания и запираения ЛБВ, а в рабочем режиме токопрохождение равно 98-99%. Выбор такого способа модуляции обеспечивает требуемую долговечность ЛБВ.

На рисунке 6 представлена зависимость общего тока катода от потенциала фокусирующего электрода. Величина запираения электронного потока составила -1600 В. Максимальное токооседание наблюдалось в интервале [-300 ... -500 В] на фокусирующем электроде и составило 20 мА при общем токе 252 мА.

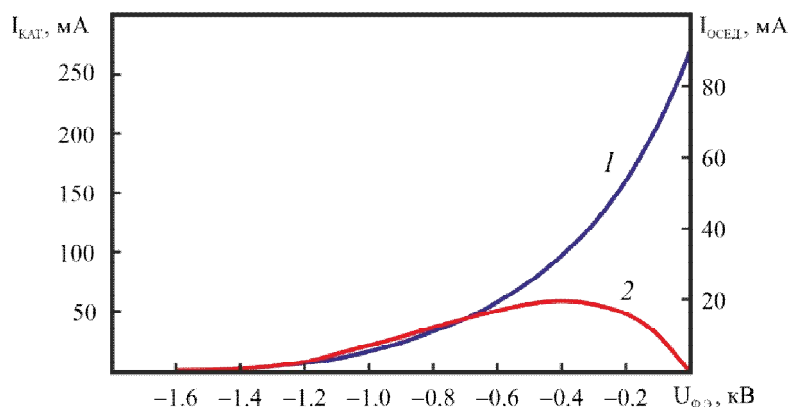


Рис. 6. Вольт-амперная характеристика, где 1 – катодный ток, 2 – токооседание

В работе [9] предложена конструкция специального коллиматора перед СЗС (см. рис. 7 (б)), который практически полностью перехватывал оседающий электронный поток во

время прохождения фронтов включения и выключения импульса и предохранял микроразмерную СЗС от перегрева, обеспечивая требуемую долговечность.

Коллиматор имел наименьший диаметр в точке максимума амплитуды магнитной индукции второго магнита МПФС, ввод энергии располагался в четвертом магните.

Расчет режимов включения данной ЭОС показал, что электронный поток начинает оседать с начала магнитного поля первого магнита и до середины второго магнита и величина токооседания составляет 22% от общего тока (рис. 8).

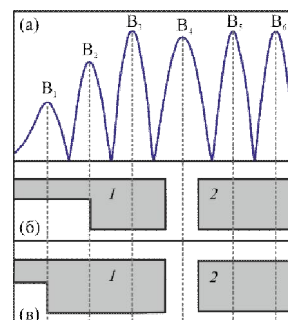


Рис. 7. Конструкции рассматриваемых коллиматоров с привязкой к (а) распределению магнитного поля МПФС

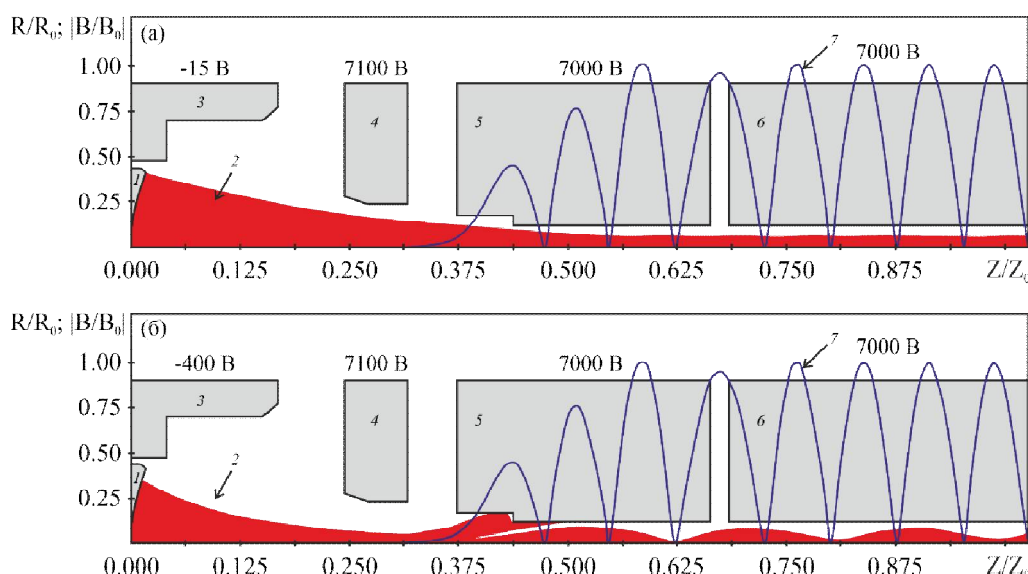


Рис. 8. Траекторный анализ ЭОС в (а) рабочем режиме и (б) при напряжении на фокусирующем электроде в момент максимального токооседания, где (1) – катод; (2) – электронный поток; (3) – фокусирующий электрод; (4) – анод; (5) – коллиматор; (6) – пролетный канал СЗС; (7) – распределение модуля амплитуды магнитной индукции в ячейках магнитов МПФС

Токооседание на ЗС составило 4 мА и имело равномерное распределение по всей длине. Поэтому целесообразно расположить коллиматор на уровне середины первого магнита (рис. 7 (в)) и за его минимальный диаметр взять диаметр пролетного канала ЗС.

Заключение

Проведено проектирование импульсной узкополосной ЛБВ коротковолновой части Ку-диапазона с выходной мощностью 300 Вт. Определены корректировочные коэффициенты на величины электродинамических параметров: замедление – 1.0, сопротивление связи – 0.9, затухание – 1.5, при введении которых получено соответствие между расчетными и экспериментальными значениями выходных характеристик ЛБВ. Выходная мощность совпадает с точностью 1.7%, а коэффициент усиления 4.8%.

Описан траекторный анализ электронного потока в режимах включения/выключения ЛБВ с низковольтной модуляцией по фокусирующему электроду. Показано, что использова-

ние специального коллиматора обеспечило практически полный перехват электронного потока на фронтах импульса модуляции и предохранило СЗС от перегрева и выхода из строя.

Библиографический список

1. Морев, С. П. Уменьшение величины и протяженности области оседания пучка на пролетный канал ЛБВО в режимах модуляции с помощью потенциала фокусирующего электрода электронной пушки / С. П. Морев // Актуальные проблемы электронного приборостроения, АПЭП-2000: материалы Международной научно-технической конференции. – 2000. – С. 150 – 155.
2. Алямовский, И.В. Электронные пучки и электронные пушки / И.В. Алямовский. – М.: Советское радио, 1966. – 456 с.
3. Чистяков, И.А, Роговин, В.И. «Оптимизация конструкции спиральной замедляющей системы для ЛБВ в X-, Ku- и K - диапазонах частот». Электроника и микроэлектроника СВЧ: сб. докладов XII Всероссийской научно-технической конференции. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023, с. 244 – 248.
4. Роговин, В.И., Чистяков, И.А. «Влияние точности расчета электродинамических характеристик на выходные характеристики ЛБВО Ku-диапазона». Нанoeлектроника, нанoфотоника и нелинейная физика: тез. докл. XVII Всерос. конф. молодых ученых. – Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2022, с. 216 – 217.
5. 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. 40-43.
6. Конторин, Ю. Ф., Роговин, В.И., Роговин, И.В. Расчет характеристик интенсивного электронного пучка в лампах бегущей волны // Прикладная физика. – 2011. – № 3. – С. 77-81.
7. Петросян, А.И., Алексеева, Н.А., Роговин, В.И., Чистяков, И.А. Расчет влияния начальных тепловых скоростей электронов на ток пучка, формируемого электронной пушкой //Электронная техника, Сер. 1, СВЧ-техника, вып. 4 (555). 2022, С. 43-50.
8. Журавлева, В.Д., Ильина, Е.М., Конторин, Ю.Ф., Морев, С.П., Пензяков, В.В., Петросян, А.И., Роговин, В.И., Семенов, С.О. Компьютерное моделирование современных ламп бегущей волны различного назначения //Достижения ученых России в области СВЧ-электроники. Вып. 3. Радиотехника, №2, 2001. – С. 56-59.
9. Патент N 2207654 Российская федерация, МПК H01J 23/06 (2006.01), H01J 23/18 (2006.01). Лампа бегущей волны. RU2207654C1: заявл. 08.01.2002, опубликовано 27.06.2003 / Морев С.П., Роговин В.И., Юдин Г.Ю.

УДК 621.385.032; ГРНТИ 47.29.37

ФОРМИРОВАНИЕ ДВОЙНЫХ СЕТОЧНЫХ СТРУКТУР В КАТОДНО-СЕТОЧНЫХ УЗЛАХ ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ ПРИБОРОВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ

Д.А. Бессонов, Р.Ю. Богачев, С.Д. Журавлев, Т.М. Крачковская, В.И. Шестеркин

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

Аннотация. Представлены результаты исследований по разработке технологии совместной прошивки двойных сеточных структур в катодно-сеточных узлах электровакуумных приборов методом лазерного фрезерования. Экспериментально выбраны параметры лазерного излучения: плотность мощности, диаметр фокусного пятна, фокусное расстояние, глубина фокуса, обеспечивающие формирование перемычек теневой сетки шириной, превышающей ширину перемычек управляющей сетки. Сканирование лазерного луча по сферической заготовке сеток с помощью зеркала позволяет осуществлять прошивку обеих сеток по радиусу их кривизны, что обеспечивает надежную геометрическую экранировку перемычек управляющей сетки от прямого перехвата тока электронного пучка.

Ключевые слова: лазерное фрезерование, сеточные структуры, анизотропный пиролитический графит.

FORMATION OF DOUBLE GRID STRUCTURES IN CATHODE-GRID UNITS OF ELECTROVACUUM DEVICES BY LASER MILLING METHOD

D.A. Bessonov, R.Yu. Bogachev, S.D. Zhuravlev, T.M. Krachkovskaya, V.I. Shesterkin

JSC «RPE «Almaz»,

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

The summary. The results are presented of research on the development of technology for joint stitching of double grid structures in cathode-grid units of electric vacuum devices using laser milling. Laser radiation parameters were experimentally selected: power density, focal spot diameter, focal length, focal depth, ensuring the formation of shadow grid jumpers with a width exceeding the width of the control grid jumpers. Scanning a laser beam over a spherical mesh blank using a mirror makes it possible to pierce both meshes along the radius of their curvature, which ensures reliable geometric shielding of the control mesh jumpers from direct interception of the electron beam current.

Key words: laser milling, mesh structures, anisotropic pyrolytic graphite.

Источники напряжения в цепи управляющей сетки усилителей СВЧ диапазона, таких как ЛБВ и клистроны, по возможности должны быть низковольтные. Независимо от вида сеточного тока (прямой токоперехват, термоэмиссионный, автоэмиссионный токи или ток омических утечек) его величина не должна превышать 0,8 миллиампера. Наиболее критичным и значительным по величине является ток, перехватываемый управляющей сеткой, расположенной на пути движения электронного пучка. Для устранения данного вида сеточного тока перемычки управляющей сетки экранируют перемычками размещенной между управляющей сеткой и катодом теневой сетки [1]. В катодно-сеточных узлах с большим (до 10 мм и более) диаметром катода сеточные структуры имеют как радиальные, так и кольцевые перемычки. Надежная экранировка радиальных перемычек управляющей сетки обеспечивается теневой сеткой с сопоставимой шириной перемычек, за счет полевой экранировки эмиссии катода вдоль границы перемычек теневой сетки [2]. Для экранировки кольцевых перемычек, вследствие кривизны эмитирующей поверхности катода, полевой экранировки недостаточно. Внешний диаметр кольцевых перемычек теневой сетки должен быть больше внешнего диаметра кольцевых перемычек управляющей сетки на столько, чтобы предотвратить оседание электронов, стартующих с поверхности катода вблизи зоны полевой экранировки.

В данной работе представлены результаты применения лазерного фрезерования при изготовлении двойных сеточных структур с самосовмещенными перемычками произвольной топологии и ширины.

Технология и установка совместной прошивки двойных сеточных структур

Установка лазерного фрезерования оснащена прецизионной системой позиционирования и перемещения сфокусированного лазерного излучения по поверхности обрабатываемых деталей в соответствии с заданной программой. В установке использовался лазер JPT YDFLP-E2-60-M7-M-R с длиной волны $\lambda=1064\text{нм}$, максимальной энергией в импульсе 2мДж, частотой следования импульсов 20-60кГц, длительностью импульса 100÷200нс. Оптическая система с фокусным расстоянием $F = 100\text{ мм}$ формировала лазерный луч с углом сходимости конуса $3^\circ 59'$. Основной задачей при прошивке двойных сеточных структур являлось формирование перемычек теневой сетки шириной не меньше ширины перемычек управляющей сетки. Данное требование достигнуто за счет:

1. Обработки чашек лазерным излучением со стороны центра радиусов кривизны сеточных структур.
2. Выбора параметров оптической системы: фокусного расстояния и угла сходимости лазерного луча.
3. Приближения КСУ к объективу лазера после формирования перемычек управляющей сетки.

Реализация данной технологии базировалась на следующих принципах геометрической оптики. Учитывалось распределение энергии в поперечном сечении лазерного излучения, сфокусированного на обрабатываемой детали, по закону Гаусса. Мощность излучения выбиралась такой, чтобы удалялся материал первой (управляющей) сетки (Рисунок 1а), а поверхность теневой сетки, удаленной на некоторое расстояние от управляющей сетки, подвергалась лишь незначительному воздействию (рисунок 1б). За счет Гауссова распределения энергии лазерного излучения, ограниченного поверхностью конуса, боковая поверхность перемычек управляющей сетки в сечении имела форму усеченного конуса с направленной к теневой сетке вершиной.

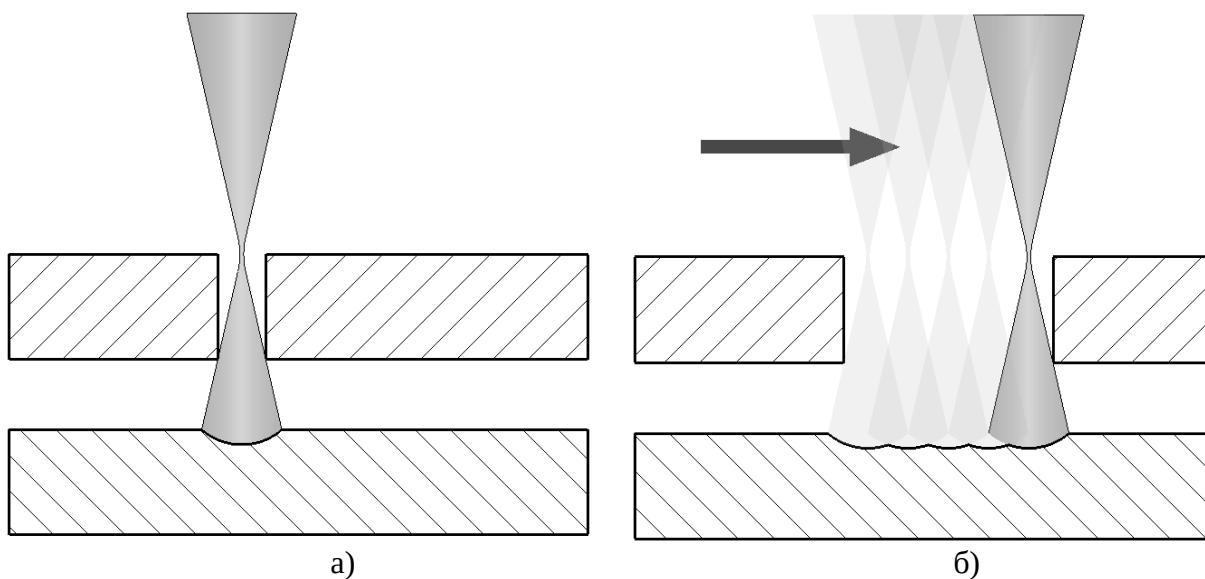


Рис. 1. Формирование отверстий в перемычках управляющей сетки

После формирования перемычек управляющей сетки КСУ перемещался в направлении к объективу лазера на расстояние h , обеспечивающее энергию излучения на поверхности теневой сетки достаточную для испарения материала (рисунок 2а). Далее осуществлялся процесс формирования перемычек теневой сетки, в процессе которого продолжалась обработка боковой поверхности перемычек управляющей сетки лазерным излучением меньшей мощности, в результате которой их ширина уменьшалась (рисунок 2б).

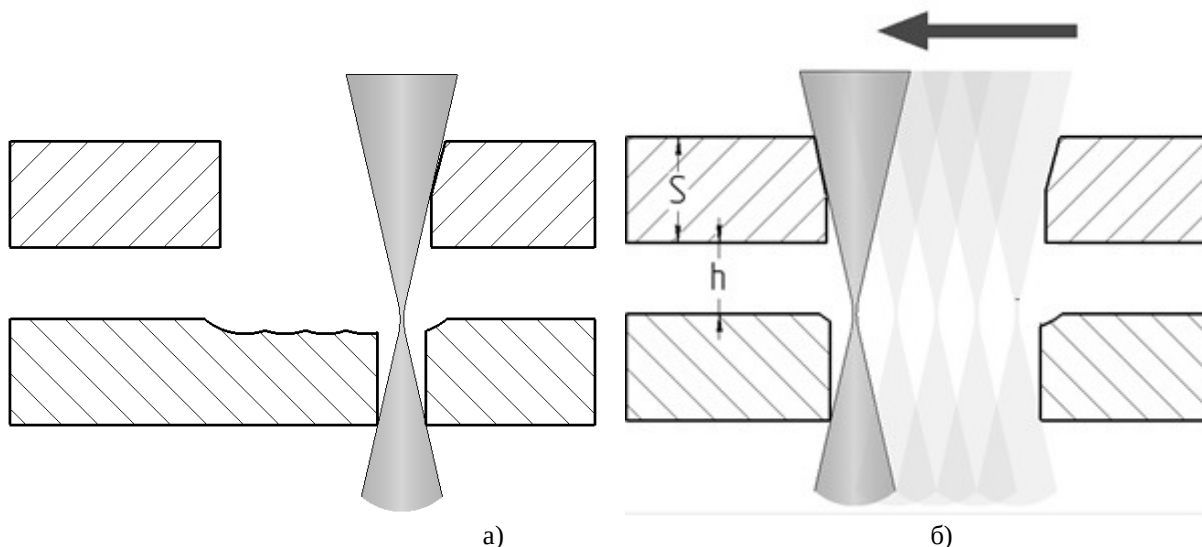


Рис. 2. Формирование отверстий в теневой сетке

Одновременно происходил процесс полировки боковой поверхности перемычек управляющей сетки.

Катодно-сеточный узел с самосовмещенными сетками

По предложенной технологии была осуществлена прошивка сеточных структур в КСУ мощной импульсной ЛБВ (рисунок 3).

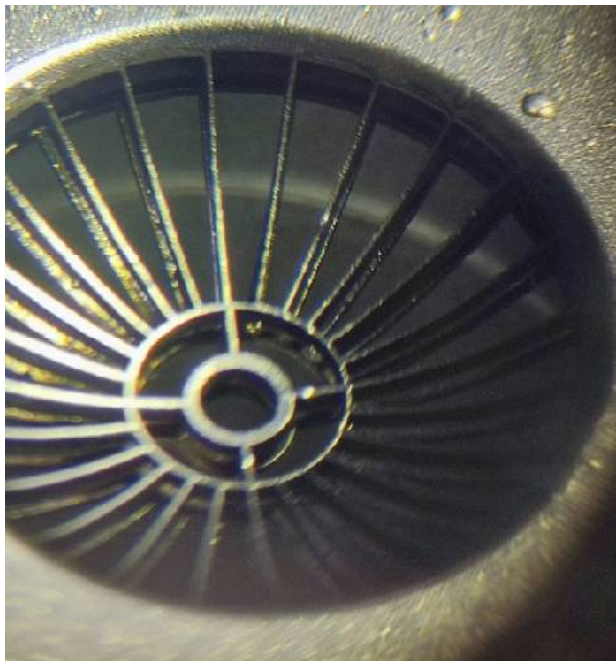


Рис. 3. Сеточные структуры в КСУ

Заготовки теневой и управляющей сеток из анизотропного пиролитического графита в форме чашек со сферической поверхностью толщиной $S = 100$ мкм и 300 мкм соответственно были прикреплены в катодно-сеточном узле к сеткодержателям на расстоянии $h = 300$ мкм друг от друга методом лазерного заклёпывания. Ширина радиальных и кольцевых перемычек управляющей сетки составляла ~ 100 мкм. Ширина радиальных и кольцевых перемычек теневой сетки составляла 120 мкм и 200 мкм соответственно.

Библиографический список

1. Григорьев Ю.А., Правдин Б.С., Шестеркин В.И. Электронно-оптические системы с сеточным управлением // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1987. Вып. 7(1246). М.: Изд-во ЦНИИ Электроника. 71с.
2. Журавлев С.Д., Шестеркин В.И. Эффективная площадь эмиссии катода в катодно-сеточном узле с теневой сеткой // Электронная техника. Сер.1 – СВЧ-техника. 2020. Вып. 4(547). С.55-59.

УДК 621.385.032; ГРНТИ 47.29.37

НЕРАЗЪЕМНОЕ СОЕДИНЕНИЕ УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИХ ДЕТАЛЕЙ С МЕТАЛЛАМИ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО ЗАКЛЁПЫВАНИЯ

Р.Ю. Богачев, Д.А. Бессонов, С.Д. Журавлев, Т.М. Крачковская, В.И. Шестеркин

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

Аннотация. Представлены результаты разработки технологии неразъемного соединения деталей из углеродосодержащих материалов с деталями из металлов методом лазерного заклёпывания. Предложенный способ применен для создания неразъемного соединения сеточных структур из анизотропного пиролитического графита (АПГ) с сеткодержателями из молибдена в катодно-сеточном узле мощной импульсной ЛБВ. Прочность крепления сеточных структур из АПГ в составе промышленно выпускаемого прибора подтверждена испытаниями прибора на вибропрочность и виброудары при ускорении 14g по утвержденной на предприятии методике испытаний приборов данного класса.

Ключевые слова: лазерная абляция, пиролитический графит, сеточные структуры.

PERMANENT CONNECTION OF CARBON-CONTAINING PARTS WITH METALS BY LASER RIVETING METHOD

R.Yu. Bogachev, D.A. Bessonov, S.D. Zhuravlev, T.M. Krachkovskaya, V.I. Shesterkin

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

The summary. The results are presented of the development of a technology for permanently connecting parts made of carbon-containing materials with parts made of metals using laser riveting. The proposed method is used to create a permanent connection of grid structures made of anisotropic pyrolytic graphite (APG) with molybdenum grid holders in the cathode-grid unit of a high-power pulsed TWT. The strength of fastening of mesh structures made of APG as part of a commercially produced device is confirmed by testing the device for vibration strength and vibration impacts at an acceleration of 14g according to the company's approved testing methodology for devices of this class.

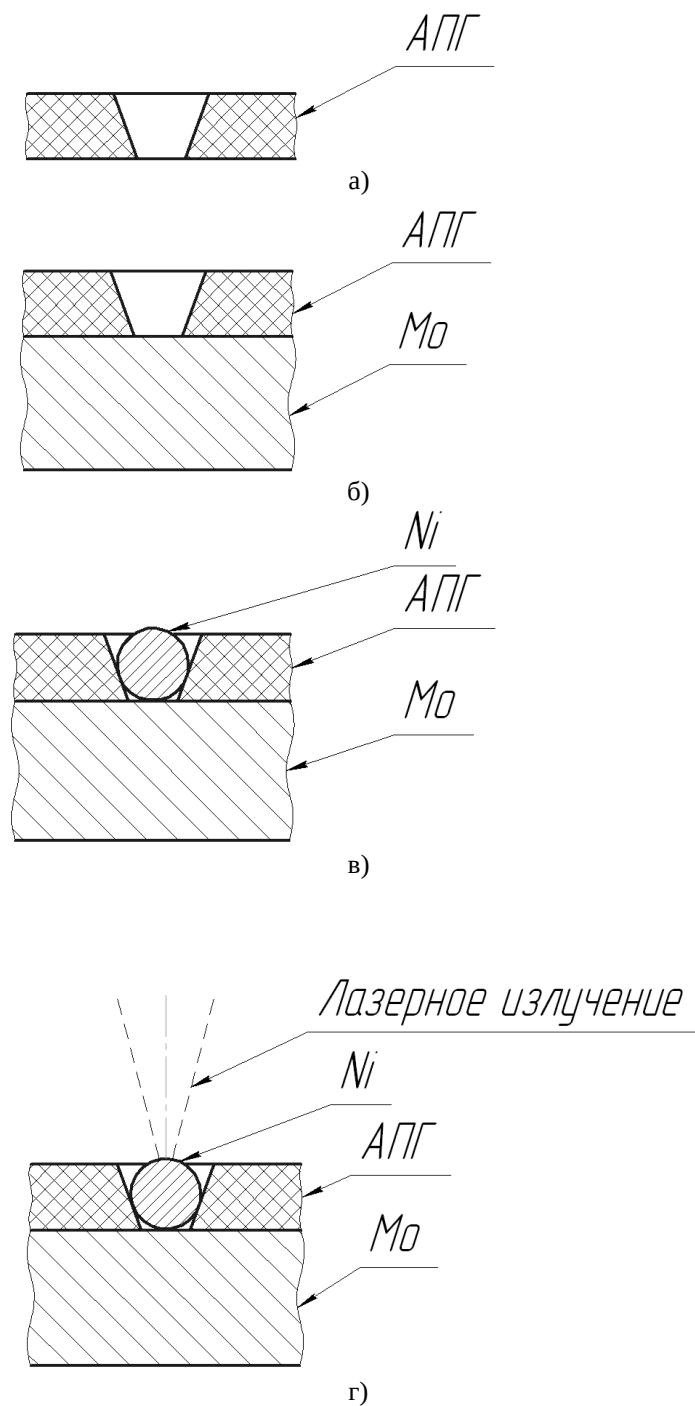
Key words: Laser ablation, pyrolytic graphite, mesh structures.

Сеточные структуры используются для низковольтного управления током электронного пучка в импульсных электровакуумных приборах СВЧ-диапазона [1]. К сеточным структурам, размещенным вблизи эмитирующей поверхности металлопористого катода, разогретого до температуры 1080÷1150°C, предъявляются жесткие требования по антиэмиссионным свойствам (ток паразитной термоэлектронной эмиссии должен быть минимальным). Одним из перспективных материалов для изготовления сеточных структур является анизотропный пиролитический графит (АПГ). По своим антиэмиссионным свойствам и теплорассеивающей способности управляющие сетки из АПГ превосходят сетки из молибдена более чем в 20 раз и примерно в 9 раз превосходят сетки из гафния [2]. Однако сеточные структуры из АПГ до настоящего времени не нашли применения в конструкциях КСУ из-за отсутствия способа их неразъемного соединения с металлами.

Углеродосодержащие материалы химически инертны. Они не образуют устойчивых химических связей с расплавами большинства металлов, что существенно усложняет процесс их соединения с металлами традиционными методами пайки. Для пайки деталей из различных марок графитов, таких как МПГ 6, МПГ 7, разработаны многокомпонентные припои на основе меди и серебра. Для улучшения смачиваемости поверхности графита в припои добавляют адгезионно-активные металлы: Ti, Nb, Cr и др. [3]. Прочность паянных соединений графита с металлами, в основном, обусловлена их объемной пористостью, которая составляет 10-15%, с размерами пор от единиц до десятков микрометров.

Пиролитический графит представляет собой практически безпористый материал, что существенно снижает механическую прочность его сцепления при пайке [4].

В данной работе представлены результаты исследований по созданию технологии неразъемного соединения деталей из пиролитического графита (изотропного и анизотропного) с деталями из металлов методом лазерного заклёпывания. На рисунке 1 представлена последовательность технологических операций, реализующая лазерное заклёпывание с применением лазерной абляции.



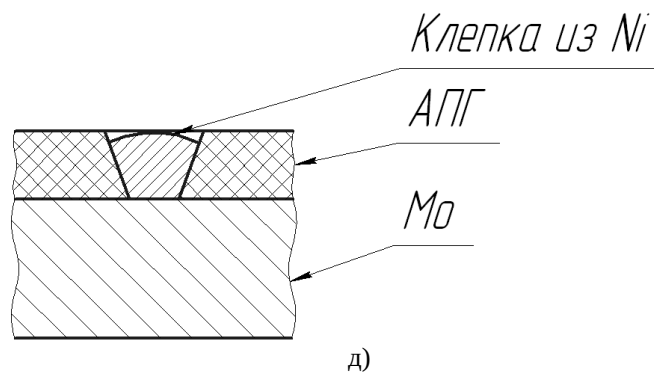


Рис. 1. Последовательность технологических операций лазерного заклёпывания

В данной работе метод лазерного заклёпывания был применен для крепления сеточных структур из анизотропного пиролитического графита (АПГ) к сеткодержателям из молибдена в катодно-сеточном узле мощной импульсной ЛБВ.

В детали из углеродосодержащего материала формируют отверстия в форме усеченного конуса или усеченной пирамиды с основанием в форме прямоугольника или эллипса с обращенной в направлении металлической детали вершиной (рис. 1а). Детали из углеродосодержащего материала механически фиксируют друг относительно друга так, как они должны быть размещены в собранном узле (рис. 1б). В отверстия закладывают кусочки никелевой проволоки (рис. 1в), которые расплавляют лазерной абляцией (рис. 1г). При остывании расплав никеля заполняет полости отверстий, образуя клёпки (рис. 2), соединяющие детали.

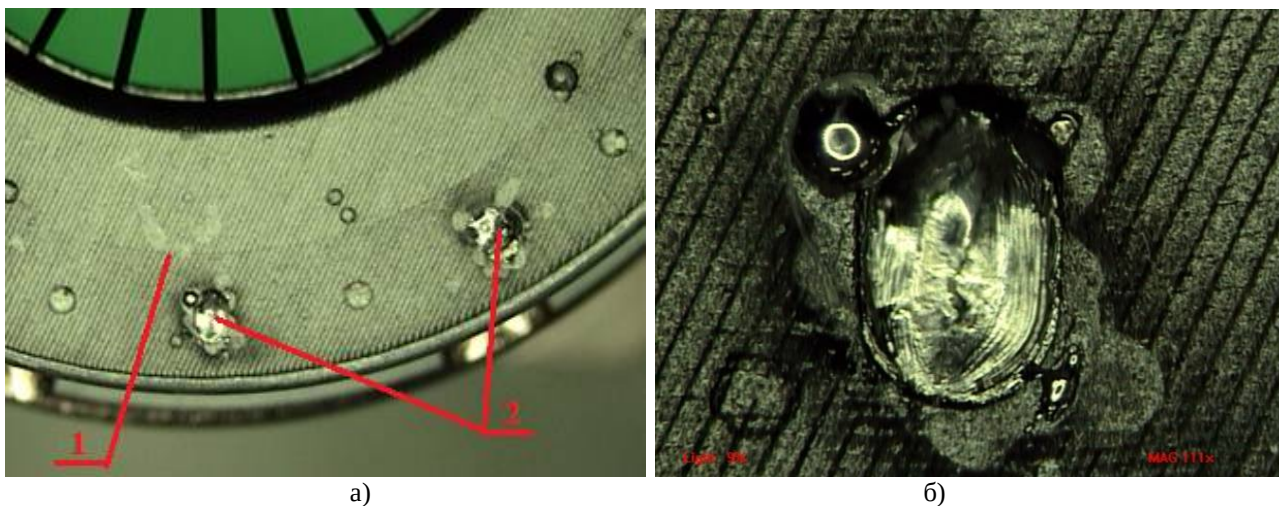


Рис. 2. Катодно-сеточный узел с сеточной структурой из АПГ (а):
1 -сеточная структура; 2 – клёпки; б): фотография клёпки

Прочность соединения подтверждена испытаниями на вибрационные и ударные нагрузки при ускорении 14g, при котором испытываются промышленно изготавливаемые приборы.

Библиографический список

1. Григорьев Ю.А., Правдин Б.С., Шестеркин В.И. Электронно-оптические системы с сеточным управлением // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1987. Вып. 7(1246). М.: Изд-во ЦНИИ Электроника. 71с.

2. Журавлев С.Д., Шестеркин В.И. Токоперехватывающие сетки из анизотропного пиролитического графита в электронных пушках с металлопористым катодом // ЖТФ. 2019. Том 89. Вып. 9. С. 1464-1468.
3. Сотникова Е.М., Радзимовская Н.М. Углеродистые материалы и способы их соединения с металлами. Обзоры по электронной технике. 1984. Серия 7: Технология, организация производства и оборудование. Вып. 7(1023). 62с.
4. Фиалков А.С., Бавер А.И., Сидоров Н.М., Чайкун М.И. и Рабинович С.М. Пирографит. Получение, структура, свойства. – Успехи химии. 1965. Том XXXIV. Вып.1. С. 132-153.

УДК 621.385.6; ГРНТИ 29.35.45

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДУЛЯЦИИ «ПЛЮС-МИНУС» В ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ С КОЛЬЦЕВЫМ КАТОДОМ И НИЗКОВОЛЬТНЫМ БЕССЕТОЧНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

С.П. Морев, Ю.Ю. Филин, Н.М. Коломийцева, К.С. Именина, Н.А. Кривошей

*АО «НПП «Исток» им. Шокина»,
Российская Федерация, Фрязино, yuryufilin@istok.ad*

Аннотация. В статье представлены результаты исследований снижения запирающего напряжения в ЭОС с кольцевым катодом и низковольтным бессеточным управлением током пучка. Найдена геометрия электродов ЭОС для работы электронной пушки при модуляции «плюс-минус». Показано что переход с модуляции «ноль-минус» на модуляцию «плюс-минус» позволяет уменьшить запирающее напряжение практически в 1,5 раза.

Ключевые слова: электронно-оптическая система (ЭОС), низковольтное бессеточное управление, запирающее напряжение, модуляция «плюс-минус».

FEATURES OF USING “PLUS-MINUS” MODULATION IN ELECTRONIC-OPTICAL SYSTEM WITH A RING CATHODE AND LOW-VOLTAGE GRIDLESS CONTROL

S.P. Morev, Yu.Yu. Filin, N.M. Kolomiytseva, K.S. Imenina, N.A. Krivoshey

*JSC NPP Istok named after. Shokin”,
Russian Federation, Fryazino, yuryufilin@istok.ad*

Annotation. The article presents the results of studies of reducing the blocking voltage in an EOS with a ring cathode and low-voltage gridless control of the beam current. The geometry of the EOS electrodes for the operation of the electron gun with plus-minus modulation has been found. It has been shown that the transition from “zero-minus” modulation to “plus-minus” modulation makes it possible to reduce the blocking voltage by almost 1.5 times.

Key words: electro-optical system (EOS), low-voltage gridless control, blocking voltage, «plus-minus» modulation.

В работе [1] представлены результаты модернизации электронно-оптической системы (ЭОС) с кольцевым катодом и низковольтным бессеточным управлением, результатом которых обеспечивалась транспортировка электронного потока с током 0,8 А в канале диаметром 2,0 мм без токооседания. В данной ЭОС управление электронным пучком осуществляется с помощью модуляции «ноль-минус», обеспечиваемой двумя фокусирующими электродами, один из которых расположен в центре кольцевого катода, что позволяет существенно снизить запирающее напряжение (рис. 1). Основные параметры данной ЭОС представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры ЭОС

Ток пучка, мА	800,0
Ускоряющее напряжение, В	9000
Микропервеанс, $\text{мкА/В}^{3/2}$	0,94
Диаметр катода, мм	5
Диаметр канала, мм	2,0
Тип катода	Импрегнированный
Плотность тока на катоде, А/см^2	3,6
Плотность тока в пучке, А/см^2	125,8
Компрессия пучка по площади (бриллюэновская)	36,34
Компрессия пучка по площади (реальная)	31

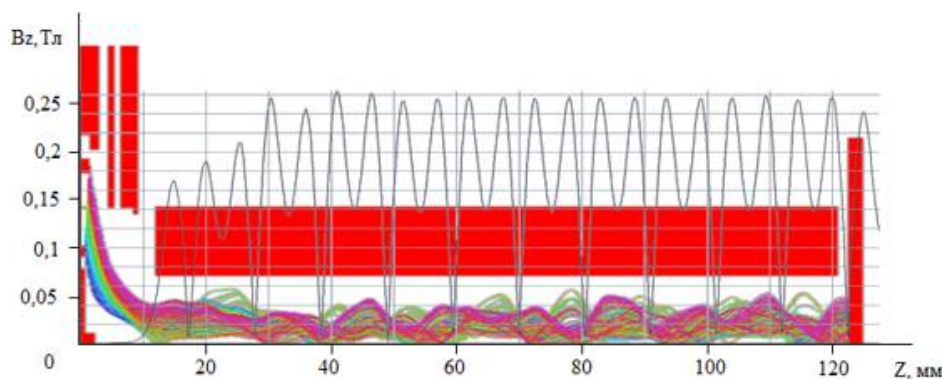


Рис. 1. Формирование и транспортировка пучка при модуляции «ноль – минус»

В ЭОС, представленной в работе [1], для полной отсечки тока катода необходимо подать отрицательный потенциал 1500 В относительно потенциала катода. С увеличением запирающего потенциала увеличивается напряженность электрического поля между катодом и управляющими электродами, которая для данной конструкции составила 8300 В/мм. Для обеспечения работы ЛБВ без пробоев в катодной области необходимо снизить запирающее напряжение. Снижение запирающего напряжения, путем приближения к катоду фокусирующих электродов приводит к сильным возмущениям пучка на краях катода в рабочем режиме, когда на фокусирующие электроды подается нулевой потенциал. Для снижения модулирующего напряжения была предложена конструкция ЭОС с модуляцией «плюс-минус», для которой была изменена конструкция фокусирующих электродов (рис. 2).

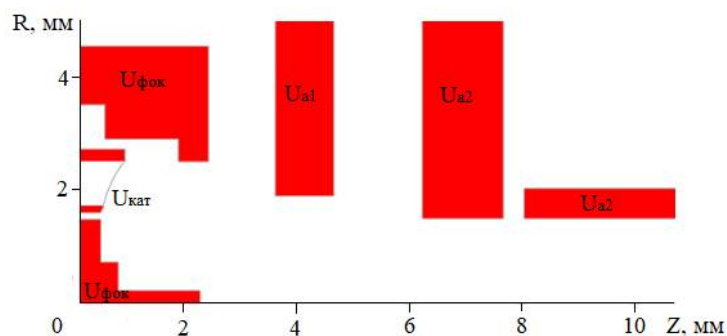


Рис. 2. Конструкция ЭОС для модуляции «плюс-минус»

Для найденной конструкции наименьшее расстояние между фокусирующими электродами и катодом составило 0,15 мм, а формирование и транспортировка электронного потока происходит без токооседания (рис. 3).

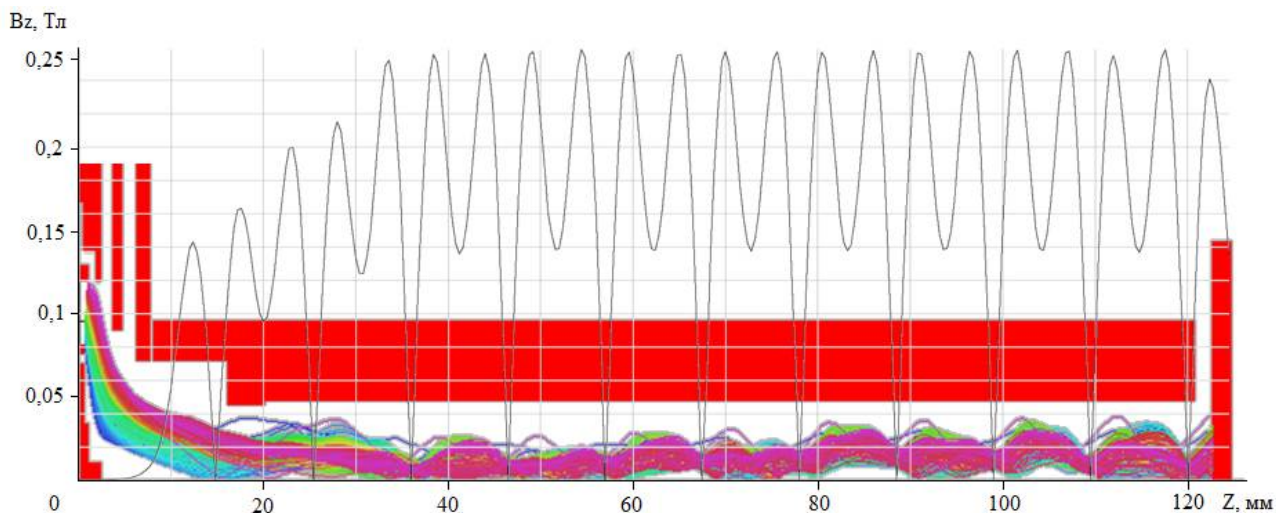


Рис. 3. Формирование и транспортировка электронного потока с модуляцией «плюс-минус»

Напряжение на фокусирующих электродах составило +370 В в рабочем режиме и -590 В в режиме полной отсечки тока. Суммарное модулирующее напряжение составило 960 В, что в 1,5 раза ниже модулирующего напряжения для модуляции «ноль-минус» и составляет 10% от напряжения катода. Следует отметить, что основными преимуществами такого типа модуляции является то, что фокусирующие электроды, используемые в ЭОС, работают как формирующие, вытягивая пучок из эмиссионного слоя катода и не создавая возмущений пучка на его краях в рабочем режиме, так и как управляющие в режимах полной или частичной отсечки катодного тока.

Таким образом, переход на модуляцию «плюс-минус» для систем с кольцевым катодом и фокусирующими электродами электрически изолированных от катода позволило снизить модулирующее напряжение и снизить напряженность электрического поля.

1. Филин Ю.Ю., Морев С.П., Коломийцева Н.М. ЭОС с низковольтным бессеточным управлением, увеличенным катодным током и МПФС с 3-ей гармоникой. XII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Сборник докладов. СПб, 249-252 с.

УДК 621.385.6; ГРНТИ 29.35.45

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА С НЕНУЛЕВЫМ ФАЗОВЫМ ОБЪЕМОМ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭОС СВЧ ПРИБОРОВ О-ТИПА, РАБОТАЮЩИХ В W-ДИАПАЗОНЕ

С.П. Морев, Н.А. Сычев

АО «НПП «Исток» им. Шокина»,

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

Аннотация. Представлены результаты применения модели с ненулевым фазовым объемом для проектирования электронно-оптических систем (ЭОС) с аксиально-симметричным электронным потоком для приборов О типа, предназначенных для работы в субмиллиметровом диапазоне частот. Показана принципиальная необходимость учета фазового объема электронного потока на всех этапах проектирования электронной пушки и магнитной фокусирующей системы. Приведены примеры проектирования ЭОС для прибора О типа коротковолновой части миллиметрового диапазона с током 0,1 А при напряжении 17500 В в магнитном поле периодической фокусирующей системы.

Ключевые слова: электронно-оптическая система (ЭОС), магнитная система, формирование и транспортировка электронного потока, фазовый объем, миллиметровый и субмиллиметровый диапазон частот.

APPLICATION OF AN ELECTRON FLOW MODEL WITH A NON-ZERO PHASE VOLUME FOR DESIGNING O-TYPE EOS MICROWAVE DEVICES OPERATING IN THE W-BAND

S.P. Morev, N.A. Sychev

JSC "RPC "ISTOK" named after Shokin"

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

Abstract. The results of using a model with a non-zero phase volume for the design of electron-optical systems (EOS) with an axially symmetric electron flow for O-type devices designed to operate in the submillimeter frequency range are presented. The fundamental necessity of taking into account the phase volume of the electron flow at all stages of designing an electron gun and magnetic focusing system is shown. Examples of designing an EOS for an O-type device in the short-wave part of the millimeter range with a current of 0.1 A at a voltage of 17500 V in the magnetic field of a periodic focusing system are given.

Key words: electron-optical system (EOS), magnetic system, formation and transportation of electron flow, phase volume, millimeter and submillimeter frequency range.

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 усиления в широкой полосе частот и относительно невысоких (15-30 кВ) напряжениях замедляющей структуры, пожалуй, основным привлекательным прибором в коротковолновой части СВЧ диапазона является ЛБВ.

В работе [1] были представлены результаты испытаний ЛБВ, предназначенной для работы в W-диапазоне. В работах [2,3] для расчетов ЭОС с малыми величинами ускоряющего напряжения было рассмотрено применение модели электронного потока с ненулевым фазовым объемом. В настоящей работе представлен анализ работы ЭОС, испытанной ЛБВ, и показана целесообразность применения этой модели для ЭОС, предназначенными для приборов О типа коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн.

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, высокая компрессия электронного потока в ЭОС, формируемого электронной пушкой, необходимая для обеспечения приемлемой долговечности работы прибора, приводит к повышенному заполнению пучком пролетного канала при выбранных в соответствии с ламинарной моделью [4] величинах магнитного поля, которое не может быть объяснено в рамках этой модели. Для обеспечения уменьшенного заполнения приходится увеличивать амплитуду магнитного поля фокусирующей системы на некий эмпирический коэффициент, что приводит к сложности разработки магнитной фокусирующей системы.

Для описания транспортировки электронного потока в магнитном поле магнитной периодической фокусирующей системы (МПФС) с учетом его фазового объема в параксиальном приближении используется уравнение [4]

$$r'' + \alpha(1 - \cos 2z)r - \frac{\alpha K}{r^3} - \frac{E_H^2}{r^3} - \frac{\beta_p}{r} = 0. \quad (1)$$

Здесь

$$\alpha = \frac{\eta B_a^2 L^2}{64\pi^2 U_0} - \text{параметр магнитного поля } (B_a - \text{амплитуда магнитного поля});$$

$$\beta_p = \frac{P}{4\pi^3 \varepsilon_0 \sqrt{2\eta}} \left[\frac{L}{2R_p} \right]^2 - \text{параметр пространственного заряда } (P - \text{первеанс пучка});$$

$$K = \left(\frac{B_k}{B_a / \sqrt{2}} \right)^2 \left(\frac{R_k}{R_p} \right)^4 - \text{параметр катодных условий};$$

$$E_H^2 = E^2 \left[\frac{L}{2\pi R_p} \right]^2 - \text{нормированный фазовый объем } \left(E^2 = \frac{R_k^2 U_{\perp}}{U} \right);$$

R/R_p и $z = 2\pi Z/L$ – нормированные радиальное значение огибающей пучка и нормализованная продольная координата соответственно (R_p – среднее значение огибающей пучка в магнитном поле, L – период системы);

$U_{\perp}$ – разброс поперечных скоростей электронов, выраженный через потенциал, который определяется формулой

$$U_{\perp} = \frac{kT}{e} \ln \frac{1}{1-N}, \quad (2)$$

где N – часть от общего числа электронов, обладающих скоростью не большей $U_{\perp}$.

$$u(z) = \frac{U(z)}{U_0} - \text{нормализованный потенциал } (U_0 - \text{потенциал на пролетном канале});$$

$$b(z) = \frac{B(z)}{B_a} - \text{нормированное значение осевой компоненты индукции магнитного поля.}$$

Выражение для среднего радиуса R_p имеет вид

$$R_p^2 = a_p^2 \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + 4 \left[\left(\frac{B_k}{B_a / \sqrt{2}} \right)^2 \left(\frac{R_k}{a_p} \right)^4 + 4\pi\epsilon_0 \sqrt{2\eta} \frac{U_{\perp}}{UP} \left(\frac{R_k}{a_p} \right)^2 \right]} \right\}. \quad (3)$$

Здесь a_p - бриллюэновский радиус пучка, равный

$$a_p^2 = \frac{\sqrt{2}PU}{\pi\epsilon_0\eta^{3/2}(B_a / \sqrt{2})^2}. \quad (4)$$

Из (2) следует, что для 99.5% электронов пучка $U_{\perp \max} = 0.7V$, в то время как среднеквадратичной скоростью $(\bar{v}_{\perp}^2)^{1/2}$ обладают лишь 63.2% всех электронов пучка ($U_{\perp \max} = 0.12V$)¹. Таким образом, для импрегнированного катода с температурой $T_k = 1400K$ интервал распределения поперечных скоростей в реальном многоскоростном потоке при учете 99,5% тока необходимо выбирать более чем в 5 раз выше, чем значение среднеквадратичной скорости электронов.

Таким образом, если граничная траектория ламинарного пучка колеблется (в отсутствие магнитного поля на катоде) относительно бриллюэновского радиуса a_p , огибающая многоскоростного пучка с разбросом $U_{\perp}$ пульсирует около среднего значения огибающей R_p , которое всегда больше a_p .

Результаты расчетов и их обсуждение

Была рассмотрена ЭОС ЛБВ [1], параметры которой представлены в таблице 1. Параметры МПФС представлены в таблице 2.

Таблица 1.

Ток пучка, мА	94,0
Ускоряющее напряжение, В	17500
Микропервеанс, мкА/В ^{3/2}	0,041
Диаметр катода, мм	1,00
Диаметр канала, мм	0.4
Тип катода	Импрегнированный
Плотность тока на катоде, А/см ²	12,0
Плотность тока в пучке, А/см ²	214
Компрессия пучка по площади (бриллюэновская)	39
Компрессия пучка по площади (реальная)	18

Таблица 2.

Амплитуда поля на оси, Гс	3950
Период МПФС, мм	9,6
Параметр магнитного поля	0,225
Бриллюэновский радиус пучка в МФС, мм	0,08
Заполнение канала пучком (без учета поперечных скоростей)	0,401
Средний радиус пучка (с учетом поперечных скоростей), мм	0,12
Реальное заполнение канала пучком (с учетом поперечных скоростей)	0,6

Напряжение на фокусирующем электроде было выбрано равным $U_{фэ} = 220 V$; Напряжение запирающего электрода составляло $U_{зап} = -640 V$;

¹ Отметим, что именно эту оценку используют в литературе для учета поперечных скоростей [5].

Анализ результатов расчетов ЭОС без учета поперечных скоростей, представленных на рисунке 1, позволяет сделать вывод правильности проектирования ЭОС в односкоростном («холодном») приближении.

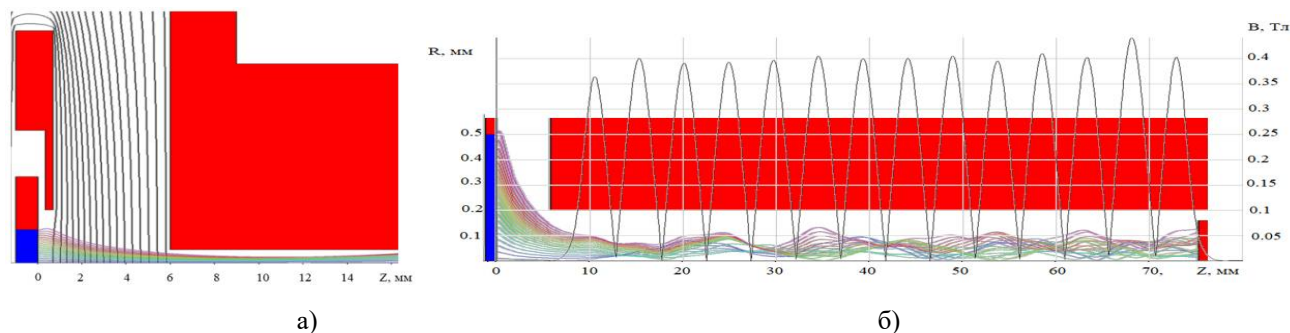


Рис. 1. Формирование пучка в области пушки (а) и его транспортировка в пролетном канале (б) в исходном варианте ЭОС без учета влияния поперечных скоростей электронов

Однако расчеты в «горячем» (многоскоростном) приближении резко меняют картину формирования и последующую транспортировку электронного потока. Учет влияния поперечных составляющих скоростей электронов в пучке приводит к формированию существенно более широкого электронного потока, кроссовер которого смещен в сторону катода электронной пушки. В следствие этого условия для оптимального согласования потока с магнитным полем МПФС нарушаются и электронный поток транспортируется в области пролетного канала с большими пульсациями, практически полностью заполняя его (рис. 2).

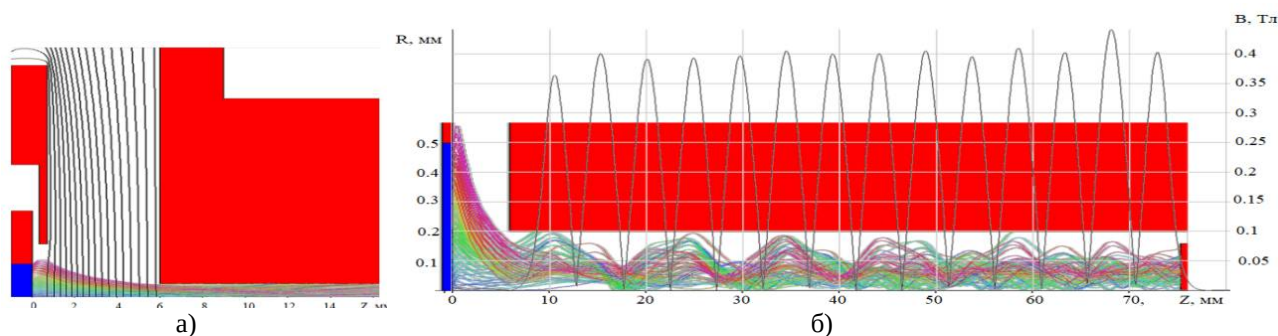


Рис. 2. Формирование пучка в области пушки (а) и его транспортировка в пролетном канале (б) в исходном варианте ЭОС с учетом влияния поперечных скоростей электронов

Юстировка такого потока является трудоемким и далеко не всегда приводящим к успеху процессом, в результате чего на приборе присутствует значительное число юстировочных элементов (рис. 3).



Рис. 3. Вид неудачно отъюстированного макета прибора. (Взято из работы [1])

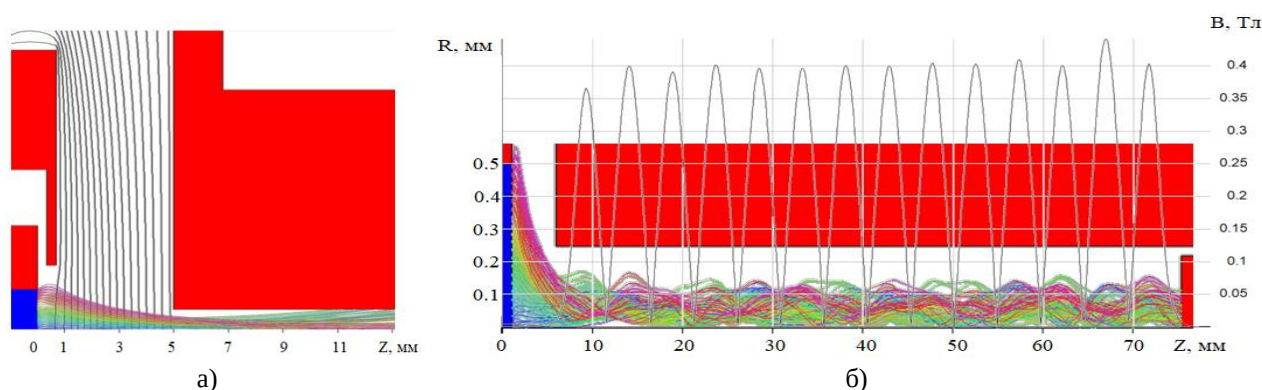


Рис. 4. Формирование пучка в области пушки (а) и его транспортировка в пролетном канале (б) в скорректированном варианте ЭОС с учетом влияния поперечных скоростей электронов

После корректировки геометрических размеров электродов электронной пушки и увеличения диаметра пролетного канала до 0,5 мм удалось сформировать поток с необходимой величиной электростатического кроссовера и, тем самым, обеспечить транспортировку электронного потока с минимальными пульсациями в области пролетного канала при том же уровне магнитного поля.

Библиографический список

1. Сычев Н.А., Панфилов А.И. Опыт разработки низковольтной ЛБВ W диапазона на замедляющей системе типа «петляющий волновод»/ V Международный научно-технический форум СТНО-2022. Сборник трудов. Том 2. Рязань, 2022, с. 5-11
2. Darmaev A., Ivanov A., Morev S., Suhoverhiy A. Development of an electron-optical system for compact Ka band TWT.- 2020 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, September 24-25, 2020, Saratov, Russia. – pp. 103-105
3. 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.
4. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. М., 1966.-456с
5. Кирштейн П., Кайно Г., Уотерс У. Формирование электронных пучков: Пер. с англ. -М.: Мир, 1970.- 600 с.

УДК 621.385; ГРНТИ 47.29

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ИСПАРЕНИЯ АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА КАТОДА В ОТПАЯННЫХ ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ ПРИБОРАХ НА ОСНОВЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ИОНИЗАЦИИ

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

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

Аннотация. Исследован способ измерения скорости испарения активного вещества катода в отпаянных электровакуумных приборах с импрегнированным и оксидно-никелевым катодами по величине тока положительных ионов, испаряющихся с нагретого катода. Показана возможность измерения скорости испарения в отпаянных электровакуумных приборах, конструкция которых допускает наложение магнитного поля вдоль оси прибора.

Ключевые слова: скорость испарения, катод, поверхностная ионизация, положительные ионы, электровакуумный прибор, магнитное поле.

MEASUREMENT OF THE EVAPORATION RATE OF THE ACTIVE CATHODE SUBSTANCES IN SOLDERED ELECTRO-VACUUM DEVICES BASED ON SURFACE IONIZATION

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. A method for measuring the evaporation rate of the active substance of the cathode in soldered vacuum devices with impregnated and nickel-oxide cathodes by the magnitude of the current of positive ions evaporating from the heated cathode is investigated. The possibility of measuring the evaporation rate in soldered electro-vacuum devices, the design of which allows the imposition of a magnetic field along the axis of the device, is shown.

Keywords: evaporation rate, cathode, surface ionization, positive ions, electrovacuum device, magnetic field.

Срок службы электровакуумного прибора (ЭВП) с подогревным катодом и его эмиссионные характеристики во многом определяется скоростью испарения активного вещества катода [1, 2]. Для её измерения создают специальные макеты со встроенными микровесами [3, 4]. По весу продуктов испарения и времени испарения определяют скорость испарения. Измерение скорости испарения также проводят по методу Беккера [5]. Для этого изготавливают макет, содержащий исследуемый катод и нагретую вольфрамовую ленту, на которую направляется поток испаряемого вещества. Время, в течение которого на ленту оседает мономолекулярный слой молекул, определяется по минимуму работы выхода. По известной площади ленты, количеству атомов в мономолекулярном слое и времени его напыления определяют скорость испарения вещества катода [5]. В этой же работе использовался метод Лэнгмюра, в котором скорость испарения вещества определяют по ионному току с вольфрамовой нити, находящейся на пути потока испаряемого вещества. Общим для всех перечисленных способов измерения скорости испарения вещества катода является невозможность применения их для отпаянных ЭВП. Целью настоящей работы является создания способа оценки скорости испарения вещества катода в отпаянных ЭВП.

При рабочей температуре катодов ЭВП с их поверхности должны испаряться не только атомы вещества катода, но и положительные ионы вещества катода за счёт поверхностной ионизации [6]. Степень ионизации пара α_0 , как отношение плотности потока ионов n_a к плотности потока атомов вещества катода n_a может быть оценена по уравнению Саха-Лэнгмюра

$$\alpha_0 = A \exp \left[\frac{e(\phi - U_i)}{kT} \right], \quad (1)$$

где A – отношение статистических весов ионного и атомного состояний, например для двухвалентного бария это отношение равно 1/2;

e – заряд электрона;

ϕ – работа выхода поверхности, с которой испаряются атомы и ионы;

U_i – потенциал ионизации испаряемого атома;

k – постоянная Больцмана;

T – температура поверхности катода.

Уравнение (1) будем использовать для грубой оценки степени ионизации, так как оно справедливо только для однородной поверхности (одна грань монокристалла), которая имеет одинаковую работу выхода на всей площади катода. Катоды ЭВП имеют поликристаллическую поверхность и, следовательно, имеется разброс значений работы выхода по поверхности (пятнистость работы выхода). Кроме этого на величину степени ионизации влияет на-

пряжённость электрического поля у поверхности катода, которая увеличивает степень ионизации [6]

$$\alpha(E) = \alpha_0 \exp \left(\frac{\sqrt{\frac{e^3 E}{4\pi\epsilon_0}}}{kT} \right), \quad (2)$$

где E – напряжённость электрического поля у поверхности катода;

ϵ_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума.

Проведём оценку возможности измерения тока положительных ионов для импрегнированного катода при его рабочей температуре 1373 К, используя экспериментально измеренную величину скорости испарения $V = 1,83 \cdot 10^{-9}$ г/(см²с) [4]. Будем считать, что вольфрамовая губка катода покрыта монослоем атомов бария. Примем работу выхода вольфрамовой губки $e\phi = 4,52$ эВ, энергия ионизации бария 5,21 эВ. Тогда степень ионизации по формуле (1) составит $1,24 \cdot 10^{-3}$. Плотность ионного тока рассчитаем как

$$J = \frac{eV\alpha_0}{m_{Ba}} J, \quad (3)$$

где m_{Ba} масса атома бария в граммах. В результате получим плотность тока положительных ионов $1,36 \cdot 10^{-9}$ А/см², которую вполне можно измерить при площади катода 1 см². В поликристаллическом вольфраме эмиссия положительных ионов идёт с граней кристаллов с наибольшей работой выхода (грани вольфрама 110, 112, 100, 111 имеют работы выхода 5,4, 4,8, 4,55, 4,42 эВ соответственно [2]), поэтому в расчёт дал минимальное значение плотности тока положительных ионов бария.

Если полагать, что вольфрамовая губка покрыта несколькими слоями бария, работа выхода которого 2,52 эВ, то расчёт по соотношениям (1, 3) показывает что степень ионизации будет составлять $6,68 \cdot 10^{-11}$, а плотность тока составит $8,53 \cdot 10^{-17}$ А/см². Поэтому следует ожидать, что величина ионного тока может быть экспериментально измерена.

В случае оксидно-никелевого катода с поверхности испаряется Ва и ВаО. Для оксидного катода на пассивном керне в основном испаряется ВаО [1]. Оксидный катод является полупроводниковым катодом, следовательно электрическое поле проникает под поверхность катода. Поэтому использование формулы (1) является очень грубым приближением. Расчёт степени ионизации по этой формуле проведём для ВаО. Примем работу выхода оксидного катода 1,2 эВ, при энергии ионизации ВаО 6,9 эВ. Степень ионизации по формуле (1) составит $3,8 \cdot 10^{-27}$. При рабочей температуре катода 1100 К, скорость испарения ВаО составляет $3,3 \cdot 10^{-11}$ г/(см²с) [7]. Тогда плотность ионного тока составит $7,9 \cdot 10^{-35}$ А/см², которую будет невозможно измерить.

Наличие порошка никеля в составе катода обеспечивает возможность поверхностной ионизации Ва и ВаО с поверхности никеля, имеющего работу выхода 4,5 эВ. Расчёт даёт значение степени ионизации $2,8 \cdot 10^{-4}$. Тогда плотность тока положительных ионов ВаО составит $5,8 \cdot 10^{-12}$ А/см², которую можно измерить.

Экспериментальное исследование скорости испарения активного вещества импрегнированного алюмо-силикатного катода на основе поверхностной ионизации производилось при использовании в качестве объекта исследования отпаянного электровакуумного прибора триода ГМИ-57Б. Сетка и катод прибора соединялись проводником. На них относительно анода подавалось отрицательное напряжение в диапазоне 5 – 50 В. В цепи анода измерялся ток положительных ионов с помощью электрометра. Поскольку анод запыляется продуктами

испарения вещества катода с низкой (порядка 2 эВ) работой выхода, то под действием облучения с разогретого катода с его поверхности возможен фототок электронов, имеющий тоже направление, что и ток положительных ионов с катода. Для его исключения прибор помещался в соленоид, обеспечивавший создание осевого магнитного поля с индукцией большей критической. На рисунке 1 представлена зависимость тока анода от индукции магнитного поля.

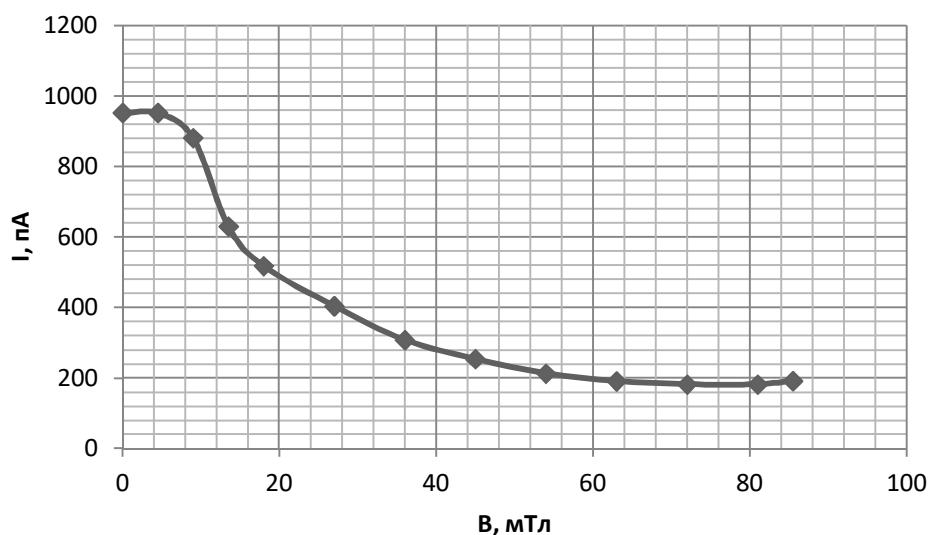


Рис. 1. Зависимость тока анода от индукции магнитного поля при напряжении между катодом и анодом 50 В

Эта зависимость показывает, что фототок есть и для его отсеечения достаточно индукции магнитного поля большей 80 мТл.

Для исключения влияния сопротивления утечки между анодом и электродами прибора на измерение тока положительных ионов с катода измерялась зависимость тока анода от напряжения между катодом, соединённым с сеткой, и анодом при индукции магнитного поля 81 мТл. Линейный характер этой зависимости (рисунок 2) при номинальном напряжении накала 6,3 В и изменении напряжения от 5 до 50 В указывает на наличие сопротивления утечки между электродами. Экстраполяция этой зависимости до пересечения с осью ординат отсекает на ней значение ионного тока при нулевой напряжённости внешнего электрического поля у катода. При напряжении меньшем 5 В линейность зависимости нарушалась и появлялся ток противоположного направления. Таким же образом измерялся ток положительных ионов при напряжениях накала от 5,8 до 7,3 В. Полагалось, что температура катода при напряжении накала 6,3 В составляет 1373 К, а температура катода при других напряжениях накала определялась по отношению мощностей накала в предположении, что мощность подводимая к катоду отводится излучением. На рисунке 3 представлены зависимости от температуры тока положительных ионов и экспериментальная зависимость скорости испарения вещества катода V в единицах $г/(см^2с)$ от температуры катода из работы [4]. Тангенс угла наклона прямой для скорости испарения составляет 1,77, а для прямой зависимости тока положительных ионов от температуры в диапазоне 1345 – 1407 К составляет 1,9. Это указывает на корреляцию между скоростью испарения вещества импрегнированного катода и тока положительных ионов с катода.

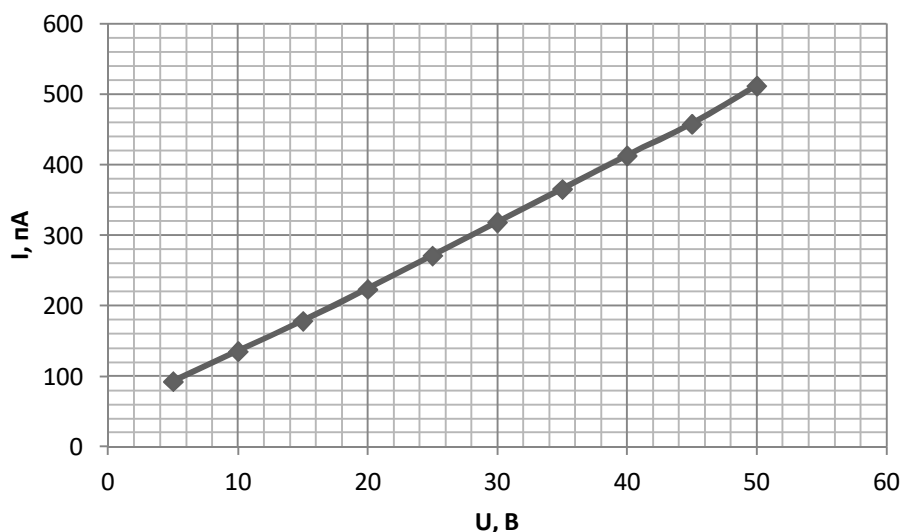


Рис. 2. Зависимость тока анода от напряжения между сеткой, соединённой с катодом, и анодом при напряжении накала 6,3 В, индукции магнитного поля 81 мТл

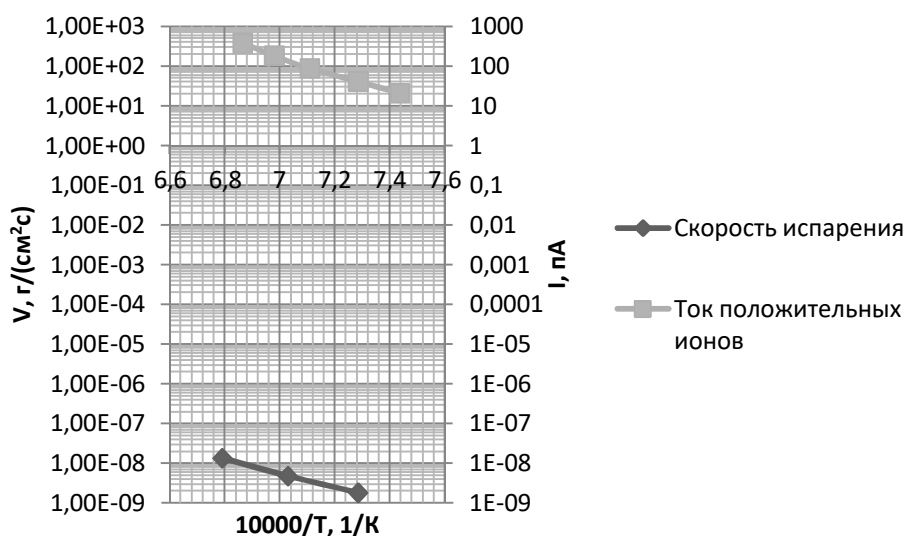


Рис. 3. Зависимость скорости испарения активного вещества импрегнированного катода, определённая взвешиванием (1) в работе [4] и зависимость тока положительных ионов от температуры катода (2)

вид, как для импрегнированного катода. Зависимости тока анода от магнитного поля и напряжения между катодом, электрически соединённым с сеткой, и анодом получились аналогичные зависимостям на рисунках 1 и 2. Поэтому на приведём (рисунок 4) только зависимость ионного тока оксидно-никелевого катода и для сравнения рассчитанную по формуле [7] зависимость скорости испарения BaO от температуры катода

$$\lg V = 7.7 - 20000/T, \quad (4)$$

где V – скорость испарения окиси бария в г/(см²с). Тангенс угла наклона прямой для зависимости тока положительный ионов от температуры составляет 1,92, а для прямой скорости

испарения 1,99. Это указывает на связь между током положительных ионов и скоростью испарения оксидно-никелевого катода.

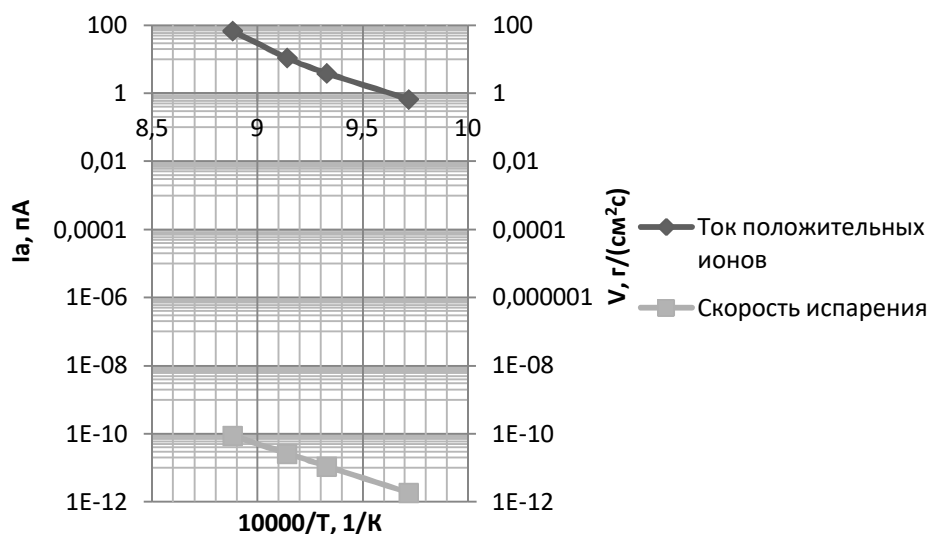


Рис. 4. Зависимость скорости испарения активного вещества оксидно-никелевого катода в работе [7] и зависимость тока положительных ионов от температуры катода

Практическая реализация оценки скорости испарения вещества катода может быть реализована путём измерения тока положительных ионов с катода для партии отпаянных ЭВП при номинальном значении мощности нагрева катода и вычислении статистически достоверного среднего значения тока. Существенные отклонения от среднего значения ионного тока будут указывать об изменении скорости испарения вещества катода в конкретном ЭВП.

Таким образом, установлена возможность использования явления поверхностной ионизации для оценки скорости испарения в отпаянных ЭВП с импрегнированными и оксидно-никелевыми катодами, если конструкция прибора допускает наложение магнитного поля вдоль оси прибора.

Библиографический список

1. Ашкинази Л. А. Термо- и вторично-электронные катоды для электровакуумных и газоразрядных приборов. Обзоры по электронной технике. Серия 1, СВЧ-техника. 1992, вып. 5 (1673). М.: ЦНИИ "Электроника".
2. Мойжес Б. Я. Физические процессы в оксидном катоде. М.: Наука, 1968, 480 с.
3. Zhang-qi Cheng, Chong-rou Wu, Ming-sheng Ni. The measurement of cathode evaporation rate by quartz crystal microbalance – J. Vac. Sci. Technol. A 9, 501–504 (1991).
4. Емельянов А. С. и др. Исследование скорости испарения активного вещества металлопористого катода методом пьезоэлектрического резонанса // Вакуумная техника и технологии – 2022: труды 29-й Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022. – С. 24-26.
5. Кульварская Б. С. Исследование скоростей испарения катодов из карбидов урана, циркония и их твёрдых растворов. Атомная энергия. Том 21, вып. 5, 1966. – С. 368 – 375.
6. Зандберг Э. Я., Ионов Н. И. Поверхностная ионизация. М.: Наука, 1969, 432 с.
7. Никонов Б. П., Отмахова Н. Г., Исследование испарения щелочноземельных оксидов. Электронная техника. Сер.1, Электроника СВЧ, 1971, №1, с. 117127.

УДК 621.396; ГРНТИ 47.14.23

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОЩНОГО РАЗВЯЗЫВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

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 2 кВт. Разработана модель циркулятора в программе Comsol Multiphysics, заданы электрические параметры и рассчитаны температурные значения от изменения входной мощности.

Ключевые слова: мощные циркуляторы, тепловые характеристики, температура феррита, вносимые потери, тепловая труба

SIMULATION OF THERMAL CHARACTERISTICS OF POWERFUL DECOUPLE

O.A. Gorlin, V.V. Klimakov

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

Abstract. The work presents modeling of thermal characteristics of the decoupler by 2 kW. The circulator model was developed in the Comsol Multiphysics program, electrical parameters were set and temperature values from changes in input power were calculated.

Keywords: powerful circulators, thermal characteristics, ferrite temperature, introduced losses, heat pipe

Циркуляторы, вентили и другие ферритовые развязывающие устройства (ФРУ) СВЧ диапазона сейчас находят широкое применение в военных и промышленных приборах, и устройствах. Несмотря на быстрое развитие полупроводниковых компонентов, которые по своим функциональным возможностям во многих случаях успешно конкурируют с ферритовыми развязывающими устройствами, полностью отказаться от применения ФРУ на данном этапе развития техники СВЧ не представляется возможным. Применение ФРУ неизменно остается актуальным в условиях радиационных воздействий и высоких уровней мощности. 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. Одной из важных задач при разработке ФРУ на высокую мощность 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. Расчеты циркуляторов показаны в литературных источниках [1-4], но исследований тепловых характеристик материалов ФРУ не проводилось, хотя этот фактор влияет на свойства феррита и соответственно на работоспособность циркулятора. Исследуемый циркулятор ранее использовался в усилительных блоках для развязки устройств на выходную импульсную мощность до 1.2 кВт, но в связи модернизацией и повышением мощности усилительного блока до 2 кВт на сегодняшний день данное развязывающее устройство не применяется в новых усилительных модулях.

Целью данной работы является исследование температурных характеристик и путей повышения мощности не изменяя габаритных размеров существующего изделия.

Для нормальной работоспособности развязывающее устройство должно удовлетворять соответствующим требованиям (таблица 1).

Таблица 1. Требования к параметрам ФРУ

Наименование параметра	Единица величины	Величина параметра
Прямые потери, не более	дБ	0,3
Развязка, не менее	дБ	15
КСВН входа, не более	-	1,5
Предельный уровень мощности импульсного входного сигнала, не более	Вт	2000
Предельный средний уровень мощности входного сигнала, не более	Вт	200
Рассеиваемая мощность при максимальном уровне входного сигнала и прямых потерях 0,3 дБ	Вт	16

Как показано в таблице 1 прямые потери ФРУ в 0,3 дБ составляют 16 Вт, поэтому для разрабатываемой модели эта величина была взята выше и составила 20 Вт и для детального исследования температурных характеристик в программе Comsol Multiphysics была разработана численная математическая модель теплообмена ФРУ (рисунок 1).

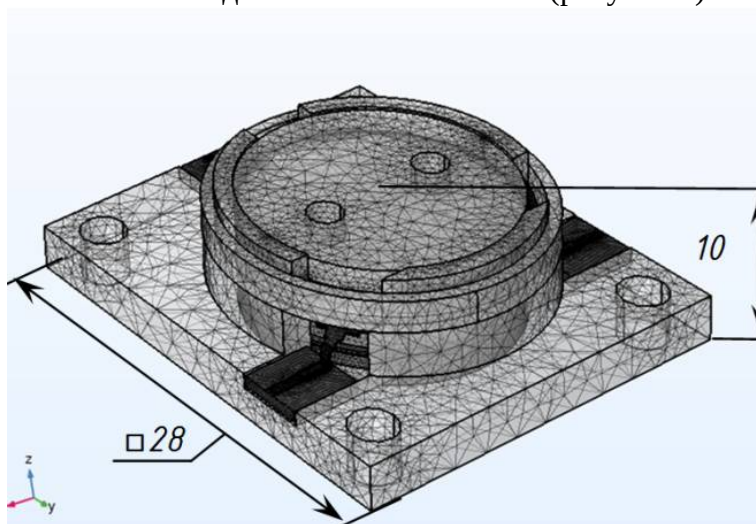


Рис. 1. Геометрия модели развязывающего устройства с расчетной сеткой конечных элементов

В тепловой модели температура внешнего корпуса модуля, в котором установлено развязывающее устройство взята равной 35°C . В качестве граничного условия для теплообмена на внешней поверхности развязывающего устройства задан коэффициент теплопередачи в диапазоне от 2-6 Вт/м²К. Результаты расчета температурного поля ФРУ показаны на рисунке 2.

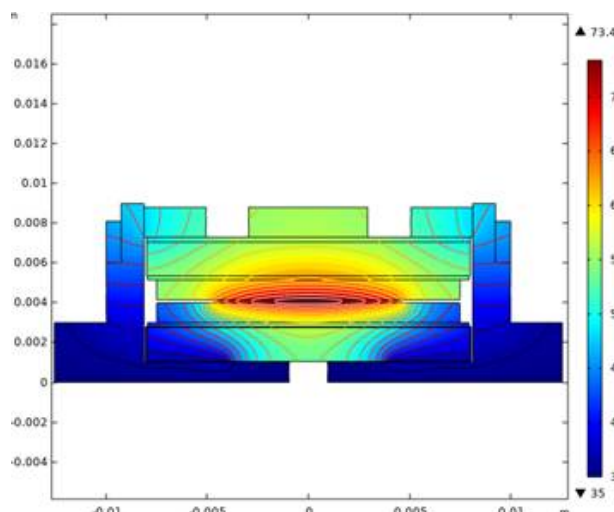


Рис. 2. Результаты расчета температурного поля ФРУ

Из результатов расчета приведенных на рисунке 2 видно, что максимальная температура в области ферритов составляет 72°C . Это связано с тем, что вкладыши непосредственно всей своей плоскостью контактируют с проводником, который является источником тепла. Так как ФРУ находится в закрытом блоке усилительного модуля малого объема и крепится на его основание (из меди) нижней частью корпуса, то основной отвод тепла осуществляется теплопроводностью именно через низ устройства. Однако в следствии симметричного исполнения конструкции магнитной системы развязывающего устройства значительная часть теплового потока направлена и на его крышку, откуда теплоотвод осуществляется только естественной конвекцией в условиях ограниченного пространства усилительного модуля. Такая ситуация способствует появлению неравномерного распределения температуры в верхнем и нижнем ферритах разного характера, и как следствие различных условий для их работы.

Для выравнивания температурного поля по конструкции развязывающего устройства было предложено решение в виде тепловой трубы, позволяющее интенсифицировать отвод тепла через верх ФРУ на крышку закрытого блока усилительного модуля (УМ). Вариант конструкции модернизированного усилительного блока с отводом тепла от крышки ФРУ с помощью тепловой трубы показан на рисунке 3. Форма тепловой трубы её расположение и способ установки приведены на рисунке 3,а.

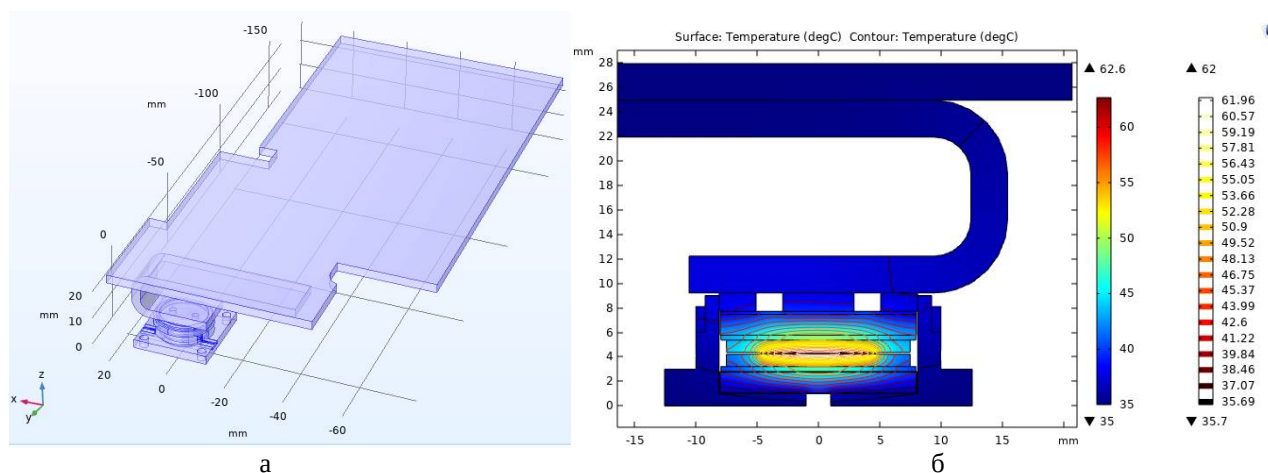


Рис. 3. ФРУ с тепловой трубой: а – расчетная модель конструкции РУ; б – результаты расчета температурного поля

На рисунке 3,б показано распределение температуры по конструкции ФРУ с тепловой трубой. Максимальная температура развязывающего устройства в результате установки тепловой трубы будет снижена на $10,8^{\circ}\text{C}$, а максимальная температура на ферритовых дисках не будет превышать 64°C .

Установка тепловой трубы позволяет получить более равномерное распределение температуры по ферритам и в конструкции рисунок 4 а,б, а также снизить градиентный перепад на $12 - 10^{\circ}\text{C}$ по всей длине в диаметральной направлении диска.

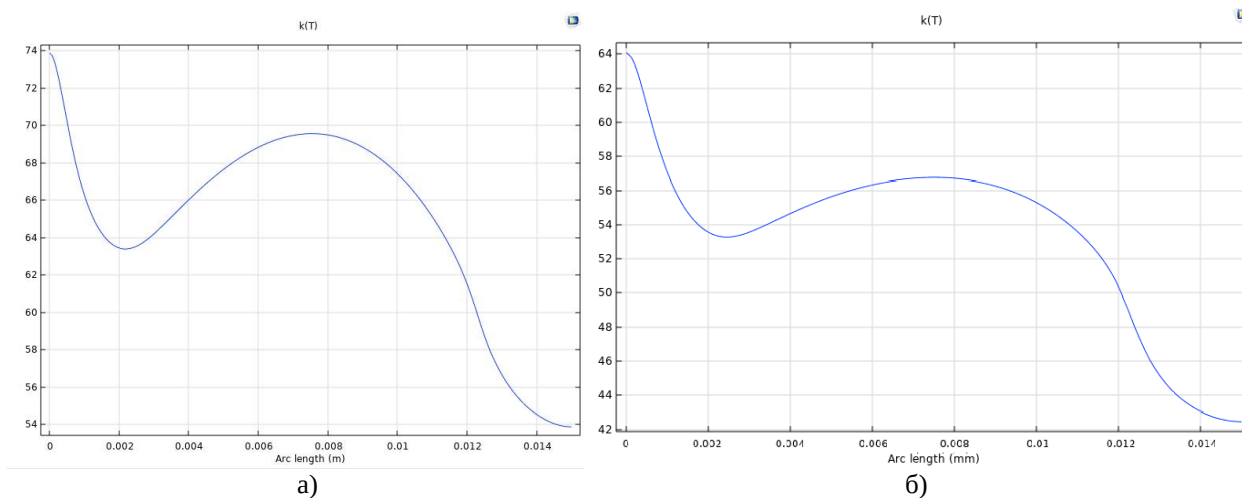


Рис. 4. Распределение температуры по длине диаметральной линии сечения на верхнем феррите в плоскости сечения на уровне 0.045 м от основания магнита
а) – без тепловой трубы; б) – с тепловой трубой

Таким образом, введение тепловых труб обеспечит более равномерное распределение температуры по диаметру феррита, а также снизит общую температуру на 10°C .

Заключение

Разработана тепловая модель ФРУ в программе Comsol Multiphysics на которой исследовались температурные характеристики. Температурная зависимость моделируемой конструкции дала максимальный результат $73,4^{\circ}\text{C}$, но распределение по диаметру ферритового диска было не равномерное. Конструкция ФРУ с тепловыми трубами позволила снизить и обеспечить более равномерное распределение по ферритовым дискам температуры. Тепловая труба с более лучшими характеристиками (перепад менее 5°C) позволит более значительно снизить температуру ФРУ. Выявлен дальнейший путь решения задачи повышения мощности – использование ферритов с высоким предельным уровнем СВЧ.

Библиографический список

1. Вамберский М.В, Абрамов В.П., Казанцев В.И. Конструирование ферритовых развязывающих приборов СВЧ - Москва, 1982г.
2. А.Л. Микаэлян Теория и применение ферритов на сверхвысоких частотах – Москва, 1963.
3. Helzajn J. The Stripline Circulator Theory and Practice. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008, 604 p.
4. Абрамов В.П., Дмитриев В.А., Шелухин С.А. Невзаимные устройства на ферритовых резонаторах – Москва, 1989г.

УДК 621.386. 2; ГРНТИ 29.35.45

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА В ЭЛЕКТРОННЫХ ПУШКАХ РЕНТГЕНОВСКИХ ТРУБОК С ПРЯМОНАКАЛЬНЫМИ КАТОДАМИ

**В.М. Саблин¹, А.Н. Дармаев², С.П. Морев³, Н.Н. Потрахов⁴,
И.Ф. Ханбеков⁵, И.П. Ли⁶**

¹АО Научно-производственное предприятие «Торий», г. Москва,

²АО «Центр суперкомпьютерного моделирования» (ЦСМ), г. Москва,

³АО Научно-производственное предприятие «Исток», г. Фрязино,

⁴СПбГТЭУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург,

⁵ООО «ТД Химмед», г. Москва, ⁶АО «Плутон», г. Москва

Аннотация. Представлены результаты анализа транспортировки протяженного электронного потока в электронно-оптических системах (ЭОС) рентгеновских трубок с прямонакальными катодами. Рассмотрены различные аспекты улучшения структуры электронного потока, позволяющие увеличить протяженность пространства дрейфа потока в пролетном канале рентгеновской трубки.

Ключевые слова: рентгеновские трубки, ЭОС, прямонакальные катоды

FEATURES OF ELECTRON FLOW FORMATION IN ELECTRON GUNS OF X-RAY TUBES WITH RECTILINEAR CATHODES

V.M. Sablin¹, A.N. Darmaev², S.P. Morev³, N.N. Potrakhov⁴, I.N. Hanbekov⁵, I.P. Lee⁶

¹JSC Scientific and Production Enterprise "Thoriy", Moscow,

²JSC "Center for Supercomputer Modeling" (CSM), Moscow

³JSC Scientific and Production Enterprise "Istok", Fryazino,

⁴SPbGTEU "LETI", St. Petersburg,

⁵limited liability company "Chimmed Group", Moscow,

⁶Joint-Stock Company "Pluton", i.li@pluton.msk.ru

Annotation. The results of the analysis of the transportation of an extended electron stream in electron-optical systems (EOS) of X-ray tubes with straight-channel cathodes are presented. Various aspects of improving the structure of the electron flow are considered, which make it possible to increase the length of the flow drift space in the span channel of the X-ray tube.

Keyword: the x-ray tube, the electron - optical system, directly heated cathodes

Введение

Рентгеновские трубки уже давно и прочно занимают широкую нишу источников рентгеновского излучения. Использование рентгеновских трубок при разработке микрофокусных и малогабаритных технологических установок связано с одним из актуальных направлений развития рентгеновской техники. В последнее время усилился интерес к созданию таких источников, в которых падающий на мишень электронный поток должен иметь по возможности малый размер (порядка 10-100 мкм), наряду с большой протяженностью транспортировки электронного потока (порядка 200-300 мм). Это выдвигает дополнительные требования к формированию электронного потока в области электронной пушки и его дальнейшей транспортировке в электронно-оптической системе рентгеновской трубки.

В докладе представлены материалы математического моделирования электронно-оптических систем, в которых источником электронов является прямонакальный катод, выполненный из вольфрама.

Постановка задачи

В работе [1] анализировалась электронная пушка с прямонакальным катодом, модель которой представлена на рисунке 1.

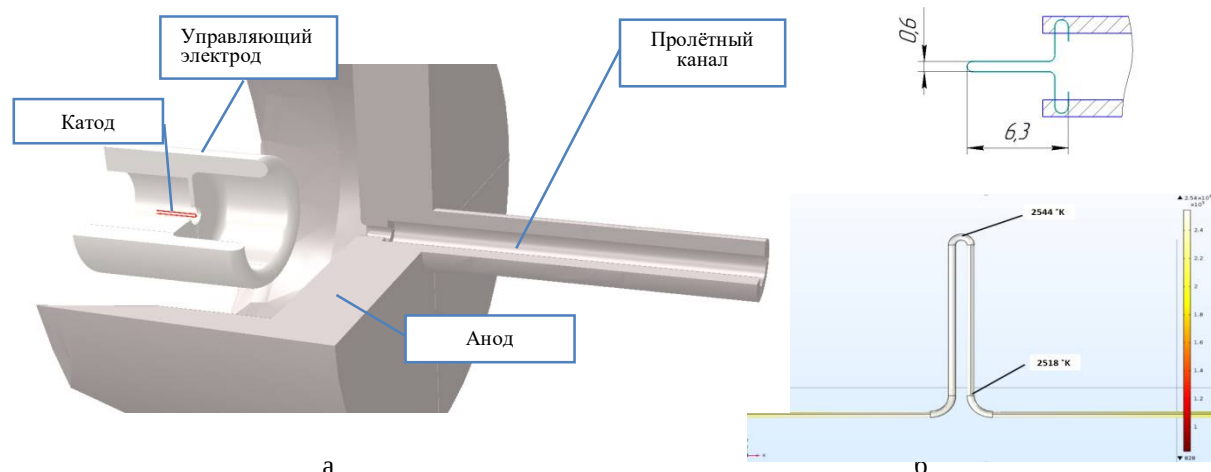


Рис. 1. Трехмерная модель электронной пушки с прямонакальным катодом (а), катод в держателе и распределение температуры по поверхности катода (б).
Взято из работы [1].

Катод электронной пушки представлял собой вольфрамовую проволоку, изогнутую и размещенную внутри молибденового держателя в соответствии с рисунком 1а. При токе накала $3,0 \div 4,0$ А температура катода составила $2200 \div 2500$ °К. Вследствие малого перепада температуры по катоду, эмиссия электронов происходила со всего катода. Работа выхода соответствовала чистому вольфраму 4,5 эВ, а температура катода – 2250 °К. Из-за пренебрежимо малого влияния собственного магнитного поля электронного потока в последующих расчетах оно не учитывались.

Аналогичные расчеты были проведены и для рассматриваемой лампы 0.15БТМ2-50.

Результаты расчетов и их обсуждение

Была рассмотрена ЭОС рентгеновской трубки со следующими исходными данными:

- ускоряющее напряжение – 50 кВ;
- ток катода – 3 мА;
- тип катода – прямонакальный (вольфрам);
- напряжение фокусирующего электрода относительно катода – ± 200 В.

От ЭОС требовалось обеспечить протяженность пространства дрейфа от электронной пушки до коллектора порядка 200-300 мм без фокусировки магнитным полем.

В рассмотренной ЭОС прямонакальный катод, работающий в режиме температурного ограничения, представлял собой спираль из четырех витков вольфрамовой проволоки диаметром 0,2 мм и размерами 0,8x1,3 мм (рис. 2а).

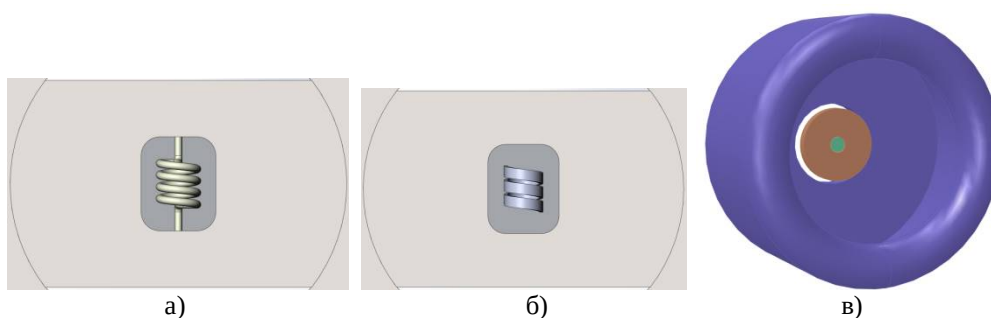


Рис. 2. Типы рассмотренных прямонакальных катодов из вольфрамовой проволоки (а), ленты (б) и цилиндрический катод диаметром 1.6 мм (в)

3D модель с прямонакальным катодом из вольфрамовой проволоки, распределение потенциала в области электронной пушки и транспортировка электронного потока в области дрейфа представлены на рисунке 3.

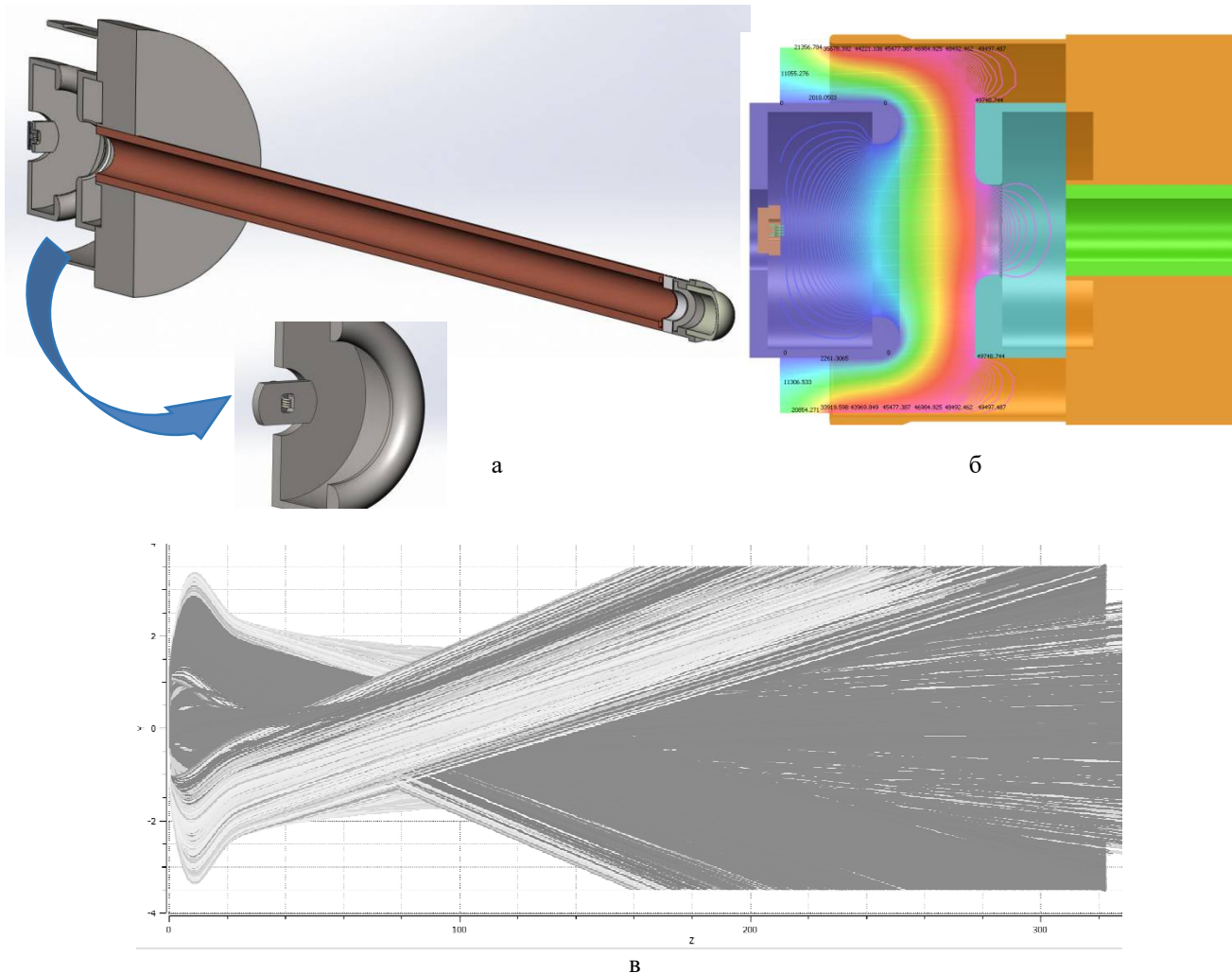


Рис. 3. Трехмерная (3D) модель ЭОС с прямонакальным катодом из вольфрамовой проволоки (а), распределение потенциала в области электронной пушки (б) и транспортировка электронного потока в области дрейфа (в)

Анализ результатов расчета показал, что величина катодного тока составила 3.13ма ($T_k=2300^\circ\text{K}$, $U_{\phi}=200\text{В}$), электронная пушка формировала неламинарный поток, в результате чего на мишень диаметром 5.0 мм попадало менее 35% катодного тока. Результат формирования потока электронной пушкой не улучшался при применении катода из вольфрамовой ленты.

Применение катода в виде спирали приводило к разным условиям фокусировки в плоскостях XZ и YZ, а наличие электронов, вылетающих с внутренних поверхностей катода, сильно затрудняло фокусировку осесимметричными электрическими полями. Уменьшение оптической силы фокусирующей линзы (т.е. изменение потенциала фокусирующего электрода) до определенной степени снижало перефокусировку пучка в плоскости YZ, улучшая тем самым токопрохождение на мишень. Однако, при этом ухудшались условия фокусировки в плоскости XZ, и при увеличении потенциала фокусирующего электрода токопрохождение снижалось. Влияние «внутренних» электронов частично можно ограничивать изменени-

ем конфигурации фокусирующего электрода, уменьшая при этом эффективную площадь эмиссии.

Замена катода из вольфрамовой проволоки на цилиндрический катод существенно изменило картину формирования электронного потока и до мишени, расположенной на удалении $z=320$ мм от катода дошло 100% катодного тока (рис. 4).

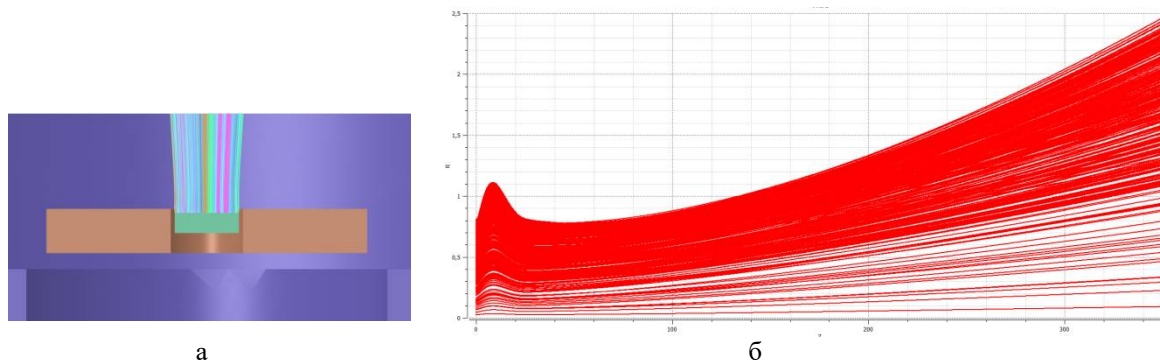


Рис. 4. Формирование электронного потока в пушке с цилиндрическим катодом (а) и транспортировка электронного потока в области дрейфа (б)

1. Особенности формирования электронного потока в рентгеновских трубках с термокатодами/ Дармаев А.Н., Морев С.П., Потрахов Н.Н., Саблин В.М.//Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции производителей рентгеновской техники. СПб.: Изд-во _СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020. 135 с.

УДК 537.86, 537.87, ГРНТИ 29.35.45

РЕЗОНАТОРНАЯ СИСТЕМА СВЕРХМОЩНОГО МНОГОЛУЧЕВОГО КЛИСТРОНА С РАДИАЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ЛУЧЕЙ

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

АО «НПП «Исток» им. Шокина»,

Российская Федерация, Фрязино, Galdetskiy@istokmw.ru

Аннотация. Рассмотрена конструкция резонаторной системы сверхмощного клистрона с радиальным расположением лучей. Предложен новый метод селекции мод в сверхразмерных резонаторах. Расчетным путем показана возможность достижения мощности более 26 МВт при КПД 57% и напряжении питания 58 кВ.

Ключевые слова: многолучевой клистрон, рекуперация, резонатор, селекция мод, термические напряжения

RESONATORS OF HIGH POWER MULTIBEAM KLYSTRON WITH RADIALY CONVERGING BEAMS

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

JSC "RPC "Istok" named after Shokin", Fryazino,
659111

Russia, Fryazino, Galdetskiy@istokmw.ru

The summary. Resonator system's design with radially converged electron beams is considered. A new technique of modes selection in overmoded resonator is proposed. Numerical simulation demonstrates the opportunity of output power power 26 MW achieving with efficiency 57% at cathode voltage 58 kV.

Keywords: multibeam klystron, depressed collector, resonator, modes selection, electric strength, thermal stress.

Введение

В настоящее время в сантиметровом диапазоне твердотельные устройства постепенно вытесняют вакуумные приборы малой и средней мощности из радиолокации и связи [1]. Однако, уровень выходной мощности сверхмощных клистронов сантиметрового и дециметрового диапазонов для электронных ускорителей, а также миллиметровых электровакуумных приборов недостижимы для полупроводниковых технологий [2,3].

Современные сверхмощные клистроны применяются в качестве усилителей СВЧ излучения мультимегаваттного уровня для ускорителей научного и медицинского назначения, в радиолокации и других сферах [4,5]. Одна из главных задач в разработке таких приборов – достижение высокой выходной мощности при ограниченном напряжении питания. При этом повышение выходной мощности традиционных однолучевых клистронов сопровождается ростом напряжения питания до сотен киловольт, что приводит к значительному увеличению длины прибора, требует громоздкой электрической изоляции, а также мер защиты от ионизирующего излучения [6,7]. Кроме того, с ростом мощности приходится повышать ток электронного потока и работать на предельно допустимых с точки зрения сохранения кпд параметрах.

Для устранения указанных недостатков используются клистроны с многолучевой соосной компоновкой пролётных каналов – многолучевые клистроны (МЛК) [8]. Повышение выходной мощности при ограниченном напряжении катода в таких конструкциях достигается за счет увеличения как количества лучей, с сохранением низкого парциального первеанса, так и поперечных размеров области пространства взаимодействия, которая ограничена величиной близкой к $\lambda/2$, где λ – рабочая длина волны [9,10]. Таким образом, в МЛК с параллельными лучами и тороидальными резонаторами диаметр области взаимодействия и диаметр катода не превышает половины рабочей длины волны, что ограничивает число парциальных лучей [11].

В данной работе рассмотрен альтернативный путь повышения выходной мощности – применение МЛК с радиальным расположением электронных потоков [12-14]. Их главная особенность заключается в том, что в подобной конструкции появляется потенциальная возможность получить высокую выходную мощность за счёт большого суммарного тока от индивидуальных электронных потоков, собираемых с большой площади эмиттеров при ограниченном напряжении питания с сохранением низкого парциального первеанса. При этом, в отличие от [13,14], в предлагаемой конструкции применены индивидуальные каналы для цилиндрических пучков, что обеспечивает высокочастотную развязку отдельных резонаторов, а парциальные катоды расположены на периферии прибора.

В результате появляется возможность существенного увеличения площади эмиссии при сохранении прямолинейности электронных пучков (в отличие от [18-21]), а каждый луч находится на пересечении двух плоскостей симметрии магнитной системы, что существенно облегчает его транспортировку и снимает требования высокой однородности магнитного поля (что является необходимым условием в традиционных МЛК). Перед последним резонатором, где плотность расположения каналов велика, индивидуальные каналы могут сливаться, образуя единый кольцевой канал с единым радиальным потоком (рис. 1).

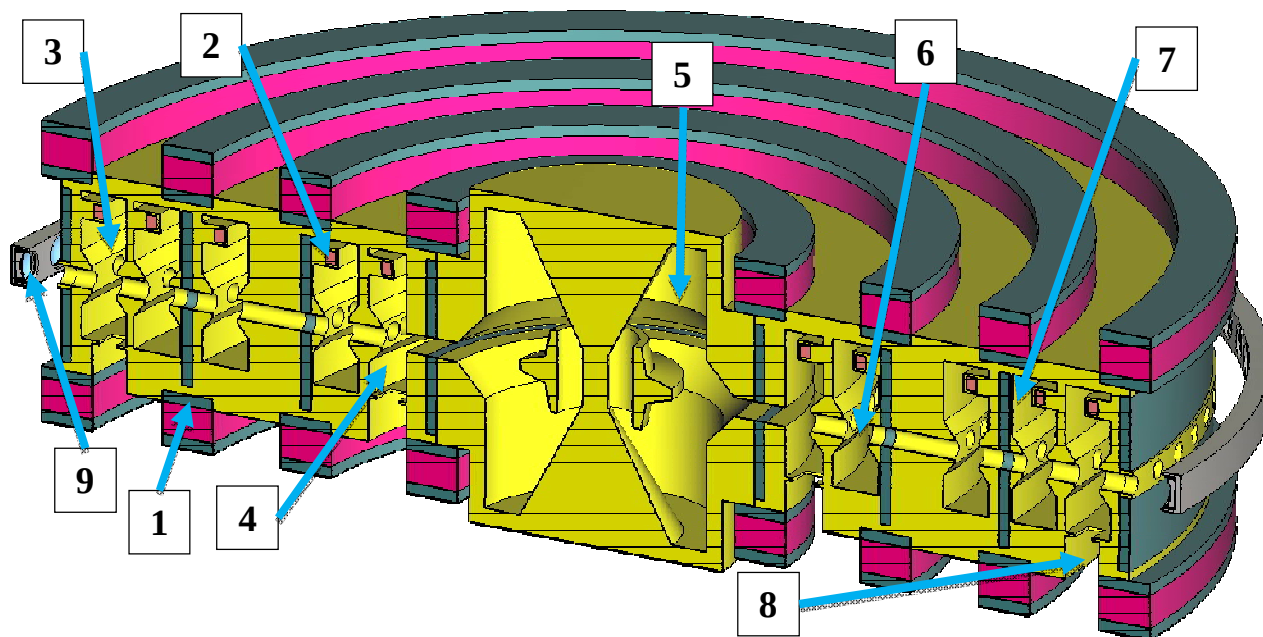


Рис. 1. Модель резонаторной системы МЛК с радиальным расположением электронных потоков вместе с оптической, магнитной фокусирующей системой, а также коллектором. Габариты системы – 60х12 см.

- 1 – полюсные наконечники с постоянными магнитами;
- 2 – диэлектрический поглотитель; 3 – входной резонатор;
- 4 – выходной резонатор; 5 – единый коллектор;
- 6 – рабочий зазор пространства взаимодействия; 7 – дополнительный балластный зазор;
- 8 – полость для связи с внешним трактом; 9 – индивидуальные эмиттеры

Селекция типов колебаний сверхразмерного кольцевого резонатора

Резонаторный блок состоит из пяти сверхразмерных кольцевых резонаторов, работающих на аксиально-симметричной моде H_{001} .

Расчёт собственных типов колебаний исходной конструкции резонатора демонстрирует густой спектр высокодобротных мод (рис. 2а), который не получается разредить с помощью изменения геометрии или путём внесения в резонансную полость дополнительных настроечных элементов. Однако, возможна селекция мод, основанная на том, что СВЧ токи рабочей моды не имеют азимутальных компонент. Поэтому введение внутрь резонатора дополнительного поглотителя в металлической оболочке, в которой выполнены щели параллельные направлению токов рабочей моды, позволяет понизить добротности всех азимутально-несимметричных мод, не меняя добротности рабочей моды (рис. 2б) [15].

Такое техническое решение позволяет спроектировать многолучевой клистрон с радиальным расположением лучей и повышенной мощностью. Сравнение расчетных параметров предложенного МЛК с аналогами в S-диапазоне частот приведено в таблице 1.

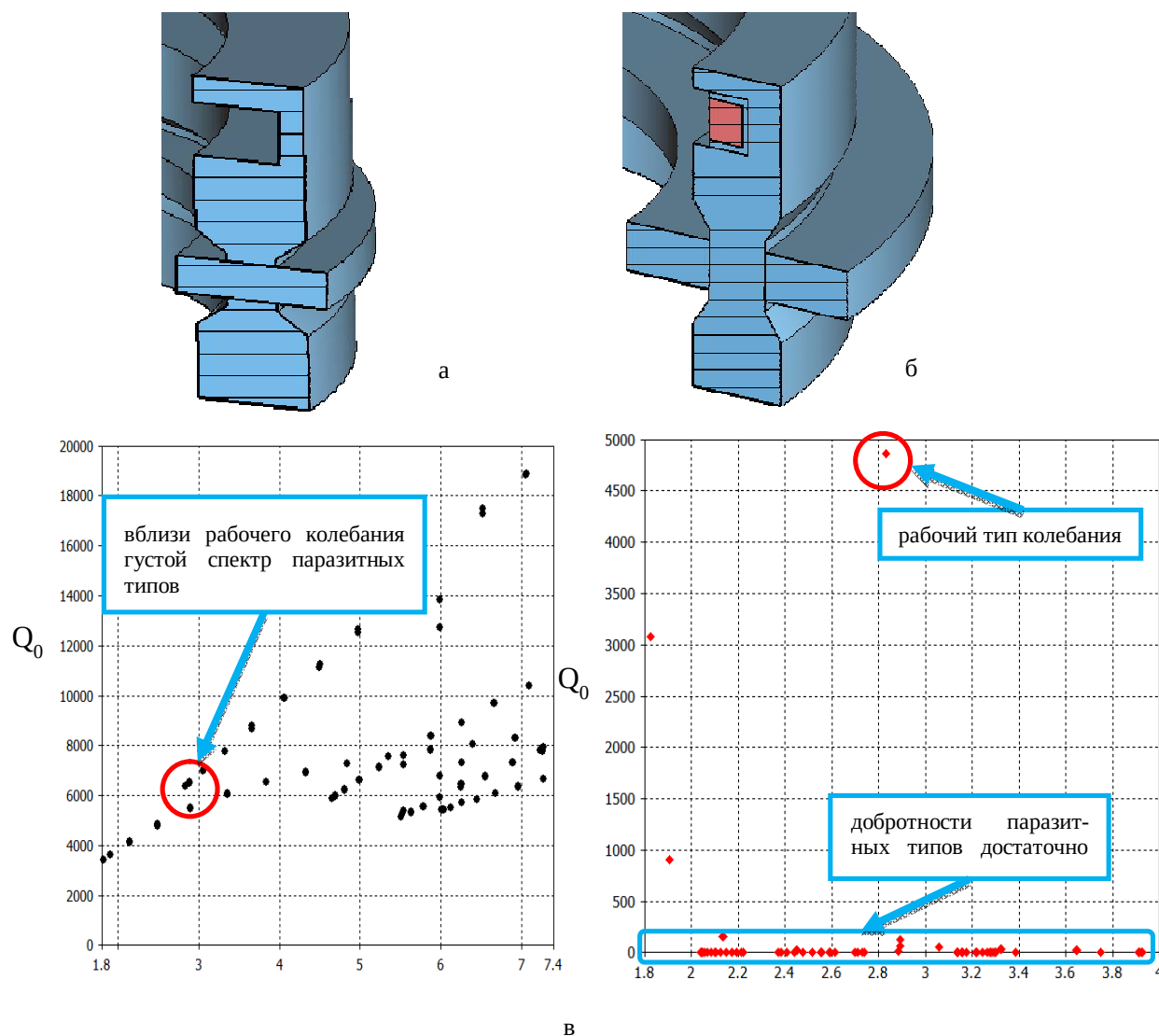


Рис. 2. Кольцевой резонатор при отсутствии (а) и при наличии (б) поглотителя и зависимость добротности собственных колебаний от их частоты (в)

Таблица 1. Сопоставление результатов расчёта исследуемого МЛК с аналогами

Параметры	АО «НПП «Исток» им. Шокина»		АО «НПП Торий»	
	Данный прибор	Клистрон 1	КИУ-168	КИУ-268
f_0 , ГГц	2.856			
U_0 , кВ	58	250	52	52
I_0 , А	11.2	225	5.75	7.5
I_Σ , А	806.4	225	230	300
$p_{\mu 1}$, мкА/В ^{1.5}	0.8	1.8	0.485	0.6
число лучей	72	1	40	40
число резонаторов	5 (кол.)	5 (тор.)	5 (кол.)	5 (кол.)

Продолжение таблицы 1

$P_{\text{вх}}$, Вт	288	270	50	70
$P_{\text{вых}}$, МВт	26.5	24.9	6	6
КПД, %	57	37	40	40
K_y , дБ	50	50	50	50

Следует отметить, что у рассмотренной конструкции есть значительный потенциал дальнейшего увеличения выходной мощности путем увеличения числа лучей.

Заключение

В данной работе рассмотрен новый класс клистронов с радиальным расположением лучей. Благодаря такой конфигурации, а также новому техническому решению: селекции мод в кольцевом резонаторе с рабочей модой H_{001} , электронному зеркалу в коллекторе, возможно обеспечить высокие параметры клистрона:

- выходная мощность 26.5 МВт
- габариты 670x200 мм (ориентировочно)
- КПД 57%,
- напряжении питания 58 кВ.

Предложенная конструкция клистрона в целом и кольцевой резонаторной системы обладает преимуществами по сравнению с резонаторными системами традиционных МЛК:

- Предложенная в работе конструкция кольцевых сверхразмерных резонаторов позволяет осуществить эффективную селекцию мод.
- Небольшая высота резонаторов позволяет разместить их в реверсной магнитной системе.
- В конструкции применены индивидуальные цилиндрические каналы для пучков, что обеспечивает высокочастотную развязку отдельных резонаторов
- Парциальные катоды расположены на периферии прибора, что дало возможность существенного увеличения площади эмиссии (плотность токоотбора не более 14 А/см²), степени компрессии и срока службы прибора при сохранении прямолинейности электронных пучков. Парциальные лучи имеют небольшой первеанс, что позволяет достичь высокого КПД.
- Имеется возможность уменьшения напряжения питания за счёт увеличения числа лучей и площади эмиттеров.
- Каждый луч находится на пересечении двух плоскостей симметрии магнитной системы, поэтому он невозмущен и прямолинеен вплоть до коллектора, что облегчает его транспортировку. Это снимает требования высокой однородности магнитного поля (что является необходимым условием в традиционных МЛК). Отработанный пучок отклоняется уже в коллекторе, где его возмущение не критично.
- Большая проводимость потока в выходном резонаторе может обеспечить широкую полосу, при условии использования большого числа лучей, дающего плотную упаковку лучей в зазоре выходного резонатора.
- Благодаря сравнительно компактной конструкции клистрона, лампы можно компоновать в единой стойке с последующим суммированием выходной мощности.
- При выходе из строя отдельных эмиттеров, например, из-за перегорания подогревателя, не происходит катастрофического отказа клистрона, а мощность лампы плавно снижается.
- За эти качества приходится платить большим числом индивидуальных эмиттеров, хотя и достаточно простых. Возможно, при серийном выпуске эмиттеров их вклад в стоимость прибора окажется небольшим. Еще одна техническая трудность – дисковая форма клистрона с немалым диаметром, что может требовать печей для откачки с увеличенным внутренним объемом.

Библиографический список

1. Гармаш С., Кищинский А., Маркинов Е. и др., Современные твердотельные СВЧ модули // Электроника, №6, 2015, С. 82-89.
2. К.Г. Симонов, А.Н. Юнаков, Д.В. Евсин и др. Сверхмощный 20-МВт клистрон S-диапазона частот. //Электронная техника, Сер. 1, «СВЧ-техника». 2023. Т. 559. № 3. — С. 76-81.
3. Галдецкий А.В., Богомолова Е.А., Натура И.П. и др. Исследование возможности создания мощной ЛБВ X-диапазона с расширенной полосой. //Электронная техника, Сер. 1, «СВЧ-техника». 2019. Т. 543. № 4. — С. 61-66.
4. Фрейдович И.А. и др. Перспективы развития многолучевых клистронов // Материалы III Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург. – 2014. – С. 25.
5. Борисов Л.М., Гельвич Э.А., Жарый Е.В. и др. Мощные многолучевые электровакуумные усилители СВЧ //Электронная техника, Сер. 1, «СВЧ-техника». 1993 №3. — С. 12-20.
6. Fowkes W., G. Caryotakis, E. Doyle, et al. 1.2 MW Klystron for Asymmetric Storage Ring B Factory, SLAC PUB 6778, March 1995.
7. Caryotakis G., A. Krasnykh, M. Neubauer et al. Design of a 11.4 GHz, 150-MW, Sheet Beam, PPM-Focused Klystron, in Proceedings of 6th Workshop on High Energy Density and High Power RF, Berkeley Springs, WV, AIP Conference Proceedings, 691, June 2003, pp. 22-33.
8. Sun L, Huang H, Li S, et al. Short-Length, High-Efficiency S-Band Coaxial Cavity Relativistic Multibeam Klystron Amplifier for Potential High Power Microwave Application[J]. IEEE Electron Device Letters, 2022, 43(10): 1760-1763.
9. Балабанов А.К., Косарев Р.А., Фрейдович И.А. и др. Многолучевой клистрон с кольцевыми резонаторами, работающими на виде колебаний $E_0 n_0$. //Патент Россия № 2015118917, 2015.
10. Фрейдович И., Воробьев М. Особенности характеристик кольцевых резонаторов многолучевых клистронов //Электроника. НТБ 1998. № 2 - С. 9-14.
11. Юнаков А.Н., Пугнин В.И. Проблемы и пути создания мощных широкополосных многолучевых клистронов в средней части сантиметрового диапазона длин волн //Электронная техника, Сер. 1, «СВЧ-техника». 2013. Т. 519. № 4. — С. 64-67.
12. Галдецкий А. В. О возбуждении резонаторов многолучевых клистронов электронными пучками // 31-я Международная научно-техническая конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» Крымико-2021, 5-11 сентября 2021 г., Севастополь. Сборник научных трудов – 2021. - Вып. 3. – С. 55-56.
13. Forno M.D., Tantawi S.G., Ruth R.D. et al. Progress on design of radial klystrons. //Proc. 2016 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). 2016 – С. 1-2.
14. Wang S., Gong Y., Wei Y. et al. Study on the Radial-Sheet-Beam Electron Optical System //IEEE Transactions on Plasma Science. 2012. Т. 40. № 12. — С. 3442-3448.
15. Галдецкий А.В., Голованов Н.А. Многолучевой клистрон. //Патент России № 2804521, 2023.

УДК 62-933.2; ГРНТИ 47.29.33

ОЦЕНКА ЧАСТОТЫ РЕАКЦИИ ПЕННИНГА В ПОЛОЖИТЕЛЬНОМ СТОЛБЕ РАЗРЯДА В КОЛЬЦЕВОМ ГЕЛИЙ-НЕОНОВОМ ЛАЗЕРЕ

*М.В. Чиркин, *А.Д. Астанкович, *В.Ю. Мишин, *А.Е. Серебряков, **С.В. Устинов, *Д.С. Шурмин

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

** Рязанское высшее воздушно-десантное командное училище имени В.Ф. Маргелова,
Российская Федерация, Рязань, ustinow62@yandex.ru

Аннотация. В данной работе выполнена оценка величин частоты реакции Пеннинга в малогабаритном кольцевом лазере. Методика оценки включает два этапа. Первый этап – экспериментальное измерение частотной зависимости комплексного сопротивления положительного столба. На втором этапе выполняется расчет по ранее разработанной математической модели комплексного сопротивления положительного столба. Величина частоты реакции Пеннинга определялась путем сравнения значений комплексных сопротивлений положительного столба в кольцевом лазере, полученных экспериментально и рассчитанных с помощью математической модели комплексного сопротивления положительного столба в кольцевом лазере

Ключевые слова: лазерный гироскоп, положительный столб, комплексное сопротивление.

ESTIMATION OF THE FREQUENCY OF THE PENNING REACTION IN THE POSITIVE COLUMN OF DISCHARGE IN A RING HELIUM-NEON

*M.V. Chirkin, *A.D. Astankovich, *V.Yu. Mishin, *A.E. Serebryakov, *D.S. Shurmin, **S.V. Ustinov

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

**Ryazan higher airborne command school (Military Institute)),
Russia, Ryazan, ustinow62@yandex.ru

The summary. In this work, we estimate the frequency of the Penning reaction in a small-sized ring laser. The assessment methodology includes two stages. The first stage is an experimental measurement of the frequency dependence of the complex resistance of the positive column. At the second stage, a calculation is performed using a previously developed mathematical model of the complex resistance of the positive column. The frequency of the Penning reaction was determined by comparing the values of the complex resistance of the positive column in a ring laser, obtained experimentally and calculated using a mathematical model of complex resistance positive column in a ring laser.

Keywords: laser gyroscope, positive column, complex resistance, bilateral dc discharge.

В качестве датчиков угловых скоростей в бесплатформенных инерциальных навигационных системах (БИНС) летательных аппаратов широко используются лазерные гироскопы. Основным элементом лазерного гироскопа является малогабаритный кольцевой гелий-неоновый лазер 5 (рисунок 1). Возбуждение активной среды кольцевого гелий-неонового лазера – осуществляется с помощью симметричного двухплечевого разряда постоянного тока. В кольцевых лазерах должна быть обеспечена стабильность разряда в условиях длительной эксплуатации, порядка 100 тысяч часов, при минимально возможном токе в широком диапазоне измерения температуры окружающей среды. Посторонние примеси в газовой среде кольцевого лазера могут отразиться на его эксплуатационных характеристиках.

Цель данной работы – оценить частоту реакции Пеннинга в кольцевом гелий-неоновом лазере, характеризующую степень загрязнения газовой среды кольцевого лазера.

В данной работе рассматривается метод измерения частоты реакции Пеннинга, который включает два этапа:

- на первом этапе выполняется регистрация частотной зависимости комплексного сопротивления разряда $Z(f)$; - а на втором этапе подбираются параметры математической модели положительного столба кольцевого гелий-неонового лазера, обеспечивающие минимальное отклонение теоретической кривой $Z_m(f)$ от экспериментальной зависимости $Z(f)$.

Экспериментальная установка и методика измерений

В качестве объекта исследований использован кольцевой гелий-неоновый лазер (рисунок 1), описанный в работе [1]. Прибор изготовлен на основе ситаллового моноблока и наполнен смесью гелия и неона в соотношении 20:1 до давления 750 Па. Разрядные промежутки ограничены медными катодами А1 и А2 и холодным катодом К из алюминия.

На рисунке 1 представлена экспериментальная установка для исследования линейной реакции симметричного двухплечевого разряда постоянного тока в кольцевом гелий-неоновом лазере на возмущения внешним гармоническим сигналом. Номиналы элементов измерительной цепи приведены в таблице.

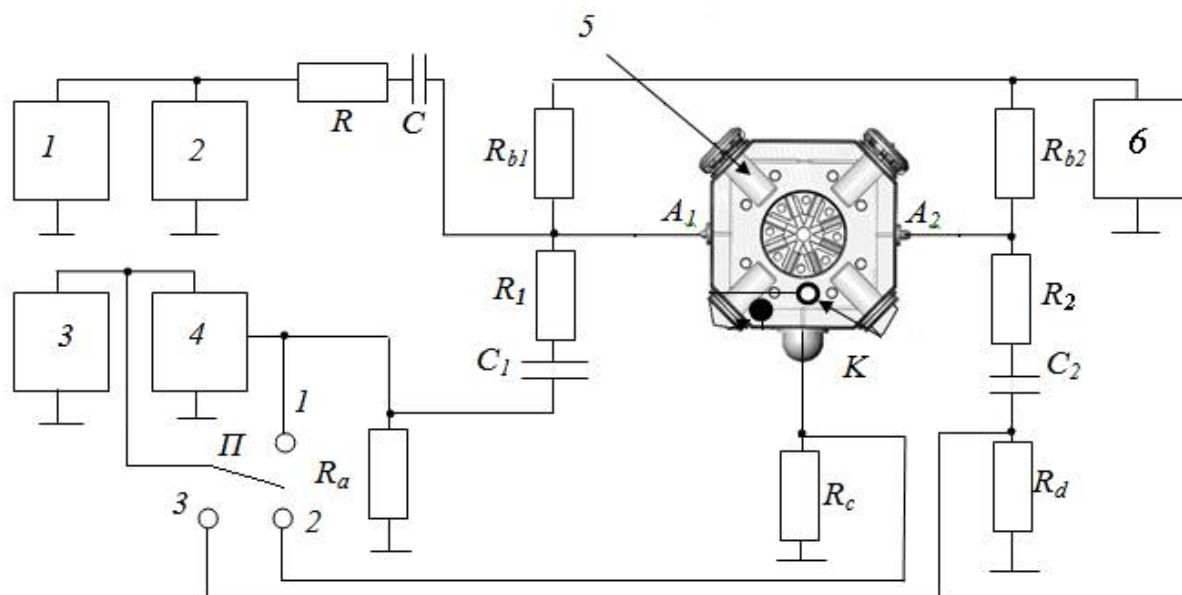


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для измерения комплексного сопротивления положительного столба двухплечевого разряда с общим катодом: 1 – генератор GFG-3015, 2 – частотомер ЧЗ-34, 3 – милливольтметр В7-27 А/1, 4 – измеритель разности фаз Ф2-16, 5 – кольцевой лазер, 6 – источник высокого напряжения, A1 и A2 – аноды, K – катод, П – трехпозиционный переключатель, 1,2,3 – контрольные точки для измерения переменных составляющих напряжений [1]

Таблица 1. Номиналы элементов измерительной цепи.

Элемент	R, кОм	Ra, Ом	Rd, Ом	Rc, Ом	R1, кОм
Номинал	$232,0 \pm 0,5$	$449,5 \pm 0,5$	$544,4 \pm 0,5$	$558,4 \pm 0,5$	$246,5 \pm 0,5$
Элемент	Rb1,2, кОм	C, нФ	C1, нФ	C2, нФ	
Номинал	1329 ± 5	$4,190 \pm 0,025$	$5,062 \pm 0,025$	$5,257 \pm 0,025$	

Кольцевой лазер 5 размещался на заземленной металлической пластине «заземленной подложке». Питание прибора осуществляется от регулируемого источника постоянного напряжения 6. Высокое напряжение подается на аноды кольцевого лазера через балластные резисторы R_{b1} и R_{b2} . Суммарный ток разряда задавался равным 1,075 мА. Модулирующий гармонический сигнал подается на одно из плеч симметричного двухплечевого разряда от генератора GFG-3015 (1) через разделительную RC-цепочку. Частота модулирующего сигнала f контролируется с помощью частотомера ЧЗ-34 (2), обеспечивающего точность установки частоты не хуже 0,1 %. В процессе измерений частота гармонического сигнала изменялась в диапазоне частот 2 – 40 кГц.

Для регистрации переменных составляющих напряжений и токов параллельно анодам подключались цепочки C_1 - R_1 - R_a и C_2 - R_2 - R_d , а последовательно с катодом – сопротивление R_c . Действующие значения переменных напряжений на резисторах R_a , R_c и R_d – U_1 , U_2 и U_3 регистрировались с помощью милливольтметра В7-27А/1 (3), а разность фаз их колебаний φ_2 , φ_3 с помощью измерителя разности фаз Ф2-16 (4) ($\varphi_1 \equiv 0$ – опорный канал фазометра). Переключатель П предназначен для поочередного соединения фазометра и милливольтметра с измерительными резисторами. В положении «1» на оба входа фазометра подаются одинаковые сигналы, что позволяет производить установку нуля на каждой частоте перед каждым измерением. После измерения напряжения и разности фаз в положении 1 производилось переключение измерительных приборов в положение 2,3. Далее переключатель возвращался в исходное положение 1; после установки следующего значения частоты производилась установка нуля. Амплитуда гармонического напряжения на выходе генератора 1 выбиралась равной 10 В, что гарантирует линейность измеряемого отклика разряда на возмущение внешним сигналом.

В процессе измерений фиксируются действующие значения переменных напряжений на R_a , R_c и $R_d - U_1$, U_2 и U_3 соответственно, а также измеряются разности фаз напряжений U_2 и U_3 относительно $U_1 - \varphi_{12}$ и φ_{13} соответственно. По измеренным значениям напряжений и разностям фаз рассчитывается частотная зависимость комплексного сопротивления положительного столба:

$$Z = \frac{R_c}{R_a} \cdot \frac{\dot{U}_1 Z_1 R_d - \dot{U}_3 Z_2 R_a}{\dot{U}_2 R_d + 2\dot{U}_3 R_c (1 + Z_2 Y)}, \quad (1)$$

$$Z_{1,2} = R_{1,2} + R_{a,d} + (i\omega C_{1,2})^{-1}, \quad Y = R_b^{-1} + i\omega C_0, \quad \dot{U}_{2,3} = U_{2,3} \exp(i\varphi_{2,3}). \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота модулирующего напряжения, i – мнимая единица, C_0 – величина монтажной емкости, выбиралась равной $3,0 \pm 0,2$ пФ[1];

Математическая модель положительного столба кольцевого гелий-неонового лазера

В работе для оценки частоты реакции Пеннинга использовалась ранее разработанная математическая модель газоразрядной плазмы [2] в виде системы уравнений баланса для электронов и метастабильных атомов неона и гелия при слабом гармоническом возмущении разряда, которая позволяет рассчитать частотную зависимость комплексного сопротивления положительного столба.

Варьируемые параметры, в пространстве которых осуществляется расчет комплексного сопротивления положительного столба: ток на катод, температура газа, радиус разрядного канала, длина разрядного канала в каждом плече, давление газовой смеси, соотношение парциальных давлений гелия и неона α , частота реакции Пеннинга ν_p .

Расчет включает два этапа. Первый этап заключается в расчете статических характеристик положительного столба: вольт-амперной (ВАХ) и зависимостей от условий поддержания разряда концентраций на оси разрядного канала для электронов, метастабильных атомов гелия в состояниях 2^3S_1 2^1S_0 и неона в состоянии $1s_5$. На втором этапе определяется комплексное сопротивление положительного столба, зависящее от частоты, а также от тока и температуры газа как от параметров.

В уравнениях баланса учтены процессы ионизации и возбуждения атомов прямым электронным ударом, ступенчатая ионизация, ионизация при столкновениях метастабильных атомов, реакция Пеннинга, передача возбуждений при столкновениях метастабильных атомов гелия с атомами неона, поперечная диффузия электронов к стенке разрядного канала.

Величина частоты реакции Пеннинга определялась путем сравнения значений комплексных сопротивлений положительного столба в кольцевом лазере, полученных экспериментально и рассчитанных с помощью математической модели комплексного сопротивления положительного столба в кольцевом лазере. Степень «близости» двух кривых определялась с помощью оптимизации, методом покоординатного спуска. Использовалась целевая функция вида:

$$Criter = \frac{\sum_{i=4}^{13} |Z_i(\nu_p) - Z_{m_i}|}{10}, \quad (3)$$

где Z – значения импеданса положительного столба, найденные по математической модели комплексного сопротивления положительного столба в кольцевом лазере;

Z_m – значения комплексных сопротивлений КЛ, найденные путем косвенных измерений. При расчете целевой функции (3) использовались частоты от 4 до 40 кГц. Значение ин-

декса (номера точки) $i = 4$ соответствует частота модуляции 4 кГц, $i = 13$ – частота модуляции 40 кГц.

Результаты моделирования

При выполнении оптимизации в модели комплексного сопротивления положительного столба в кольцевом лазере, использовались следующие параметры: ток на катод – 1075 мкА; температура газа – 293 К. Частота реакции Пеннинга с участием метастабильных атомов гелия ν_p изменялась в диапазоне от 19000 до 24000 с⁻¹.

На рисунке 2 представлены результаты оптимизации. Частота реакции Пеннинга с участием метастабильных атомов гелия $\nu_p = 23547$ с⁻¹. Значение целевой функции 6,782.

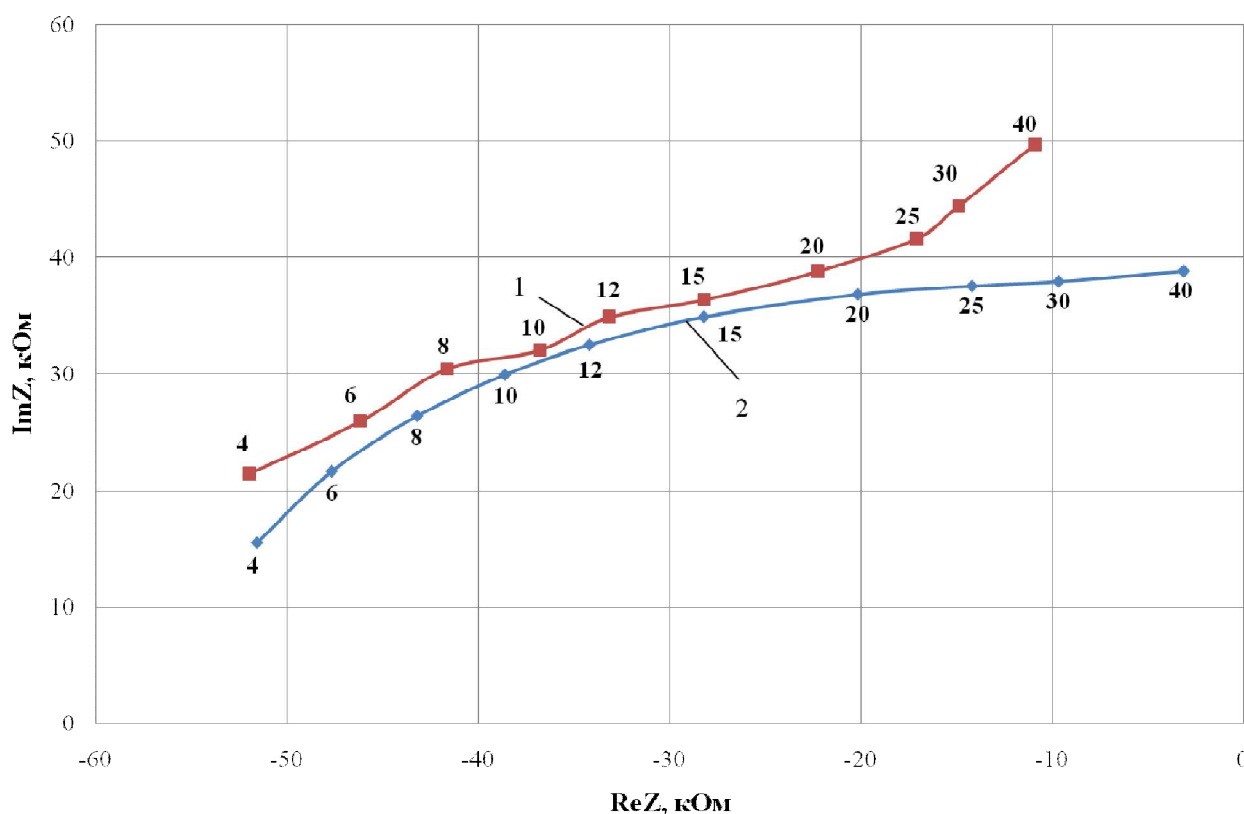


Рис. 2. Годографы частотных зависимостей комплексного сопротивления положительного столба для кольцевого лазера: 1 – экспериментальная кривая, 2 – модель комплексного сопротивления положительного столба (оптимальные значения $\nu_p = 23547$ с⁻¹). Около точек на кривых указаны частоты модуляции в кГц

Библиографический список

1. Кузнецов А.Г., Молчанов А.В., Чиркин М.В., Измайлов Е.А. Прецизионный лазерный гироскоп для автономной инерциальной навигации // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 1. с. 78-88.
2. Устинов С.В. Ионизационная неустойчивость симметричного двухплечевого разряда в кольцевых гелий-неоновых лазерах: диссертация кандидата технических наук: 2.2.1 – «Вакуумная и плазменная электроника» - РГРТУ. Рязань, 2023 – 146 с.

УДК 621.317.785621.396; ГРНТИ 90.27.3447.47

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СЧЕТЧИКА МАРКИ «ФОБОС»

С.Ю. Иванов, В.Ю. Мишин

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

Аннотация. В данной научной статье представлен анализ и оценка электрического счетчика "Фобос", предназначенного для измерения и учета потребления электроэнергии в бытовых и промышленных объектах. В статье приведены подробные технические характеристики счетчика, а также проведено исследование его функциональности, точности и надежности. Результаты исследования позволяют сделать выводы о преимуществах и недостатках данного устройства, а также предоставляют основу для дальнейших улучшений и развития электроизмерительной техники..

Ключевые слова: электрический счетчик, модель «Фобос».

ANALYSIS AND EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE ELECTRIC METER OF THE PHOBOS BRAND

S.Y. Ivanov , V.Y. Mishin

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

The summary. This scientific article presents an analysis and evaluation of the Phobos electric meter, designed to measure and account for electricity consumption in domestic and industrial facilities. The article provides detailed technical characteristics of the meter, as well as a study of its functionality, accuracy and reliability. The results of the study allow us to draw conclusions about the advantages and disadvantages of this device, as well as provide a basis for further improvements and development of electrical measuring equipment.

Keywords: electric meter, Phobos model.

Счетчики предназначены для измерений активной и реактивной электрической энергии, в однофазных двухпроводных электрических сетях переменного тока частотой 50 Гц. Внешний вид прибора представлен на (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид счетчиков «ФОБОС 1» «базового» исполнения [1]

Принцип действия

Принцип действия счетчиков основан на масштабировании входных сигналов напряжения и тока с дальнейшим преобразованием их в цифровой код и обработкой, а также с последующим отображением на дисплее отсчетного устройства или выносном дисплее результатов измерений и информации [1]:

- количества активной электрической энергии не менее, чем по 4–м тарифам, суммарно по тарифам в двух направлениях (потребление, генерация), кВт·ч;
 - количества реактивной электрической энергии не менее, чем по 4–м тарифам, суммарно по тарифам в двух направлениях (потребление, генерация), кВАр·ч;
 - параметров сети (сила переменного тока, сила переменного тока в нулевом проводе (опционально), напряжение переменного тока, коэффициент мощности, активная, реактивная и полная мощности, частота сети);
 - значения потребленной электрической энергии на конец последнего программируемого расчетного периода (начало на 00 часов 00 минут 00 секунд первых суток, следующих за последним программируемым расчетным периодом) суммарно и по тарифным зонам;
 - текущего времени и даты.
- Дополнительная информация, предоставляемая по интерфейсам счетчика:
- показатели качества электрической энергии (положительное и отрицательное отклонение напряжения, отклонение частоты, суммарная продолжительность за расчетный период положительного или отрицательного отклонения уровня напряжения в точке поставки электрической энергии на величину более 10% от номинального напряжения в интервале измерений, равном 10 минутам, количество фактов за расчетный период положительного отклонения уровня напряжения в точке поставки электрической энергии на величину 20% и более от номинального напряжения);
 - архивные данные;
 - расчетное соотношение реактивной и активной мощности (коэффициент реактивной мощности);
 - расчетный небаланс фазного тока и тока в нулевом проводе (опционально).

Особенности применения

Счетчики предназначены для эксплуатации как в качестве самостоятельного устройства, так и в составе программно–технических комплексов (далее – ПТК), интеллектуальных систем учета (далее – ИСУ) и систем телемеханики (далее – СТ) [2]. Для передачи результатов измерений и информации в ИСУ на уровне информационно–вычислительного комплекса электроустановки (ИБКЭ) и информационно–вычислительного комплекса (ИБК), связи со счетчиками с целью их обслуживания и настройки в процессе эксплуатации, используются вспомогательные цепи счетчика, включающие в себя в зависимости от модификации :

- радиointерфейс (радиомодуль, опционально);
- интерфейс оптического типа (оптический порт, опционально);
- интерфейс Ethernet, (опционально, в том числе, в виде сменного модуля);
- GSM/GPRS (опционально);
- импульсное выходное устройство оптическое;
- импульсное выходное устройство электрическое (только для шкафного исполнения).

Счетчики имеют встроенные автономные часы реального времени, обеспечивающие непрерывный, без сбоев, отчет текущего времени, в том числе при пропадании основного питания, с поддержкой текущего времени (секунды, минуты, часы) и календаря (число, месяц, год). В счетчиках реализована возможность задания не менее 24 временных тарифных зон суток отдельно для каждого дня недели и праздничных дней, с индивидуальным тарифным расписанием для не менее, чем 12 сезонов года. Счетчики имеют энергонезависимую память, сохраняющую данные при отключении питания более 30 лет.

Функциональный состав счетчика

Основными конструктивными узлами счетчика являются [2]:

- узел измерения;
- блок микроконтроллера;
- блок питания;
- интерфейсы и испытательные выходы:
 - радиointерфейс (радиомодем);
 - последовательный интерфейс RS-485 (для счетчика модификации R);
 - интерфейс Ethernet, (для счетчика модификации E);
 - интерфейсы (один из или несколько) GSM/GPRS/NB-IoT (для счетчика модификации G(1-6); оптический порт (для счетчика модификации O);
 - входы резервного питания счетчика (для счетчика шкафного исполнения);
 - оптические испытательные выходы; электрический испытательный выход (только для счетчика шкафного исполнения);
 - Жидкокристаллический дисплей (для счетчика исполнения «Сплит» – выносной дисплей); Кнопки управления (для счетчика исполнения «Сплит» – в составе выносного дисплея);
 - Реле нагрузки (для счетчика модификации L);
 - Датчики: датчик вскрытия кожуха (крышки корпуса), датчик вскрытия крышки клеммной колодки счетчика, датчик воздействия магнитного поля, датчик (измеритель) тока в нулевом проводе (для счетчиков модификации I), датчик температуры в корпусе счетчика.

Узел измерения

Основными компонентами узла измерения являются датчики напряжения и тока. Для измерения токов фазы и нейтрали используются трансформатор тока и шунт. Для измерения напряжения используется схема делителя напряжения. Принцип действия узла измерения основан на преобразовании сигналов тока и напряжения сети переменного тока, поданных на измерительные элементы счетчика, в цифровую информацию, удобную для дальнейшей обработки, хранения и отображения. Узел измерения генерирует также сигналы оптического и электрического испытательных выходов, пропорциональные измеряемой мощности (энергии в единицу времени).

Самодиагностика счетчика

Счетчик проводит самодиагностику ежедневно и при повторном включении питания с выводом результата неисправности на дисплей. В процессе самодиагностики производится тестирование [2]:

- измерительного блока;
- вычислительного блока;
- таймера;
- блока питания;
- блока памяти (подсчет контрольной суммы);
- дисплея (отсутствие ошибок передачи информации на дисплей).

Все отрицательные результаты самодиагностики регистрируются в журнале событий и отображаются на дисплее счетчика.

Результаты изучения прибора

Электрический счетчик «Фобос» в ходе анализа данных показал высокую точность измерений. Благодаря своей точности, счетчик «Фобос» может быть использован как основное средство учета электроэнергии в различных сферах применения.

Однако, стоит отметить, что при анализе , были выявлены некоторые недостатки. Счетчик «Фобос» имеет небольшие колебания в измерениях в зависимости от температуры и влажности окружающей среды. Данный недостаток требует дополнительной калибровки или корректировки измерений.

Преимуществами электрического счетчика «Фобос» являются его компактность, удобство использования, возможность удаленного управления и считывания данных. Также, этот прибор совместим с другими системами учета и может интегрироваться в умные сети. Крупная энергетическая компания «Россети» внедряет в свою работу эти приборы учета, что приводит к хорошим показателям и анализу потерь электрической энергии. Благодаря умным приборам учета, экономится время для нахождения потери кВт·ч и уменьшение потери прибыли для компании.

Библиографический список

1. Телематические Системы - автоматизации учета энергоресурсов URL: <https://waviot.com.ru/> (дата обращения 27.02.2024).
2. Опрос и схема подключения электросчетчика Фобос 1. Технические характеристики и маркировка. АСКУЭ Энергетик URL: https://yaenergetik.ru/devices/fobos_1/ (дата обращения 27.02.2024).

УДК 534.143; ГРНТИ 47.13.21

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПЬЕЗОЛОПАСТИ ЭЛЕКТРОННОГО МОДУЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ

С.А. Сафронов, В.В. Климаков

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, super.skorpion1999@yandex.ru*

Аннотация. В работе приводится компьютерное моделирование электроупругих характеристик пьезолопастей в непосредственной зависимости от её геометрических параметров. Получены зависимости амплитуды и резонансной частоты колебания пьезолопастей от её длины, высоты основания и толщины пьезокерамики, а также данные о форме трёх её резонансных мод. Произведена проверка валидности разработанной численной компьютерной модели на экспериментальном макете пьезолопастей.

Ключевые слова: пьезолопасть, пьезокерамика, электроупругость, численное моделирование, пьезоэффект.

SIMULATION OF THE OPERATION OF THE PIEZOELECTRIC BLADE OF AN ELECTRONIC COOLING MODULE

S.A.Safronov, V.V. Klimakov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, super.skorpion1999@yandex.ru*

Abstract. The work provides computer modeling of the electroelastic characteristics of a piezoblade in direct dependence on its geometric parameters. The dependences of the amplitude and resonant frequency of oscillation of the piezoelectric blade on its length, the height of the base and the thickness of the piezoceramics, as well as data on the shape of its three resonant modes, were obtained. The validity of the developed numerical computer model was checked on the developed experimental model of the piezoelectric blade.

Key words: piezoelectric blade, piezoceramics, electroelasticity, numerical modeling, piezoelectric effect.

Пьезокерамика с момента своего открытия приобрела множество различных применений, от звуковых динамиков до сложных пьезоэлектрических двигателей и приводов. В частности, пьезоэлементы широко применяются в устройствах, где необходимы возвратно-поступательные движения [1]. Практика их проектирования требует расчетов напряженно

деформируемых состояний в области механики сплошной среды и решения смешанных задач электроупругости. Современный подход к конструированию пьезоэлектрических устройств основан на численном мультифизическом моделировании в специализированных программных комплексах таких как COMSOL Multiphysics.

В данной работе рассматривается применение пьезокерамических элементов для создания веерообразного колебания пьезолопасти в электрическом модуле воздушного охлаждения. Такое решение может найти широкое применение в устройствах и приборах электроники к которым применяются жесткие требования по массогабаритным характеристикам, и где традиционное создание воздушного потока вентилятором недопустимо из-за его малой эффективности [2]. Так как форма и габариты пьезокерамики и пьезолопасти практически не ограничены геометрически, то разрабатываемые устройства охлаждения могут иметь широкий спектр вариантов их конструктивного исполнения.

Конструкция пьезолопасти. Геометрия расчетной модели

Проектируемая пьезолопасть представляет собой основание, выполненное из материала, обладающим высокой степенью эластичности и при этом упругими свойствами, благодаря которым она может осуществлять непрерывные возвратно-поступательные движения. Под критерии такого материала подходит стеклотекстолит марки FR-4 с толщиной не более 0.5 мм. На данное основание крепится готовый пьезоэлектрический модуль PZT 8, выполненный в виде металлического основания с закреплёнными на него двумя пьезокерамическими пластинами. Пьезолопасть закрепляется с помощью фиксатора, в качестве которого может служить любое устройство, способное жёстко зафиксировать её в горизонтальном положении. Трёхмерная расчетная модель представлена на рисунке 1.

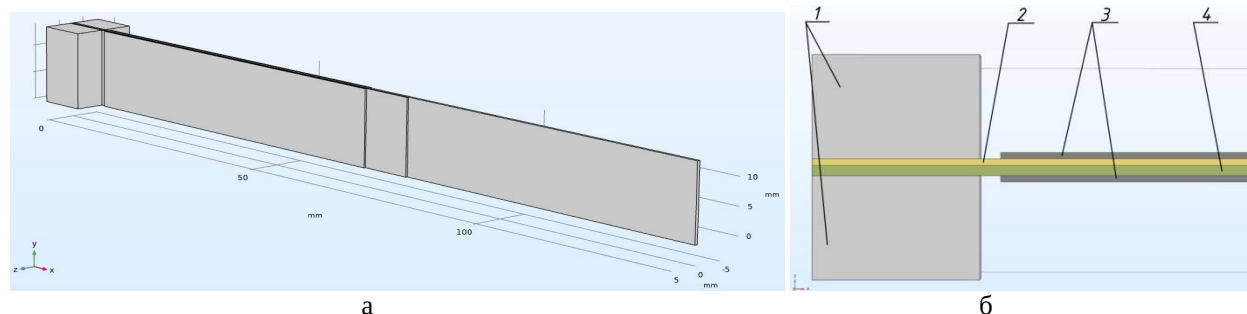


Рис. 1. Расчетная модель пьезолопасти (а) и вид сверху на пьезолопасть (б):
1 – фиксатор, 2 – латунная пластина (основание пьезоэлектрического модуля),
3 – пьезокерамика, 4 – основание пьезолопасти

Геометрия базовой модели пьезолопасти следующая: длина – 140 мм, высота – 14 мм, длина латунной пластины – 80 мм, длина пьезокерамической пластины – 62 мм, длина фиксатора – 8 мм, толщина основания – 0.5 мм, толщина латунной пластины – 0.3 мм, толщина пластин пьезокерамики – 0.3 мм.

Расчетная численная модель пьезолопасти была создана в программном комплексе COMSOL Multiphysics 5.4. В неё был внесён ряд упрощений: убран демпфирующий фактор связующих материалов в соединениях, крепление пьезолопасти в фиксаторе абсолютно жёсткое, не учитывается сопротивление воздушной среды и электрические потери.

При построении сетки расчетной модели, необходимо корректно выбрать размер конечных элементов [3]. При этом стоит учесть, что уменьшение размера конечного элемента снижает погрешность вычисления, однако рост их числа в расчетной сетке, экспоненциально увеличивает требуемую вычислительную мощность используемой ЭВМ, и как следствие общее время затрачиваемое на расчёт. Узлы ячеек сеток, построенных на разных элементах

трехмерной модели, должны совпадать, чтобы общая структура сетки была согласованна для численного расчета.

Исследуемая конструкция пьезолопасти является подвижной, поэтому в качестве формы ячеек сетки для основания выбран *тетраэдр*. Данная форма является наиболее универсальной при решении подобных задач. На фиксаторе количество ячеек сетки выбрано минимальным, так как этот элемент является жестко зафиксированным. На латунной пластине и в пьезокерамике форма ячеек представляет собой параллелепипед. В пьезокерамике такой выбор обоснован тем, что при расчете пьезоэффекта применяется тензорное описание физических свойств кристалла для которого обычно, используется прямоугольная кристаллографическая система координат [4]. На латунной пластине подобная сетка используется из соображения общности конструкции пьезокерамического модуля. Построение сетки на математической модели представлено на рисунках 2-4.

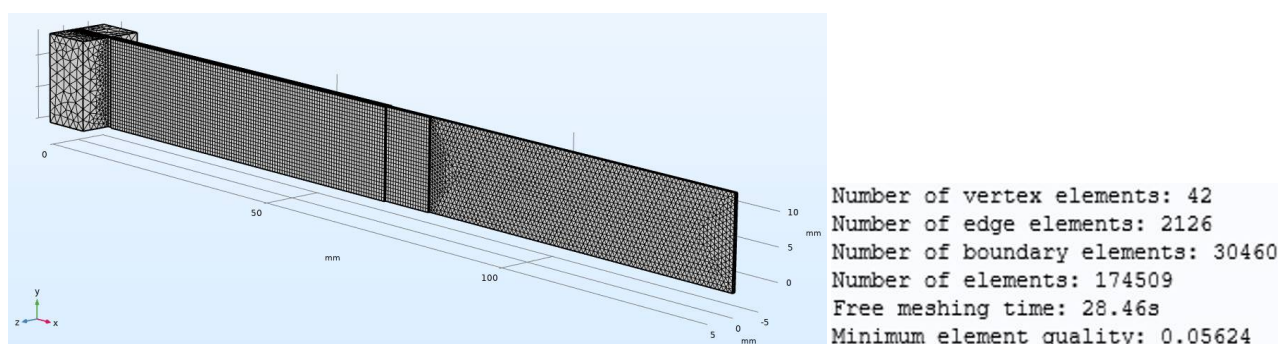


Рис. 2. Общий вид построения сетки на расчетной модели пьезолопасти и её параметры

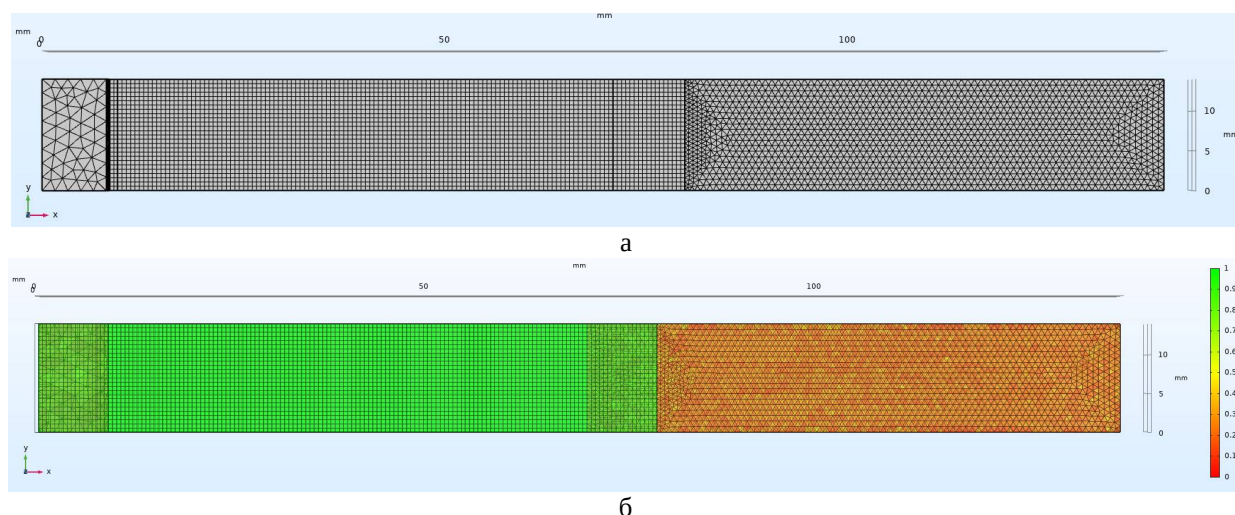


Рис. 3. Построение сетки на расчетной модели пьезолопасти (вид слева):

а – визуализация разбиения,

б – визуализация качества сетки конечных элементов по параметру асимметрии ячеек

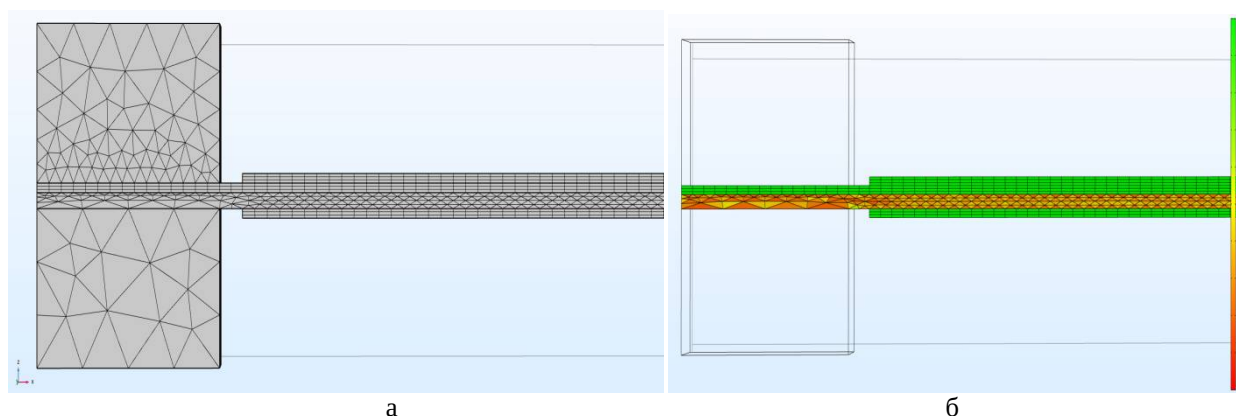


Рис. 4. Построение сетки на расчетной модели пьезолопасти (вид сверху): а – визуализация разбиения, б – визуализация качества сетки конечных элементов по параметру асимметрии ячеек

Представленная сетка является компромиссом между предельными затратами вычислительной мощности и релевантностью получаемых на данной модели результатов расчета.

Исследование зависимости амплитуды колебания и резонансной частоты пьезолопасти от её геометрических параметров

Для численного моделирования пьезолопасти в COMSOL Multiphysics 5.4 был выбран модуль исследования – Eigenfrequency [5] и тип исследования – параметрический. Материал основания и фиксатора в математической модели пьезолопасти – стеклотекстолит FR-4, материал пьезокерамики – PZT 8, основание пьезоэлектрического модуля – латунь. Физические свойства материалов и соответствующие параметры взяты из стандартной библиотеки материалов COMSOL Multiphysics 5.4. В данном исследовании на обе пьезокерамические пластины прикладывалось напряжение величиной 90 В. Поляризация пьезокерамики заведомо выбрана такой, чтобы её деформация была максимальной при данном расположении и ориентации пьезокерамических пластин.

Моделирование формы мод колебания пьезолопасти:

Исследование на поиск формы трёх резонансных мод колебаний базовой геометрии пьезолопасти и определения ее резонансных частот производилось в диапазоне частот от 20 - 500 Гц. На рисунке 5 показано поведение пьезолопасти (форма колебаний) на резонансных модах с частотами 63.89, 150.68 и 456.19 Гц.

Из приведенных результатов моделирования видно, что пьезолопасть совершает вееобразное движение, с максимальной амплитудой колебания, именно при частоте, соответствующей первой резонансной моде. Таким образом, дальнейшие исследования конструкции пьезолопасти необходимо проводить именно на первой моде.

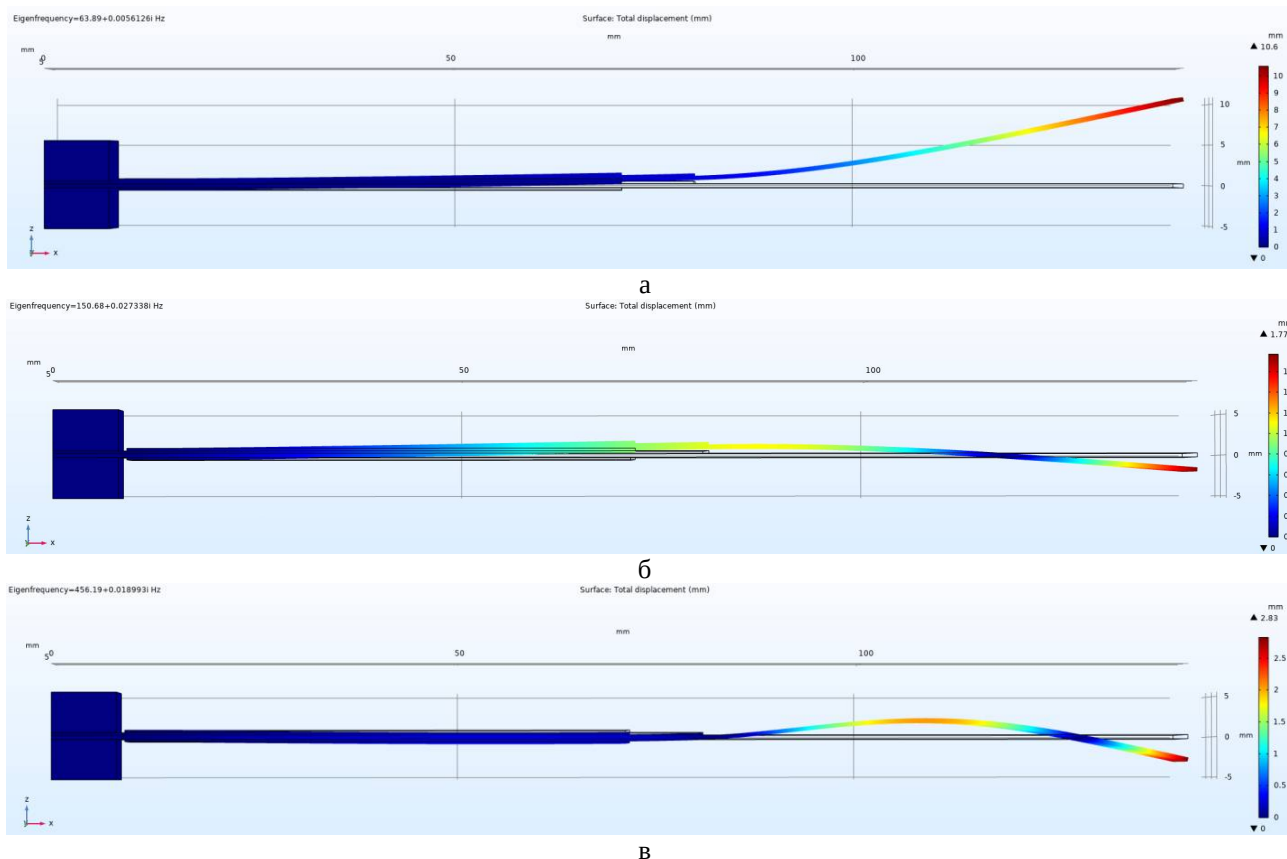


Рис. 5. Форма колебаний пьезолопасти при частотах: а – 63.89 Гц, б – 150.68 Гц, в – 456.19 Гц

Моделирование зависимости амплитуды колебания и резонансной частоты от изменения длины основания пьезолопасти

Для данного исследования, в базовой геометрии пьезолопасти изменялся только параметр длины её основания от 100 до 160 мм с шагом 10 мм. В результате проведённого исследования были получены графики зависимости максимальной амплитуды (синяя) и резонансной частоты (красная) от длины основания пьезолопасти (рисунок 6).

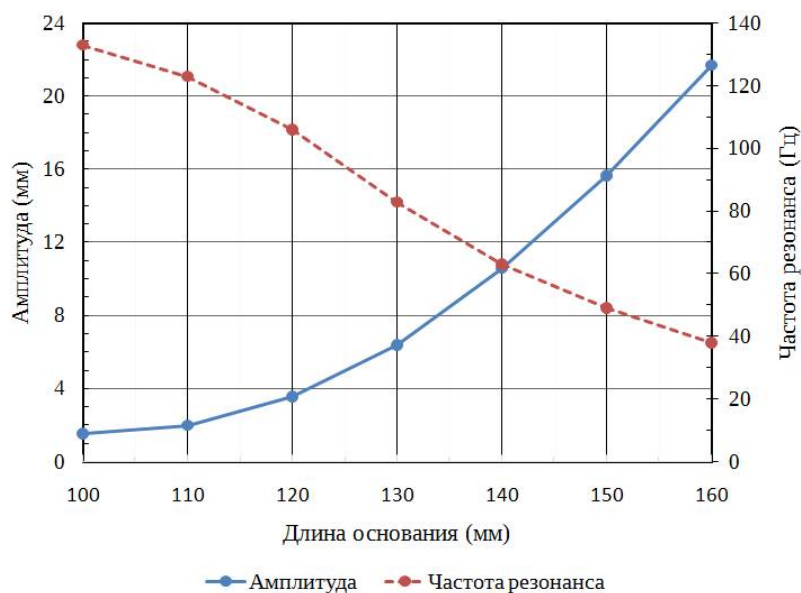


Рис. 6. График зависимости амплитуды колебания и резонансной частоты от длины основания пьезолопасти

Из результатов моделирования видно, что зависимость амплитуды от длины основания носит возрастающий характер параболического вида в диапазоне от 1,5 до 22 мм, в то время как зависимость резонансной частоты спадающий характер в диапазоне от 130 до 40 Гц.

Моделирование зависимости амплитуды колебания и резонансной частоты от изменения высоты пьезолопасты

Изменение данного параметра (высоты) базовой геометрии происходило в пяти узловых точках 5, 8, 10, 12 и 15 мм. Стоит отметить, что в модели изменяется непосредственно вся высота конструкции в целом (основание, латунная пластина, пьезокерамика, фиксаторы). На рисунке 8 представлены графики зависимости амплитуды и резонансной частоты колебания от высоты пьезолопасты.

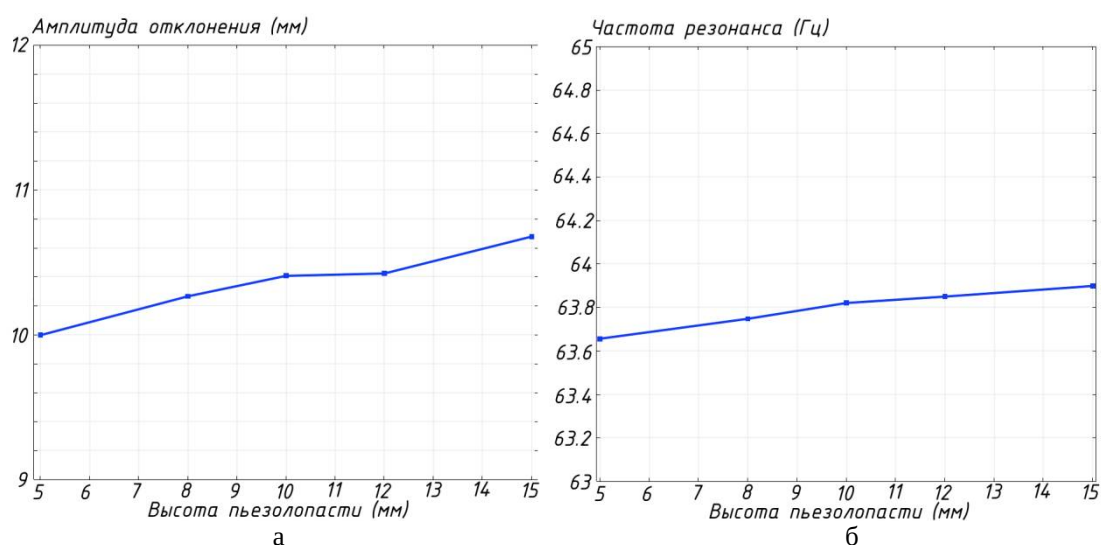


Рис. 7. График зависимости от высоты пьезолопасты: а - амплитуды колебаний, б – резонансной частоты

Приведенные данные моделирования показали, что резонансная частота практически не зависит от изменения высоты пьезолопасты, в то время как амплитуда колебаний незначительно возрастает.

Моделирование зависимости амплитуды колебания и резонансной частоты от изменения толщины пьезокерамики

Толщина пьезокерамических пластин изменялась от 0.2 до 0.5 мм. На рисунке 8 представлены графики зависимости амплитуды колебания пьезолопасты и её резонансной частоты от толщины пьезокерамических пластин.

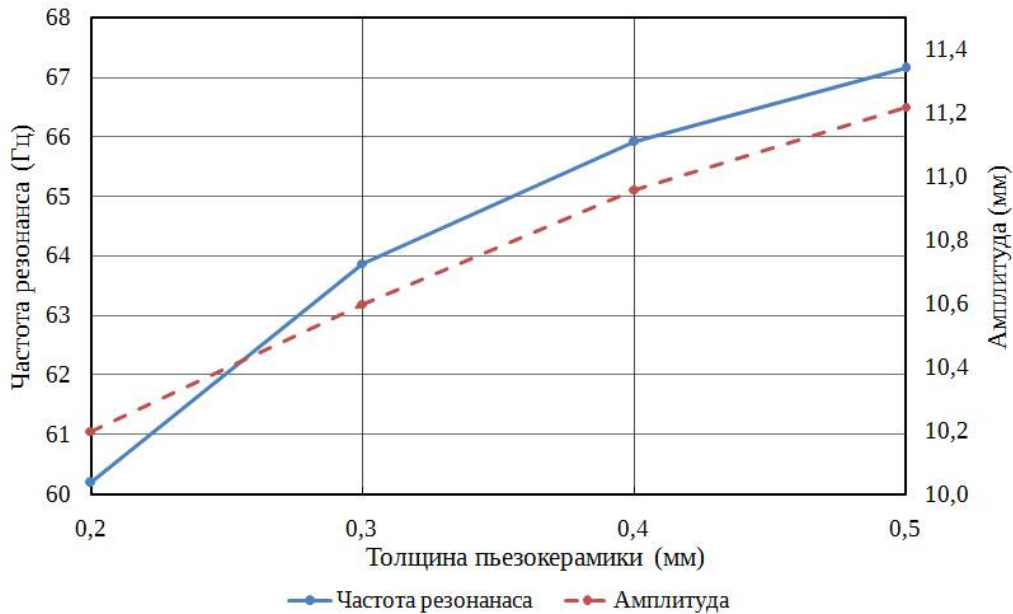


Рис. 8. График зависимости амплитуды колебания и резонансной частоты пьезопласти от толщины пьезокерамических пластин

Из результатов численного моделирования видно, что график зависимости резонансной частоты и амплитуды от толщины пьезокерамических пластин носит, возрастающий характер в диапазоне 7 Гц и 1,1 мм. Это показывает малое влияние параметра толщины на амплитудные и частотные характеристики пьезопласти.

Экспериментальные исследования характеристик макета пьезопласти

Для проверки достоверности полученных результатов численного моделирования был изготовлен макет пьезопласти рисунок 9. Материал основания пьезопласти - стеклотекстолит с толщины 0,7 мм стачивался вручную до толщины 0,5 мм.

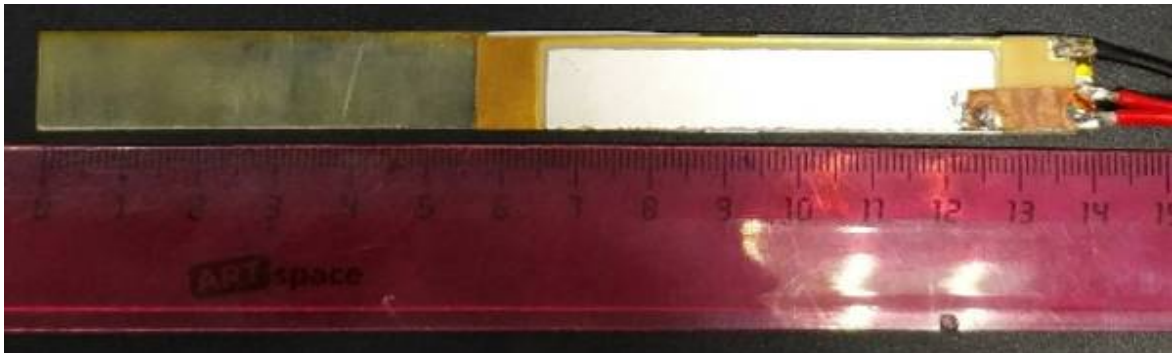


Рис. 9. Общий вид макета пьезопласти

Для экспериментальных исследований колебаний пьезопласти, подаваемое на макет напряжение, от генератора, задавалось в диапазоне от 10 до 90 В, форма напряжения - меандр. На рисунке 10 показаны фотографии предельных амплитуд колебаний пьезопласти при напряжениях из этого диапазона.

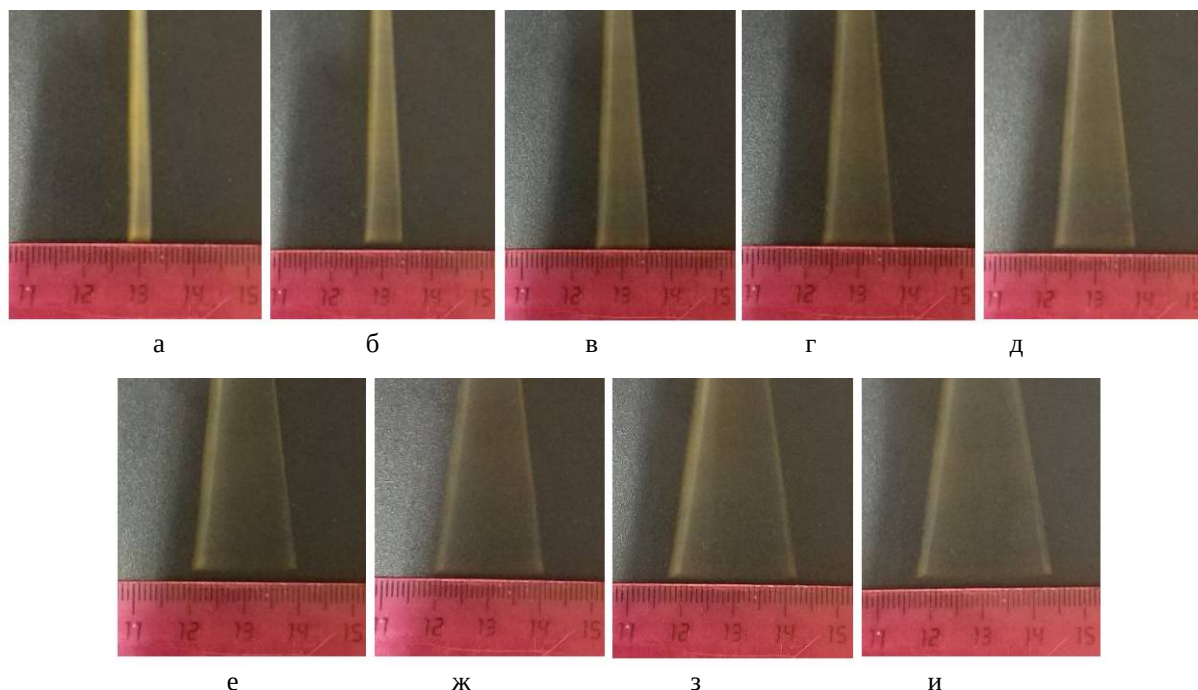


Рис. 10. Колебания лопасти в зависимости от приложенного напряжения к пьезокерамике:
а - 10 В; б - 20 В; в - 30 В; г - 40 В; д - 50 В; е - 60 В; ж - 70 В; з - 80 В; и - 90 В

На рисунке 11 данные измерений амплитуды колебаний пьезолопасти представлены в виде графика зависимости амплитуды колебания хвостовика макета от приложенного напряжения к пьезокерамике.

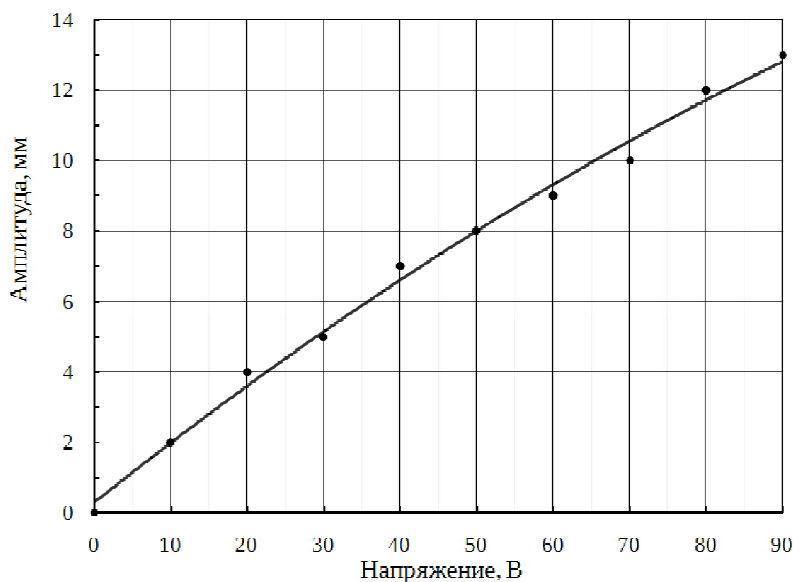


Рис. 11. График зависимости амплитуды колебаний пьезолопасти от приложенного напряжения к пьезокерамике

Из построенной экспериментальной зависимости видно, что полученная амплитуда колебаний хвостовика пьезолопасти на макете немного больше, чем на расчетной модели. Это может быть связано с тем, что, в отличие от компьютерной модели, на макете толщина основания пьезолопасти не была одинаковой по всей длине и локально была меньше 0.5 мм. В связи с чем, гибкость и, а следовательно и подвижность основания получилась больше, и

как следствие возникло увеличение амплитуды в среднем на 2 мм. Это обстоятельство требует дополнительного исследования на компьютерной модели влияния одновременного вклада в амплитуду колебаний параметра толщины и длины основания пьезолопасти.

Таким образом, в данной работе было проведено численное моделирование направленное на исследование зависимостей резонансной частоты и амплитуды колебаний конструкции пьезолопасти при изменении её геометрических параметров. Был создан макет пьезолопасти, позволяющий оценить достоверность и проверить валидность созданной компьютерной модели в дальнейшем.

Библиографический список

1. Пьезоэлектрические модули для активного охлаждения / [Электронный ресурс] // Радио Лоцман : [сайт]. — URL: <https://www.rlocman.ru/review/article.html?di=182993> (дата обращения: 13.02.2024)
2. Шурмин, Д. С., Климаков, В. В., Мишин, В. Ю., Серебряков, А. Е., Астанкович, А. Д. Моделирование механической части виброчастотной подставки лазерного гироскопа / Д. С. Шурмин, В. В. Климаков, В. Ю. Мишин, А. Е. Серебряков, А. Д. Астанкович [Текст] // Сборник трудов III Международного научно-технического форума : в 10 т.. Том 2.. — Рязань: «BookJet» , 2020. — С. 63-68.
3. Молчанов, А. В., Климаков, В. В., Чиркин, М. В. Тепловая модель бесплатформенной инерциальной навигационной системы на лазерных гироскопах [Текст] / А. В. Молчанов, В. В. Климаков, М. В. Чиркин // Труды МИЭА. Навигация и управление летательными аппаратами. — 2013. — № 7. — С. 60-69.
4. Д. И. Бардзокас, А. И. Зобин, Н. А. Сенник, М. Л. Фильштинский Математическое моделирование в задачах механики связанных полей Т.1 / Д. И. Бардзокас, А. И. Зобин, Н. А. Сенник, М. Л. Фильштинский // Введение в теорию термопьезоэлектричества. Изд. 2-е. // М.: КомКнига, 2010. - 312с.
5. Eigenfrequency Analysis / [Электронный ресурс] // Simulate real-world designs, devices, and processes with multiphysics software from COMSOL : [сайт]. — URL: <https://www.comsol.com/multiphysics/eigenfrequency-analysis> (дата обращения: 15.02.2024).

УДК 629.7.052; ГРНТИ 47.29.33

УСТОЙЧИВОСТЬ МЕТОДА КОМПЕНСАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ЗАХВАТА ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА К ВОЗМУЩЕНИЯМ ПАРАМЕТРОВ ЕГО ПЕРВИЧНЫХ СИГНАЛОВ

М.В. Чиркин, Ю.Р. Иваненко, А.Е. Серебряков, В.Ю. Мишин, Г.В. Давыдов
*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, ivanenko.july@yandex.ru*

Аннотация. Исследована устойчивость к возмущениям входных данных метода вычисления мгновенной фазы Саньяка с компенсацией динамического захвата (МФСК) на базе построенной математической модели для первичных сигналов лазерного гироскопа (ЛГ) с гармонической частотной подставкой. Для анализа корректности работы метода МФСК полученные результаты сравниваются с угловой скоростью, найденной в результате аналитического решения дифференциального уравнения ЛГ с нулевой зоной захвата. Определено влияние квазибелого шума, изменения значений амплитуд первичных квадратурных сигналов и сдвига фаз между квадратурными сигналами и сигналом переменной составляющей суммы мощностных сигналов на зарегистрированные отсчеты угловой скорости вращения корпуса ЛГ.

Ключевые слова: лазерный гироскоп, фаза Саньяка, статический порог захвата, динамический порог захвата, гармоническая частотная подставка.

STABILITY OF THE METHOD TO COMPENSATE FOR DYNAMIC LOCK-IN OF LASER GYROSCOPE TO PARAMETER PERTURBATIONS OF ITS PRIMARY SIGNALS

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

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

Abstract. The stability of the method calculating the instantaneous Sagnac phase to compensate for dynamic lock-in (ISPC) to input perturbations is studied using the mathematical model built for primary signals of laser gyroscope (LG) with a harmonic dither. To analyze the ISPC method, the results obtained are compared with the angular rate being the analytical solution of differential equation for LG with zero lock-in zone. The effect of quasi-white noise, changes in primary quadrature signal amplitudes and phase shift between quadrature signals and the signal being the alternating component of power signal sum is determined on the registered counts of the angular rate of LG body rotation.

Keywords: laser gyroscope, Sagnac phase, static lock-in threshold, dynamic lock-in threshold, harmonic dither.

В настоящее время в навигационных системах и системах тактического наведения в качестве датчиков угловой скорости широко применяются лазерные гироскопы со знакопеременной частотной подставкой [1]. Основой лазерного гироскопа (ЛГ) является кольцевой гелий-неоновый лазер, активная среда которого поддерживается симметричным двухплечевым разрядом постоянного тока.

Слабая связь между встречными оптическими волнами, генерируемыми гелий-неоновым лазером, возникает из-за обратного рассеяния лазерного излучения на элементах кольцевого резонатора (сферические и плоские зеркала и эллиптическая диафрагма). Она приводит к синхронизации частот встречных волн, вследствие чего ЛГ становится нечувствительным к малым угловым скоростям вращения. Количественно такое явление характеризуется величиной статического порога захвата [2]. Для подавления методической погрешности, вызванной статическим захватом, по отдельности или в совокупности применяются технологические [3-5], производственные [6-11] или аппаратно-алгоритмические [12-18] решения. В условиях серийного производства наименее затратными, а значит, наиболее предпочтительными являются аппаратно-алгоритмические решения: их применение не затрагивает отлаженных технологических процессов.

Использование в ЛГ гармонической частотной подставки позволяет подавить явление статического захвата, но может привести к параметрической синхронизации, т.е. к возникновению зон динамического захвата. Если частотная подставка промодулирована псевдослучайным сигналом [19-22], обозначенную проблему удастся решить. Однако рандомизация выходного сигнала ЛГ приводит к случайным блужданиям регистрируемого углового положения («*angle random walk*»). В данной статье для цифровой обработки первичных квадратурных сигналов ЛГ с гармонической частотной подставкой используется метод вычисления мгновенной фазы Саньяка с компенсацией динамического захвата (МФСК) [14, 15, 17, 18]. Указанный метод нивелирует «паразитные» скачки фазы Саньяка, обусловленные обратным рассеянием лазерного излучения внутри кольцевого резонатора, что создает условия для подавления случайной погрешности ЛГ ввиду отказа от ошумления частотной гармонической подставки. Цель настоящей работы заключается в исследовании устойчивости метода МФСК к возмущениям входных данных, т.е. к изменениям входных параметров построенной математической модели для первичных сигналов ЛГ.

В методах, применяемых в настоящее время для расчета угловых перемещений ЛГ – реверсивный счет импульсов [13] и вычисление мгновенной фазы Саньяка (МФС) [12, 23, 24] – явление динамического захвата подавляется посредством модуляции частотной под-

ставки псевдослучайным сигналом, в результате происходит размазывание «паразитных» скачков фазы Саньяка во временной области, а не их компенсация, как в методе МФСК.

Результаты математического моделирования

При численном решении методом Рунге-Кутты четвертого порядка дифференциального уравнения ЛГ, описывающего быстроту изменения фазы Саньяка [2], были сформированы тестовые первичные сигналы, которые впоследствии обрабатывались методом МФСК. Данный метод включает в себя следующие этапы [15]:

- дискретизацию первичных квадратурных сигналов ЛГ;
- восстановление отсчетов фазы Саньяка по квадратурным сигналам ЛГ с помощью функции четырехквadrантного арктангенса;
- восстановление величин фазового сдвига и статического порога захвата путем синхронного детектирования переменной составляющей суммы мощностных сигналов кольцевого лазера;
- формирование сигнала ошибки – «паразитных» скачков фазы Саньяка, вызванных слабой связью встречных оптических волн;
- удаление сформированного сигнала ошибки из отсчетов восстановленной фазы Саньяка.

В данной работе численные эксперименты были проведены со следующими начальными условиями:

$L = 0,28$ м – периметр четырехзеркального кольцевого резонатора;

$\lambda = 632,8$ нм – длина волны излучения гелий-неонового лазера;

$f = 400$ Гц, $\omega_d = 120$ °/с – частота и амплитуда подставки соответственно;

$\Omega_0 = 12$ °/ч – угловая скорость равномерного вращения корпуса ЛГ;

$\omega_L = 0,01$ °/с, $\rho = 0,1$ рад – статический порог захвата и фазовый сдвиг, обусловленные обратным рассеянием лазерного излучения внутри кольцевого резонатора;

$A_1 = A_2 = 1$ В – амплитуды оптических волн, распространяющихся внутри кольцевого резонатора по часовой и против часовой стрелки соответственно;

$r_1 = r_2 = 5,69 \cdot 10^{-8}$ отн. ед. – амплитуды коэффициентов связи встречных оптических волн;

$\beta_1 = 1$ рад, $\beta_2 = -1$ рад – фазы коэффициентов связи встречных волн;

$t_{max} = 1001$ с – максимальное время моделирования; $f_s = 2,4$ МГц – частота дискретизации первичных сигналов ЛГ;

$f_{out} = 2,4$ кГц – частота обновления выходной информации.

С целью приближения к условиям реального эксперимента к сформированным «идеальным» (без добавления шума) квадратурным сигналам и к сигналу переменной составляющей суммы мощностных сигналов кольцевого лазера [14-15] был добавлен квазибелый шум ($SNR = 50$ дБ – отношение сигнал/шум). После компенсации «паразитных» скачков фазы Саньяка гармоническая частотная подставка удалялась из отсчетов угловой скорости, восстановленной на частоте 2,4 кГц. Далее последовательно на трех временных интервалах ($t_{av} = 1$ с, $t_{av} = 10$ с и $t_{av} = 100$ с; t_{av} – время осреднения) происходило осреднение мгновенных значений измеренной угловой скорости вращения корпуса ЛГ.

Исследование метода МФСК осуществлялось на базе трех серий численных экспериментов. План действий первой серии экспериментов представлен ниже:

1. Моделирование «идеальных» сигналов ЛГ, т.е. первичных квадратурных сигналов (U_s, U_c – «синусный» и «косинусный» соответственно) с амплитудой 1 В и усиленного до ± 1 В сигнала переменной составляющей суммы мощностных сигналов (v_{ac}).

2. Цифровая обработка «идеальных» сигналов U_s, U_c, v_{ac} методом МФСК.

3. Моделирование сигналов U_s, U_c, v_{ac} , каждый из которых имеет амплитуду 1 В, с добавлением квазизелого шума в эти три сигнала ($SNR = 50$ дБ).

4. Цифровая обработка «неидеальных» (с аддитивным шумом) сигналов U_s, U_c, v_{ac} методом МФСК.

Установлено, что в случае работы с «идеальными» сигналами U_s, U_c, v_{ac} формирование сигнала ошибки ψ_{err} , вызванной слабой связью встречных оптических волн, определяется точностью восстановления двух величин: фазового сдвига $\langle \rho \rangle \pm \sigma(\rho) = (10,00 \pm 0,09) \cdot 10^{-2}$ рад и статического порога захвата $\langle \omega_L \rangle \pm \sigma(\omega_L) = (10,000 \pm 0,009) \cdot 10^{-3}$ °/с [15]. При работе с «неидеальными» сигналами U_s, U_c и v_{ac} на формирование сигнала ошибки, наряду с указанной выше точностью восстановления величин ρ и ω_L , влияние оказывает квазизелый шум, добавляемый к моделируемым сигналам. На рисунке 1 представлены ошибки измерений угловой скорости ЛГ, рассчитанные как

$$\Delta\Omega = \langle |\Omega_0 - \Omega_{\text{МФСК}}| \rangle \pm \sigma(|\Omega_0 - \Omega_{\text{МФСК}}|),$$

где $\Omega_{\text{МФСК}}$ – угловая скорость, восстановленная по методу МФСК;

Ω_0 – измеренная угловая скорость, найденная в результате аналитического решения дифференциального уравнения, описывающего быстроту изменения фазы Саньяка в ЛГ с нулевой зоной захвата [25].

На рисунке 1 линиями 1 и 2 изображены области разброса значений восстановленной угловой скорости $[\pm \sigma(|\Omega_0 - \Omega_{\text{МФСК}}|)]$ относительно значений средней абсолютной ошибки $[\langle |\Omega_0 - \Omega_{\text{МФСК}}| \rangle]$, обозначенных графическими символами 3 и 4. Во временном интервале от 1 с до 100 с более узкая область разброса угловых скоростей наблюдается при работе с «идеальными» сигналами U_s, U_c и v_{ac} . Выяснено, что квазизелый шум вносит незначительные ошибки в измерение угловой скорости вращения ЛГ методом МФСК: при $t_{av} = 100$ с найденные значения средней абсолютной ошибки восстановленной угловой скорости при работе с «идеальными» и «неидеальными» сигналами совпадают, при этом разброс значений угловой скорости при добавлении шума увеличивается приблизительно в 2,4 раза.

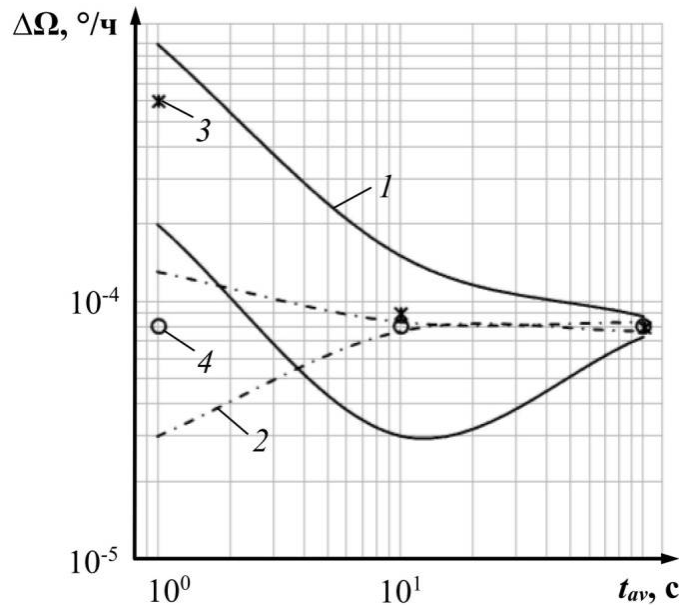


Рис. 1. Погрешность измерения угловой скорости ЛГ:
 1, 2 – разброс значений восстановленной угловой скорости при работе с «неидеальными» и «идеальными» сигналами соответственно;
 3, 4 – абсолютная ошибка измеренной угловой скорости при работе с «неидеальными» и «идеальными» сигналами соответственно

Во второй серии численных экспериментов последовательно были выполнены следующие действия:

1. Изменение амплитуды «косинусного» сигнала с шагом 0,1 В в диапазоне от 1 В до 1,5 В, при этом амплитуды сигналов U_s и v_{ac} равны 1 В; в указанные сигналы шум не добавлен.

2. Цифровая обработка описанных в пункте 1 сигналов методом МФСК.

3. Изменение амплитуды «косинусного» сигнала с шагом 0,1 В в диапазоне от 1 В до 1,5 В, при этом амплитуды сигналов U_s и v_{ac} равны 1 В; в указанные сигналы добавлен квазибелый шум ($SNR = 50$ дБ).

4. Цифровая обработка описанных в пункте 3 сигналов методом МФСК.

Если амплитуда «косинусного» сигнала на 50% превышает значение амплитуды «синусного» сигнала, то наблюдается некорректное восстановление величины фазового сдвига $\langle \rho \rangle \pm \sigma(\rho) = (15,0 \pm 0,14) \cdot 10^{-2}$ рад, при этом параметр статического захвата восстанавливается с такой же точностью, как и в первой серии экспериментов $\langle \omega_L \rangle \pm \sigma(\omega_L) = (10,000 \pm 0,009) \cdot 10^{-3}$ °/с.

Согласно результатам второй серии численных экспериментов средняя абсолютная ошибка измеренной угловой скорости ЛГ пропорционально возрастает с увеличением амплитуды «косинусного» сигнала. Начиная с $U_{c,m} = 1,1$ В, рассчитанные значения указанной ошибки для «неидеальных» и «идеальных» сигналов ЛГ совпадают. При $t_{av} = 100$ с изменение амплитуды «неидеального» «косинусного» сигнала от 1 В до 1,1 В приводит к росту погрешности измерения угловой скорости ($\Delta\Omega$) примерно в 14 раз. При дальнейшем увеличении амплитуды «косинусного» сигнала с шагом 0,1 В до значения 1,5 В абсолютная ошибка измеренной угловой скорости возрастает приблизительно в 5 раз, а разброс значений угловой скорости – в 4 раза (рис. 2).

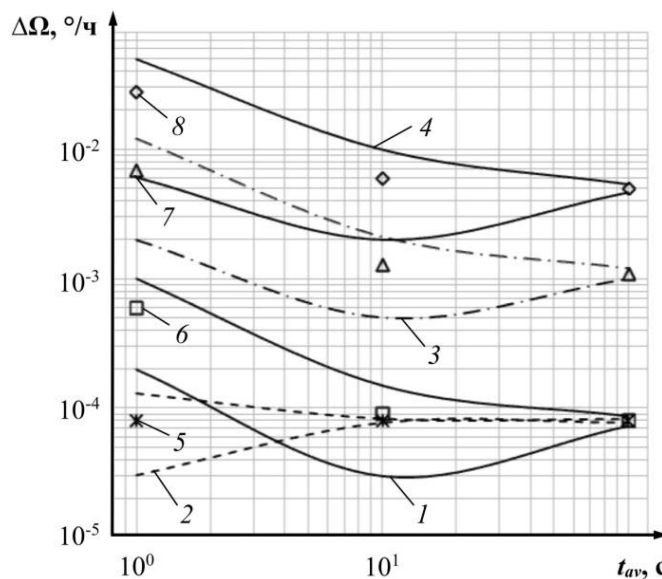


Рис. 2. Влияние амплитуды «косинусного» сигнала на погрешность измерения угловой скорости ЛГ:

- 1, 2 – разброс значений восстановленной угловой скорости при работе с «неидеальными» и «идеальными» сигналами ($U_{c,m} = 1$ В) соответственно;
- 3, 4 – разброс значений измеренной угловой скорости при работе с «идеальными» или «неидеальными» сигналами для $U_{c,m} = 1,1$ В и $U_{c,m} = 1,5$ В соответственно;
- 5, 6 – абсолютная ошибка измеренной угловой скорости при работе с «идеальными» и «неидеальными» сигналами ($U_{c,m} = 1$ В) соответственно;
- 7, 8 – абсолютная ошибка восстановленной угловой скорости при работе с «идеальными» или «неидеальными» сигналами для $U_{c,m} = 1,1$ В и $U_{c,m} = 1,5$ В соответственно.

Следовательно, различие амплитуд первичных квадратурных сигналов ЛГ оказывает на погрешность измерения угловой скорости большее влияние, чем наличие шумов в сигналах U_s, U_c и v_{ac} . С целью минимизации $\Delta\Omega$ требуется предварительная нормировка амплитуд информационных (первичных квадратурных) сигналов.

На базе построенной математической модели для первичных сигналов ЛГ проводились исследования устойчивости метода МФСК не только к добавлению шума в сигналы U_s, U_c, v_{ac} , различию амплитуд квадратурных сигналов, но и к сдвигу фаз между первичными сигналами и сигналом переменной составляющей суммы мощностных сигналов кольцевого лазера.

В третьей серии экспериментов использовался следующий план действий:

Сдвиг сигналов U_s, U_c относительно сигнала v_{ac} на заданное количество отсчетов (1, 2, 5, 8, 10, 12) влево, т.е. квадратурные сигналы опережают по фазе сигнал переменной составляющей суммы мощностных сигналов, при этом амплитуды сигналов U_s, U_c и v_{ac} равны 1 В; в указанные сигналы шум не добавлен.

Цифровая обработка описанных в пункте 1 сигналов методом МФСК.

Сдвиг сигналов U_s, U_c относительно сигнала v_{ac} на заданное количество отсчетов (1, 2, 5, 8, 10, 12) влево, при этом амплитуды сигналов U_s, U_c и v_{ac} равны 1 В; в указанные сигналы добавлен квазибелый шум ($SNR = 50$ дБ).

Цифровая обработка описанных в пункте 3 сигналов методом МФСК.

Один отсчет, на который осуществляется сдвиг сигналов U_s, U_c относительно сигнала v_{ac} на частоте первичного сигнала ЛГ 0,2 МГц, соответствующей максимальной амплитуде гармонической подставки, приближенно равен $0,6 \text{ рад} \approx 34^\circ$. Начиная с двух отсчетов, поря-

док величины $\Delta\Omega$ не изменяется при сдвиге квадратурных сигналов относительно сигнала ν_{ac} (с добавлением или без добавления квазибелого шума).

Неправильное восстановление параметра статического захвата происходит при сдвиге сигналов U_s, U_c относительно сигнала ν_{ac} на 5, 8, 10 и 12 отсчетов влево (независимо от наличия шума):

$$\langle \omega_L \rangle \pm \sigma(\omega_L) = (2,70 \pm 0,011) \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{с} \text{ (5 отсчетов);}$$

$$\langle \omega_L \rangle \pm \sigma(\omega_L) = (2,20 \pm 0,011) \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{с} \text{ (8 отсчетов);}$$

$$\langle \omega_L \rangle \pm \sigma(\omega_L) = (1,70 \pm 0,012) \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{с} \text{ (10 отсчетов);}$$

$$\langle \omega_L \rangle \pm \sigma(\omega_L) = (2,90 \pm 0,013) \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{с} \text{ (12 отсчетов).}$$

Некорректное восстановление ρ наблюдается при сдвиге рассматриваемых сигналов на 5 и 8 отсчетов (с добавлением или без добавления шума):

$$\langle \rho \rangle \pm \sigma(\rho) = (3,000 \pm 0,004) \text{ рад (5 отсчетов);}$$

$$\langle \rho \rangle \pm \sigma(\rho) = (3,000 \pm 0,005) \text{ рад (8 отсчетов).}$$

Согласно результатам третьей серии численных экспериментов абсолютная ошибка измеренной угловой скорости максимальна при сдвиге фаз квадратурных сигналов на 3 рад (5 отсчетов) относительно фазы сигнала ν_{ac} , т.е. рассчитанные значения указанной ошибки находятся не в прямой зависимости от значений разности фаз (количество отсчетов). Начиная с двух отсчетов, значения $\Delta\Omega$ в случае работы с «идеальными» и «неидеальными» сигналами ЛГ совпадают. При $t_{av} = 100$ с сдвиг фаз между «неидеальными» сигналами U_s, U_c и ν_{ac} на 0,6 рад (1 отсчет) приводит к увеличению средней абсолютной ошибки измеренной угловой скорости равномерного вращения корпуса ЛГ примерно в 63 раза, а разброса значений угловой скорости – в 4 раза (рис. 3).

При сдвиге исследуемых сигналов на 3 рад (5 отсчетов) абсолютная ошибка возрастает в 875 раз, а разброс значений угловой скорости – в 57 раз; при сдвиге на 7,2 рад (12 отсчетов) абсолютная ошибка увеличивается в 500 раз, а разброс ее значений – приблизительно в 29 раз. Следовательно, при $t_{av} = 100$ с точность измерения угловой скорости методом МФСК не хуже чем $5 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{ч}$ достигается, если разность фаз между квадратурными и мощностными сигналами ЛГ не превышает 0,6 рад.

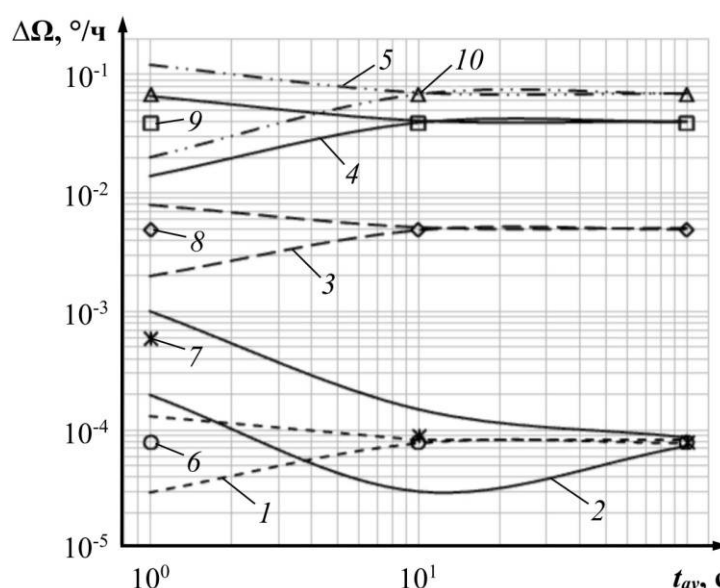


Рис. 3. Влияние разности фаз между квадратурными сигналами и сигналом переменной составляющей суммы мощностных сигналов на погрешность измерения угловой скорости ЛГ:

- 1, 2 – разброс значений восстановленной угловой скорости при работе с «идеальными» и «неидеальными» сигналами соответственно (0 отсчетов);
- 3, 4, 5 – разброс значений восстановленной угловой скорости при работе с «идеальными» или «неидеальными» сигналами, сдвинутыми друг относительно друга на 1, 12 (10) и 5 отсчетов соответственно;
- 6, 7 – абсолютная ошибка измеренной угловой скорости при работе с «идеальными» и «неидеальными» сигналами соответственно (0 отсчетов);
- 8, 9, 10 – абсолютная ошибка измеренной угловой скорости при работе с «идеальными» или «неидеальными» сигналами, сдвинутыми друг относительно друга на 1, 12 (10) и 5 отсчетов соответственно.

Установлено, что корректная работа метода МФСК реализуется только в условиях равенства амплитуд и фаз мощностных и информационных сигналов ЛГ. В реальном эксперименте мгновенное значение амплитуды сигнала v_{ac} в 100 раз меньше мгновенной амплитуды «синусного» или «косинусного» сигнала. Разработка и изготовление фотоусилителей для мощностных сигналов с такими большими коэффициентами усиления и одинаковыми ФЧХ являются нетривиальной задачей.

Построение бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) авиационного применения с точностью не хуже чем 0,9 км за час полета (БИНС 4-го поколения) становится возможным при использовании метода МФСК для цифровой обработки первичных квадратурных сигналов ЛГ только в случае предварительной нормировки данных сигналов по амплитуде и фазе, например, с помощью метода МФС, который заключается в аппроксимации кривой второго порядка множества точек, соответствующих парам отсчетов первичных сигналов [12, 23, 24].

Заключение

Метод МФСК имеет относительно большую устойчивость к наличию квазибелого шума в первичных квадратурных сигналах и сигнале переменной составляющей суммы мощностных сигналов ЛГ: средняя абсолютная ошибка измеренной угловой скорости равномерного вращения корпуса ЛГ не изменяется, однако разброс значений угловой скорости увеличивается приблизительно в 2,4 раза.

Различие амплитуд квадратурных сигналов более чем на 10% приводит к резкому – в 14 раз – увеличению погрешности измерения угловой скорости ЛГ.

На интервале осреднения 100 с точность измерения угловой скорости методом МФСК $5 \cdot 10^{-3}$ °/ч, требуемая для построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем четвертого поколения, достигается, если разность фаз между информационными и мощностными сигналами ЛГ не превышает 0,6 рад.

Следовательно, корректная работа метода МФСК реализуется только в случае предварительной нормировки первичных квадратурных сигналов ЛГ по амплитуде и фазе. Для решения данной проблемы предлагается использовать метод вычисления мгновенной фазы Саньяка с аппроксимацией первичных сигналов ЛГ полиномиальным уравнением второго порядка [12, 23, 24].

Библиографический список

1. Болотнов А.С. Применение лазерного гироскопа в бесплатформенных инерциальных системах // Политехнический молодежный журнал. – 2019. – №10(39). – С. 1–9.
2. Aronowitz F. Fundamentals of the ring laser gyro // Optical gyros and their application. – 1999. – P. 3–45.
3. Азарова В.В., Голяев Ю.Д., Кузнецов Е.В. Оптические технологии производства лазерных зеркал, разработанные в НИИ «Полус» им. М. Ф. Стельмаха // Инновационные технологии, в электронике и приборостроении: сборник докладов Российской научно-технической конференции с международным участием, 5–12 апреля 2021. – Москва: МИРЭА – Российский технологический университет. – 2021. – Том 1. – С. 194–197.
4. Азарова В.В., Ищенко П.И., Кулагин А.В., Оглоблин М.С., Фокин В.В., Чертович И.В. Особенности получения высокоотражающих интерференционных лазерных зеркал // XI международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов, 26–28 января 2022. – М.: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». – 2022. – С. 187–188.
5. Данилов А.С., Азарова В.В. Методы защиты зеркал лазерных гироскопов от воздействия тлеющего разряда // Оптические технологии, материалы и системы («Оптотех 2022»): сборник докладов конференции, 5–10 декабря 2022. – Москва: МИРЭА – Российский технологический университет. – 2022. – С. 102–113.
6. Петрухин Е.А., Синельников А.О., Хохлов И.Н. Способ измерения порога статического захвата в лазерном датчике угловой скорости // Патент Российской Федерации № 2762951 С1. – 2021. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47488527> (дата обращения 12.02.2024).
7. Alekseev S.Yu., Morozov D.A., Borisov M.V., Molchanov A.V., Zakharov M.A. Technological aspects of precision ring laser production: synchronization threshold measurements in manufacture and operation // 19th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS 2012), 28–30 May 2012. – Saint Petersburg: Proceedings. – 2012. – P. 54–56.
8. Fyodorov A.E., Zborovsky V.A., Rekunov D.A. Estimation of RLG resonator accuracy parameters in the process of production // 21st Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS 2014), 28–30 May 2014. – Saint Petersburg: Proceedings. – 2014. – P. 303–311.
9. Khokhlov I., Sinelnikov A. A method for measuring the lock-in zone in laser gyro sensors // 28th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS 2021), 31 May – 2 June 2021. – Saint Petersburg: Proceedings. – 2021. – P. 1–3.
10. Petrukhin E.A., Bessonov A.S. A model for the formation of complex coupling coefficients in a ring resonator of a laser gyroscope // Quantum Electronics. – 2022. – Vol. 52, No. 4. – P. 391–401.
11. Petrukhin E.A., Bessonov A.S. Setup for measuring complex coupling parameters in laser gyro ring cavity // 27th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS 2020), 25–27 May 2020. – Saint Petersburg: Proceedings. – 2020. – P. 1–3.
12. Витязев С.В., Валуйский Д.В., Мишин В.Ю., Молчанов А.В., Серебряков А.Е., Чиркин М.В. Определение фазы Саньяка в цифровом лазерном гироскопе при применении DSP процессора // Навигация и управление летательными аппаратами. – 2021. – № 1(32). – С. 22–37.
13. Серебряков А.Е., Тепцов Д.Б., Витязев С.В., Молчанов А.В. Алгоритм вычисления фазы Саньяка по квадратурным сигналам кольцевого лазера // Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA-2023): доклады XXV Международной конференции, 29–31 марта 2023. – М: Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. – 2023. – С. 106–109.
14. Чиркин М.В., Серебряков А.Е., Иваненко Ю.Р., Мишин В.Ю., Молчанов А.В. Компенсация динамического захвата в кольцевом лазерном гироскопе // Навигация и управление летательными аппаратами. – 2022. – № 3(38). – С. 12–27.
15. Chirkin M.V., Mishin V.Yu., Serebryakov A.E., Molchanov A.V., Ivanenko J.R., Davydov G.V. Suppression of laser gyroscope random error without dither noising // 30th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS 2023), 29–31 May 2023. – Saint Petersburg: Proceedings. – 2023. – P. 225–228.
16. Choi W.-S.; Shim K.-M.; Chong K.-H.; An J.-E.; Kim C.-J.; Park B.-Y. Sagnac effect compensations and locked states in a ring laser gyroscope // Sensors (Basel). – 2023. – № 23(3). – 1718 p.

17. Jae-Cheul Lee, Hyun-Ju Cho, Ho-Soon Yang. Zero lock-in implementation by phase wrapping/unwrapping in a ring laser gyroscope // *Applied Optics*. – 2021. – Vol. 60, No. 34. – P. 10529–10538.
18. Sin-Woo Song, Ja-Cheul Lee, Suk-Kyo Hong, Dongkyoung Chwa. New random walk reduction algorithm in ring laser gyroscopes // *Journal of Optics*. – 2010. – Vol. 12. – P. 115501–115509.
19. Кремер В.И., Осипов А.М., Поликовский Е.Ф. Компенсация погрешностей лазерного гироскопа, вызываемых действием вибрационной частотной подставки // *Гироскопия и навигация*. – 2001. – № 1(32). – С. 14–19.
20. Chesnokov G.I., Polikovskiy E.F., Molchanov A.V., Kremer V.I. Some ways of improving the technical and operational characteristics of strapdown inertial navigation systems // 10th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS 2003), 26–28 May 2003. – Saint Petersburg: Proceedings. – 2003. – P. 277–285.
21. Chirkin M.V., Mishin V.Y., Morozov D.A., Golovan A.A., Molchanov A.V. Filtering output signals of a laser gyro triad // 21st Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS 2014), 26–28 May 2014. – Saint Petersburg: Proceedings. – 2014. – P. 388–390.
22. Efimov B.V., Kremer V.I., Molchanov A.V., Polikovskiy E.F. Compensation of random drift of a laser gyroscope // 8th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS 2001), 28–30 May 2001. – Saint Petersburg: Proceedings. – 2001. – P. 113–114.
23. Golovan A.A., Mishin V.Yu., Molchanov A.V., Chirkin M.V. Method for analyzing the influence of the errors induced by the gyroscopic channel of a strapdown INS in the autonomous mode // *Journal of computer and systems sciences international*. – 2021. – Vol. 60, No. 4. – P. 627–638.
24. Molchanov A.V., Belokurov V.A., Chirkin M.V., Kagalenko M.B., Koshelev V.I., Mishin V.Yu., Morozov D.A. The application of advanced processing technique to the triad of precision laser gyroscopes // 23rd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS 2016), 30 May – 1 June 2016. – Saint Petersburg: Proceedings. – 2016. – P. 120–122.
25. Molchanov A.V., Belokurov V.A., Chirkin M.V., Kagalenko M.B., Koshelev V.I., Mishin V.Yu., Morozov D.A. The application of advanced processing technique to the triad of precision laser gyroscopes // 23rd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS 2016), 30 May – 1 June 2016. – Saint Petersburg: Proceedings. – 2016. – P. 120–122.

СЕКЦИЯ «ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА»

УДК 520.68; ГРНТИ 47.13.07

ПОИСК ИЗЛУЧАЮЩИХ НАНОЧАСТИЦ В ОКРЕСНОСТЯХ ТОЧЕК ЛИБРАЦИИ ПЛАНЕТ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ СИНТЕЗА ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМЫХ НАНООБЪЕКТОВ, ЗАПУСКАЮЩИХ МЕХАНИЗМЫ РЕГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В.А. Линьков, С.Ю. Линькова

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

Аннотация. В работе рассматривается применение малоразмерного бинарного космического аппарата для поиска и сбора внеземных функциональных наночастиц в окрестностях точек либрации планет, входящих в Солнечную систему, для синтеза новых телеуправляемых нанообъектов со свойствами квантовых точек и апконвертирующих наночастиц, способных запустить механизмы регенерации элементов биосистем.

Ключевые слова: бинарный космический аппарат, точки либрации, Солнечная система, поиск внеземных нанообъектов, квантовые точки, апконвертирующие наночастицы, фотогенетика, регенерация биосистем.

SEARCH FOR RADIATING NANOPARTICLES IN THE VIBRANCE OF LIBRATION POINTS OF PLANETS OF THE SOLAR SYSTEM FOR THE SYNTHESIS OF TELECONTROLLED NANOOBJECTS THAT TRIGGER REGENERATION MECHANISMS OF ELEMENTS OF BIOLOGICAL SYSTEMS

V.A. Linkov, S.Yu. Linkova

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkina,
Russian Federation, Ryazan, linkov.v.a@rsreu.ru*

Annotation. The work discusses the use of a small-sized binary spacecraft to search and collect extraterrestrial functional nanoparticles in the vicinity of the libration points of planets in the Solar System, to synthesize new remotely controlled nanoobjects with the properties of quantum dots and upconverting nanoparticles that can trigger regeneration mechanisms of elements of biosystems.

Key words: binary spacecraft, libration points, Solar system, search for extraterrestrial nanoobjects, quantum dots, upconverting nanoparticles, photogenetics, regeneration of biosystems.

В работе рассматривается применение малоразмерного бинарного космического аппарата (БКА) для поиска и сбора внеземных функциональных наночастиц, скопления которых расположены в окрестностях точек либрации [1] (точек Лагранжа) планет, входящих в Солнечную систему, для синтеза новых телеуправляемых нанообъектов на базе квантовых точек и апконвертирующих наночастиц, способных запускать механизмы регенерации элементов биологических систем.

Космические миссии в будущем будут продолжаться длительное время (например, для инспекции ближних экзопланет), для этого необходимо в разы увеличить жизненный цикл исследовательских автоматических зондов, а также в пилотируемой космонавтике значительно увеличить продолжительность жизни космонавтов. Одним из возможных вариантов для реализации этого может стать изучение и последующий запуск механизмов регенерации за счет многократного обновления элементов биологических систем на основе воздействия на определенные зоны кодовыми последовательностями микрокоманд, состоящих из программируемых самоэволюционирующих спектров электромагнитного излучения нанообъектов [2, 43, 48, 49].

Поиск функциональных наночастиц проводится по трем направлениям. Направление №1 - создание новых функциональных нанообъектов путем объединения нескольких наночастиц с различными известными свойствами в компактные наносферы, обладающие новыми ранее не известными свойствами в лабораторных условиях [2, 48, 49] путем искусственного синтеза. Направление №2 - поиск новых внеземных структур с квантовыми эффектами в грунте астероидов или планет, доставленных на Землю с помощью спускаемых космических аппаратов, или повторный поиск с использованием новых инструментов во внеземном веществе упавших ранее на Землю метеоритах [50] (например, исследование вкраплений в Fe-Ni слоях во фрагментах метеорита Дронино (Рязанская область)). Направление №3 - Активный поиск новых нанообъектов в местах (гравитационных колодцах) скопления космической пыли [23 - 42, 44, 45], а именно в окрестностях точек либрации, где возможен естественный синтез за счет многократного столкновения внеземных микрообъектов с разными химическими и физическими свойствами на протяжении миллионов лет в условиях непрерывной бомбардировки элементарными частицами и широким спектром космического излучения.

Собранные и доставленные на Землю нанообъекты внеземного происхождения в Земных условиях подвергаются биологическому и физико-химическому анализу. При выявлении уникальных свойств у собранных наночастиц, на основании анализа новых сочетаний веществ космического происхождения, осуществляется искусственный синтез подобных нанообъектов, обладающих новыми свойствами, не встречающимися на Земле.

Используемое в описании словосочетание «бинарный космический аппарат» (БКА) понимается как космический аппарат, состоящий из двух корпусов и общей армированной гибкой ленточной солнечной батареи, расположенной между ними [11 – 36, 37 - 42], разворачиваемый за счет разматывания солнечной батареи, смотанной в рулон при реверсивном перемещении одного корпуса относительно другого в противоположные стороны и обратно, осуществляемом с помощью мультивекторных матричных ракетных двигателей (ММРД) [3 - 10, 46, 47]. Гибкая ленточная солнечная батарея (СБ) – это гибкая диэлектрическая ленточная подложка, на которую нанесен массив соединенных между собой тонкопленочных солнечных фотоэлементов в сочетании с микроконтейнерами для сбора нанообъектов. Точки либрации (точки Лагранжа) – это точки, где гравитационное и центробежное ускорения, воздействующие на помещенное в окрестностях точки тело, уравниваются, в связи с чем, так называемые «малые тела» могут там накапливаться, например, в окрестностях точек L4, L5.

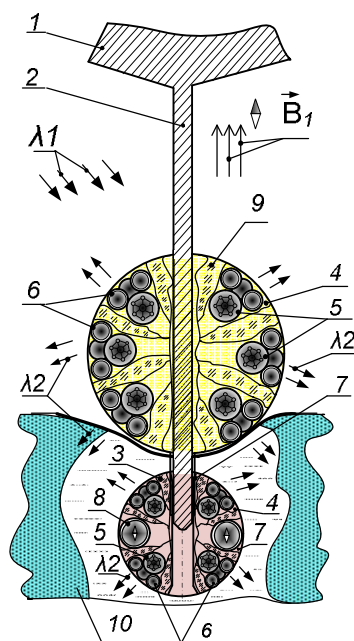


Рис. 1.1

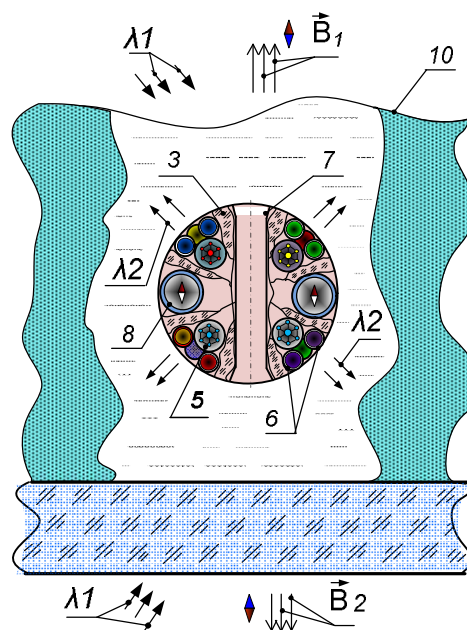


Рис. 1.2

Рис. 1.1. Магнитопрозрачная электропроводящая приемо-передающая игла зонда атомно-силового микроскопа с излучающими отделяемыми нанообъектами.

Рис. 1.2. Отстыкованный от иглы телеуправляемый излучающий нанообъект, движущийся по исследуемому наноклодцу с помощью двух сфокусированных встречно направленных электромагнитных полей.

На рисунках 1.1 и 1.2, приводится структура функционального телеуправляемого нанообъекта отделяемого от магнитопрозрачной электропроводящей наноиглы 2 зонда 1 атомно-силового микроскопа [2, 49] используемого для исследований методами оптогенетики и нейрофотоники механизмов запуска регенерации элементов биологических систем. Стрелками указываются направления возбуждающего ближнего инфракрасного излучения λ_1 и преобразованного по длине волны излучения λ_2 . Стрелками с символом B_1 и B_2 (первый и второй векторы магнитной индукции) показано направление магнитных силовых линий внешних магнитных полей. Внешнее магнитное поле осуществляет притяжение или отталкивание магнитных наночастиц 8 структуры ядро-оболочка, закрепленных в корпусе магнитопрозрачной стеклянной сферы 3 (рис. 1.2), которая в свою очередь перемещает закрепленные в ней апконвертирующие наночастицы 5 структуры ядро-оболочка и квантовые точки 6 структуры ядро-оболочка, при взаимодействии разнополярных или однополярных магнитных полей.

Синтез стимулирующего нанообъекта осуществляется с помощью стеклянной нано сферы 3, в нанометровые поры 4 которой введены апконвертирующие наночастицы 5 структуры ядро-оболочка, окруженные квантовыми точками 6 структуры ядро-оболочка. Это позволило для формирования длины волны электромагнитного излучения, применяемого при сканировании поверхности стенок наноклодцев 10 объекта диагностирования, использовать оптимальное сочетание нескольких преобразований электромагнитного излучения с учетом уровня проникновения и разрушающих свойств определенных длин волн, воздействующих на живые биологические объекты. Цепочка преобразований состоит из преобразования исходной длины волны, расположенной в ближней инфракрасной области (в «окне прозрачности» биотканей) в локальное ультрафиолетовое, а ультрафиолетовое преобразовывается в стабильное излучение в видимом или среднем инфракрасном диапазонах. Эти преобразования выполняется в следующей последовательности: глубоко проникающим безопасным для

биотканей ближним инфракрасным излучением (700-1100 нм) возбуждаются апконвертирующие наночастицы структуры ядро-оболочка, которые, в свою очередь, генерируют локальное ультрафиолетовое излучение в ближнем диапазоне (300-400 нм), которым возбуждают только рядом расположенные вокруг их квантовые точки структуры ядро-оболочка, которые излучают стабильные длинны волн в видимом или среднем инфракрасном диапазоне (400-3000 нм), которым точно облучают при перемещении телеуправляемого нанокompозитного излучающего элемента боковые стенки наноколодцев 10 на ранее не доступных для исследования глубинах, без повреждения ультрафиолетовым излучением живых биотканей. Для возбуждения апконвертирующих наночастиц введены первый и второй внешние источники возбуждения апконвертирующих наночастиц, работающие в ближнем инфракрасном диапазоне, что позволяет снизить или исключить радиационную нагрузку цитотоксичного ультрафиолетового излучения на исследуемые живые биологические клеточные культуры. Введение апконвертирующих наночастиц 5 структуры ядро-оболочка, возбуждаемых ближним инфракрасным светом, позволило увеличить глубину исследования наноколодцев до 4 – 7 мм за счет минимального поглощения большинством биомолекул ближнего инфракрасного света в диапазоне длин волн от 700 – 1100 нм в «окне прозрачности» биоткани, а использование двунаправленного встречного возбуждения апконвертирующих наночастиц позволило увеличить глубину исследования изогнутых (волнообразных) наноколодцев в два раза, до 8 – 14 мм и уменьшить эффекты фотоповреждения биоткани [2, 49].

Квантовые точки 6 структуры ядро-оболочка расположены на малом расстоянии вокруг каждой апконвертирующей наночастицы 5 структуры ядро-оболочка для выполнения резонансной безызлучательной передачи энергии по ферстеровскому механизму (FRET, Forster Resonance Energy Transfer), т.к. эффективность FRET обратно пропорциональна шестой степени расстояния между ними. Кроме того, линии фотолюминесценции апконвертирующих наночастиц 5 структуры ядро-оболочка находятся в полосе поглощения квантовых точек 6 структуры ядро-оболочка. С помощью диэлектрической наносферы большего диаметра 9 измеряется колебания модуля Юнга одновременно с электрическими откликами принимаемые электропроводящей нано размерной иглой 2, как ответ на возбуждающие импульсы преобразованные телеуправляемой наносферой 3.

Для реализации изобретения [2] использованы, известные технологии изготовления апконвертирующих наночастиц 5 структуры ядро-оболочка, повышающие конверсионные свойства композиции, имеющие кубическую структуру (α) или гексагональную структуру (β), композиции α - NaYF_4 : Yb, Er @ CaF_2 . Рекомендуются размер ядра – от 2 до 80 нм, а оболочка – толщиной от 2 до 40 нм. В качестве оболочки могут быть использованы другие материалы, улучшающие преобразовательные функции наночастиц, включающие в себя NaYF_4 (α или β), CaF_2 , LiYF_4 , NaGdF_4 , NaScF_4 , NaYbF_4 , NaLaF_4 , LaF_3 , GdF_3 , GdOF , La_2O_3 , Lu_2O_3 , Y_2O_3 , $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}$, YbF_3 , YF_3 , KYF_4 , KGdF_4 , BaYF_5 , BaGdF_5 , NaLuF_4 , KLuF_4 и BaLuF_5 , но не ограничиваться ими. Сочетание компонентов и процентное содержание определяет интенсивность излучения тех или иных пиков в оптическом диапазоне от ультрафиолетового до красной области спектра, генерируемых апконвертирующими наночастицами [2]. В качестве дополнительной оболочки при синтезе апконвертирующих наночастиц структуры ядро-оболочка также может быть использован диоксид титана TiO_2 , который наносится на ядро апконвертирующей наночастицы (TiO_2 coated NaYF_4 :Yb,Tm @ SiO_2), в зависимости от процентного сочетания компонентов длина волны излучения может находиться в диапазоне от 330 нм до 675 нм [2]. Кроме того, могут быть применены известные апконвертирующие наночастицы NaYF_4 :Yb³⁺,Tm³⁺, обладающие антистоксовой люминесценцией в ультрафиолетовой и синей области спектра, исключающие радиационную нагрузку цитотоксичного ультрафиолетового излучения на клеточные культуры, используемые при создании трансинженерных конструкций [49].

Использование квантовых точек 6 структуры ядро-оболочка обусловлено возможностью генерирования ими стабильных длин волн, (длина волны определяется величиной диаметра квантовой точки), отработанной технологией изготовления и получения стабильного легко программируемого спектра [43] электромагнитного излучения в оптическом диапазоне. Ядро каждой квантовой точки 6 структуры ядро-оболочка может, например, включать, по меньшей мере, один материал, выбранный из группы, состоящей из CdSe, CdS, ZnS, ZnSe, CdTe, CdSeTe, CdZnS, PbSe, AgInZnS, и ZnO, но не ограничивается ими. Оболочка каждой квантовой точки 6 структуры ядро-оболочка может включать в себя, по крайней мере, один материал, выбранный из группы, состоящей из CdSe, ZnSe, ZnS, ZnTe, CdTe, PbS, TiO, SrSe, и HgSe, но этими вариантами не ограничивается [2].

Ферромагнитное ядро магнитной наночастицы 8 структуры ядро-оболочка может, например, включать, по меньшей мере, один материал, выбранный из группы, состоящей из Fe, Co, Ni, FeOFe_2O_3 , NiOFe_2O_3 , CuOFe_2O_3 , MgOFe_2O_3 , MnBi, MnSb, MnOFe_2O_3 , CrO_2 , MnAs, SmCo, FePt или их комбинации, но не ограничивается ими. Размер ядра одной магнитной наночастицы 8 структуры ядро-оболочка может варьироваться от 3 нм до 20 нм. Внешняя оболочка (окружающая магнитный сердечник) магнитной наночастицы 8 структуры ядро-оболочка сформирована из магнитомягкого или суперпарамагнитного материала, например, может включать, по меньшей мере, один материал, выбранный из групп, состоящих из Fe_3O_4 , FeO, CoFe_2O_4 , MnFe_2O_4 , NiFe_2O_4 , $\text{ZnMnFe}_2\text{O}_4$, или их комбинации, но не ограничивается ими. Внешняя оболочка может иметь толщину в диапазоне от 0,5 нм до 3 нм. Внешняя оболочка защищает ядро от окисления и повышает магнитные свойства магнитной наночастицы 8 структуры ядро-оболочка и может покрываться дополнительной биосовместимой оболочкой, что, в свою очередь, защищает исследуемый биологический диагностируемый объект 10 при частичном повреждении общей защитной оболочки магнито-прозрачной стеклянной сферы 3. Для осуществления изобретения могут быть использованы, например, известные технологии изготовления магнитных наночастиц структуры ядро-оболочка [49].

Изготовление излучающего элемента осуществляется легированием магнито-прозрачной стеклянной сферы 3 (рис. 1.2) магнитными наночастицами 8 структуры ядро-оболочка, апконвертирующими наночастицами 5 структуры ядро-оболочка и квантовыми точками 6 структуры ядро-оболочка с выполнением условий допусковых отклонений [2, 43, 49]. Легирование магнито-прозрачной стеклянной сферы 3 выполняется за счет последовательного проникновения магнитных наночастиц 8 структуры ядро-оболочка в сквозные нанометровые поры 7 большого диаметра, затем проникновения апконвертирующих наночастиц 5 структуры ядро-оболочка в оставшиеся не заполненными сквозные нанометровые поры малого 4 диаметра с конусообразными входами и заполнение оставшихся пустот в конусообразных входах вокруг апконвертирующих наночастиц 5 структуры ядро-оболочка квантовыми точками 6 структуры ядро-оболочка. Для возбуждения апконвертирующих наночастиц 5 структуры ядро-оболочка могут быть использованы лазерные диоды с гауссовым профилем распределения интенсивности пучка (одномодовые лазерные диоды) и длиной волны, например, 975 нм с плотностью мощности излучения допустимой для безопасной работы с живой биотканью (in vivo).

Ограниченное количество классов функциональных нанообъектов, синтезированными в Земных лабораториях заставило начать параллельно разработку инструментов для поиска нанообъектов с неизвестными ранее свойствами в пылеобразных скоплениях, расположенных в окрестностях точек либрации планет входящих в Солнечную систему.

На протяжении последних 10 лет были созданы и запатентованы бинарные космические аппараты для поиска, сбора и анализа внеземных низкотемпературных [38, 41], криотемпературных [39, 42] нанообъектов с магнитными [23, 27, 37, 40, 48], электрическими [38, 39], излучающими, флуоресцентными [25, 34 - 36] свойствами, а также со свойствами кван-

товых точек и апконвертирующих наночастиц [28 29, 30]. Разработаны планарные магнитные и электростатические ловушки для сбора нанообъектов [23, 24], охладители [37 - 42]. Пассивные системы консервации собранных нанообъектов [31, 32] и активные с поддержанием низких и криогенных температур [41, 42] маневровые матричные и многоматричные ракетные двигатели [3-10, 46, 47] гибкие ленточные батареи, совмещенные с реконфигурированными антеннами [11 - 22] и планарными контейнерами для забора и запайки в них нанообъектов [23 – 42] в космосе.

На рисунках 2.1 – 2.5 – схематично поясняются этапы развертывания бинарного космического аппарата для поиска и сбора внеземных низкотемпературных нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в Солнечную систему, в моменты развертывания и свертывания гибкой 22 ленточной СБ (вид с теневой стороны БКА). На рисунке 2.3 – этап сканирования окрестности точки либрации, сбор и герметизация собранных низкотемпературных нанообъектов. На рисунках 2.4 и 2.5, – этапы свертывание БКА. рисунке 2.1, первый этап – тестирование лазерных дальномеров 17 - 20, и корпусного 11, 12 электронного оборудования. Рисунок 2.2, второй этап – выдвижение двигателей ММРД 13 - 16, и ориентация положения БКА на Солнце. Рисунок 2.3, третий этап – развертывание гибкой ленточной подложки 22 с размещенными микроконтейнерами 21 для забора внеземных низкотемпературных нанообъектов и перемещение БКА по окрестности точки либрации, а также сбор низкотемпературных нанообъектов за счет притяжения их к поверхностям жестких диэлектрических микроподложек, расположенных в открытых микроконтейнерах 21, и последующая герметизация открытых частей микроконтейнеров 21 с собранными низкотемпературными нанообъектами - запайкой прозрачной герметизирующей пленкой 23. Рисунок 2.4, - четвертый этап – конвейерная герметизация микроконтейнеров 21 с собранными низкотемпературными нанообъектами. Рисунок 2.5, пятый этап – полное свёртывание гибкой ленточной подложки 22 в рулон и переход системы в энергоэкономичный режим ожидания транспортно-космического аппарата для перемещения собранных низкотемпературных нанообъектов в исследовательскую лабораторию электронной и зондовой микроскопии, расположенной на Земле, или для большей биологической безопасности на орбитальной станции в космосе. На заднем плане рисунка 2.1 схематически представлены Солнце, на которое ориентированы солнечные элементы БКА, и Сатурн со своими наиболее крупными спутниками (на начало 2022 года подтверждено существование 82 естественных спутников (Лун) Сатурна)), образующие вместе систему с большим количеством точек либрации, в окрестностях которых происходит поиск низкотемпературных нанообъектов с новыми функциональными (например, магнитными, электретыми и одновременно флуоресцентными) свойствами.

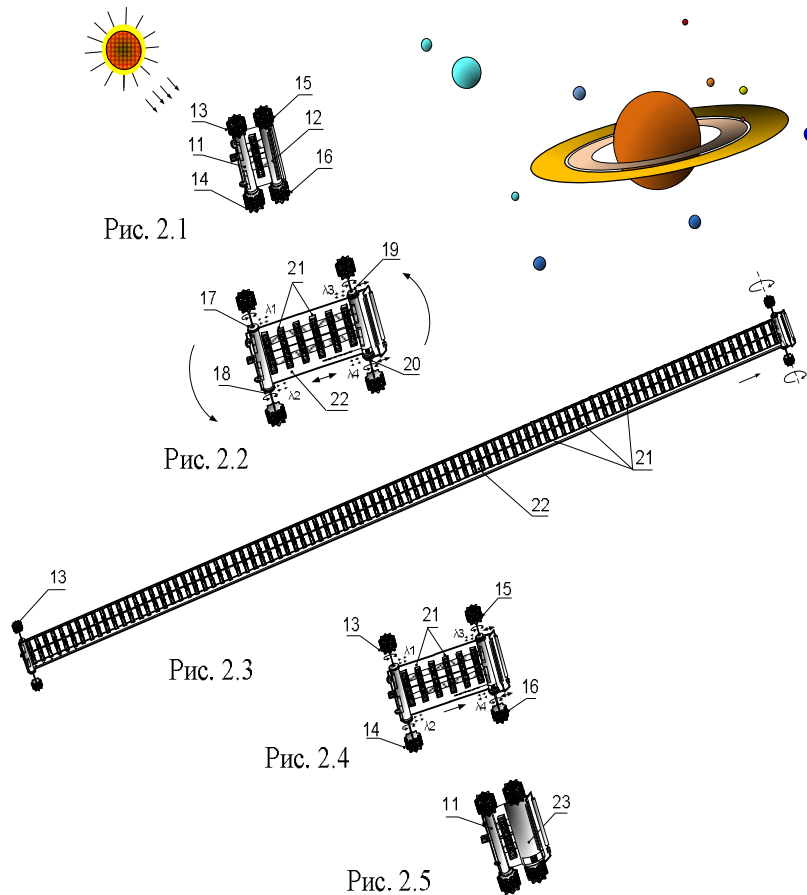


Рис. 2.1 и Рис. 2.2 – схематично поясняются этапы разворачивания бинарного космического аппарата (БКА) для поиска и сбора внеземных низкотемпературных нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в Солнечную систему.

Рис. 2.3 – этап сканирования окрестности точки либрации, сбор и герметизация собранных низкотемпературных нанообъектов.

Рис.2.4 и Рис.2.5, – этапы сворачивание БКА.

Предложенный метод поиска и сбора внеземных нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в Солнечную систему, позволяет: развернуть и свернуть поисковое гибкое ленточное полотно СБ большой площади между двумя растягивающими ее маневровыми ММРД с волнообразной цилиндрической поверхностью. Осуществить сбор излучающих наночастиц с заданными свойствами, попавшими в зону притяжения электрических или электромагнитных полей. Реализовать конвейерную герметизацию и низкотемпературное хранение собранных на жесткие диэлектрические микроподложки функциональных наночастиц, размещенных в микроконтейнерах, нанесенных на гибкую подложку, сворачиваемую в компактный, транспортируемый рулон.

Библиографический список

1. Точки либрации в небесной механике и космодинамике, *Маркеев А.П.*, Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», М.,1978 г. 312 стр.
2. Сканирующий зонд атомно-силового микроскопа с отделяемым телеуправляемым нанокомпозитным излучающим элементом, легированным квантовыми точками, апконвертирующими и магнитными наночастицами структуры ядро-оболочка: Патент на изобретение RU 2723899 С1, 18.06.2020, / *Линьков В. А., Гусев С. И., Вишняков Н. В., Линьков Ю. В., Линьков П. В.*
3. Матричная ракетная двигательная система с индивидуальным цифровым управлением величиной тяги каждой двигательной ячейки для малоразмерных космических аппаратов: Патент на изобретение RU 2660210 С1, 05.07.2018. Заявка № 2017114832 от 26.04.2017. / *Линьков В.А., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И., Гусев С.И.*

4. Реверсивная матричная ракетная двигательная система с индивидуальным цифровым управлением величиной тяги каждой реверсивной двигательной ячейки для малоразмерных космических аппаратов: Патент на изобретение RU 2654782 C1, 22.05.2018. Заявка № 2017123451 от 03.07.2017. / Линьков В.А., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И., Гусев С.И.

5. Матричная ракетная двигательная система с индивидуальным цифровым управлением величиной тяги каждой двигательной ячейки для малоразмерных космических аппаратов: Патент на полезную модель RU 178924 U1, 23.04.2018. Заявка № 2017116244 от 10.05.2017. / Линьков В.А., Вишняков Н.В., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И., Гусев С.И.

6. Реверсивная матричная ракетная двигательная система с индивидуальным цифровым управлением величиной тяги каждой реверсивной двигательной ячейки для малоразмерных космических аппаратов: Патент на полезную модель RU 178748 U1, 18.04.2018. Заявка № 2017123920 от 05.07.2017. / Линьков В.А., Вишняков Н.В., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И., Гусев С.И.

7. Мультивекторная матричная ракетная двигательная система с цифровым управлением величиной и направлением тяги двигательных ячеек для малоразмерных космических аппаратов: Патент на полезную модель RU 183937 U1, 09.10.2018. Заявка № 2018125136 от 09.07.2018. / Линьков В.А., Гусев С.И., Колесников С.В., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И.

8. Мультивекторная матричная ракетная двигательная система с цифровым управлением величиной и направлением тяги двигательных ячеек для малоразмерных космических аппаратов: Патент на изобретение RU 2707474 C1, 26.11.2019. Заявка № 2018142754 от 03.12.2018. / Линьков В.А., Гусев С.И., Колесников С.В., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И.

9. Мультивекторная матричная ракетная двигательная система с цифровым управлением величиной и направлением тяги двигательных ячеек для малоразмерных космических аппаратов: Патент на изобретение RU 2700299 C1, 16.09.2019. Заявка № 2018124424 от 03.07.2018 / Линьков В.А., Гусев С.И., Колесников С.В., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И.

10. Мультивекторная матричная ракетная двигательная система с цифровым управлением величиной и направлением тяги двигательных ячеек для малоразмерных космических аппаратов: Патент на полезную модель RU 189442 U1, 22.05.2019. Заявка № 2018143940 от 11.12.2018. / Линьков В.А., Гусев С.И., Колесников С.В., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И.

11. Бинарный космический аппарат с реконфигурируемой сканирующей антенной, совмещенной с солнечной батареей, развертываемой мультивекторными матричными ракетными двигателями: Патент на изобретение RU 2745166 C1, 22.03.2021. Заявка № 2020122810 от 03.07.2020. / Линьков В.А.

12. Бинарный космический аппарат с реконфигурируемой сканирующей антенной, совмещенной с солнечной батареей, развертываемой мультивекторными матричными ракетными двигателями: Патент на полезную модель RU 203113 U1, 22.03.2021. Заявка № 2020123633 от 09.07.2020. / Линьков В.А.

13. Бинарный космический аппарат с реконфигурируемой антенной, совмещенной с солнечной батареей, развертываемой мультивекторными матричными ракетными двигателями: Патент на изобретение RU 2744261 C1, 04.03.2021. Заявка № 2020121447 от 23.06.2020. / Линьков В.А.

14. Бинарный космический аппарат с реконфигурируемой антенной, совмещенной со свертываемой в рулон солнечной батареей, развертываемой мультивекторными матричными ракетными двигателями: Патент на изобретение RU 2735448 C1, 02.11.2020. Заявка № 2020113745 от 03.04.2020. / Линьков В.А.

15. Бинарный космический аппарат со сканирующей антенной, совмещенной со свертываемой в рулон солнечной батареей, развертываемой мультивекторными матричными ракетными двигателями: Патент на изобретение RU 2735449 C1, 02.11.2020. Заявка № 2020116045 от 27.04.2020. / Линьков В.А.

16. Бинарный космический аппарат с реконфигурируемой антенной, совмещенной с солнечной батареей, развертываемой мультивекторными матричными ракетными двигателями: Патент на полезную модель RU 200445 U1, 26.10.2020. Заявка № 2020122662 от 03.07.2020. / Линьков В.А.

17. Бинарный космический аппарат со сканирующей антенной, совмещенной со свертываемой в рулон солнечной батареей, развертываемой мультивекторными матричными ракетными двигателями: Патент на полезную модель RU 200213 U1, 13.10.2020. Заявка № 2020117163 от 12.05.2020. / Линьков В.А.

18. Бинарный космический аппарат с реконфигурируемой антенной, совмещенной со свертываемой в рулон солнечной батареей, развертываемой мультивекторными матричными ракетными двигателями: Патент на полезную модель RU 198984 U1, 06.08.2020. Заявка № 2020116038 от 27.04.2020. / Линьков В.А.

19. Бинарный малоразмерный космический аппарат с реконфигурируемой антенной, совмещенной с гибкой развертываемой ленточной солнечной батареей: Патент на изобретение RU 2716728 C1, 16.03.2020. Заявка № 2019103169 от 05.02.2019. / Линьков В.А., Гусев С.И., Колесников С.В., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И.

20. Бинарный космический аппарат с реконфигурируемой антенной, совмещенной с гибкой ленточной солнечной батареей, развертываемой мультивекторными матричными ракетными двигателями: Патент на изобретение RU 2714064 C1, 11.02.2020. Заявка № 2019111570 от 16.04.2019. / Линьков В.А., Гусев С.И., Колесников С.В., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И.

21. Бинарный космический аппарат с реконфигурируемой антенной, совмещенной с гибкой ленточной солнечной батареей, развертываемой мультивекторными матричными ракетными двигателями: Патент на полезную модель RU 190778 U1, 11.07.2019. Заявка № 2019112546 от 24.04.2019. / Линьков В.А., Гусев С.И., Колесников С.В., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И.

22. Бинарный малоразмерный космический аппарат с реконфигурируемой антенной, совмещенной с гибкой ленточной солнечной батареей, развертываемой мультивекторным матричным ракетным двигателем: Патент на полезную модель RU 190495 U1, 02.07.2019. Заявка № 2019103760 от 11.02.2019. / Линьков В.А., Гусев С.И., Колесников С.В., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И.

23. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных нанообъектов с магнитными свойствами в окрестностях точек либрации: Патент на изобретение RU 2761686 C1, 13.12.2021. Заявка № 2021110352 от 13.04.2021. / Линьков В. А.

24. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в солнечную систему: Патент на изобретение RU 2761486 C1, 08.12.2021. Заявка № 2021111499 от 21.04.2021. / Линьков В. А.

25. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных излучающих нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в солнечную систему: Патент на полезную модель RU 207630 U1, 08.11.2021. Заявка № 2021119904 от 06.07.2021. / Линьков В. А.

26. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в солнечную систему: Патент на полезную модель RU 206424 U1, 13.09.2021. Заявка № 2021112468 от 27.04.2021. / Линьков В. А.

27. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных нанообъектов с магнитными свойствами в окрестностях точек либрации: Патент на полезную модель RU 206426, 13.09.2021. Заявка № 2021111489 от 21.04.2021. / Линьков В. А.

28. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных объектов со свойствами квантовых точек и апконвертирующих наночастиц в окрестностях точек либрации: Патент на изобретение 2749431 C1, 10.06.2021. Заявка № 2020135104 от 26.10.2020. / Линьков В. А.

29. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных объектов со свойствами квантовых точек в окрестностях точек либрации: Патент на изобретение RU 2744277 C1, 04.03.2021. Заявка № 2020134827 от 22.10.2020. / Линьков В.А.

30. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных объектов со свойствами квантовых точек и апконвертирующих наночастиц в окрестностях точек либрации: Патент на полезную модель RU 202750 U1, 04.03.2021. Заявка № 2020136043 от 02.11.2020. / Линьков В.А.

31. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных объектов со свойствами квантовых точек в окрестностях точек либрации: Патент на полезную модель RU 202757 U1, 04.03.2021. Заявка № 2020135116 от 26.10.2020. / Линьков В.А.

32. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных излучающих нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в солнечную систему: Патент на изобретение RU 2772290 C1, 18.05.2022. Заявка № 2021118434 от 23.06.2021. / Линьков В. А.

33. Бинарный космический аппарат для поиска, сбора и анализа внеземных флуоресцентных нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в солнечную систему: Патент на полезную модель RU 211253 U1, 26.05.2022. Заявка № 2021102985 от 07.02.2022. / Линьков В. А.

34. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных флуоресцентных нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в солнечную систему: Патент на полезную модель RU 211363 U1, 01.06.2022. Заявка № 202101987 от 27.01.2022. / Линьков В. А.

35. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных флуоресцентных нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в солнечную систему: Патент на изобретение RU 2776623 C1, 22.07.2022. Заявка № 2022101616 от 24.01.2022. / Линьков В. А.

36. Бинарный космический аппарат для поиска, сбора и анализа внеземных флуоресцентных нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в солнечную систему: Патент на изобретение RU 2776624 C1, 22.07.2022. Заявка № 2022101989 от 27.01.2022. / Линьков В. А.

37. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных низкотемпературных нанообъектов с магнитными свойствами в окрестностях точек либрации планет, входящих в Солнечную систему: Патент на полезную модель RU 217021 U1, 14.03.2023. Заявка № 2022132408 от 09.12.2022. / Линьков В. А., Линькова С.Ю.

38. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных низкотемпературных нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в Солнечную систему: Патент на полезную модель RU 217330 U1, 28.03.2023. Заявка № 2022132407 от 09.12.2022. / Линьков В. А.

39. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных криотемпературных нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в Солнечную систему: Патент на полезную модель RU 218355 U1, 23.05.2023. Заявка № 2023105189 от 06.03.2023. / Линьков В. А., Линькова С.Ю.

40. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных криотемпературных нанообъектов с магнитными свойствами в окрестностях точек либрации планет, входящих в Солнечную систему: Патент на полезную модель RU 218396 U1, 24.05.2023. Заявка № 2023105178 от 06.03.2023. / Линьков В. А.

41. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных низкотемпературных нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в Солнечную систему: Патент на изобретение RU 2798620 C1, 23.06.2023. Заявка № 2022131187 от 29.11.2022. / Линьков В. А.

42. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных криотемпературных нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в Солнечную систему: Патент на изобретение RU 2797453 C1, 06.06.2023. Заявка № 2023105189 от 06.03.2023. / Линьков В. А.

43. Линьков В.А. Наноразмерные допуски и посадки для коллоидной самосборки микропрограммных элементов с конвейерным программированием спектров излучения на базе квантовых точек и апконвертирующих наночастиц структуры ядро-оболочка. Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2020: сб.тр. III междунар. науч.-тех. Форума в 10 т. Т.6 - Рязань: РГРТУ-2020 С. 161-172.

44. Линьков В.А., Линькова С.Ю. ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ПОИСКОВЫХ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ЗОНДОВ ДЛЯ СБОРА И АНАЛИЗА ВНЕЗЕМНЫХ НАНООБЪЕКТОВ В ОКРЕСНОСТЯХ ТОЧЕК ЛИБРАЦИИ ПЛАНЕТ, ВХОДЯЩИХ В СОЛНЕЧНУЮ СИСТЕМУ. Современные технологии в науке и образовании-СТНО-2022. Сборник трудов V Международного научно-технического форума. В 10-ти томах. Под редакцией О.В. Миловзорова. Рязань, 2022. С. 22-28.

45. Линьков В.А., Линькова С.Ю. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОИСКОВЫХ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ЗОНДОВ ДЛЯ СБОРА И АНАЛИЗА ВНЕЗЕМНЫХ ФЛУОРЕСЦИРУЮЩИХ НАНООБЪЕКТОВ В ОКРЕСНОСТЯХ ТОЧЕК ЛИБРАЦИИ ПЛАНЕТ, ВХОДЯЩИХ В СОЛНЕЧНУЮ СИСТЕМУ. В книге: Новые информационные технологии в научных исследованиях Материалы XXVII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. В 2-х томах. Рязань, 2022. С. 148-149.

46. Линьков В.А., Линькова С.Ю. ЦИФРОВЫЕ МАТРИЧНЫЕ РАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ДЛЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ. Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2023: сб. тр. VI междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.2./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. - Рязань: Рязан. гос. радиотех. ун-т, 2023. С. 81-88.

47. Линьков В.А., Линькова С.Ю. МУЛЬТИВЕКТОРНЫЕ МАТРИЧНЫЕ ДВИГАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ БИНАРНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ. Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2023: сб. тр. VI междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.2./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. - Рязань: Рязан. гос. радиотех. ун-т, 2023. С. 89-97.

48. Линьков В.А., Линькова С.Ю. БИНАРНЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ ДЛЯ ПОИСКА И СБОРА ВНЕЗЕМНЫХ КРИОТЕМПЕРАТУРНЫХ НАНООБЪЕКТОВ С МАГНИТНЫМИ СВОЙСТВАМИ В ОКРЕСНОСТЯХ ТОЧЕК ЛАГРАНЖА ПЛАНЕТ, ВХОДЯЩИХ В СОЛНЕЧНУЮ СИСТЕМУ. В сборнике: Актуальные проблемы современной науки и производства. Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции. Рязань, 2023. С.159-172.

49. Сканирующий зонд атомно-силового микроскопа с разделяемым телеуправляемым нанокompозитным излучающим элементом, легированным квантовыми точками, апконвертирующими и магнитными наночастицами структуры ядро-оболочка: Патент на изобретение RU 2724987 C1, 29.06.2020, / Линьков В. А., Гусев С. И., Вишняков Н. В., Линьков Ю. В., Линьков П. В.

50. Способ обнаружения квантовых точек и устройство для его осуществления Патент на изобретение RU 2493631 C1, 20.09.2013. Заявка № 2012113955/28 от 11.04.2012. / Линьков В. А., Вихров С.П., Вишняков Н.В., Литвинов В.Г.

УДК 53.06; ГРНТИ 47.01.81

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ ПО ПАРАМЕТРАМ НИЗКОЧАСТОТНОГО ШУМА

Д.С. Логинов, И.Ф. Шерова, Т.А. Холомина

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

Аннотация. В работе рассматриваются методы контроля качества и диагностики потенциальной надежности электронных компонентов, а также возможности реализации для этих целей спектроскопии низкочастотного шума. Приведена схема, иллюстрирующая особенности диагностики качества и надежности компонентов по их характеристикам в области $1/f$ шума. Представлены преимущества диагностики с помощью спектроскопии низкочастотного шума и возможности ее практического применения.

Ключевые слова: спектроскопия низкочастотного шума, спектральная плотность мощности, диагностика надежности электронных компонентов.

FORECASTING THE RELIABILITY OF ELECTRONIC COMPONENTS BASED ON LOW-FREQUENCY NOISE PARAMETERS

D.S. Loginov, I.F. Sherova, T.A. Kholomina

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

Annotation. The article discusses methods of quality control and diagnostics of the potential reliability of electronic components, as well as the possibility of implementing low-frequency noise spectroscopy for these purposes. A diagram illustrating the features of diagnostics of the quality and reliability of components based on their characteristics in the $1/f$ noise region is presented. The advantages of diagnostics using low-frequency noise spectroscopy and the possibilities of its practical application are presented.

Keywords: low-frequency noise spectroscopy, spectral power density, reliability diagnostics of electronic components.

Скрытые дефекты изделий являются серьезной проблемой в производстве электронных компонентов. Для выявления потенциально ненадежной продукции проводятся различные испытания, сопровождаемые предшествующими и последующими измерениями параметров.

Как правило, эти меры направлены на попытки выявить скрытые дефекты в компонентах (устройствах, приборах, модулях, интегральных схемах) до их поставки к потребителю и непосредственной эксплуатации. Для этого могут быть использованы различные варианты термотренировки, электротермической тренировки, энергоциклирования и т. д. Компоненты подвергаются значительным нагрузкам, включая тепловые, электрические и экстремальные переходные процессы. Воздействия, которые происходят во время подобных испытаний, вызывают проявления скрытых дефектов компонента, в результате чего скрытые дефекты могут стать явными. В таком случае потенциально ненадежный компонент либо выходит из строя, либо его характеристики недопустимо изменяются.

Подобные методы контроля качества и диагностики потенциальной надежности электронных компонентов используются уже давно и достаточно успешно. Однако для проведения такой диагностики требуется значительное количество времени от нескольких десятков до сотен часов [1]. Значительные временные потери тем временем приводят к усложнению процесса производства электронных компонентов и повышению их себестоимости, затрудняя своевременное реагирование на сбои в технологическом процессе. Возникает необходимость уменьшить временные потери за счет более интенсивного воздействия на компонент. В этом случае скрытые дефекты проявляются быстрее, но из-за высокой интенсивности воздействия возможно появление новых. В результате предпринятые меры могут привести к отказу даже исправных электронных компонентов [1].

Авторами ряда опубликованных работ установлено, что решить данную проблему можно применением спектрокопии низкочастотного (НЧ) шума для прогнозирования потенциальной надежности электронных компонентов.

Несмотря на давнюю историю изучения и широкую распространенность НЧ шума вида $S(f) \sim 1/f^\beta$ (S – спектральная плотность мощности (СПМ) шума, f – частота, β – показатель формы спектра), исследователи признают, что в подавляющем большинстве объектов, где наблюдается этот шум, его природа до сих пор неизвестна [2]. Возникновение шума в электронных компонентах, имеющего вид $S(f) \sim 1/f^\beta$, иногда его называют $1/f$ шумом, может быть обусловлено различными причинами и каждый конкретный случай может иметь свою особую причину. Однако наиболее распространенной, по мнению большинства исследователей, являются скрытые дефекты в компонентах.

При сравнении характеристик шума $1/f^\beta$ однотипных компонентов можно оценить их относительную надежность. Например, параметры партии выпускаемых электронных компонентов (транзисторов, диодов, резисторов и т. д.) соответствуют заданным предельным значениям. Уровень $1/f$ шума измеряется для каждого компонента, при этом некоторые из них имеют уровень $1/f$ шума значительно выше среднего. В работах [3-4] компоненты подвергались испытаниям на надежность, и результаты свидетельствуют о том, что повышенный уровень $1/f$ шума является признаком критического (предотказного) состояния.

Как правило, основными характеристиками НЧ шума являются значение спектральной плотности мощности на определенной низкой частоте, или величина показателя формы спектра β . В работах [5-7] отмечается, что значение показателя формы спектра низкочастотного шума, который используется как диагностический параметр, варьируется в широком диапазоне: от 0,5 до более, чем 3, и имеет существенное влияние на погрешность измерения СПМ низкочастотного шума.

Авторы многих работ полагают, что для эффективного применения НЧ шумовой диагностики, необходимо применять специальные (часто экстремальные) воздействия с целью выявления источника потенциальной опасности отказа компонентов. При этом параметры спектров НЧ шума необходимо измерять до и после воздействия. Данная комплексная диагностика предоставит информацию о внутренних дефектах исследуемого компонента, включая их природу, размер, расположение и степень их опасности, помимо исчерпывающей информации о его потенциальной надежности. Примером реализации такого эксперимента является обобщенная схема диагностики НЧ шумов, предложенная автором [1] (рисунок 1).



Рис. 1. Схема диагностики качества и надежности электронных компонентов по их характеристикам в области $1/f$ шума [1]

На основе полученных от анализатора шума данных блок обработки отправляет команды исполнительным устройствам, которые сортируют, маркируют или отбраковывают исследуемые компоненты. Собранные статистические данные позволяют оперативно вносить коррективы в технологический процесс с целью снижения уровня отказов [1].

Такой подход к прогнозированию надежности электронных компонентов, по мнению многих авторов, является перспективным, несмотря на то, что обобщенные общепризнанные теоретические представления о механизмах генерации низкочастотного шума в твердом теле и, в частности, в конкретных электронных компонентах пока отсутствуют.

Основным фактором, который характеризует потенциальную ненадежность полупроводниковых изделий (диодов, транзисторов, интегральных схем), является относительная величина изменения информативного электрического параметра до и после воздействия определенного внешнего дестабилизирующего воздействия (радиационное излучение, импульс тока или мощности, механические воздействия и т.д.).

Авторы [3] отмечают, что методы отбраковки электронных компонентов по шумам обычно основаны на сравнении исследуемых изделий с контрольным бездефектным изделием по уровню шума и надежность изделия оценивается по разности значений шумов. По мнению авторов, недостатком этих методов является низкая достоверность, так как до 15% надежных изделий потенциально могут быть забракованы.

Анализ результатов, опубликованных в научно-технической литературе, показывает, что для каждого вида дефектов необходимо выбрать такое внешнее воздействие, на которое будет реагировать только (или хотя бы преимущественно) этот дефект. Сам этот отклик может быть зафиксирован путём измерения отклика $1/f$ шума исследуемого компонента на выбранное специальное внешнее воздействие. Сложность заключается в выборе наиболее избирательных внешних воздействий [1]. Эта избирательность и является основой для диагностики дефектов по характеристикам спектра $1/f$ шума [1]. Если приложенное внешнее воздействие изменяет характеристики спектра $1/f$ шума исследуемого компонента, то предположение о характере и пространственной локализации дефектов подтверждается.

В заключение можно сделать вывод, что даже в своем современном виде, который нуждается в совершенствовании, НЧ шумовая диагностика качества и надежности электронных компонентов не имеет альтернативы, обладает такими преимуществами, как низкие временные затраты и отсутствие риска повреждения исследуемого объекта.

Спектроскопия НЧ шума дает возможность обнаруживать дефекты в материалах или устройствах с высокой степенью точности, что невозможно при использовании других методов, таких как стационарные электрические или оптические. Значительным преимуществом таких измерений является оперативное получение информации неразрушающими методами, что может позволить своевременно реагировать на сбои технологического процесса.

В настоящее время активно продолжаются работы по изучению НЧ шума и возможности его практических применений. Вместе с тем, продолжаются поиски новых методов и подходов к анализу и использованию НЧ шума для достижения более точных результатов в науке и промышленности. Можно ожидать, что в ближайшем будущем изучение параметров низкочастотного шума значительно расширит возможности экспресс-диагностики электронных компонентов.

Библиографический список

1. Разуменко Д. Низкочастотные шумы электронных компонентов как инструмент для диагностики внутренних дефектов // Компоненты и технологии. 2008. № 9. С.168–176.
2. Левинштейн М. Е., Дьяконова Н. В. Шум $1/f$ в полупроводниках и полупроводниковых приборах//ФТП. 1989. 23.С. 283–291. [http://www.ioffe.ru/LNEPS/winter 2004/levinstein .pdf](http://www.ioffe.ru/LNEPS/winter 2004/levinstein.pdf).
3. Горлов М., Емельянов В., Жарких А., Строгонов А. Прогнозирование потенциально ненадежных полупроводниковых приборов по критериям низкочастотного шума // ChipNews. 2004. №6.

4. Горлов М.И., Емельянов А., Смирнов Д. Возможность отбраковки полупроводниковых приборов по уровню низкочастотного шума // Компоненты и технологии. 2005. № 8. С.198-201.
5. Сергеев В. А. , Резчиков С. Е. Аналоговый генератор НЧ-шума с регулируемым показателем формы спектра // Изв. вузов. Электроника. 2018. Т. 23. № 6. С. 635–639.
6. Резчиков С. Е. Адаптивные алгоритмы и устройства автоматизированного измерения параметров низкочастотного шума полупроводниковых приборов. Автореферат дис. к-та техн. наук: 05.11.01/ Резчиков Сергей Евгеньевич. Ульяновск, 2020. 22 с.
7. Сергеев В. А. , Резчиков С. Е. Адаптивные алгоритмы измерения параметров низкочастотного шума полупроводниковых приборов в условиях массового контроля. // Измерительная техника. 2020. №11. С. 59-64.

УДК 621.396; ГРНТИ 47.47

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СКАНИРУЮЩЕЙ МИКРОСКОПИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ РАСТЕКАНИЯ

А.М. Косорукова, В.Г. Литвинов

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

Аннотация. В статье рассматривается метод сканирующей микроскопии сопротивления растекания (Scanning spreading resistance microscopy, SSRM), основанный на принципах зондовой микроскопии. Рассмотрены возможности, предоставляемые методом сканирующей микроскопии сопротивления растекания.

Ключевые слова: сканирующая микроскопия, сопротивление растекания, зондовая микроскопия, электрические свойства, проводящие материалы, полупроводниковые материалы.

THE CURRENT STATE OF SCANNING MICROSCOPY SPREADING RESISTANCE

A.M. Kosorukova, V.G. Litvinov

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

The summary. The article discusses the method of Scanning spreading resistance microscopy (SSRM), based on the principles of probe microscopy. The possibilities provided by the method of scanning microscopy of the spreading resistance are considered.

Keywords: scanning microscopy, spreading resistance, probe microscopy, electrical properties, conductive materials, semiconductor materials.

Метод сканирующей микроскопии сопротивления растекания (СМСП или SSRM в англоязычной литературе) является одним из ключевых инструментов для исследования электрических свойств материалов на микроскопическом уровне. Этот метод основан на зондовой микроскопии и позволяет получать информацию о распределении сопротивления, тока и других электрических параметров на поверхности исследуемого образца с высоким пространственным разрешением. В данной статье будут рассмотрены основные принципы работы метода SSRM, а также его возможности.

Метод сканирующей микроскопии сопротивления растекания (SSRM)

Метод сканирующей микроскопии сопротивления растекания основан на принципах зондовой микроскопии и включает в себя сканирование поверхности образца наконечником, покрытым проводящим материалом. Этот метод позволяет измерять электрические свойства образцов, включая ток, проводимость и сопротивление. Благодаря использованию логарифмического малоомощного усилителя, данный метод способен работать с широким спектром проводящих материалов [1].

Принцип действия SSRM основывается на том, что при контакте зонда микроскопа с поверхностью исследуемого образца между ними устанавливается токовая связь. Ток, протекающий через контакт, зависит от сопротивления образца. Зонд движется по поверхности образца с определенным шагом, позволяя получить информацию о сопротивлении в каждой точке. Для измерений используется металлический зонд, который создает контакт с поверхностью образца. Зонд подключен к источнику постоянного напряжения, а измерение производится путем измерения тока, протекающего через образец [1].

Метод сканирующей микроскопии сопротивления растекания обладает высокой эффективностью для двумерного профилирования полупроводниковых материалов ввиду обеспечения непосредственного взаимодействия с поверхностью образца посредством удаления оксидного слоя при помощи прочного алмазного зонда атомно-силового микроскопа. В контексте метода SSRM необходимо применение значительного контактного усилия наконечника на образец для преодоления оксидного или загрязненного слоя на поверхности образца. Рекомендуется осуществлять измерения в условиях вакуума либо атмосферы азота с целью предотвращения повторного окисления или адсорбции влаги на поверхности образца в ходе измерения [2].

Главное достоинство SSRM состоит в том, что данный метод позволяет измерять сопротивление материала в микро- и нанометровом диапазонах. Это дает возможность изучать поверхностные свойства материалов и выявлять различные изъяны, например, дефекты проводимости и явления диффузии [2].

SSRM активно используется в сфере полупроводников и микроэлектроники, в которой точность определения сопротивления имеет важнейшее значение. Помимо этого, данный метод может применяться для изучения электрохимических реакций, анализа поверхностных характеристик материалов и контроля их качества [2].

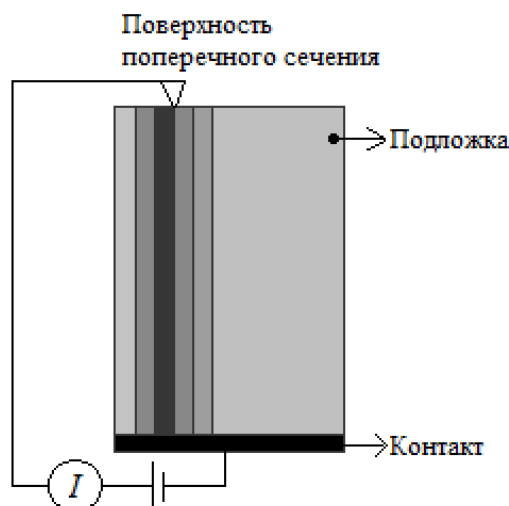


Рис. 1. Принципиальная схема SSRM

В SSRM замер сопротивления осуществляется между обратным контактом и зондом АСМ на поверхности поперечного сечения, чтобы исключить эффект растекания носителя по причине скола. В SSRM вычисление сопротивления осуществляется по закону Ома, а пространственное разрешение зависит от радиуса кривизны на вершине наконечника АСМ. Точность установления сопротивления определяется тем, насколько возможно сократить контактное сопротивление между зондом и образцом путем увеличения контактного давления на зонд. Для формирования оптимального омического соединения между зондом и образцом рекомендуется чистая плоскость образца, контроль окружающих условий и значи-

тельное контактное давление. Поэтому предпочтительным является зонд АСМ с жестким рычагом и жестким наконечником [2].

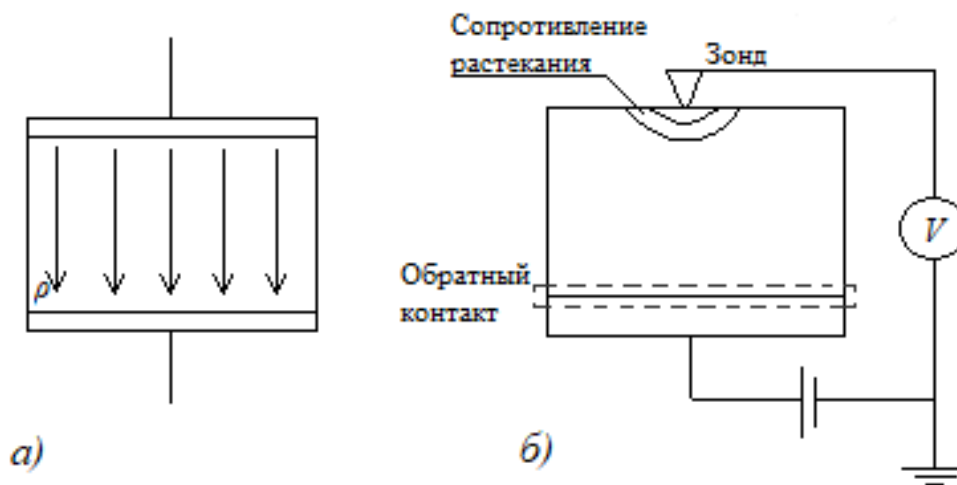


Рис. 2. Схематические изображения (а) общего протекания тока между параллельными металлическими пластинами и (б) растекающегося тока между наконечником АСМ и обратным контактом образца

Как показано на рисунке 2, а, в общем случае ток протекает по всей площади образца. Однако при контакте с образцом острым наконечником АСМ локальное распространение тока вблизи наконечника может быть измерено методом SSRM из-за узкой площади контакта между наконечником и образцом (рис. 2, б). В этом случае грубые образцы могут изменять эффективную площадь контакта между наконечником АСМ и поверхностью, что затрудняет точное измерение значения сопротивления. Соответственно, полировка и последующая очистка могут помочь получить точные профили легирования образца [2].

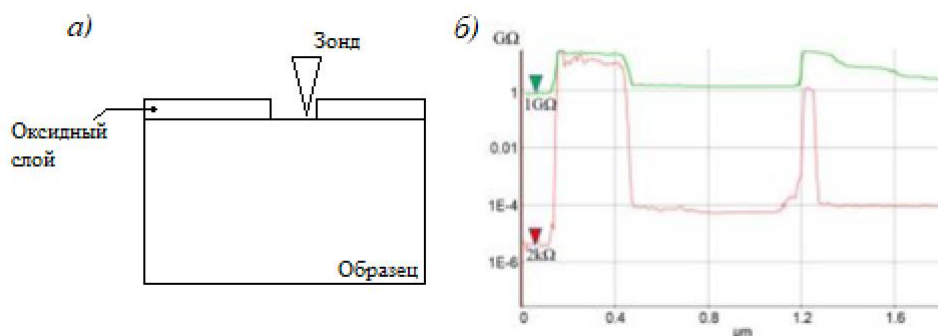


Рис. 3. К пояснению принципа работы метода измерения SSRM:

а) Схематическое изображение измерения SSRM.

Наконечник сканирует образец, удаляя изолирующий поверхностный слой оксида;

б) сравнение профиля измеренного сопротивления на слое оксида с высокой нагрузочной силой (красный) и низкой нагрузочной силой (зеленый) [2]

Омическое соединение между зондом и образцом также играет критически важную роль. Слой оксида увеличивает контактное сопротивление, образуя барьер Шоттки, что не позволяет пользователю получить верное значение сопротивления. Рисунок 3 показывает, как зонд сканирует образец, удаляя слой оксида и, таким образом, фактически минимизируя контактное сопротивление (изображение 3, а). Продольный профиль на рисунке 3, б демонстрирует, как меняется поверхностное сопротивление в зависимости от силы воздействия на зонд [2].

Возможности, предоставляемые SSRM

Картография сопротивления. SSRM позволяет измерять пространственное распределение сопротивления образца и создавать карты сопротивления. Это позволяет исследовать различные электрические характеристики, такие как проводимость, примеси, границы зерен и дефекты [3].

Примером оборудования для SSRM может служить сканирующий зондовый микроскоп NTEGRA II производства компании NT-MDT. Величина сопротивления, которое может быть измерено методом SSRM на NTEGRA II, зависит от многих факторов, таких как тип исследуемого материала, размер образца и условия проведения эксперимента. Обычно NTEGRA II может измерять сопротивления в диапазоне от нескольких ом до нескольких мегаом [4].

Измерение глубины проникновения. SSRM может измерять глубину проникновения электрического поля в материал, что помогает в определении размеров дефектов или интерфейсных областей, отличающихся по электрическому сопротивлению [3].

Изображение поверхностной топографии. SSRM может быть использован для получения изображений поверхностной топографии образца с высоким разрешением (до 5 мкм). Это позволяет сопоставить структуру образца с его электрическими характеристиками [4].

Исследование проводимости в наноструктурах. SSRM позволяет изучать проводимость в наноструктурах, таких как нанотрубки, нанопроводники и нанопленки. Это может быть полезно для разработки новых электронных устройств на наномасштабном уровне. Особенностью проводящих кантилеверов является их способность создавать контакт с образцом даже при очень малых усилиях на зонде, что позволяет проводить исследования на чувствительных образцах. Кроме того, проводящие кантилеверы могут быть изготовлены из различных материалов, что позволяет выбирать оптимальный вариант для конкретных задач исследования [3].

Измерение джоулева нагрева. SSRM может быть использован для измерения джоулева нагрева в проводящих образцах. Это помогает в изучении тепловых эффектов в наноструктурах и проводниках, т.е. объектов нанотеплофизики [3].

Изучение электрических свойств полупроводников. SSRM позволяет измерять и анализировать различные электрические параметры полупроводников, такие как типы и концентрации подвижных носителей заряда [3].

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003) с использованием научного оборудования РЦЗМкп РГРТУ им. В.Ф. Уткина.

Библиографический список

1. В.А. Мошников, Ю.М. Спивак, П.А. Алексеев, Н.В. Пермяков Атомно-силовая микроскопия для исследования наноструктурированных материалов и приборных структур: учеб. пособие, 2014.
2. Scanning Spreading Resistance Microscopy (SSRM) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.parksystems.com/park-spm-modes/electrical-properties/240-scanning-spread-resistance-microscopy-ssrm> (дата обращения 17.02.2024г.)
3. “Scanning Probe Microscopy: The Lab on a Tip” by Hans Erk, Springer (2014).
4. NT-MDT NTEGRA-II Atomic Force Microscope. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ntmdt-si.com/products/atomic-force-microscopes/ntegra-ii> (дата обращения 17.02.2024г.)

УДК 53.098; ГРНТИ 29.03.45

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.С. Моргунов, М.В. Полагин, В.Г. Литвинов, В.Г. Мишустин

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,

Российская Федерация, Рязань, alex46326@gmail.com

Аннотация. В работе представлена модернизация лабораторного стенда по изучению магнитных свойств материалов. Приведены структурная и принципиальные схемы блоков аппаратуры. Проанализированы особенности работы блока питания и усилителя мощности.

Ключевые слова: магнитные материалы, ферромагнетики, двуполярное питание, усилитель мощности.

LABORATORY MEASURING SETUP FOR STUDYING MAGNETIC PROPERTIES OF FERROMAGNETIC MATERIALS

A.S. Morgunov, M.V. Polagin, V.G. Litvinov, V.G. Mishustin

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

Russia, Ryazan, alex46326@gmail.com

The summary. The paper presents the modernization of a laboratory stand for the study of magnetic properties of materials. The structural and schematic diagrams of the equipment blocks are given. The features of the operation of the power supply and power amplifier are analyzed.

Keywords: magnetic materials, ferromagnets, bipolar power supply, power amplifier.

Все элементы в природе обладают магнитными свойствами и могут взаимодействовать с внешним магнитным полем. Эти магнитные свойства зависят от атомных и молекулярных магнитных свойств.

В зависимости от магнитной природы, вещества можно разделить на несколько типов: диамагнитные, парамагнитные, ферромагнитные, антиферромагнитные и ферримагнитные. Вещества с этими свойствами можно назвать слабомагнитными или сильномагнитными [1]. Расположение электронов в атомах для каждого типа вещества показано на рисунке 1.

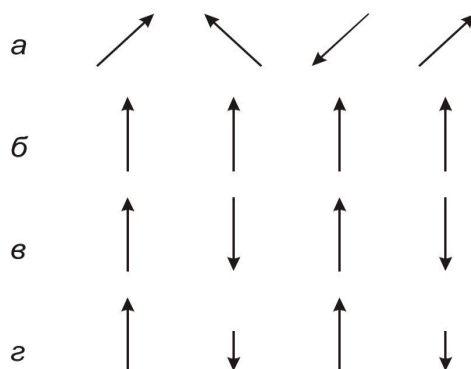


Рис. 1. Схематическое расположение спинов в парамагнитных (а), ферромагнитных (б), антиферромагнитных (в) и ферримагнитных (г) веществах

Основными магнитными параметрами вещества являются:

намагниченность M , А/м, $M = k\vec{H}$, где k – магнитная восприимчивость;

$\vec{H}$ – напряженность магнитного поля, А/м;

B – магнитная индукция B , Тл (тесла), характеризующая суммарное магнитное поле внутри материала:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(1 + k)\vec{H} = \mu_0\mu\vec{H} = \mu_\alpha\vec{H}, \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, численно равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, характеризующая магнитную проницаемость вакуума;

μ – относительная магнитная проницаемость вещества, которая показывает, во сколько раз магнитная проницаемость данной среды больше магнитной проницаемости вакуума (величина безразмерная);

$\mu_a = \mu_0 \mu$ – абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м.

Отдельные классы магнетиков различаются по величине и знаку магнитной восприимчивости, а также по характеру зависимости магнитных характеристик от температуры и напряженности магнитного поля [2].

Изучение свойств данных материалов производится на разработанном лабораторном стенде (рисунок 2), который включает в себя генератор напряжения, усилитель мощности (УМ) (рисунок 3), измерительная ячейка (рисунок 4), осциллограф, ПК, плата сбора данных PCle-6361 и терминал BNC 2120.

Схема усилителя мощности была взята и модернизирована в соответствии с источником [3]. Так как питание усилителя является двуполярным использовались два трансформатора на каждое плечо (рисунок 5).

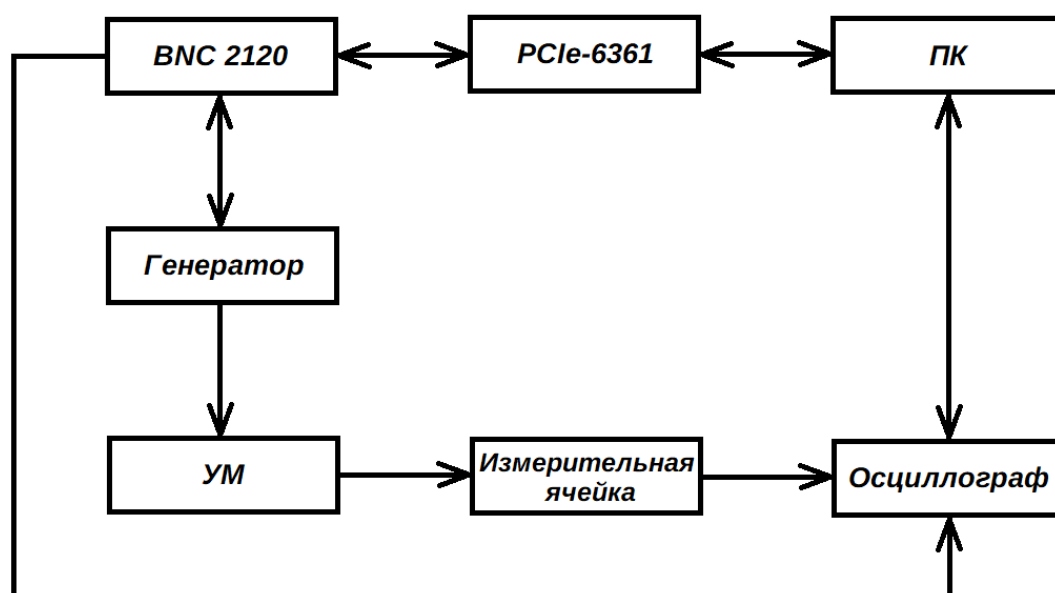


Рис. 2. Структурная схема лабораторного стенда

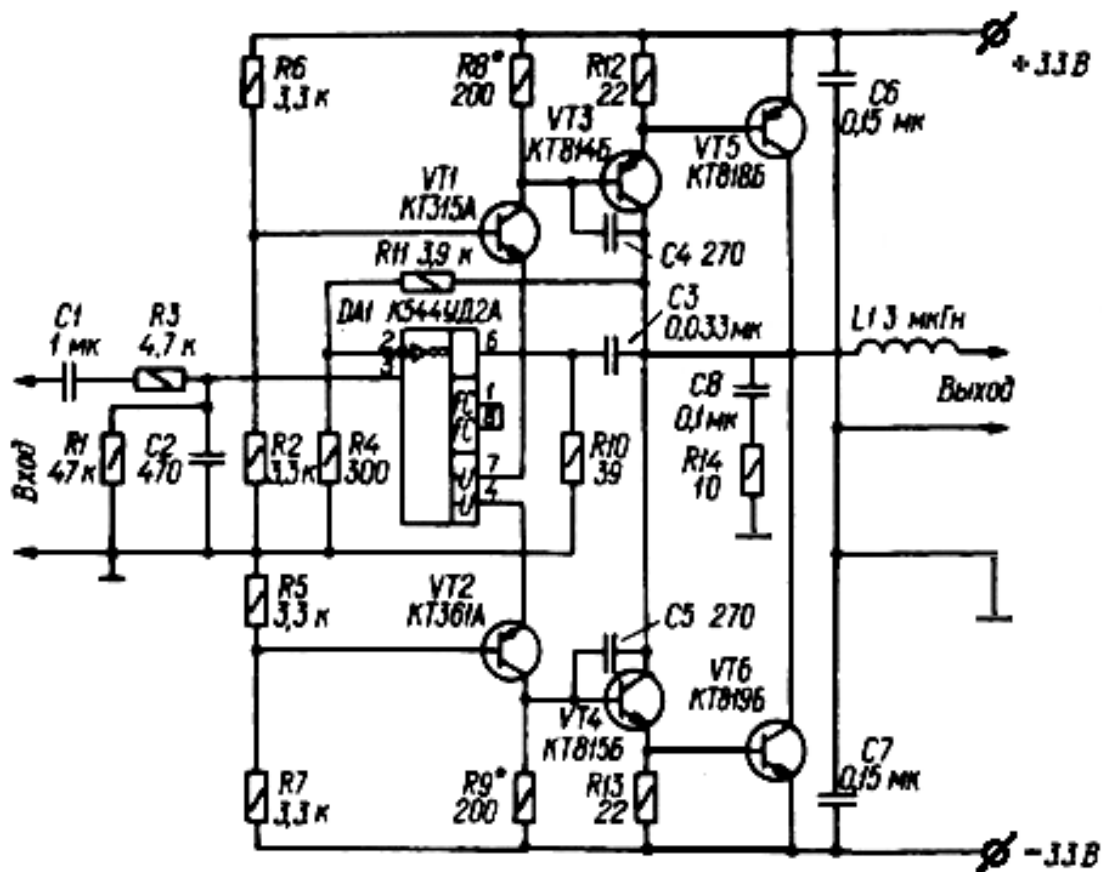


Рис. 3. Принципиальная схема усилителя мощности [3]

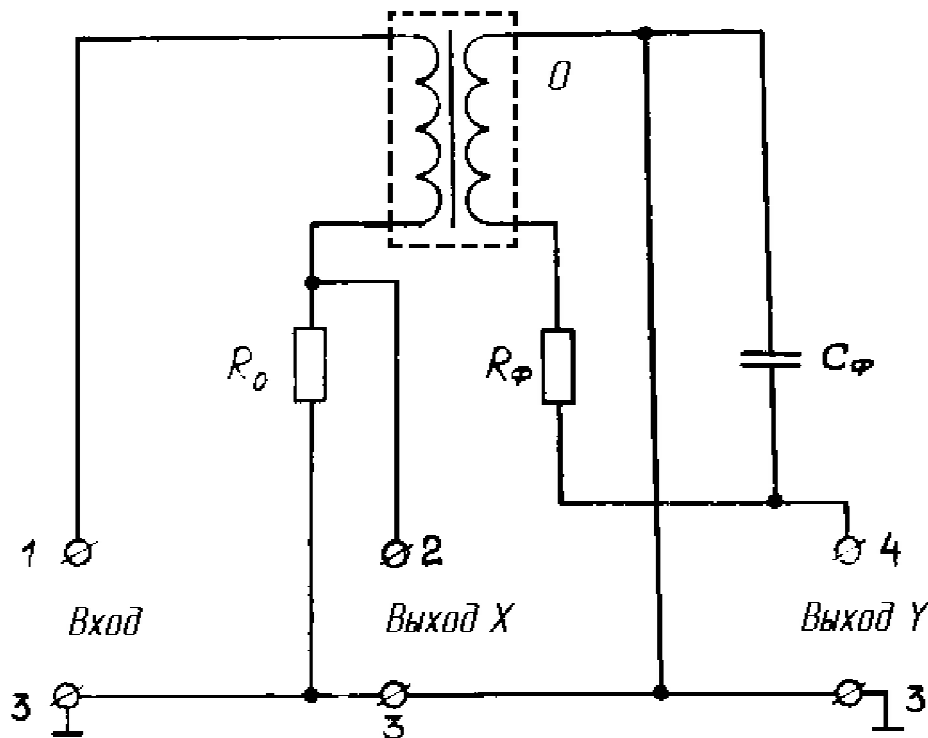


Рис. 4. Принципиальная схема ячейки для измерения параметров магнитных материалов в переменных магнитных полях

Здесь O – ячейка с исследуемым материалом, который является сердечником для двух связанных трансформаторной связью катушек индуктивности;

R_0 – эталонное сопротивление;

R_Φ – сопротивление фазовращателя;

C_Φ – конденсатор фазовращателя;

2, 3 и 3, 4 – горизонтальный и вертикальный входы осциллографа соответственно;

1, 3 – вход сигнала с генератора.

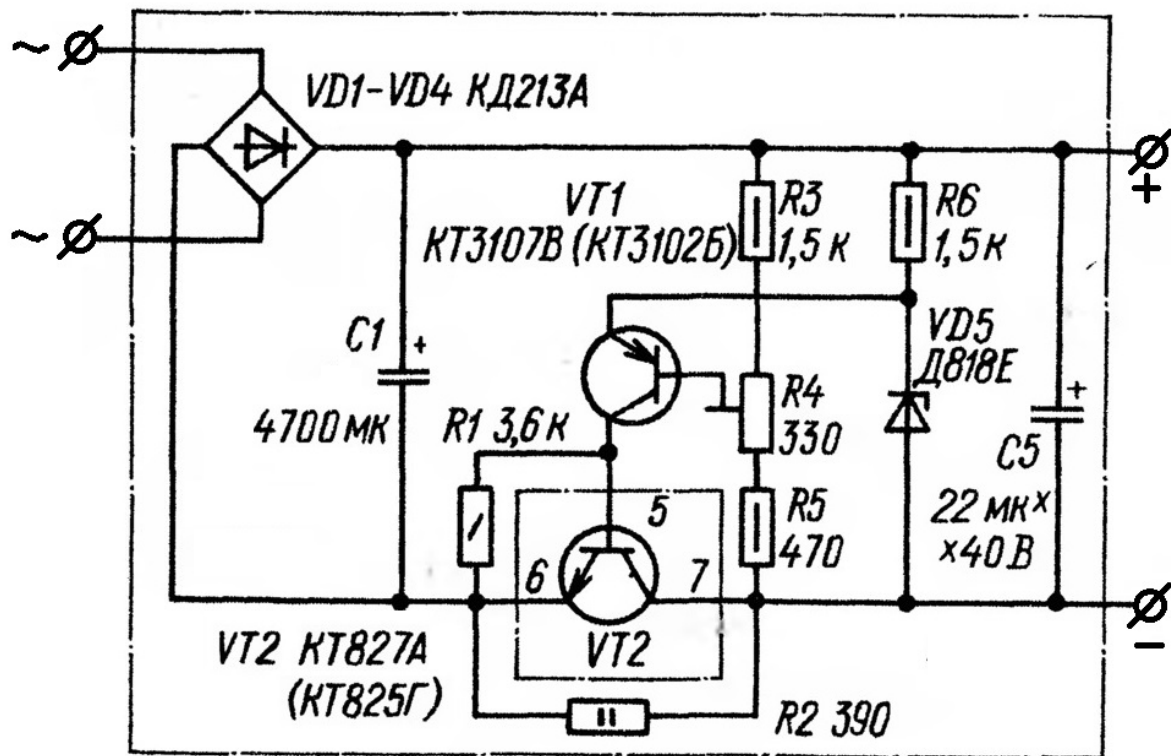


Рис. 5. Блок питания усилителя мощности [4]

Отличительной особенностью схемы усилителя является использование ОУ в мало-сигнальном режиме, которое расширяет диапазон частот сигналов без превышения максимальной скорости нарастания выходного напряжения ОУ. Транзисторы выходного каскада используются в схеме с общим эмиттером, а предоконечного – с разделением нагрузки в цепях коллекторов и эмиттеров. Это обеспечивает ряд преимуществ, включая возможность размещения всех четырех транзисторов на одном теплоотводе. Операционный усилитель DA1 получает питание через транзисторы VT1 и VT2, которые его понижают до требуемого значения [3].

Схмотехническое построение усилителя основано на обеспечении стабильности его работы на соответствующих величинах токов покоя транзисторов оконечного и предоконечного каскадов, предотвращение возбуждения усилителя на высоких частотах. Рабочий диапазон частот выбирается в пределах от 50 до 1000 Гц для проводящих магнитомягких материалов. Параметры и соотношения резисторов в цепи отрицательной обратной связи подобраны для входного напряжения до 1 В.

ФНЧ R3-C2 и ФВЧ C3-R10 ограничивают АЧХ усилителя по низкой и верхней частоте во избежание выхода из строя транзисторов оконечного каскада. Конденсаторы C4, C5 определяют ФЧХ усилителя мощности.

Катушка L1 повышает стабильность работы усилителя при значительной емкостной нагрузке, цепь Бушера R14C8 предотвращает возбуждение усилителя.

Принципиальная схема блока питания усилителя приведена на рисунке 5. Он содержит два сетевых трансформатора с одной вторичной обмоткой на каждом. Выходы с трансформаторов поступают на выпрямители, которые имеют по четыре диода (VD1-VD4).

Стабилизаторы напряжения выполнены по схеме на транзисторах разной структуры. Благодаря включению обоих транзисторов по схеме с общим эмиттером, параметры такого устройства, несмотря на простоту, достаточно хорошие. К тому же стабилизаторы устойчивы к перегрузке и к коротким замыканиям в нагрузке. При коротком замыкании обесточивается стабилитрон VD5, и транзисторы VT1, VT2 закрываются. После устранения замыкания работоспособность устройства автоматически восстанавливается [3].

Итогом работы является получение файла данных для построения петли гистерезиса, по которой определяются такие параметры, как коэрцитивная сила H_c , остаточная индукция B_r , индукция насыщения B_s , начальная магнитная проницаемость $\mu_{нач}$, максимальная магнитная проницаемость $\mu_{макс}$, удельная мощность потерь W . Также возможно построение зависимостей магнитной проницаемости от следующих величин: напряженность H ; частота изменения магнитного поля f ; температуры T ; а также зависимость от этих параметров одновременно.

Преимуществами разработанного лабораторного стенда является возможность его использования в режиме симуляции, в котором можно моделировать сильные магнитные поля, а также в режиме реальных исследований с использованием ПК, что позволяет устранять флуктуации при усреднении результатов большого количества измерений.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003) с использованием научного оборудования РЦЗМкп РГРТУ им. В.Ф. Уткина.

Библиографический список

1. А.А. Преображенский, Е.Г. Бишард Магнитные материалы и элементы // Учебник для студ. вузов по спец. «Полупроводники и диэлектрики». — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1986. С. 352.
2. С.И. Мальченко, Т.А. Холомина, М.В. Зубков, А.В. Логвин Исследование свойств магнитных материалов // РГРТУ. 2016. С. 19.
3. Е. Гумеля Простой высококачественный УМЗЧ // Журнал Радио №1. 1989. С. 44-48.
4. Ю. Солнцев Высококачественный усилитель мощности // Журнал Радио №12. 1984. С. 44-46.

УДК 621.382; ГРНТИ 47.09.29

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АМОРФНЫХ ПЛЕНОК GST225

Е.П. Трусов^{1*}, А.В. Ермачихин^{1,2}, Ю.В. Воробьев³, В.Г. Литвинов¹

¹Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, ertrusov@yandex.ru,

²НПК «Технологический центр»,

Российская Федерация, г. Москва, г. Зеленоград

³Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
Российская Федерация, г. Москва, г. Зеленоград

Аннотация. В работе рассматриваются температурные и временные электрофизические характеристики материала $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (или GST225), полученного путем магнетронного распыления.

Ключевые слова: ХСП, GST, удельная электропроводность, дрейф сопротивления, энергия активации проводимости

INVESTIGATION OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS GST225 AMORPHOUS FILMS

E.P. Trusov^{1*}, A.V. Ermachikhin^{1,2}, Yu.V. Vorobyov³, V.G. Litvinov¹

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

² Scientific-Manufacturing Complex "Technological Centre"
Russia, Moscow, Zelenograd

³ National research university of Electronic Technology,
Russia, Moscow, Zelenograd

The summary. The paper considers the temperature and time electrophysical characteristics of the $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (or GST225) material obtained by magnetron sputtering. The relationship between the activation energy of conduction and the resistivity of the material is considered. Calculations of the activation energy of the conductivity and the resistance drift index are given. The electrophysical properties were examined on fresh samples after manufacture and after annealing at temperatures of 80 °C and 100 °C. The time dependences of the resistivity and the resistance drift index at different temperatures are considered.

Keywords: chalcogenide glassy semiconductors, GST, electrical conductivity, resistance drift, activation energy of conductivity

Введение

Халькогенидные стеклообразные полупроводники (ХСП) были открыты в середине 50-х годов прошлого века. Эти материалы имеют удельную электропроводность от 10^{-13} до $10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{см}^{-1}$. Позже, в 1960-х годах был обнаружен эффект, в последствии названный эффектом переключения. Эффект заключается в обратимом скачкообразном переходе из состояния с высоким сопротивлением к состоянию с низким сопротивлением. Эффект переключения в материалах ХСП возможен как при электрическом воздействии, так и при оптическом воздействии. Таким образом, в начале 1990-х годов стала развиваться оптическая память и вместе с этим стали появляться CD, DVD и Blu-Ray оптические диски [1,2].

Популярность оптических дисков дала толчок в исследовании халькогенидов на предмет создания электрической фазопеременной памяти на основе ХСП. И уже к 2017 годам была выпущена энергонезависимая память емкостью 64 ГБ [3]. Среди привлекательных особенностей ХСП – простая структура ячеек с высокой масштабируемостью; энергонезависимость, относительно высокая скорость операций чтения/записи (<10 нс) и длительный срок службы (> 10^{12} операций) [4]. При этом основными недостатками у фазопеременной памяти является: относительно высокое энергопотребление, наличие эффекта дрейфа сопротивления (увеличение сопротивления с течением времени).

Материал с фазовым переходом, тройное соединение $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ рассматривается как один из наиболее подходящих кандидатов для разработки устройств фазопеременной памяти [5]. Это предположение основано на текущем применении соединений GST в оптических устройствах хранения данных, а именно в перезаписываемых компакт-дисках CD-RW, цифровых универсальных дисках DVD и blu-ray дисках, которые основаны на быстром и обратимом изменении между кристаллической фазой, и аморфной фазой имеющие, отличающиеся друг от друга высоким контрастом в отражающей способности [5]. Соединения GST широко используются в перезаписываемых мультимедийных технологиях, однако его успешное применение в качестве основного материала для устройств энергонезависимой фазопеременной памяти требует полного понимания основных электрофизических свойств GST. Знание электрофизических свойств материала как в аморфной фазе, так и в кристаллической позволит нарастить скорость перехода, уменьшить дрейф сопротивления что сделает конечное устройство более быстрым и стабильным во времени.

Исходя из этого, исследование электрических характеристик материалов ХСП и, в частности, $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ является актуальной задачей для разработки фазопеременной памяти.

Исследование пленки материала $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$

Исследуемый образец $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ имеет толщину 130 нм, осаждение аморфной пленки проводилось методом магнетронного распыления коммерческой поликристаллической мишени (ACI alloys) на постоянном токе. Измерение тока проводилось при фиксированном напряжении 50 В в диапазоне температур от $-150\text{ }^\circ\text{C}$ до $40\text{ }^\circ\text{C}$ со скоростью нагрева 2 К/минуту. На рисунке 1а представлен график изменения температуры образца от времени. На этом графике видно нелинейное первое охлаждение образца, и с учетом того, что нагрев – контролируемый процесс с помощью термоконтролера, при анализе $I(T)$ рассматривались данные, полученные только в фазе нагрева. Однако при температурах образца ниже $-110\text{ }^\circ\text{C}$ сигнал становится слишком зашумленным, что препятствовало его анализу, и, следовательно, исследуемый температурный диапазон составляет от $-110\text{ }^\circ\text{C}$ до $+40\text{ }^\circ\text{C}$. На рисунке 1б представлен график температуры образца при отжиге и последующем измерении ВАХ. Было выполнено два отжига, каждый длительностью 120 минут.

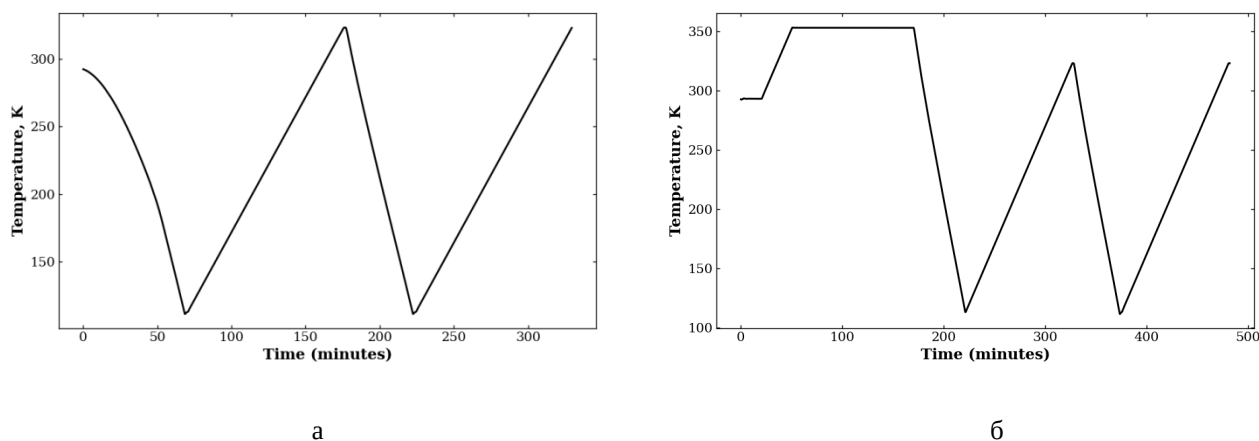


Рис. 1. График температуры образца, а – при измерении ВАХ;
б – при отжиге и последующем измерении ВАХ

Первый отжиг проводился при температуре $80\text{ }^\circ\text{C}$, второй при $100\text{ }^\circ\text{C}$. Время между напылением пленки и измерением составило 7 дней. Время между первым измерением и отжигом составило 15 дней. Время между первым отжигом и вторым составило 56 дней. В промежутках между измерениями образец находился при комнатной температуре в непрозрачном кейсе.

При изучении эффекта дрейфа сопротивления выполнялось исследование удельного сопротивления и энергии активации образца. На рисунке 2 представлена температурная зависимость удельного сопротивления для образца $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, показывающая увеличение удельного сопротивления образца при отжиге. Удельное сопротивление также будет увеличиваться при выдержке образца при комнатной температуре [6], но процесс будет намного медленнее, отжиг в данном случае служит для ускорения процесса.

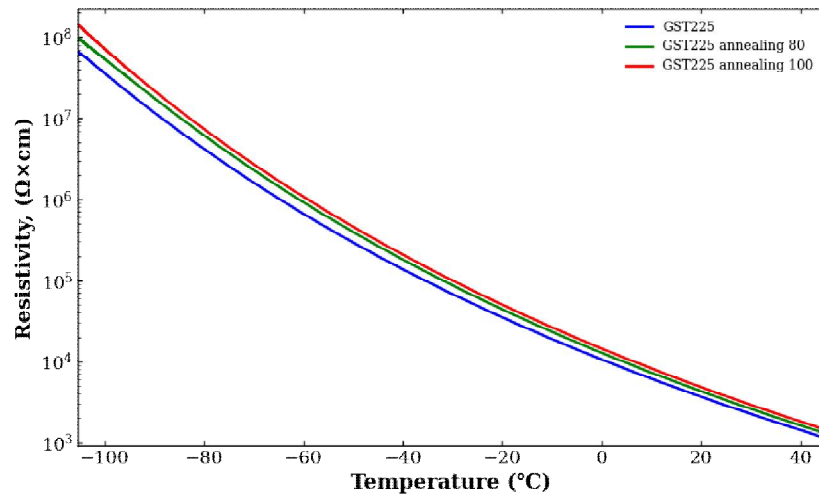


Рис. 2. График температурной зависимости удельного сопротивления до отжига, после отжига при температуре 80°C, после отжига при температуре 100°C

Традиционно энергия активации рассчитывалась по углу наклона температурной зависимости проводимости в координатах Аррениуса.

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

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

Однако сама температурная зависимость проводимости в координатах Аррениуса не является линейной функцией. В связи с этим угол наклона рассчитывался для каждой точки в отдельности. После этого строилась температурная зависимость энергии активации проводимости (рисунок 3). Ход временной характеристики энергии активации в целом повторяет динамику изменения удельного сопротивления материала – ρ (рисунок 2). А $E_A(T)$ находятся в обратном соотношении с температурной зависимостью удельного сопротивления.

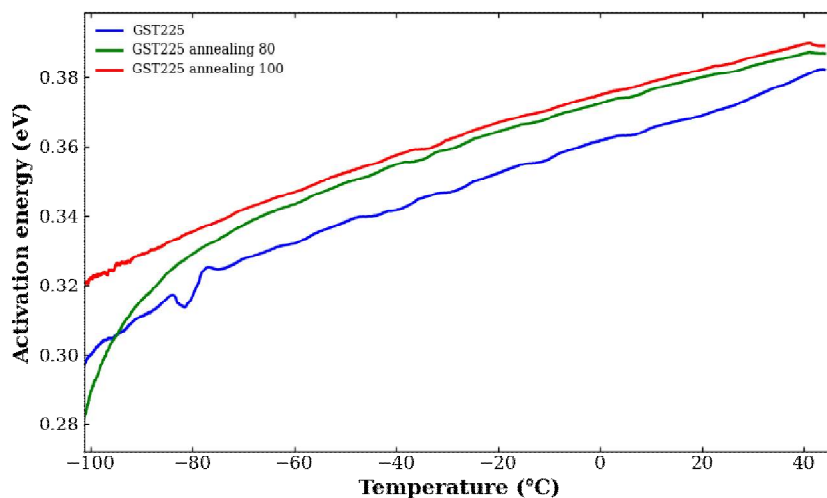


Рис. 3. График температурной зависимости энергии активации проводимости до отжига, после отжига при температуре 80°C, после отжига при температуре 100°C

Авторы [7] в своей работе предполагают, что σ_0 в процессе дрейфа не изменяется, сделав вывод, что основной вклад в процесс дрейфа вносит именно энергия активации.

Рассмотрим дрейф сопротивления, который наблюдался у исследуемого образца во время отжига [8]:

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{t}{\tau} \right)^\nu, \quad (2)$$

где показатель ν характеризует динамику процесса дрейфа сопротивления.

Результаты исследования дрейфа удельного сопротивления при различных температурах показаны на рисунке 4. Видно, что динамика дрейфа, определяемая показателем ν , зависит от температуры отжига. Показатель дрейфа для температуры отжига 80 °C составляет 0,06 что коррелирует с показателем дрейфа для структур приборного качества [9]. Для отжига с температурой 100°C показатель дрейфа показал снижение и стал составлять 0,035. В то время как, для свежетоженного аморфного материала GST225 в среднем типичны значения около 0,1 [10]. Для аппроксимации прямыми, показанной на рисунке 4, выбирались данные, зарегистрированные на поздней стадии изотермического отжига. Значения сопротивления, зарегистрированные для малых времен отжига, показывают отклонение от прямой линии. Подобная особенность присутствует на многих результатах, опубликованных для тонкопленочных структур [10].

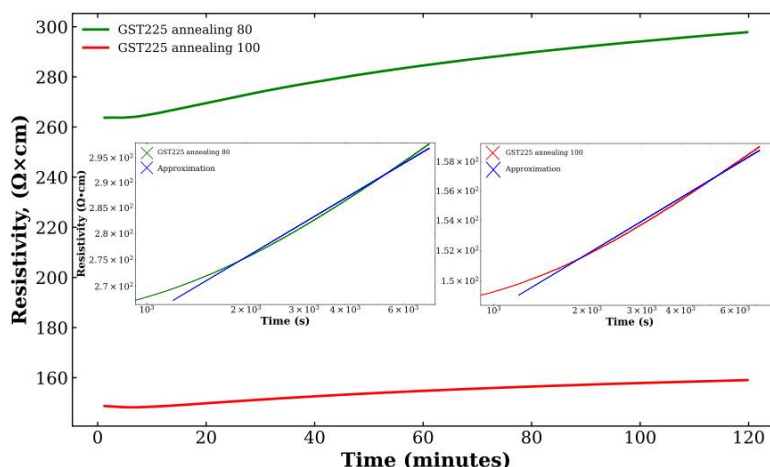


Рис. 4. Графики зависимости удельного сопротивления во время отжига. Зеленая линия – отжиг при 80°C, красная линия – отжиг при 100°C

Снижение величины показателя ν с ростом температуры может быть связано с изменением зонной структуры материала, происходящей при нагревании.

Явление дрейфа сопротивления определяется, как показано выше, ростом величины энергии активации проводимости (рисунок 3). Активационный характер проводимости определяется, в первом приближении, увеличением концентрации дефектов:

$$\sigma = e \mu N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{k_B T}\right)^\nu, \quad (3)$$

где в качестве величины активационного барьера выбрано расстояние между уровнем Ферми и валентной зоной в силу дырочного характера проводимости в GST [11]. Авторы [10] объясняют дрейф сопротивления в GST увеличением ширины запрещенной зоны материала в

процессе отжига. Данное объяснение остается справедливым и в условиях неизменности относительного положения уровня Ферми (ζ) в запрещенной зоне материала, обусловленного его фиксацией вблизи середины запрещенной зоны в аморфных халькогенидных полупроводниках вследствие большого количества дефектных состояний [12].

Заключение

В работе исследовались электрические характеристики пленки GST225 в аморфном состоянии. Температурная зависимость энергии активации проводимости находится в обратной пропорциональности с температурной зависимостью удельного сопротивления. А вот ход временной зависимости энергии активации в целом повторяет динамику изменения удельного сопротивления материала. Также наблюдалось обратно пропорциональное соотношение показателя дрейфа сопротивления в GST225 от температуры при изотермическом отжиге пленки, что может указывать на наличие значительной температурной зависимости ширины запрещенной зоны материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 23-79-10309 с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии РГРТУ, а также ЦКП «Диагностика и модификация микроструктур и нанообъектов» и «Микросистемная техника и электронная компонентная база» МИЭТ.

Библиографический список

1. Фельц А. Аморфные и стеклообразные неорганические твердые тела. 1986. 558 с.
2. Богословский Н.А., Цэндин К.Д. Физика эффектов переключения и памяти в халькогенидных стеклообразных полупроводниках // Физика и техника полупроводников. 2012. Том 46, № 5. С. 577–608.
3. Le Gallo M., Sebastian A. An overview of phase-change memory device physics // Journal of Physics D: Applied Physics. Institute of Physics Publishing, 2020. Vol. 53, № 21.
4. Shportko K. V. Disorder and compositional dependences in Urbach-Martienssen tails in amorphous (GeTe) x (Sb 2 Te 3) $1-x$ alloys // Sci Rep. Nature Publishing Group, 2019. Vol. 9, № 1.
5. Da Silva J.L.F., Walsh A., Lee H. Insights into the structure of the stable and metastable (GeTe) m (Sb 2 Te 3) n compounds // Phys Rev B Condens Matter Mater Phys. 2008. Vol. 78, № 22.
6. Gorbenko A. et al. Resistance Drift and Crystallization in Suspended and On-oxide Phase Change Memory Line Cells // Proceedings of the IEEE Conference on Nanotechnology. 2019. Vol. 2019-July, № February 2023. P. 417–420.
7. Ielmini D. et al. Kinetic of resistance drift in PCM by structural relaxation of the amorphous chalcogenide phase Nanocrystal Memories View project phase change nanostructures and chalcogenide thin films for electronics View project Kinetic of resistance drift in PCM by structural relaxation of the amorphous chalcogenide phase.
8. 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.
9. Braga S., Cabrini A., Torelli G. Dependence of resistance drift on the amorphous cap size in phase change memory arrays // Appl Phys Lett. 2009. Vol. 94, № 9.
10. Wimmer M. et al. Role of activation energy in resistance drift of amorphous phase change materials // Front Phys. 2014. Vol. 2. P. 1–12.
11. Nardone M. et al. Electrical conduction in chalcogenide glasses of phase change memory // Journal of Applied Physics. 2012. Vol. 112, № 7.
12. Kalb J., Spaepen F., Wuttig M. Atomic force microscopy measurements of crystal nucleation and growth rates in thin films of amorphous Te alloys // Appl Phys Lett. 2004. Vol. 84, № 25. P. 5240–5242.

УДК 519-7; ГРНТИ 29.19.31

ВИРТУАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ ПО ИЗУЧЕНИЮ ЕМКОСТНОЙ РЕЛАКСАЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ГЛУБОКИХ УРОВНЕЙ

А.С. Моргунов, В.В. Гудзев

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, alex46326@gmail.com*

Аннотация. В работе представлен алгоритм вычисления РСГУ-спектра с помощью прикладного программного обеспечения для виртуального стенда емкостной релаксационной спектроскопии глубоких уровней. Приведен пример для построения емкостного РСГУ-спектра и определения его параметров.

Ключевые слова: релаксационная спектроскопия глубоких уровней, РСГУ-спектр, взвешивающая функция, глубокий уровень.

VIRTUAL STAND FOR LABORATORY WORK ON THE STUDY OF DEEP-LEVEL CAPACITIVE RELAXATION SPECTROSCOPY

A.S. Morgunov, V.V. Gudzev

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, alex46326@gmail.com*

The summary. The paper presents an algorithm for calculating the RSGU spectrum using application software for a virtual stand of deep-level capacitive relaxation spectroscopy. An example is given for constructing a capacitive RSG spectrum and determining its parameters.

Keywords: relaxation spectroscopy of deep levels, RSGU spectrum, weighing function, deep level.

В полупроводниковых материалах всегда присутствуют дефекты и примеси, которые создают энергетические уровни в запрещенной зоне полупроводника [1]. Эти дефекты и примеси называются глубокими центрами (ГЦ), которые могут быть связаны с радиационными дефектами, дефектами кристаллической решетки, примесями и дефектами, связанными с термообработкой материала.

Один из наиболее точных и информативных методов для изучения влияния и параметров глубоких центров (ГЦ) в полупроводниковых материалах - релаксационная спектроскопия глубоких уровней (РСГУ) [2]. С помощью этого метода можно определить основные параметры ГЦ, включая энергию активации носителей заряда на глубоких уровнях, концентрацию носителей заряда на этих уровнях и сечение захвата носителей. Существует несколько видов РСГУ, но наиболее распространенными являются токовая и емкостная релаксационная спектроскопия.

Для виртуального стенда лабораторной работы по изучению емкостной релаксационной спектроскопии глубоких уровней с помощью прикладного программного обеспечения был разработан алгоритм построения РСГУ-спектра, а также расчет его параметров, таких как энергия активации ΔE , сечение захвата σ_{Γ} и концентрация ГУ N_t .

Релаксация емкости описывается следующим уравнением, параметры которого меняются в результате температурного сканирования образца:

$$\frac{\Delta C(t)}{C} = -\frac{N_t}{2N_D} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (1)$$

где $\frac{\Delta C(t)}{C}$ – относительное изменение емкости перехода;

N_t – концентрация глубоких центров;

N_D – концентрация ионизированных доноров в слое объемного заряда;

τ – постоянная времени;

t – время релаксации заполнения уровня.

Постоянная времени релаксации τ зависит от температуры и определяется по следующей формуле:

$$\tau = (\sigma_n v_t N_c)^{-1} \cdot \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right), \quad (2)$$

где ΔE – энергия ионизации; k – постоянная Больцмана, равная $8,68 \cdot 10^{-5}$ эВ/К.

Тепловая скорость v_t находится по формуле:

$$v_t = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}, \quad (3)$$

где m – эффективная масса кремния, равная 1.08.

Плотность состояний N_c рассчитывается из выражения:

$$N_c = 2 \cdot \frac{(2\pi mkT)^{\frac{3}{2}}}{h^3}, \quad (4)$$

где h – постоянная Планка, равная $6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Алгоритм построения РСГУ-спектра работает следующим образом:

- 1) Вычисление значений τ при каждой температуре.
- 2) Построение функций тока и емкости.
- 3) Перемножение каждого модельного сигнала и взвешивающей функции:

$$R_k(t) = y(t) \cdot x_k(t), \quad (5)$$

где $x_k(t)$ – релаксационный сигнал емкости; $y(t)$ – взвешивающая функция.

- 4) Интегрирование произведения функций:

$$S_k(t) = \int_0^{t_c} R_k(t) dt. \quad (6)$$

5) Построение полученных точек РСГУ-спектра, соответствующих определённым температурам.

Блок-схема данного алгоритма представлена на рисунке 1.

Для построения графика релаксации емкости (рисунок 2) задаются следующими параметрами, для примера: сечение захвата σ_{II} для постоянной времени релаксации $\tau \cdot 10^{-17}$ см²; энергия ионизации $\Delta E = 0,2$ эВ; концентрация носителей заряда на глубоких уровнях $N_t = 10^{11}$ см⁻³; концентрация доноров $N_D = 10^{14}$ см⁻³.

В алгоритме используется взвешивающая функция синхронный усилитель (lock-in) (рисунок 3), которая описывается следующим выражением:

$$y1(t) = \begin{cases} (0) \text{ if } 0 \leq t \leq 0,2t_c \\ (1) \text{ if } 0,2t_c \leq t \leq 0,6t_c \\ (-1) \text{ if } 0,6t_c \leq t \leq t_c \\ (-1) \text{ if } t \leq t_c, \end{cases} \quad (7)$$

где t_c – длительность окна, равная 1 мкс; t – общее время.

Результат расчета РСГУ-спектра, выполненный в соответствии с алгоритмом, представлен на рисунке 4.

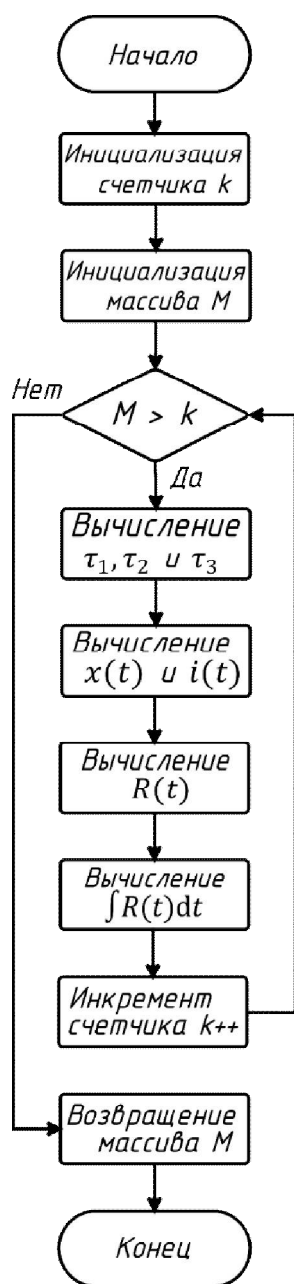


Рис. 1. Блок-схема вычисления точек для построения РСГУ спектра

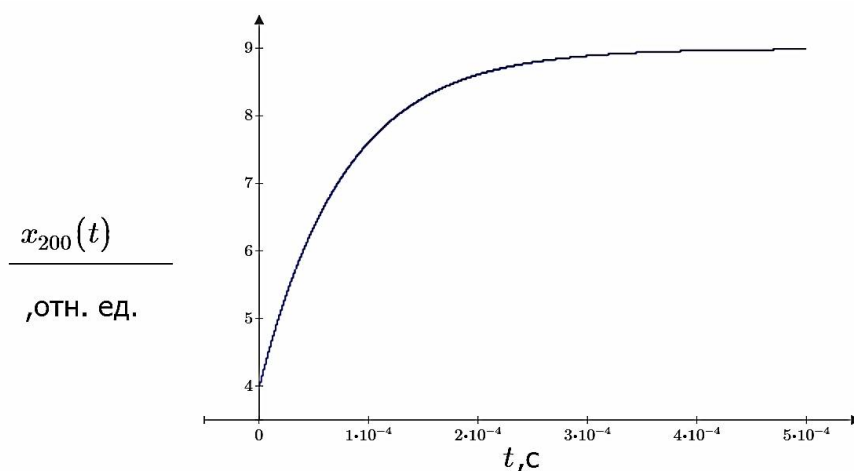


Рис. 2. Релаксация емкости при температуре 200 К

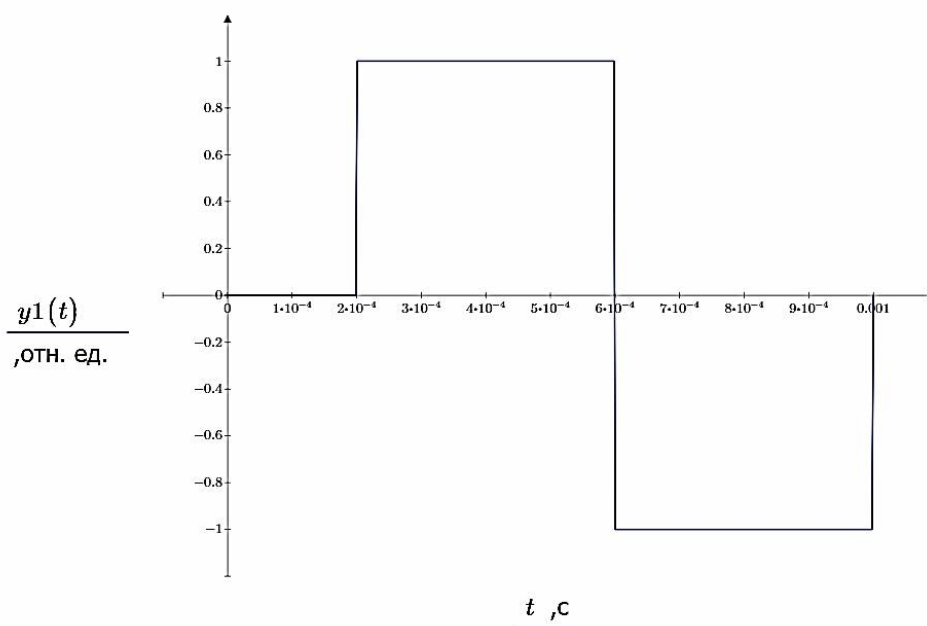


Рис. 3. Весовая функция синхронного усилителя (lock-in)

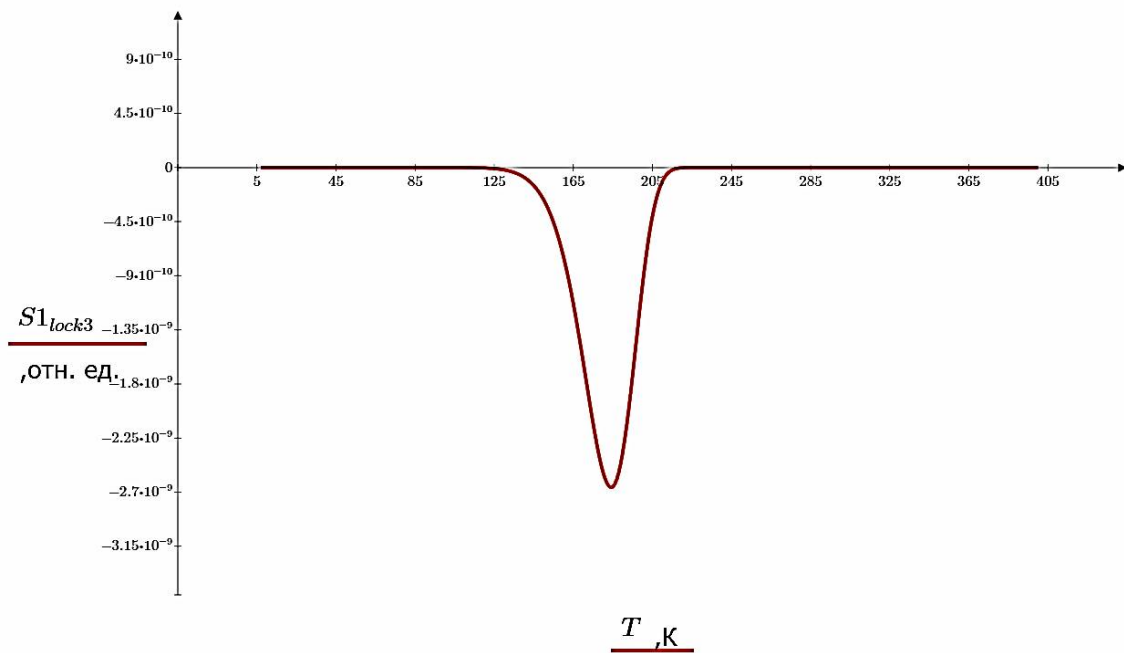


Рис. 4. РСГУ-спектр емкостной релаксации при обработке синхронным усилителем (lock-in)

Для определения сечения захвата необходимо вычислить значение ординаты в точке пересечения прямой Аррениуса и оси ординат. После нахождения ординаты (u) и воспользовавшись формулой (8), получаем [3]:

$$\sigma_{II} = \frac{h^3 \exp\left(\frac{u}{\log e}\right)}{16\pi m k^2}, \quad (8)$$

где e – число Эйлера.

Общая формула нахождения концентрации носителей заряда на ГУ с использованием абсолютного значения максимумов пиков на РСГУ-спектре:

$$N_t = \frac{2R_{\max}}{qWSK}, \quad (9)$$

где $R_{\max}$ – высота максимума пика на спектре; K – коэффициент преобразования, равный 1 [4].

Для определения энергии активации ГУ требуется наличие не менее двух РСГУ-спектров, полученных при различных значениях постоянной времени настройки дискриминатора τ_1 и τ_2 спектрометра. Энергия активации определяется по следующей формуле [5]:

$$\Delta E = \frac{k}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \cdot \ln \frac{\tau_1 \cdot T_1^2}{\tau_2 \cdot T_2^2}, \quad (10)$$

где T_1 , T_2 – температуры максимумов РСГУ-спектров, соответствующих постоянным времени настройки дискриминатора τ_1 и τ_2 .

$$\tau_{1,2} = \frac{t_a}{2 \cdot \ln \left(\frac{t_a}{t_d} + 1 \right)}, \quad (11)$$

где t_d – длительность окна, без учета переходного процесса (отступа); $t_a = t_c - t_d$ [1].

Данный алгоритм позволяет изучать параметры ГУ в модельном эксперименте. Это дает возможность построить лабораторный стенд по изучению емкостной релаксационной спектроскопии глубоких уровней. Кроме того, данная программа может быть использована исследователями для предварительного анализа проводимого эксперимента по изучению глубоких центров в полупроводниковых барьерных структурах.

Библиографический список

1. Гудзев В. В. Исследование глубоких энергетических уровней в барьерных структурах на основе кристаллического и аморфного гидрогенизированного кремния: специальность 01.04.10 «Физика полупроводников»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Гудзев Валерий Владимирович. – Рязань, 2015. – 22 с.
2. Lang D.V. Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors // Journal of Applied Physics. 1974. Vol. 45. Issue 7. pp. 3023-3032.
3. Денисов А. А., Лактюшкин В. Н., Садофьев Ю. Г. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней // Обзоры по электронной технике. 1985. Сер. 7. Вып. 15 (1141). 52 с.
4. Ермачихин А.В., Воробьев Ю.В., Трусев Е.П., Литвинов В.Г. Сравнение методов релаксационной спектроскопии глубоких уровней при анализе релаксационного тока // Вестник РГРТУ. 2022. № 82. С. 207-217.
5. Ikoma T., Taniguchi M., Noge H. Deep-level characterization in LEC GaAs: // Extended abstracts of the 15th conf. on Solid state devices and materials. Tokyo. 1983. P.149-152.

УДК 004.932.2; ГРНТИ 28.23.15

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ С ПОМОЩЬЮ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Н.Б. Рыбин*, Н.В. Рыбина*, В.В. Трегулов, А.И. Иванов****

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

**Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина,
Российская Федерация, Рязань, alex2012-14@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрен метод фрактального анализа изображений. Проведены исследования тестовых изображений поверхности металлических структур. Представлены мультифрактальные спектры изображений поверхности.

Ключевые слова: металлические образцы, дефекты, фрактальный анализ, мультифракталы, лакуарность.

STUDYING THE SURFACE OF METAL SAMPLES USING FRACTAL ANALYSIS

N.B. Rybin*, N.V. Rybina*, V.V. Tregulov, A.I. Ivanov****

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

**Ryazan State University named for S.A. Yesenin,
Russia, Ryazan, alex2012-14@yandex.ru

The summary. The method of fractal image analysis is considered. Test images of metal structures surface were studied. Multifractal spectra of surface images are presented.

Keywords: metal samples, defects, fractal analysis, multifractals, lacunarity.

На свойства металлических структур оказывают влияние различные факторы, в том числе связанные с особенностями рельефа поверхности. Наличие дефектов поверхности может приводить к существенному изменению характеристик структур, поэтому анализ их морфологии является важным. Существуют всевозможные методы исследования поверхностных дефектов по их изображениям, например, флуктуационный анализ, метод средней взаимной информации [1]. В данной работе рассмотрен метод фрактального анализа изображений поверхности.

В качестве объекта исследования используются примеры изображений поверхности металлических структур, взятые из атласа [2]. На рис. 1 представлены изображения поверхности образцов: «Макрошлиф с флокенами»; «Металл с морщиной»; «Скопление сферических пор на поверхности металла»; «Чешуйчатость на поверхности металла» (в дальнейшем – образцы № 1-4) [2].

Проведен фрактальный анализ изображений программой ImageJ с применением библиотеки FracLac. Результаты представлены в таблице 1. Фундаментальной характеристикой фрактала является фрактальная размерность D – коэффициент, описывающий фрактальные структуры или множества на основе количественной оценки их сложности, т.е. варьирования степени проработанности деталей с изменением масштаба. Фрактальная размерность D рассчитывается как отношение логарифма числа занятых пикселями ячеек $N(\varepsilon)$ к логарифму масштаба ε [3]:

$$D = - \left(\frac{\ln N_{\varepsilon}}{\ln \varepsilon} \right). \quad (1)$$

Масштаб ε равен отношению размера ячейки к размеру изображения.

Из фрактального анализа изображений поверхности образцов следует, что значения D для образцов № 1 и № 3 сильно отличаются от остальных (табл.1). Следовательно, морфология поверхности образцов № 1 и № 3 заметно отличается от образцов № 2 и № 4 (табл. 1).

Другим важным параметром фрактальной структуры является лакуарность (Λ). Это мера неоднородности или трансляционной/вращательной инвариантности фрактального множества. Для оценки величины Λ хаотичных фракталов используется дисперсия распределения точек множества. В библиотеке FracLac величина Λ рассчитывается как изменение плотности пикселей при разных размерах ячеек [3]:

$$\Lambda_{\varepsilon} = \left(\frac{\sigma}{\mu} \right)^2, \quad (2)$$

где σ – стандартное отклонение распределения количества пикселей μ в ячейке определенного размера и положения [3].

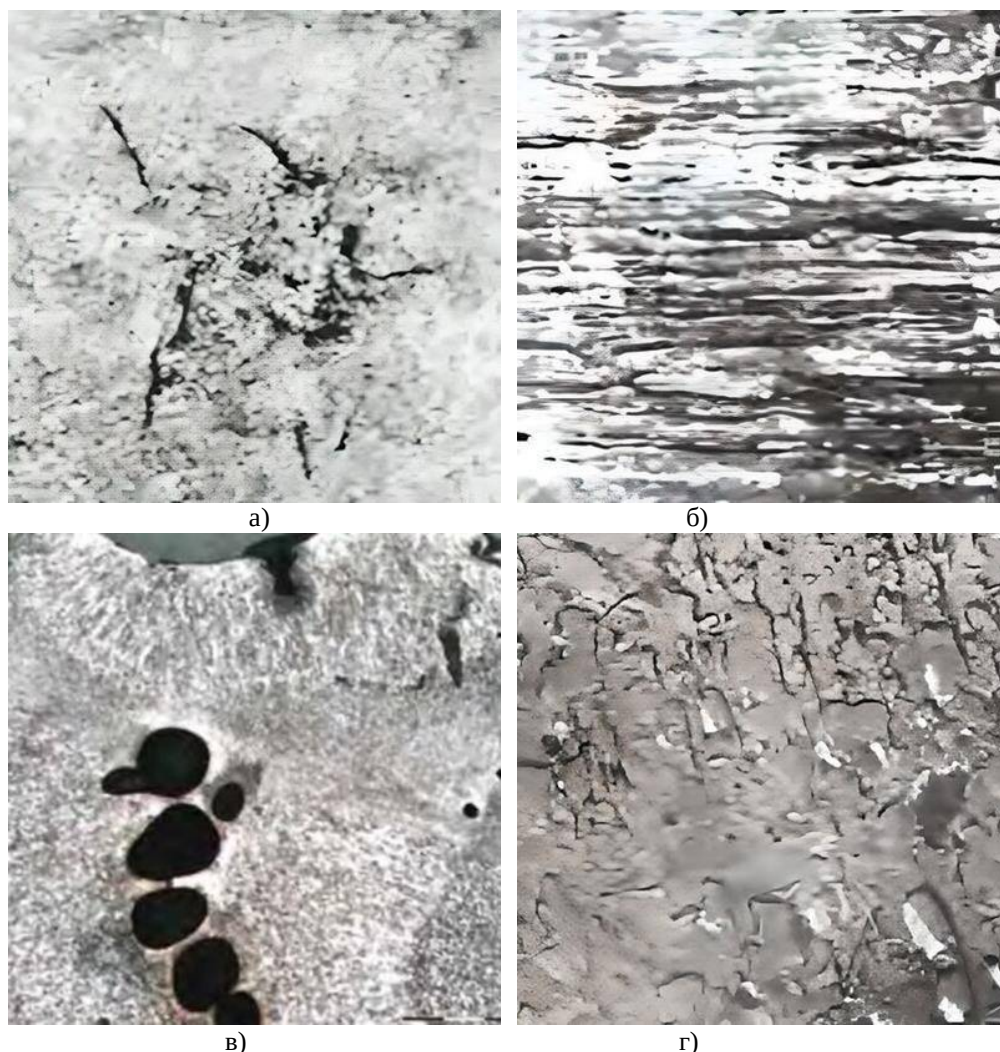


Рис. 1. Изображения поверхности образцов: а) образец № 1, б) образец № 2, в) образец № 3, г) образец № 4

В результате проведенного исследования установлено, что значение лакуарности для образцов № 1 и № 3 заметно выше, чем для остальных. Это объясняется большей неоднородностью рельефа поверхности.

Также в работе проведен так называемый мультифрактальный анализ изображений поверхности. Мультифракталы — это множества, использующие при своем формировании несколько правил масштабирования. Одним из фундаментальных свойств мультифрактала является функция распределения набора составляющих его пикселей $f(\alpha)$, которая получила название мультифрактального спектра. Анализ кривой $f(\alpha)$ позволяет определить принадлежность модели к различным классам мультифракталов, а именно монофракталов или нефракталов [3]. Исходя из вида спектров $f(\alpha)$, представленных на рис. 2, поверхность образцов № 1, № 3 и № 4 обладает мультифрактальными свойствами и соответствует аттрактору Хеннона. Поверхность образца № 2 имеет монофрактальный характер и описывается моделью кривой Коха [3].

Таблица 1. Значения параметров фрактальности для исследуемых образцов

№ п/п	D	Λ
1	1,58	1,12
2	1,80	0,44
3	1,45	2,20
4	1,77	0,57

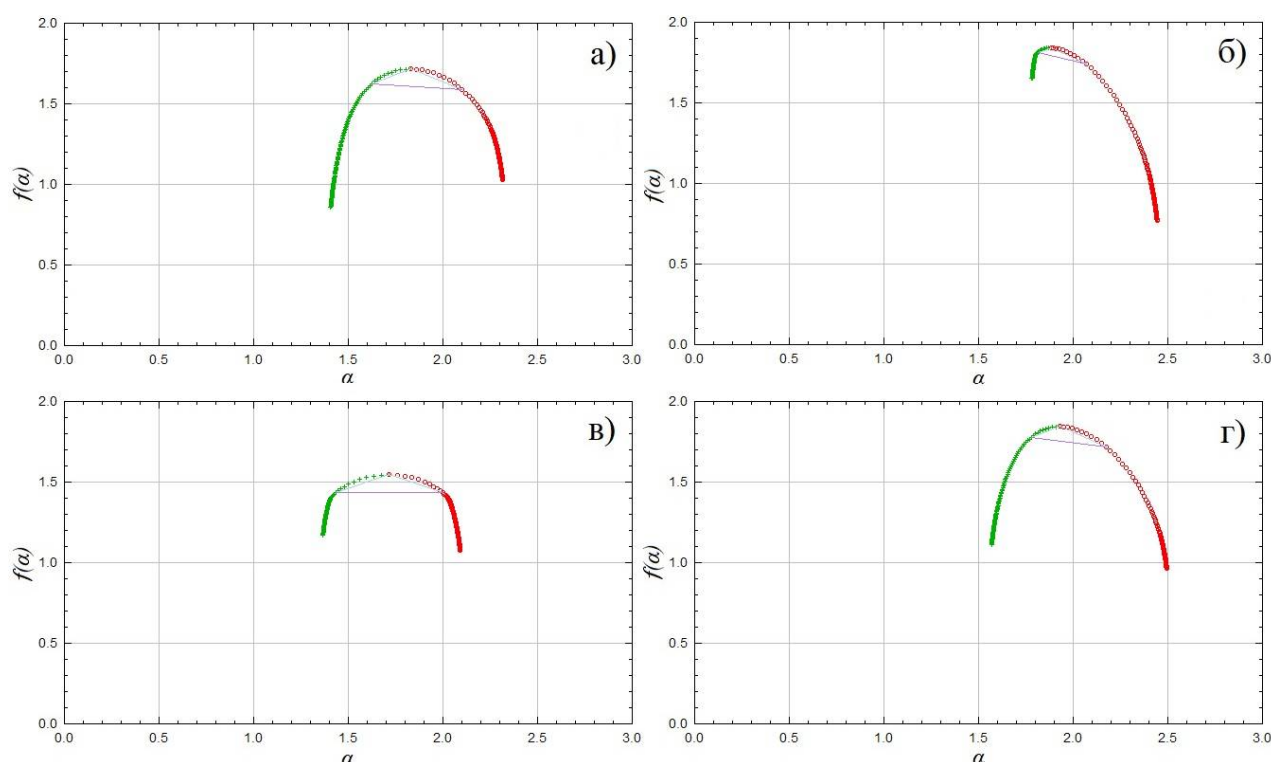


Рис. 2. Мультифрактальные спектры образцов $f(\alpha)$: а) образец № 1, б) образец № 2, в) образец № 3, г) образец № 4

Фрактальный анализ поверхности различных структур является действенным способом изучения особенностей морфологии. Из анализа значений фрактальных размерностей и лакуарности следует, что образцы № 1 и № 3 обладают большей неоднородностью рельефа, чем образцы № 2 и № 4. Кроме того, выяснено, что образцы № 1, № 3 и № 4 характеризуются мультифрактальными свойствами, в то время как образец № 2 является монофракталом. Таким образом, можно сделать вывод о том, что поверхность образца № 2 обладает наименьшим количеством неоднородностей среди представленных образцов. Причем для этого образца структурные неоднородности преимущественно ориентированы в одном направлении.

Библиографический список

1. Рыбина, Н.В. Анализ дефектов поверхности по информационно-корреляционным характеристикам / Н.В. Рыбина, Н.Б. Рыбин, В.Д. Степнов // Вестник РГРТУ. - 2023, № 86. - С.179-185.
2. Васин, О.Е. Атлас дефектов. Научно-технический сборник / О.Е. Васин, В.М. Югай, Р.А. Садртдинов, В.А. Подмогаев, В.Б. Гейцан, Н.К. Кареев, А.А. Селиванов. – Екатеринбург, 2008. – 56 с.
3. Karperien, A. FracLac Advanced User's Manual / A. Karperien. – Australia: Charles Sturt University, 2005. – 36 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/238733659>. – Дата доступа: 22.02.2024.

УДК 621.382.2/.3; ГРНТИ 47.09.29

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ 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 моделирования многослойных полупроводниковых квантово-размерных гетероструктур. Описаны теоритические основы полупроводниковых структур с несколькими гетеропереходами, основные методы моделирования гетероструктур и современное состояние их исследования.

Ключевые слова: полупроводник, гетероструктура, моделирование, уравнения Шрёдингера и Пуассона, математическая модель.

FEATURES OF MODELING 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 modeling multilayer semiconductor quantum-sized heterostructures. The theoretical foundations of semiconductor structures with several heterojunctions, the main methods for modeling heterostructures and the current state of their research are described.

Keywords: semiconductor, heterostructure, modeling, Schrödinger and Poisson equations, mathematical model.

Физика квантово-размерных гетероструктур является важным направлением физики полупроводников. Благодаря тому, что в наноструктурах движение носителей заряда ограничено в одном или более направлениях, энергетический спектр носителей заряда, фононов значительно изменяется, возникает целый ряд новых физических явлений, что позволяет создавать новые материалы и устройства с уникальными свойствами и функциональностью [1]. Поэтому исследование гетероструктур имеет важное значение для развития науки и техники.

В современном мире постоянно ведется создание и внедрение новых гетеропар и материалов, позволяющих достичь больших функциональных преимуществ и характеристик полупроводниковых приборов по сравнению с имеющимися, что обеспечивает прогресс в практическом использовании гетероструктур.

Моделирование полупроводниковых гетероструктур является важным инструментом для разработки новых технологий и улучшения существующих электронных устройств. В данной статье мы рассмотрим современное состояние методов моделирования многослойных полупроводниковых гетероструктур и их особенности.

Теоретические основы

Гетероструктура представляет собой выращенную на подложке структуру, состоящую из слоёв различных материалов (полупроводников, диэлектриков), которые различаются шириной запрещённой зоны и/или сродством к электрону.

Между двумя разными материалами формируется гетеропереход, в котором возможна повышенная концентрация носителей, и отсюда — формирование вырожденного двумерного электронного газа. В отличие от гомоструктур, гетероструктура обладает большой свободой выбора в конструировании нужных профилей зоны проводимости и валентной зоны. Гетероструктуры дают возможность управления фундаментальными параметрами в полупроводниковых кристаллах и приборах: шириной запрещенной зоны, эффективными массами носите-

лей и их подвижностями, показателем преломления, электронным энергетическим спектром и т. д [1].

Для выращивания гетероструктур используют много различных методов. Основными методами являются молекулярно-лучевая эпитаксия и осаждение из газовой фазы (MOCVD) [2,3].

Методы моделирования многослойных полупроводниковых гетероструктур

Для проектирования и оптимизации современных полупроводниковых гетероструктур большое значение имеет разработка математических моделей и методов, отражающих квантово-механический характер поведения носителей заряда.

Современные методы моделирования многослойных полупроводниковых гетероструктур включают в себя как теоретические, так и экспериментальные подходы. Рассмотрим некоторые из них.

Квантово-механическое моделирование

Квантово-механическое моделирование позволяет определить зонную структуру и базовые свойства гетеросистемы, выявить поляризационные эффекты и рассчитать плотности зарядов на интерфейсах между слоями [4].

Данный метод использует уравнение Шредингера для описания поведения электронов во внешних полях, таких как электрические и магнитные. Этот метод позволяет точно предсказать энергетические уровни и электронные свойства многослойных структур.

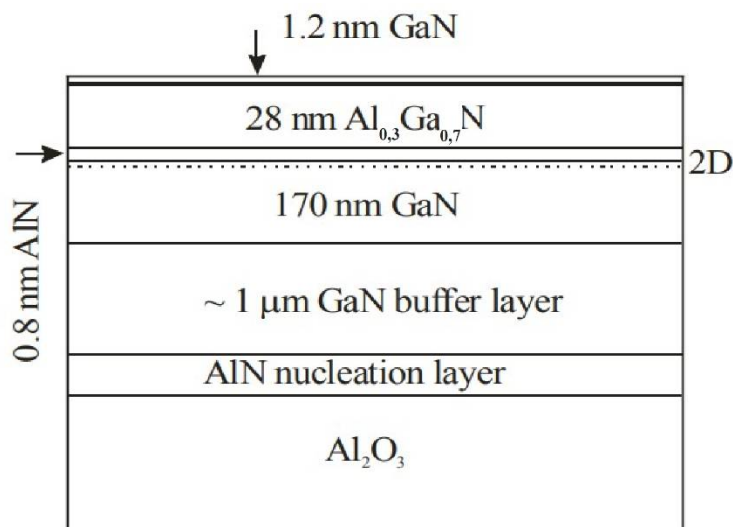


Рис. 1. Пример многослойной полупроводниковой гетероструктуры на основе GaN/Al_{0,3}Ga_{0,7}N [5]

Математическая модель, описывающая распределение электронов в таких структурах, представляет собой систему уравнений Шредингера и Пуассона [6,7]. Как правило, ограничение движения носителей заряда в полупроводниковых приборах достигается приложением напряжения в соответствующих зонах. Таким образом, в общем случае задача моделирования полупроводниковых гетероструктур ставится в пространственной постановке. Математическая модель имеет вид:

$$-\frac{\hbar^2}{2} \nabla \cdot \left(\frac{1}{m^*} \nabla \varphi \right) + (-e\varphi + \Delta E_c) \varphi = E\varphi, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\varepsilon \nabla \varphi) = -e(N_D(z) - N_A(z) - n(\mathbf{r})) + \sum_l \sigma_l \delta(z - z_l), \quad (2)$$

$$n(\mathbf{r}) = \sum_i (\varphi_i(\mathbf{r}))^2 n_i, \quad (3)$$

$$n_i = k_B T \frac{m^*}{\pi \hbar^2} \ln \left(1 + \exp \left(\frac{E_F - E_i}{k_B T} \right) \right), \quad (4)$$

где E_i и $\psi_i(\mathbf{r})$ – энергетические уровни и соответствующие им волновые функции;

$n(\mathbf{r})$ – электронная плотность;

$\hbar$ – постоянная Планка;

e – заряд электрона;

m^* – эффективная масса электрона;

E_F – положение уровня Ферми;

$\varphi(\mathbf{r})$ – электростатический потенциал;

N_D, N_A – концентрации донорной и акцепторной примесей; σ_l – плотности зарядов на интерфейсах;

δ – дельта функция;

z_l – местоположения интерфейсов;

ε – диэлектрическая постоянная материала;

ΔE_c – сдвиг зоны проводимости материала;

k_B – постоянная Больцмана, T – температура.

В модели (1) – (4) отражен тот факт, что значения m^* , ε и ΔE_c могут меняться от слоя к слою. При этом температура в гетероструктуре предполагается постоянной.

При записи уравнений (1) – (4) выделено направление поперек слоев (координата z), что отражает послойный рост структуры и зависимость ряда характеристик только этой координаты.

Задача (1) – (4) решается, как правило, в прямоугольной области Ω (пример двумерной области представлен на рис.1), что характерно для большинства полупроводниковых устройств. Постановка условий на границе Γ области Ω отражает специфику функционирования гетероструктуры. Область Ω в расчетах обычно значительно больше области, где реализуется квантовое ограничение, так что справедливым является постановка однородного условия Дирихле для волновой функции на границах $-\psi|_{\Gamma} = 0$. Для электростатического потенциала в зависимости от условий функционирования гетероструктуры на различных участках границы могут задаваться как значения приложенных напряжений (граничные условия Дирихле, $\varphi|_{\Gamma} = \varphi_g$), так и значения напряженности электрического поля (граничные условия Неймана, $\frac{\partial \varphi}{\partial \eta}|_{\Gamma} = f_g$, где $\frac{\partial \varphi}{\partial \eta}$ – производная по нормали к границе). Первый вариант харак-

терен, например, для задач, в которых квантовые ограничения достигаются за счет внешнего электрического поля (квантовые нити в двумерном случае и квантовые точки в трехмерном случае), а также в зонах контакта полупроводника с металлами. Вторым вариантом часто используется на границе со стороны подложки, где задается нулевое значение напряженности (однородное условие Неймана).

Решение спектральной задачи (1) (уравнение Шрёдингера) зависит от электростатического потенциала φ , распределение которого в структуре $\varphi(\mathbf{r})$ определяется уравнением Пуассона (2). При этом в правую часть уравнения Пуассона входит электронная плотность $n(\mathbf{r})$, которая, в свою очередь, определяется энергетическими уровнями E_i и волновыми функциями

ми $\psi_i(r)$ согласно статистике Ферми-Дирака (3), (4). Задача, таким образом, имеет ярко выраженный сопряженный характер.

Самосогласованное решение этой системы дает искомые энергетические уровни E_i и соответствующие им волновые функции $\psi_i(r)$, профиль потенциальной ямы $V(r)$, а также распределение электронной плотности в гетероструктуре $n(r)$ [8].

Методы численного моделирования

С использованием программного обеспечения, такого как COMSOL Multiphysics, Silvaco Atlas, Sentaurus TCAD и другие, можно проводить численное моделирование электронных и оптических свойств многослойных структур.

Программное обеспечение, такое как COMSOL Multiphysics или ANSYS, может использоваться для решения уравнений Пуассона и Шрёдингера в гетероструктурах (метод конечных разностей).

SILVACO ATLAS и TCAD Sentaurus может быть использовано для проведения численного моделирования с использованием метода Монте-Карло, использующегося для моделирования транспорта электронов и дырок в полупроводниковых гетероструктурах.

Программное обеспечение, например, QuantumATK или VNL-ATK, может быть использовано для изучения электронных свойств квантовых ям в гетероструктурах.

Моделирование с помощью математических физических моделей

Такие модели как модель транзистора или модель передачи электронов могут быть использованы для анализа работы многослойных полупроводниковых гетероструктур.

Математическое моделирование может помочь в понимании и оптимизации работы этих структур. Оба этих типа таких моделей позволяют учесть особенности наноразмерных устройств и создать более точные и реалистичные модели гетероструктур.

Экспериментальные методы

Экспериментальные методы моделирования гетероструктур позволяют получить информацию о их структуре, свойствах, их поведении в различных условиях, способствуют развитию новых материалов и технологий на их основе и использованию их в различных областях, таких как фотоника, оптоэлектроника, наноэлектроника и другие.

Электронная микроскопия, рентгеновская дифракция или спектроскопия могут быть использованы для изучения структурных и оптических свойств многослойных полупроводниковых гетероструктур.

Измерение оптических свойств гетероструктур осуществляется с помощью спектроскопии, фотолюминесценции и других оптических методов для изучения свойств гетероструктур при воздействии света.

Важной задачей при исследовании полупроводниковых гетероструктур является определение распределения концентрации примесных атомов по глубине образца [9]. При малой концентрации примесей возникает сложность химического анализа из-за недостаточной чувствительности оборудования. Поэтому используют методы, основанные на облучении поверхности остросфокусированным электронным или ионным лучом. Результатом такого воздействия является испускание вторичных электронов или ионов, а также характеристического рентгеновского излучения. Анализ энергии или длины волны испускаемых частиц позволяет определить тип и концентрацию примесных атомов [10]. Среди методов, решающих задачу определения химического состава поверхностного слоя объекта, можно выделить вторичную ионную масс-спектроскопию, Оже-спектроскопию, электронную микроскопию, фотоэлектронную спектроскопию для химического анализа и др. [11, 12].

Рентгеновская дифракция позволяет изучать кристаллическую структуру гетероструктур, их параметры решетки и качество интерфейсов между различными материалами.

Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ) позволяет изучать поверхность гетероструктур на атомарном уровне, что позволяет оценить их гетерогенность и качество интерфейсов. СТМ включает широкий спектр методов исследования поверхности. Сканирующие зондовые микроскопы подразделяются на следующие основные типы: сканирующий туннельный микроскоп, предназначенный для измерения рельефа проводящих поверхностей с высоким пространственным разрешением; ближнепольный оптический микроскоп, который позволяет получать растровые изображения поверхностей и объектов с разрешением ниже дифракционного предела; сканирующий атомно-силовой микроскоп, который используется для определения рельефа поверхности с разрешением от десятков ангстрем вплоть до атомарного и, в отличие от сканирующего туннельного микроскопа, позволяет исследовать как проводящие, так и непроводящие поверхности [13].

Выводы

Интеграция технологий и миниатюризация устройств создают растущий интерес к использованию гетероструктур в полупроводниковых устройствах.

Методы моделирования гетероструктур совершенствуются и активно применяются для исследования и дальнейшего развития полупроводниковых наноструктур. Эти методы могут быть использованы как по отдельности, так и в комбинации, чтобы получить более полное представление о свойствах наноразмерных объектов.

Работа выполнена в РГРТУ с использованием научного оборудования РЦЗМкп РГРТУ им. В.Ф. Уткина.

Библиографический список:

1. Ж.И. Алферов История и будущее полупроводниковых гетероструктур // Физика и техника полупроводников. — 1998. — Т. 32, №1 — С. 321–345.
2. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры.: Пер. с англ./Под ред. Л. Ченга, К. Плога. – М: Мир, 1989 – 584 с., ил.
3. Chow P. P. Molecular beam epitaxy / Kern W., Vossen J. L. // Thin Film Processes II. – Academic Press, Inc., (USA), 1991. – P. 133 – 175.
4. I. Supryadkina, K. Abgaryan, D. Bazhanov, I. Mutigullin. Study of the Polarizations of (Al,Ga,AlGa)N Nitride Compounds and the Charge Density of Various Interfaces Based on Them. // Semiconductors, 2013, Vol. 47, No. 12, pp. 1621–1625.
5. Протасов Д.Ю., Малин Т.В., Тихонов А.В., Цацульников А.Ф., Журавлев К.С. Рассеяние электронов в гетероструктурах AlGaIn/GaN с двумерным электронным газом // Физика и техника полупроводников. 2013. Т. 47. Вып. 1. С. 36–47.
6. D. Vasilevski, S. M. Goodnick, S. Goodnick. Computational Electronics: Semiclassical and Quantum Device Modeling and Simulation, CRC Press, 2010.
7. В.И. Зубков. Моделирование вольт-фарадных характеристик гетероструктур с квантовыми ямами с помощью самосогласованного решения уравнений Шрёдингера и Пуассона. // Физика и техника полупроводников, 2006, том. 40, вып. 10, с. 1236-1240.
8. К.К. Абгарян, Д.Л. Ревизников Вычислительные алгоритмы в задачах моделирования и оптимизации полупроводниковых гетероструктур. — 2016. – 122 с.
9. Проблемы измерения геометрических характеристик электронного зонда растрового электронного микроскопа / Ч. П. Волк [и др.] // Труды ИОФАН. – 2006. – Т. 62. – С. 77 – 120.
10. Фотодиоды с расширенным спектральным диапазоном 1.5 – 4.8 μm на основе гетероструктур, работающих при комнатной температуре / Д. А. Старостенко [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2011. –Т. 37, № 19. – С. 95 – 103.
11. Николичев Д. Е., Боряков А. В. Локальная диагностика состава полупроводниковых наносистем методом сканирующей оже-микроскопии. – Н. Новгород : Изд-во Нижегород, ун-та, 2011. – 110 с.
12. Смирнов В. И. Неразрушающие методы контроля параметров полупроводниковых материалов и структур. – Ульяновск : УлГТУ, 2012. – 75 с.
13. Гетероструктуры с квантовыми точками: Получение, свойства, лазеры (обзор) / Н. Н. Леденцов [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 1998. – Т. 32, № 4. – С. 385 – 410.

УДК 621.315; ГРНТИ 29.19.31

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В МНОГОСЛОЙНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ

Н.В. Вишняков, Ю.Д. Гудков, В.Г. Мишустин

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

Аннотация. В работе представлены результаты моделирования оптического поглощения монохроматического света в двухслойной гетероструктуре на примере системы α -Si:H/c-Si с учетом используемых допущений. Результаты получены с помощью среды компьютерного моделирования MathCAD.

Ключевые слова: метод компенсации тока нестационарной фотопроводимости, оптическое поглощение, многослойная структура, гетероструктура, полупроводник.

SIMULATION OF OPTICAL ABSORPTION IN MULTILAYER SEMICONDUCTOR STRUCTURES

N.V. Vishnyakov, Yu.D. Gudkov, V.G. Mishustin

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, gudlov4000@mail.ru

The summary. The paper presents the results of modeling the optical absorption of monochromatic light in a two-layer heterostructure using the example of the α -Si:H/c-Si system, taking into account the assumptions used. The results were obtained using the MathCAD computer modeling environment.

Keywords: nonstationary photoconductivity current compensation method, optical absorption, multilayer structure, heterostructure, semiconductor.

Метод компенсации тока нестационарной фотопроводимости (МКТНФ) является одним из немногих способов, позволяющих непосредственно измерять распределение внутреннего электрического поля в барьерных полупроводниковых структурах [1]. МКТНФ основан на одновременном воздействии на исследуемую структуру монохроматического света и компенсирующего напряжения от внешнего источника. Для расчета распределения внутреннего электрического поля по толщине необходимо знать зависимость коэффициента оптического поглощения от длины волны и толщины экспериментальной структуры [2]. Значения напряженности находят как

$$E(x_c) = \frac{U_{\text{внеш}}}{d},$$

где $U_{\text{внеш}}$ – величина внешнего напряжения, при котором происходит компенсация переходного тока фотопроводимости, d – толщина исследуемой структуры. Координата x_c (рис. 1), в которой измеряется внутреннее поле, определяется из распределения фотогенерированных носителей заряда по толщине исследуемой структуры.

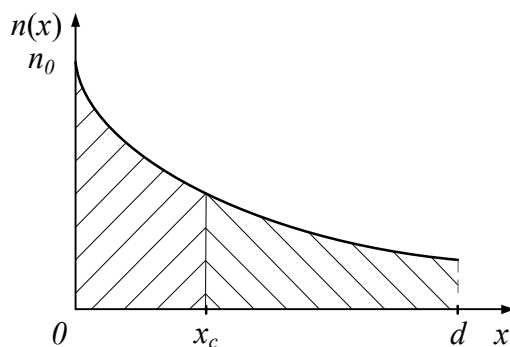


Рис. 1. Распределение концентрации фотогенерированных носителей заряда по толщине исследуемой структуры при освещении монохроматическим светом

В точке x_c внутреннее поле компенсируется внешним, что соответствует минимуму электростатического потенциала. Под действием суперпозиции внутреннего и внешнего электрических полей фотогенерированные носители будут дрейфовать в эту точку. Компенсация переходного фототока будет происходить при условии, что количество фотогенерированных носителей (площадь под кривой $n(x)$ на рис.1) одинаково по обе стороны от точки x_c . Изменяя длину волны монохроматического света, т.е. изменяя распределение фотогенерированных носителей по толщине и, соответственно, положение координаты x_c , и подбирая значение $U_{\text{внеш}}$, при котором происходит компенсация переходного тока, получают распределение внутреннего электрического поля по толщине [3].

При исследовании «простых» структур типа диода Шоттки, МКТНФ дает результаты, которые находятся в согласии с теоретическими и экспериментальными результатами, описанными в работах [4, 5]. Однако современные фоточувствительные элементы имеют сложную многослойную структуру, в которой имеются как активные слои, в которых собственно и происходит основное поглощение света, так и пассивирующие слои, электроды и пр. В качестве примера можно указать на фотоэлектрические преобразователи с p-i-n структурой на основе α -Si:H и α -SiC:H [6], HIT-структуры на основе гетероперехода a-Si:H/c-Si [7] и др. В этом случае теряется простота расчета распределения фотогенерированных носителей по толщине, и возникает необходимость учитывать изменение коэффициента оптического поглощения при переходе из одного слоя в другой, отражение и переотражение на границах раздела, влияние энергетических состояний на границах раздела, на генерацию и рекомбинацию носителей заряда и т.д.

В данной работе проведено моделирование оптического поглощения монохроматического излучения на примере гетероперехода α -Si:H/c-Si при различных длинах волн падающего света видимого диапазона. Для расчетов использовались следующие исходные данные: площадь освещаемой поверхности - 1 см^2 , мощность излучения - 600 Вт независимо от длины волны падающего света, толщина пленки α -Si:H - 0,1 мкм, толщина c-Si - 150 мкм. Моделирование оптического поглощения было проведено в системе компьютерной алгебры «Mathcad». При моделировании оптического поглощения были использованы следующие допущения: свет падает под углом 90° к поверхности; процесс переотражения на границе раздела α -Si:H/c-Si не учитывается; рассматривается только собственное поглощение в полупроводниках.

На рис. 2 представлены расчетные зависимости мощности прошедшего монохроматического излучения в зависимости от координаты в однородном материале. Данные зависимости получены на основании закон Бугера-Ламберта-Бера

$$P(x) = P(0) \exp(-\alpha x),$$

где $P(0) = 600 \text{ Вт/см}^2$ – величина мощности падающего монохроматического излучения, α – коэффициент оптического поглощения, который зависит от длины волны падающего света для каждого материала.

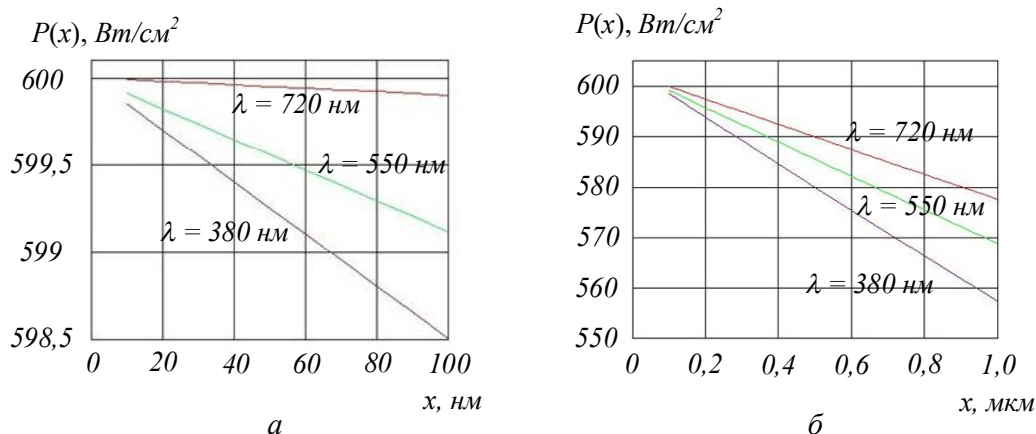


Рис. 2. Зависимость мощности прошедшего монохроматического излучения от координаты в различных полупроводниковых материалах: а – α -Si:H; б – c-Si

На рисунке 3 представлены аналогичные зависимости для гетероструктуры α -Si:H/c-Si. На границе раздела α -Si:H/c-Si наблюдается излом зависимости, который объясняется изменением оптических свойств структуры при переходе из одного материала в другой. Влиянием переотражения на границе раздела в данном случае можно пренебречь, поскольку слой α -Si:H много тоньше толщины пластины c-Si, т.е. его основное назначение – это пассивация оборванных связей в кристаллическом кремнии [7].

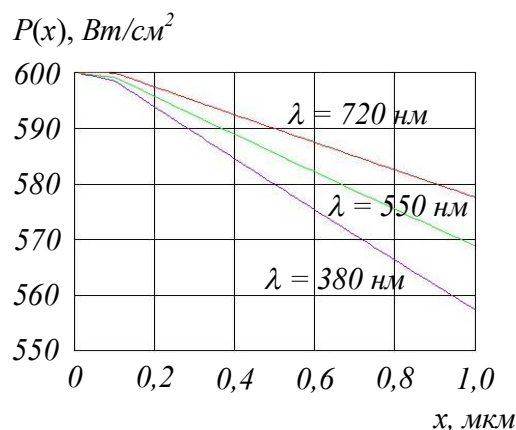


Рис. 3. Зависимость мощности прошедшего монохроматического излучения от координаты в двухслойной структуре α -Si:H/c-Si

Считая величину квантового выхода известной (обычно ее принимают равной единице [8]), можно рассчитать распределение фотогенерированного заряда по толщине. Используя численные методы, можно определить координату x_c , в которой измеряют внутреннее поле [3].

Таким образом, моделирование оптического поглощения позволяет применять метод МКТНФ к барьерным структурам, состоящих из нескольких слоев, отличающихся оптическими свойствами и толщиной. Эти результаты могут быть использованы как при непосредственной разработке фотоэлектрических элементов, так и при уточнении математических моделей, используемых в специализированных САПР.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003) с использованием научного оборудования РЦЗМкп РГРТУ им. В.Ф. Уткина.

Библиографический список

1. Вихров С.П., Вишняков Н.В., Маслов А.Д. и др. Измерение распределения встроенных электрических полей в полупроводниковых барьерных структурах // Вестник РГРТУ. 2018. №66. Часть 2. С. 23 – 29.
2. Юшка Г.Б., Монтримас Э.А. Измерение распределения электрического поля в тонких структурах a-Si:H // Литовский физический сборник 1992. Т.32, №4 С. 612 – 617.
3. Мишустин В.Г. Исследование влияния локализованных состояний на распределение пространственного заряда в барьерных структурах на основе неупорядоченных полупроводников / Дисс. канд. физ.-мат. наук: Рязань, 2008. 185 с.
4. R.A. Street Measurements of depletion layers in hydrogenated amorphous silicon // Physical review B. 1983. V. 27. No. 8. P. 4924 - 4932.
5. T. Datta, M. Silver Transient photoconductivity and Schottky barrier profile determination in a-Si:H // Journal de physique. 1981. V. 42. P. C4-563 – C4-566.
6. А.В. Пирюгин, В.Г. Мишустин Разработка двухкаскадного тонкопленочного солнечного элемента на основе аморфного гидрогенизированного кремния // Сб. тр. между-нар. науч.-техн. форума СТНО-2018. Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2018. Т. 2. С. 84 – 90.
7. Вихров С.П., Вишняков Н.В., Гудзев В.В. и др. Исследование глубоких энергетических уровней в солнечном элементе типа HIT // ФТП. Т. 52. №7. 2018. С. 787 – 791.
8. Ермачихин А.В., Воробьев Ю.В., Сазонов В.О. Измерение квантового выхода в солнечном элементе типа HIT // Вестник РГРТУ. 2019. №68. С. 120 – 125.

УДК 621.382.323; ГРНТИ 47.33.29

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ GaN-ТРАНЗИСТОРОВ

И.А. Андрианов, М.С. Миронов

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

Аннотация. В работе рассматриваются особенности и преимущества транзисторов изготовленных по GaN-технологии по сравнению с обычными кремниевыми транзисторами. сравнивается КПД, быстродействие, предельная мощность, энергопотребление, сопротивление открытого канала и напряжение пробоя. GaN-транзистор исследуется в полумостовой схеме повышающего корректора коэффициента мощности, для сравнения КПД с кремниевыми транзисторами.

Ключевые слова: GaN-транзистор, нитрид галлия, КПД, миниатюризация.

THE STUDY OF THE EFFICIENCY OF GAN TRANSISTORS

I.A. Andrianov, M.S. Mironov

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

Annotation. The paper discusses the features and advantages of transistors manufactured using GaN technology in comparison with conventional silicon transistors. The efficiency, speed, power limit, energy consumption, resistance of the open channel and breakdown voltage are compared. The GaN transistor is being investigated in a half-bridge circuit of a power factor boosting corrector, to compare efficiency with silicon transistors.

Keywords: GaN-transistor, gallium nitride, efficiency, miniaturization.

Транзисторы на основе структур AlGaIn/GaN в последние годы начали занимать лидирующие позиции на рынке микроэлектроники, почти все сверхбыстрые зарядные устройства современных смартфонов и ноутбуков созданы с использованием GaN-транзисторов. Это связано с рядом их преимуществ, именно об этих преимуществах пойдет речь в данной статье.

Неоспоримые преимущества GaN-транзисторов перед кремниевыми транзисторами

1) Высокая удельная мощность GaN-транзисторов достигается за счет 2-х ключевых особенностей: структуры нитрида галлия и способа построения кристалла транзистора.

Нитрид галлия, GaN – является полупроводником с запрещенной зоной больше, чем у обычного кремния, и малой допустимой областью, что и обеспечивает высокое напряжение пробоя.

По сравнению с транзисторами из кремния, GaN-транзисторы имеют разное строение кристаллической решетки и разные коэффициенты теплового расширения. При создании GaN-транзистора сначала на кремниевой подложке создаются переходные слои, необходимые для выращивания тонкого (примерно 2-2,5 мкм) GaN-слоя (рис.1). На поверхности образованного транзистора, между слоями GaN и AlGaIn образуется очень тонкий слой свободных электронов (2DEG), обладающий очень высокой проводимостью, благодаря несравнимо высокой подвижности электронов.

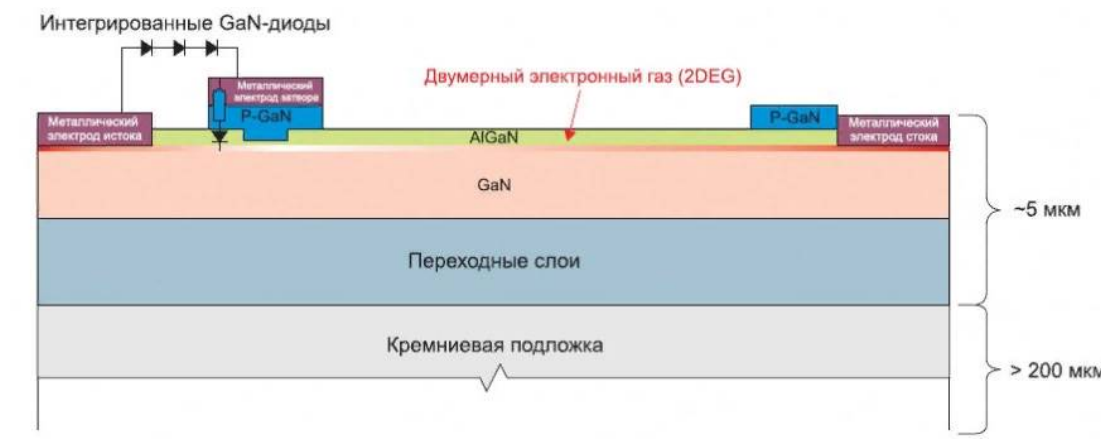


Рис. 1. Поперечное сечение силового GaN-транзистора с напряжением пробоя 600 В

2) Большое, по сравнению с кремнием, напряжение пробоя сток-исток, обусловлено тем, что широкозонный полупроводник, и по сравнению с кремнием, расстояние между стоком и истоком в таких транзисторах, теоретически может быть в меньше практически в 10 раз. Именно это и позволяет создавать транзисторы с тем же сопротивлением открытого канала, что и для кремния, но ширина этого канала может быть значительно уже.

Современные кремниевые транзисторы работают в режимах, близких к их теоретическому пределу, но как показано на рисунке 2, GaN-транзисторы к своему пределу не подошли и имеют возможности для дальнейшего развития.

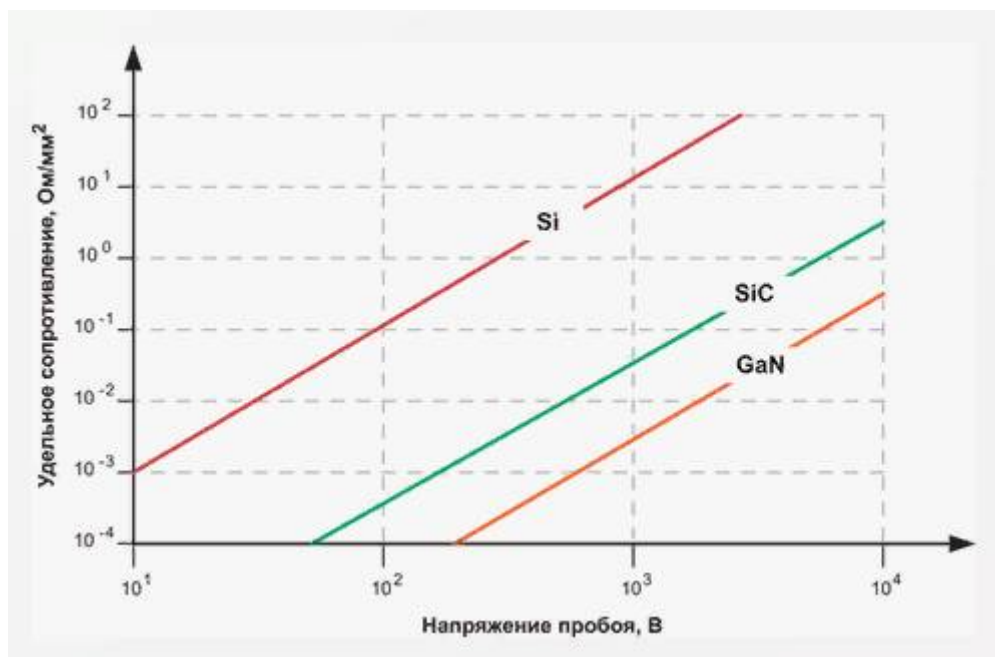


Рис. 2. Зависимость сопротивления открытого канала от напряжения пробоя

Как видно из графика на рисунке 2, GaN-транзистор, при удельном сопротивлении в $0,1 \text{ Ом/мм}^2$ имеет напряжение пробоя практически в сто раз больше.

3) Широкий диапазон рабочей частоты, но в основном ВЧ и СВЧ диапазоны;

Считается, что максимальной эффективности GaN-транзистор достигает при работе в ВЧ и СВЧ диапазонах частот. Однако эта эффективность обеспечивается также и в полумостовых схемах (рис. 3), при сравнительно небольшой для GaN-транзистора частоте, примерно в 65 кГц.

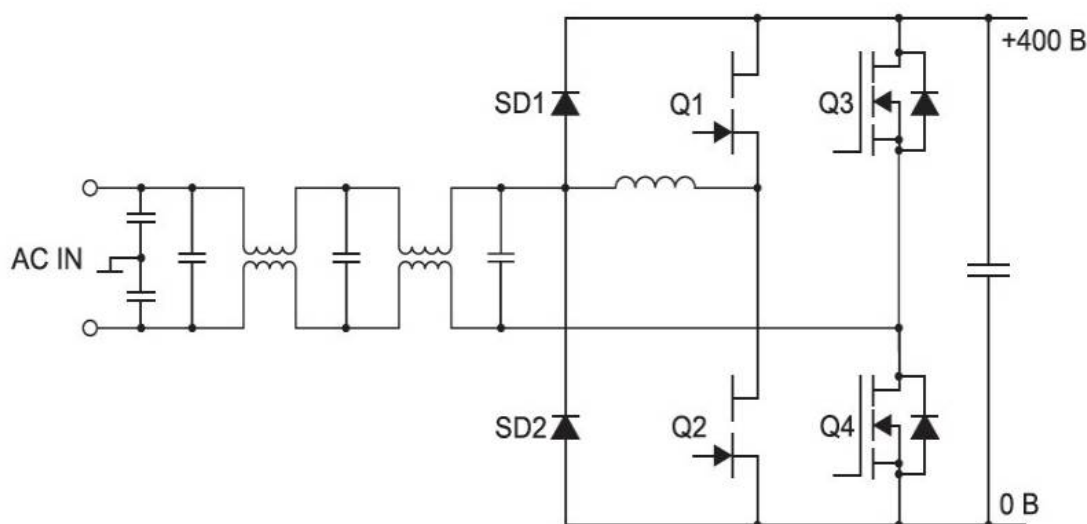


Рис. 3. Полумостовая схема корректора коэффициента мощности

При использовании вместо Q1 и Q2 обычных кремниевых транзисторов, из-за эффекта обратного восстановления паразитной ёмкости встроенных диодов возникали бы потери коммутации. Но у GaN-транзисторов нет эффекта обратного восстановления из-за отсутствия неосновных носителей заряда, участвующих в процессе канальной проводимости.

4) Высокий КПД.

Потери настолько незначительны, что КПД схемы (рис.4), показанной на рисунке 3, превышает показатель 99% практически во всей части диапазона мощности, но это не самый высокий показатель, при мощности в 1000 Вт, КПД схемы становится равно 99,33%, что является необычно высоким показателем даже для современной микроэлектроники.

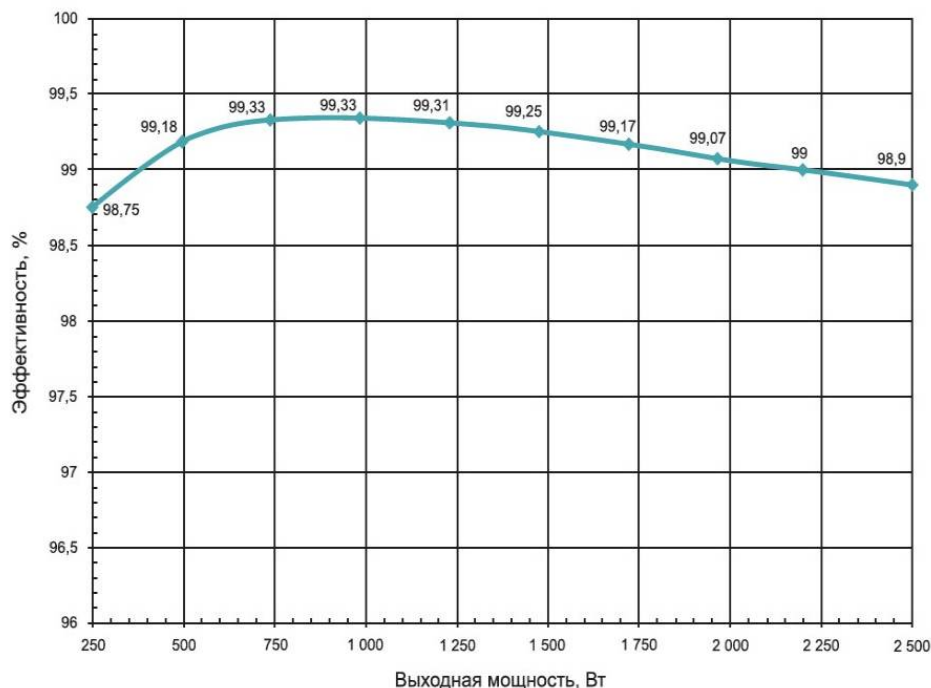


Рис. 4. Результат измерений в схеме ККМ с GaN-транзистором

Из графика на рисунке 4 видно, что GaN-транзисторы обладают высокой эффективностью по сравнению с кремниевыми, а также имеют значительно меньшие габариты и большее напряжение пробоя. Сравнительные характеристики кремниевых и GaN-транзисторов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение свойств полупроводниковых материалов

Характеристики материала	Si	SiC	GaN
Ширина запрещенной зоны, эВ	1,1	3,2	3,5
Критическая напряженность эл. поля, $\cdot 10^6$ В/см	0,3	3	3,3
Теплопроводность, Вт/м $\cdot$ к	1,5	4,9	>1,5
Подвижность электронов, см ² /В $\cdot$ с	1350	700	2000
Дрейфовая скорость насыщения электронов	1,0	2,0	2,7

Из таблицы 1 видно, что GaN-транзисторы почти по всем параметрам лучше, чем привычные кремниевые транзисторы, нужно отметить, что у GaN-транзисторов существенно больше показатель подвижности электронов, что и сделало их популярными в устройствах с протоколами быстрой зарядки: PD и QC.

Итоги работы

В данной работе произведен сравнительный анализ характеристик кремниевых и GaN-транзисторов, проведено исследование эффективности GaN-транзисторов в полумостовой схеме корректора коэффициента мощности и приведена таблица характеристик материалов, из которых изготавливаются транзисторы.

Исследование показывает, что современные GaN-транзисторы не только не уступают кремниевым, но и превосходят их при определенных условиях. Развитие GaN-технологий происходит стремительно, возможно GaN-транзисторы вскоре вовсе заменят обычные транзисторы, которые уже достигли предела своих возможностей.

Библиографический список

1. Ю.Р. Ефименков, В.О. Ткаченко, В.Н. Данилин. Исследования по созданию мощного СВЧ транзистора с барьером Шоттки, на GaN, с затвором, сформированным с помощью электронной литографии. // Материалы V Международной научно-технической школы-конференции Молодые ученые – 2008, часть 1.
2. А.А. Кищинский. Твердотельные СВЧ усилители мощности на нитриде галлия - состояние и перспективы развития. // Материалы 19 Крымской конференции "СВЧ техника и телекоммуникационные технологии", Севастополь, 2009 г.
3. А. Васильев, В. Данилин, Т. Жукова. Новое поколение полупроводниковых материалов и приборов: через GaN к алмазу. // Электроника: Наука, Технология, Бизнес 2007.
4. В. Данилин, Т. Жукова, Ю. Кузнецов и др. Транзистор на GaN пока самый "крепкий орешек". // Электроника: НТБ, 2005, №4.
5. Нитрид-галлиевые (GaN) транзисторы Microsemi // URL:: <https://www.icquest.ru/publications/3-microsemi/2012/643-nitrid-gallievy-gan-tranzistory-microsemi>
6. Технология GaN – революционный шаг в будущее // URL:: <https://www.symmetron.ru/news/tekhnologiya-gan-revolutsionnyy-shag-v-budushchee/>
7. Преимущества использования полевых GaN-транзисторов в непилотируемых космических аппаратах // URL:: <https://ptelectronics.ru/stati/preimushchestva-ispolzovaniya-polevykh-gan/>

УДК 621.382.2/.3; ГРНТИ 47.09.29

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ЛОКАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР

А.В. Васин

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, lexasuper6201@gmail.com*

Аннотация. В данной статье рассматривается современное состояние электрофизических методов локального исследования полупроводниковых микро- и наноструктур, в частности пористого кремния. В статье представлен обзор современных методов исследования, а также их преимущества и недостатки. Особое внимание уделено электрофизическим методам, таким как сканирующая зондовая микроскопия и методам локальной электропроводности. Рассмотрены существующие на данный момент результаты исследований пористого кремния с использованием данных методов, а также их влияние на разработку новых устройств и технологий в области полупроводниковой электроники.

Ключевые слова: пористый кремний (por-Si, ПК), ядерный магнитный резонанс (ЯМР), спектроскопия поглощения рентгеновского излучения (XAS), электронная микроскопия (ЭМ), сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ).

CURRENT STATE OF ELECTROPHYSICAL METHODS FOR LOCAL STUDY OF SEMICONDUCTOR MICRO- AND NANOSTRUCTURES

A.V. Vasin

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russian Federation, Ryazan, levasuper6201@gmail.com*

Abstract. This article examines the current state of electrophysical methods for local research of semiconductor micro- and nanostructures, in particular porous silicon. The article provides an overview of modern research methods, as well as their advantages and disadvantages. Particular attention is paid to electrophysical methods, such as scanning probe microscopy and local electrical conductivity methods. The current results of research into porous silicon using these methods are reviewed, as well as their impact on the development of new devices and technologies in the field of semiconductor electronics.

Keywords: porous silicon (por-Si, PS), nuclear magnetic resonance (NMR), X-ray absorption spectroscopy (XAS), electron microscopy (EM), scanning probe microscopy (SPM).

В современном мире полупроводниковые микро- и наноструктуры играют важную роль в различных областях науки и техники. Они используются в электронике, оптоэлектронике, фотонике, биомедицинской технике и других областях. Для изучения их свойств и характеристик применяются различные методы, включая электрофизические методы локального исследования [1]. Одним из наиболее интересных и перспективных материалов является пористый кремний (por-Si, ПК), который обладает уникальными физическими свойствами и широким спектром применения. В настоящее время активно ведутся исследования электрофизических свойств ПК и других полупроводниковых микро- и наноструктур, направленные на расширение спектра возможностей их применения, а также на улучшение технологий и методов их производства.

Интерес ученых к данной теме обусловлен бурным развитием современной науки и технологии, а также необходимостью поиска новых материалов и технологий с улучшенными свойствами [1]. В данной статье мы рассмотрим современное состояние электрофизических методов локального исследования полупроводниковых микро- и наноструктур, с особым акцентом на ПК.

На текущий момент существует несколько передовых методов локального исследования полупроводниковых микро- и наноструктур [1], включая ПК:

- ядерный магнитный резонанс (ЯМР);
- спектроскопия поглощения рентгеновского излучения (XAS);
- электронная микроскопия (ЭМ);
- сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ).

Метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР)

Метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР) является передовым инструментом для исследования структуры и свойств материалов, включая ПК, представляющий собой материал с множеством микроскопических пор и чрезвычайно большой поверхностью площадью, что делает его идеальным для изучения методом ЯМР [2]. Принцип работы метода показан на рисунке 1.

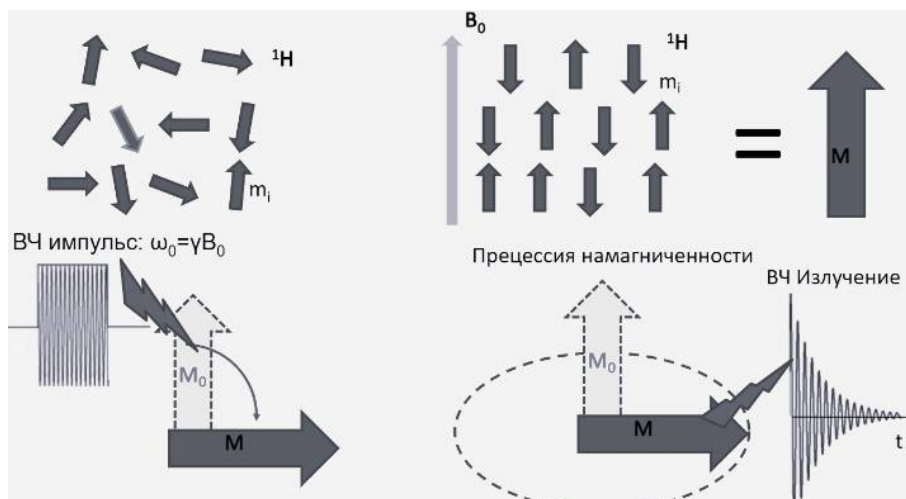


Рис. 1. Принцип работы метода ЯМР [2]

ЯМР использует излучение (появляющееся в результате взаимодействия ядерного спина с переменным магнитным полем) для изучения структуры и химических свойств вещества [2]. В случае ПК, этот метод позволяет исследовать поверхностные свойства, размеры и форму пор, а также отношение между поверхностным и внутренним объемом материала. Для исследования пористого кремния методом ЯМР применяются различные ядра, такие как ^{29}Si , ^1H , ^{13}C и др. Каждое ядро обладает уникальными свойствами, что позволяет получить разнообразную информацию о структуре и составе материала [3].

Одной из особенностей ЯМР исследований ПК является возможность изучения водородного спектра, представленного на рисунке 2, что позволяет оценить параметры водяной плёнки на поверхности материала [3]. Кроме того, ЯМР позволяет исследовать взаимодействие ПК с различными молекулами, что имеет важное значение для понимания процессов адсорбции и каталитической активности материала [4]. Для проведения ЯМР исследований ПК необходимо подготовить образец, обработав его специальным образом, чтобы исключить воздействия аморфных и кристаллических составляющих материала.

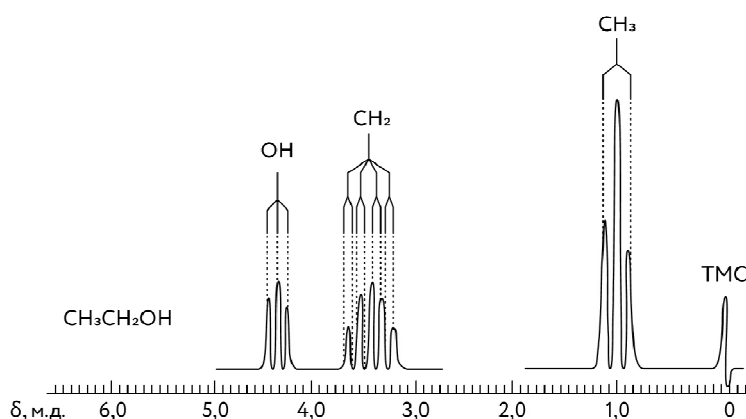


Рис. 2. Пример спектра ЯМР [3]

Исследования методом ЯМР позволяют получить информацию о поверхностных и внутренних свойствах ПК, что может быть использовано для улучшения его технологических и физико-химических характеристик. Одним из преимуществ ЯМР исследований является их возможность проводить в условиях высокой температуры и давления, что позволяет

изучать поведение ПК в реальных условиях эксплуатации [4]. Этот метод также может быть использован для контроля качества ПК, анализа структурных изменений в процессе его использования и для разработки новых методов синтеза и модификации этого материала.

Метод спектроскопии поглощения рентгеновского излучения (XAS)

Спектроскопия поглощения рентгеновского излучения (XAS) применяется для изучения внутренней структуры материалов на атомном уровне. Она основана на измерении величины изменений в интенсивности поглощенного рентгеновского излучения (в зависимости от его энергии), что позволяет определить электронную структуру атомов и молекул [5].

Принцип работы XAS, представленный на рисунке 3, основан на явлении поглощения рентгеновского излучения атомами или молекулами, что приводит к возбуждению электронов из внутренних электронных оболочек [6]. Энергия поглощенного рентгеновского излучения соответствует разности энергий между начальным и конечным состояниями системы, что позволяет получить информацию о распределении электронной плотности и состояниях валентных электронов.

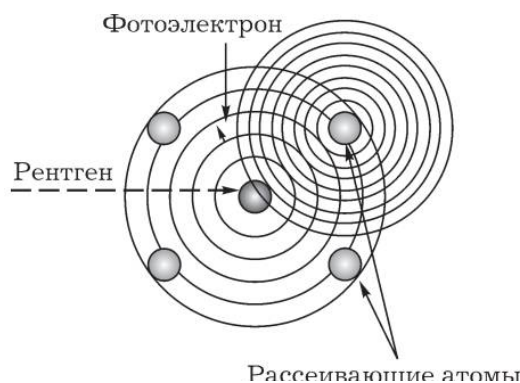


Рис. 3. Процессы поглощения и рассеяния метода XAS [5]

XAS может быть использован для изучения различных типов материалов, включая катализаторы, полупроводники, магнитные материалы и биологические образцы [6]. Он позволяет определить химический состав, валентность атомов, координационное окружение и изменения в электронной структуре в зависимости от внешних условий, таких как температура, давление и химические реакции. Пример получаемого спектра показан на рисунке 4.

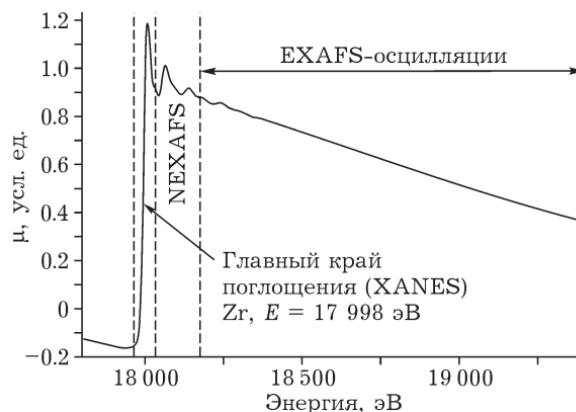


Рис. 4. Спектр поглощения EXAFS для Zr [5]

Основными методами XAS являются рентгеновская абсорбционная спектроскопия (X-ray absorption spectroscopy, XAS), расширенная рентгеновская спектроскопия (extended X-

ray absorption fine structure, EXAFS) и близко-краевая рентгеновская абсорбционная спектроскопия (near-edge X-ray absorption fine structure, NEXAFS) [7]. Каждый из этих методов обладает своими уникальными возможностями и используется для изучения различных аспектов внутренней структуры материалов.

В отношении ПК метод XAS может быть использован для определения состава, структуры и электронных свойств материала. Он позволяет анализировать поверхностные и внутренние свойства, что важно для оптимизации использования ПК в различных областях науки и техники.

Метод NEXAFS позволяет определить химическое состояние атомов в образце, в то время как EXAFS предоставляет информацию о расстояниях между атомами и их окружении [7]. Применение XAS для исследования ПК может быть полезным при изучении его структуры в наномасштабах. Результаты таких исследований могут иметь применение в разработке новых материалов для каталитических устройств, фотоники, электроники и других областей [5]. XAS также может быть использован для изучения процессов взаимодействия ПК с различными химическими веществами, что полезно при оптимизации его использования в устройствах фильтрации или сенсорах. Исследования с использованием XAS могут также помочь в определении структуры ПК при различных температурах, давлениях и в различных окружающих условиях. Дальнейшие исследования в области XAS могут привести к разработке новых методов синтеза и модификации материала с улучшенными свойствами [6].

Метод электронной микроскопии (ЭМ)

Метод электронной микроскопии (ЭМ) широко используется для исследования пористых материалов. Этот метод позволяет получить изображения с высоким разрешением структуры материала и его поверхности. Высокая разрешающая способность данного метода позволяет наблюдать поры и каналы в кремнии на нанометровом уровне, что важно для понимания их размеров, формы и распределения [8]. Принцип работы данного метода показан на рисунке 5.



Рис. 5. Схема детектирования электронов при взаимодействии электронного пучка с образцом [9]

Для проведения исследований методом ЭМ образцы пористого кремния готовят путем механического или химического полирования [9]. Затем образцы помещаются на проводящую подложку, и в вакуумной камере подвергаются воздействию электронного пучка для получения изображений [9]. Изображение взаимодействия представлено на рисунке 6.

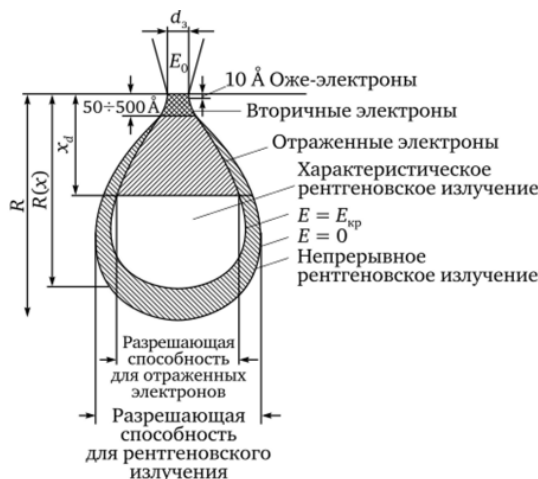


Рис. 6. Схема взаимодействия электронного пучка с образцом [8]

Одним из основных видов электронной микроскопии, применяемых для исследования ПК, является сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) [10]. Она позволяет просматривать поры и каналы пористого кремния в трехмерном виде. Для получения еще более детальной информации о внутренней структуре ПК применяется просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) [10]. Этот метод позволяет исследовать образцы на атомарном уровне и получать изображения внутренней структуры материала с высоким разрешением.

Методы сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ)

Методы сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) в своей основе представлены сканирующей туннельной (СТМ) и атомно-силовой микроскопией (АСМ) [11]. Они являются передовыми техниками наномасштабного анализа поверхности материалов. СТМ и АСМ позволяют наблюдать и измерять поверхность материала с нанометровым разрешением. С помощью этих методов можно изучать как морфологию поверхности, так и механические, электрические и оптические свойства ПК.

СТМ – это метод, основанный на использовании зонда (с радиусом закругления порядка нескольких атомов), который сканирует поверхность образца и регистрирует изменения электрического взаимодействия между зондом и поверхностью [12]. АСМ работает на основе измерения сил ближнего взаимодействия между зондом и образцом и может применяться для непроводящих материалов [12]. Одним из преимуществ методов СТМ и АСМ является их невысокое влияние на образец, что позволяет проводить измерения в условиях близких к реальным. Также эти методы могут быть использованы для изучения образцов в различных средах, включая вакуум, газы и жидкости [13]. Схемы работы СТМ и АСМ представлены на рисунках 7 и 8.



Рис. 7. Схема работы СТМ [11]

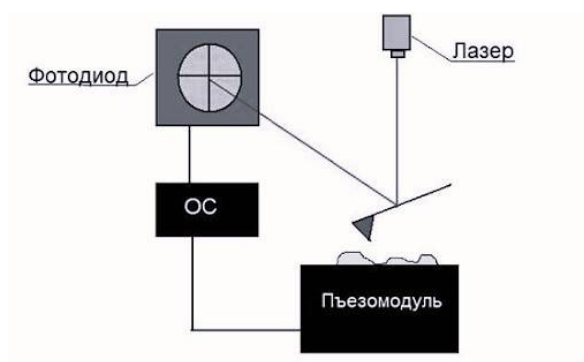


Рис. 8. Схема работы АСМ [11]

Наиболее перспективное применение СТМ и АСМ методик связано с локальным наноконтактным (схематичное изображение и структурная схема представлены на рисунках 9, 10) измерением электрофизических характеристик ПК, таких как удельного сопротивления, концентрации и подвижности носителей заряда, глубины диффузии, плотность дефектов и др [13].

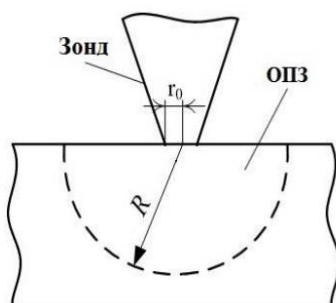


Рис. 9. Схематичное изображение точечного барьерного контакта (штриховой линией показан край ОПЗ) [14] [16]

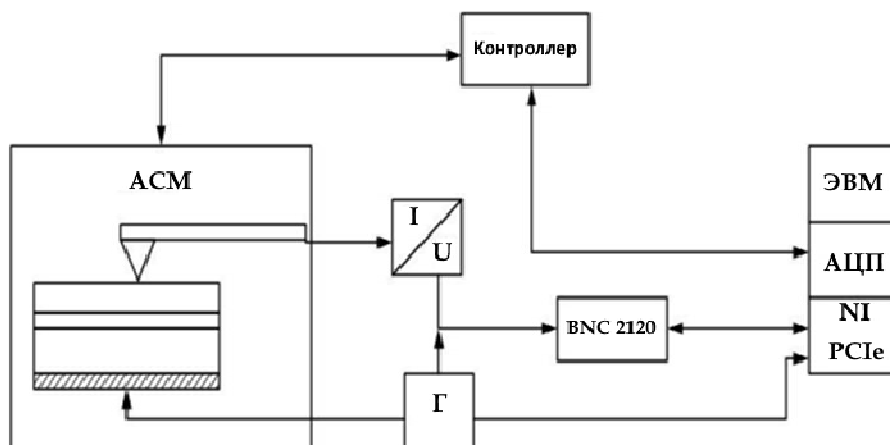


Рис. 10. Структурная схема измерительно-аналитического комплекса [15] [17]

Отдельное внимание в случае ПК заслуживают объемная плотность зарядов поверхности и объемная диффузионная емкость, так как эти параметры напрямую связаны с морфологией ПК. Полученные измерения можно использовать для построения карт распределения данных параметров как по поверхности образца, так и в его объеме (пример представлен на рисунке 10) [13].

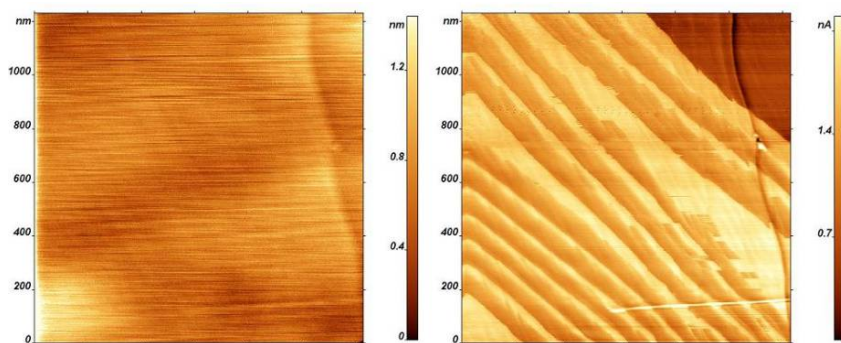


Рис. 10. Топография поверхности графита (слева) и распределение тока по поверхности (справа) [13]

Для проведения подобных исследований используется зонд, который обеспечивает крайне малый (нанометровый) размер контакта с поверхностью образца, что позволяет измерять электрические свойства в масштабах нанометров [12]. Одним из основных параметров, изучаемых с помощью этого метода, является сопротивление растекания. Сопротивление растекания характеризует электрические свойства ПК в местах наличия дефектов или особенностей структуры, таких как поры или микротрещины. Измерение этого параметра позволяет выявить места потенциальных проблем в ПК и оптимизировать его структуру для улучшения производственных процессов и качества конечных изделий [11].

Работа выполнена в РГРТУ с использованием научного оборудования РЦЗМкп РГРТУ им. В.Ф. Уткина.

Библиографический список:

1. Томашев М.В. Современные методы исследования полупроводников. И.: Физматлит Москва, 2002 г., 288 с.
2. Топалов И.Н. Ядерный магнитный резонанс: принципы и приложения. И.: Наука, 2005 г., 320 с.
3. Телищев В.М. Ядерный магнитный резонанс: от теории к практике. И.: БХВ-Петербург, 2012 г., 416 с.
4. Hornak J.P. Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy: An Introduction to Principles, Applications, and Experimental Methods. Prentice Hall, 1996, 288 p.
5. Иванов А.А. Спектроскопия поглощения рентгеновского излучения. И.: Наука, 2010 г., 250 с.
6. Сидоров В.В. Основы спектроскопии поглощения рентгеновского излучения. И.: Просвещение, 2008 г., 200 с.
7. Brown C. Fundamentals and Applications of X-ray Absorption Spectroscopy. CRC Press, 2019, 400 p.
8. Каневский М.В., Скочев А.А. Электронная микроскопия: принципы и методы. И.: Лань, 2010 г., 480 с.
9. Шварцберг А.Д. Обзор методов электронной микроскопии. И.: Медицина, 2014 г., 240 с.
10. Glauert M.A. Electron Microscopy: Methods and Protocols. Humana Press, 2019, 300 p.
11. Чепурной Н.И. Сканирующая зондовая микроскопия наноструктур и наноматериалов. И.: Наука, 2015 г., 320 с.
12. Скуратов Г.Е. Принципы работы сканирующей зондовой микроскопии. И.: Мир, 2011 г., 176 с.
13. Paula Harms M.M., Laterveer E. Scanning Probe Microscopy: Characterization, Nanofabrication, and Device Application of Nanostructures. Springer, 2011, 331 p.
14. Литвинова В.С., Литвинов В.Г. Векторный анализ электрической цепи наноконтакта металл – полупроводник // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. Вып. 47. № 3. С. 116-120.
15. Кусакин Д.С., Литвинова В.С., Литвинов В.Г., Воробьев Ю.В., Рыбин Н.Б. Методика локального измерения электрической емкости фемтофарадного диапазона точечного барьерного контакта металл-полупроводник // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. Вып. 50 Часть 2. № 4. С. 122-125.

16. Кусакин Д.С., Литвинов В.Г., Рыбин Н.Б., Ермачихин А.В., Воробьев Ю.В. Анализ электрических свойств точечного барьерного контакта металл-полупроводник // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. Вып. 53. №3. С. 149-153.

17. Кусакин Д.С., Литвинов В.Г. Измерение электрической емкости точечного барьерного контакта металл-полупроводник // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. Вып. 54. Часть 2. № 4. С. 132-136.

УДК 621.382; ГРНТИ 47.33.31

ТЕСТОВЫЕ СТРУКТУРЫ И ОСНОВНЫЕ ИЗМЕРЯЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

К.С. Зайцев, В.Г. Литвинов

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, kasperskiy219@gmail.com*

Аннотация. В данной статье рассматриваются тестовые структуры применяемые при производстве интегральных микросхем, а так же электрофизические параметры получаемые с помощью данных структур. В работе произведен обзор некоторых тестовых структур, их преимущества и недостатки, требования к конструкции ячеек. Перечислены основные характеристики используемые при проектировании и отработке технологических операций на производстве.

Ключевые слова: тестовые структуры, электрофизические параметры ИМС.

TEST STRUCTURES AND THE MAIN MEASURED PARAMETERS OF SEMICONDUCTOR DEVICES

K.S. Zaitsev, V.G. Litvinov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russian Federation, Ryazan, kasperskiy219@gmail.com*

Annotation. This article discusses the test structures used in the manufacture of integrated circuits, as well as the electrophysical parameters obtained using these structures. The paper provides an overview of some test structures, their advantages and disadvantages, and cell design requirements. The main characteristics used in the design and development of technological operations in production are listed.

Keywords: test structures, electrophysical parameters of the IC.

В процессе производства ИМС при отработке технологических операций необходимо контролировать большое количество различных параметров, непосредственно влияющих на качество изготавливаемых микросхем. Данные параметры определяют с помощью различных тестовых структур, которые могут использоваться для широкого круга задач включая разработку и тестирование технологии, контроль дефектов, тесты на надежность и т.д. В данной статье производится обзор тестовых структур и методов применяемых при проведении измерений основных электрофизических параметров ИМС.

Тестовая структура представляет собой определённым образом сконструированную и сформированную на полупроводниковой пластине схему, которая используется для контроля технологического процесса и основных параметров микроэлектронных изделий. Данные структуры изготавливаются в одном технологическом цикле с реальными изделиями, чтобы определять погрешности формирования геометрических и электрофизических параметров. Тестовые структуры состоят из совокупности элементов, которые не входят в состав готовых изделий. Их основное предназначение это получение данных, позволяющих производить расчеты характеристик качества технологических процессов и критериев годности изготавливаемых изделий. Таким образом тестовая схема, состоящая из определенного набора элементов, является инструментом для получения необходимой информации об изготавливаемых интегральных схемах.

С помощью тестовых структур, возможно производить контроль технологических процессов и различных физических параметров:

- Точность совмещения фотошаблонов при проведении фотолитографии.
- Влияние механических напряжений на элементы интегральной микросхемы.
- Целостность и качество выполнения разводки и контактов.
- Величину и распределение заряда в окисле.
- Определять сопротивление изоляции и т.д.

На биполярных кристаллах измеряется около тридцати всевозможных параметров, толщины окислов, контактные сопротивления, характеристики диффузионных и имплантированных областей.

К конструкции тестовых ячеек предъявляют ряд требований, основными из которых являются:

- У тестовой структуры должен быть один порядок степени интеграции и плотности упаковки с проверяемым элементом.
- Тестовая структура должна быть изготовлена по таким же технологическим процессам, что и основное изделие.
- Возможность простого и быстрого (с применением автоматизированных систем) контроля физических и технологических параметров каждого элемента ТС.

Существует множество различных видов тестовых структур. Например, крестообразная структура, применяемая для контроля правильности процесса формирования легированных слоев. Существуют несколько конфигураций крестообразных структур, на рис. 1 изображена одна из них. Изготавливаются четыре площадки обеспечивающие контакт с полупроводником, две подключаются к источнику тока, две к вольтметру. На рис. 1 толстыми линиями обозначен исследуемый легированный слой полупроводника, к которому подведены прямоугольные контактные площадки I1, I2 и U1, U2.

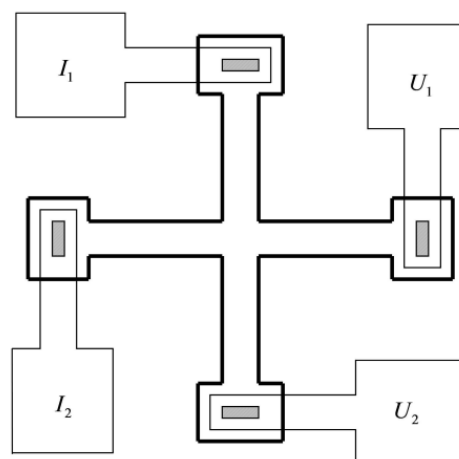


Рис. 1. Крестообразная ТС

Качество легированного слоя будет определяться поверхностным сопротивлением, которое находится из выражения (1):

$$R_p = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot \frac{U}{I}, \quad (1)$$

где I - ток, протекающий через токовые контакты;

U - падение напряжения, измеряемое с помощью потенциальных контактов.

Преимуществом таких структур является простота изготовления, результаты измерений нечувствительны к изменению параметров фотошаблонов и к изменению размеров структуры при фотолитографии.

В технологическом процессе изготовления ИМС используют параметр удельного сопротивления для оценки качества слоёв металлизации. Данный параметр влияет на величину потерь в линиях металлизации. Если рассматривать самый простейший случай, то для измерения можно использовать простейший пленочный резистор. Но крестообразные структуры изготовленные не из полупроводника, а из металла имеют меньший размер и не проигрывают в точности.

Приведенное контактное сопротивление является определяющим в случае когда необходимо оценить качество омических контактов. Данное сопротивление необходимо получить как можно меньшим, для его определения используются специальные структуры. Одним из методов является изготовление цепи из последовательно соединенных омических контактов. Такая структура дает получить усредненное значение контактного сопротивления, но при этом занимает значительную площадь.

В методе TLM используется тестовая схема состоящая из четырех омических контактов на разном расстоянии друг от друга.

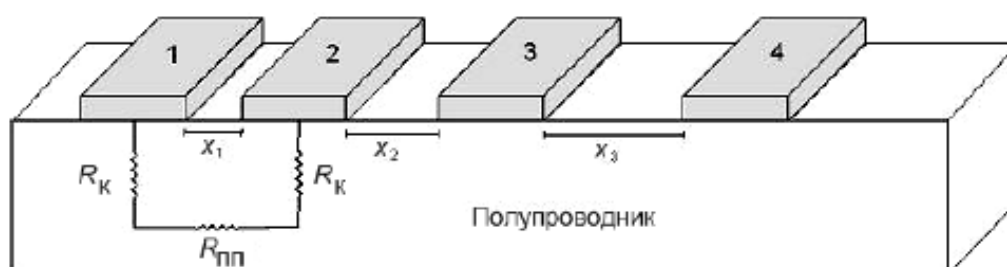


Рис. 2. TLM структура

По сравнению с предыдущей данная схема занимает меньшую площадь. Суть данного метода заключается в том, что сопротивление измеряется между каждой парой ближайших контактов, а затем строится график зависимости сопротивления от расстояния между контактными площадками и по нему определяется контактное сопротивление.

Для оценки качества диэлектрика можно использовать конденсаторную структуру металл-диэлектрик-металл (МДМ). Чаще всего для оценки измеряется относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс диэлектрических потерь. Также помимо конденсаторной структуры можно использовать два меандровых резистора, разделенные слоем диэлектрика, и измерять ток утечки между этими резисторами.

На этапе отработки тех. операций важными параметрами так же является концентрация и подвижность носителей заряда. Для измерения этих параметров применяют метод Холла. Он заключается в том, что образец помещают в постоянное магнитное поле и измеряют разность потенциалов между противоположными сторонами образца, возникающую из-за силы Лоренца, которая действует на носители заряда. Определение данных параметров основано на соотношении постоянной Холла, которая характеризует величину отклика в направлении, перпендикулярном току и полю. В предположении близости холл-фактора к единице, постоянная холла равна:

$$R_H = \frac{\mu_n}{\sigma}, \quad (2)$$

где μ_n – подвижность носителей; σ – электропроводность материала.

Экспериментально определив электропроводность и постоянную холла из уравнения можно найти холловскую подвижность. Данное значение, как правило, близко к значению подвижности носителей заряда.

Для оценки качества межэлементных соединений применяется трехдорожечная структура (рис. 3). Данная тестовая схема специально выполняется с минимальной шириной дорожек разной длины. На рисунке цифрой 1 обозначена токоведущая дорожка, цифрой 2 контактная площадка. Для оценки качества и надежности пересечений элементов коммутации служит тестовая схема (рис. 4), которая содержит около 3000 пересечений.

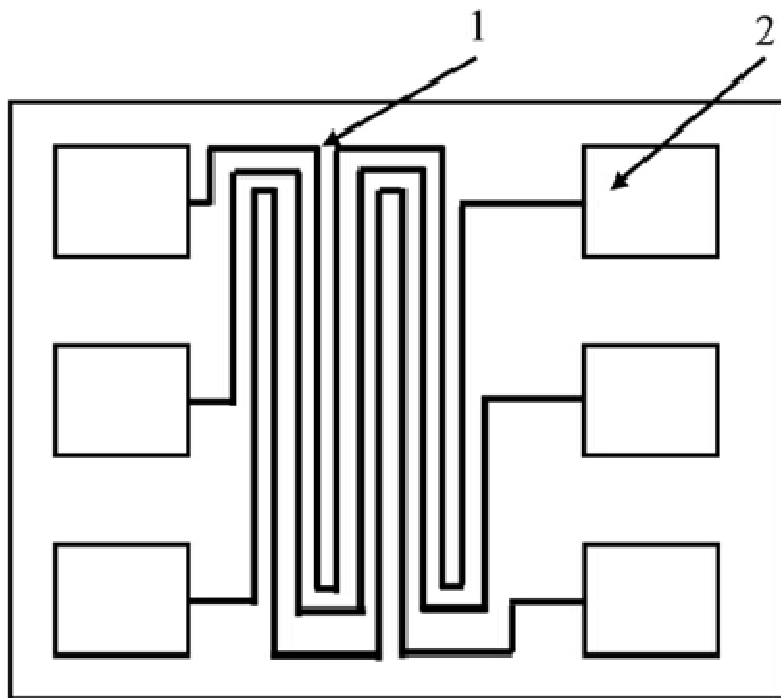


Рис. 3. Трехдорожечная тестовая структура

Данные которые получают с помощью тестовых структур используются автоматизированными системами управления качеством ИМС. С помощью данных систем строятся карты распределения годных или же негодных микросхем изготовленных на одной или нескольких пластинах.

Тестовые структуры используются в исследовании механизмов отказов, с их помощью можно прогнозировать надежность. Также тестовые структуры изготавливают в виде отдельных самостоятельных элементов, после чего их герметизируют в корпуса и подвергают испытаниям в различных условиях. Испытания проводятся с целью выявления основных механизмов отказа изготавливаемых микросхем, определения энергий активации процессов деградации и получения количественных характеристик надежности. Используя тестовые структуры производят построение моделей надежности ИМС. Исследуются также различные дефекты как электромиграция, коррозия, разогрев носителей заряда в МОП транзисторах и т.д. Для разных базовых технологий производства необходимо использовать свой набор тестовых структур, так как механизмы отказа и их влияние на ИМС может отличаться в зависимости от технологии. В состав тестовых структур могут входить как специально сконструированные элементы, предназначенные для оценки параметров физической структуры и их стабильности при воздействии различных нагрузок, так и реальные элементы, используемые в микросхемах. Эти элементы могут быть представлены как в единичных количествах, так и в виде регулярных структур (цепей, блоков), состоящих из большого количества однотипных

элементов (сотни, тысячи) в одной тестовой структуре, используемых для прогнозирования количественных показателей надежности основных элементов, входящих в состав микросхемы.

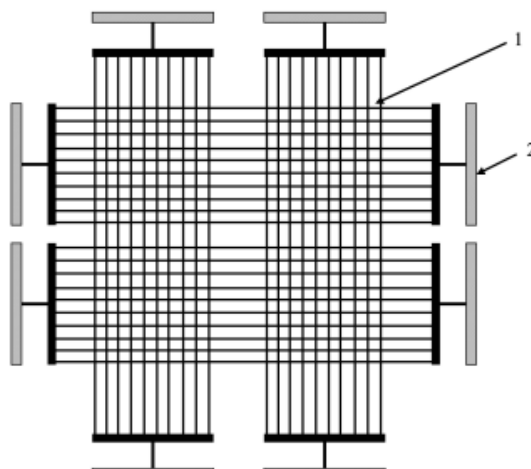


Рис. 4. Тестовая структура для оценки качества и надежности пересечений элементов коммутации

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003) с использованием научного оборудования РЦЗМкп РГРТУ им. В.Ф. Уткина.

Библиографический список

1. А.С. Сальников, А.Ю. Ющенко: Обзор тестовых структур для измерения электрофизических параметров материалов, 2010.
2. Walton A.J. Microelectronic Test Structures // Proc. IEEE Int. Conf. on Microelectronic Test Structures. – Monterey, 1997.
3. Sze S.M. Physics of Semiconductor Devices. – 2nd Ed. – Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, 1985. – 351 p.

УДК 621.315.592; 524.85 ГРНТИ 47.33.33; 41.29

ОБЗОР ВЛИЯНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ ИК ДИАПАЗОНА НА КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

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 фотоприемников инфракрасного диапазона и их применение для астрономических и космологических исследований. Приводятся примеры получения новых результатов и развития представлений о строении вселенной за счет использования приемников излучения с более высокими качественными характеристиками.

Ключевые слова: инфракрасное излучение, фотоприемник, фотоэлектрический преобразователь, космология.

REVIEW OF THE MODERN IR PHOTODETECTORS INFLUENCE ON COSMOLOGICAL RESEARCH

D.V. Litvinova¹, V.S. Litvinova²

¹*Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,
Russia, St.Petersburg, dv_lit@mail.ru*

²*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, varvara_lit@mail.ru*

The summary. The paper discusses the main types of infrared photodetectors and their application for astronomical and cosmological research. Examples are given of obtaining new results and developing ideas about the structure of the universe through the use of radiation detectors with higher quality characteristics.

Keywords: infrared radiation, photodetector, photoelectric converter, cosmology.

Фотоприемники (ФП) нашли широкое применение при построении различных радиотехнических устройств и систем. Изучение окружающей среды и различных физических явлений и эффектов породило необходимость создания приемников или детекторов излучения ультрафиолетового, видимого и инфракрасного (ИК) диапазона. Особый интерес для специалистов и ученых представляет анализ ИК излучения, способного проникать через облака водяного пара и газопылевые преграды. В течение 20 века бурно развивалось направление по поиску материалов и созданию приборов для приема и анализа ИК излучения.

В настоящее время весь ИК диапазон разделяют на пять областей: ближний инфракрасный (NIR), коротковолновый инфракрасный (SWIR), средневолновый инфракрасный (MWIR), длинноволновый инфракрасный (LWIR) и дальний инфракрасный (FIR) [1].

Открытия в области астрономии всегда были связаны с введением в эксплуатацию более новых, совершенных, чувствительных инструментов для наблюдения - телескопов. Вначале конструкции телескопов эволюционировали в сторону увеличения диаметра зеркала. Обсерватории стремились построить в высокогорной местности, чтобы уменьшить проблему, связанную с паразитной засветкой от населенных пунктов, запыленностью атмосферы. С началом космической эры развития человечества стали ясны очевидные преимущества построения или размещения обсерваторий в космическом пространстве.

Самым известным таким телескопом на данный момент следует считать «Хаббл», запущенный на околоземную орбиту в 1990 году. По данным из открытых источников информации с помощью данного телескопа сделано около 1 миллиона наблюдений разных частей вселенной. К выдающимся открытиям относят оценку возраста вселенной 13,8 миллиардов лет и открытие экзопланет. Самый далекий объект – наблюдение галактики GN-z11 какой она была 13,4 миллиарда лет назад. Диапазон длин волн, на которых работает телескоп, 0,11 – 2,5 мкм.

Основной инструмент телескопа «Хаббл» - камера ближней инфракрасной области NICMOS (от англоязычного названия Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer). Данный детектор необходимо охлаждать, чтобы обеспечить работу в инфракрасном диапазоне. Детектор чувствителен к излучению в диапазоне 0,8 – 2,5 мкм и состоит из двух частей. Одна часть обеспечивает чувствительность в видимом и ультрафиолетовом диапазоне с заходом в ИК область (UVIS) от 200 до 1000 нм, выполнена на основе кремниевой CCD 16 мегапиксельной матрицы. Вторая часть обеспечивает чувствительность для излучения от 850 нм и более, выполнена на основе 1 мегапиксельной матрицы из HgCdTe [2].

Есть также интересный космический телескоп ИК диапазона «Спитцер» - запущен в работу в 2003 году. Его рабочий диапазон длин волн 3,6 – 160 мкм обеспечивает наблюдение за самыми тусклыми и удаленными объектами во вселенной. Телескоп в настоящее время не работает из-за отсутствия охлаждения ИК камеры. Инфракрасная камера была настроена на работу на четырех длинах волн (3,6 мкм, 4,5 мкм, 5,8 мкм и 8 мкм). В коротковолновой области использовался датчик на основе InSb, а для длинноволновой – датчик на основе Si, ле-

гированного As (примесная полоса поглощения). С помощью данного телескопа впервые детально были изучены звездные ясли и формирование молодых звезд, что стало возможно, благодаря технике детектирования ИК излучения. Также с помощью данного телескопа впервые был зафиксирован свет от экзопланет с помощью прямого наблюдения.

В 2004 году с помощью «Спитцера» была обнаружена образовавшаяся «молодая» звезда в темной туманности L1014. До этого момента техника не позволяла что-нибудь разглядеть в подобных туманностях. «Спитцеру» также принадлежит открытие звезд, образовавшихся всего через 100 миллионов лет после «Большого взрыва».

Сдерживающим фактором для долгой и надежной эксплуатации космических обсерваторий является необходимость использования системы охлаждения телескопа и его отдельных узлов. Чтобы тепловое излучение от Солнца не влияло на работу фотоприемников используют защитный экран. Для снижения теплового шума ИК детекторов их нужно охлаждать до температур значительно ниже 100 К. Например миссия телескопа «Спитцер» в 2009 году из-за того, что в охлаждающей системе стал заканчиваться жидкий гелий, была изменена с «Холодной» на «Теплую», которая завершилась отключением телескопа в 2020 году. Во время «Теплой» миссии работа телескопа осуществлялась в коротковолновой части ИК диапазона.

Также самым выдающимся по конструкции является космический телескоп «Джеймс Уэбб» [3]. В космической обсерватории «Джеймс Уэбб» ведутся наблюдения за астрономическими объектами в диапазоне частот от длинноволновой (красной) части видимого света до среднего инфракрасного (0,6—28,3 мкм). Это позволило открыть еще более далекие по сравнению с обнаруженными ранее с помощью телескопа Хаббл объекты во Вселенной, поскольку излучение от этих объектов имеет меньшую интенсивность и большее красное смещение. Такие объекты принято считать первыми галактиками и звездами, появившимися с момента образования Вселенной (Большого взрыва). С помощью телескопа «Джеймс Уэбб» ведутся наблюдения в более длинноволновом диапазоне частот - от видимого красного света до среднего инфракрасного (0,6—27,9 мкм). На телескопе смонтировано четыре инфракрасных инструмента:

- камера ближнего инфракрасного диапазона на диапазон 0,6 – 5 мкм на основе массива HgCdTe детекторов;
- спектрограф ближнего инфракрасного диапазона на диапазон 0,6 – 5,3 мкм;
- средне-инфракрасный прибор на диапазон 4,9 – 27,9 мкм состоит из трех массивов мышьяко-кремниевых детекторов;
- устройство формирования изображения в ближнем инфракрасном диапазоне и бесщелевой спектрограф.

С помощью камеры ближнего ИК диапазона планируется:

- обнаружение и изучение и изучение образования самых ранних звезд с низкой металличностью;
- поиск объектов в поясе Койпера;
- детальное изучение нашей галактики Млечный Путь;
- изучение красного смещения галактик для понимания закономерностей расширения Вселенной;
- поиск темной материи, картирование ее распределения с помощью методики гравитационного линзирования света массивными объектами.

Спектрограф ближнего инфракрасного диапазона позволяет изучать спектр излучения далеких источников и на его основе делать выводы о физических и химических свойствах исследуемых объектов – массе, температуре, химическом составе. Спектрограф позволяет изучать настолько тусклые объекты, что накопление света от них может занимать несколько сотен часов. Прибор является уникальным, поскольку позволяет наблюдать одновременно за сотней объектов на площади размером 3'x3'. Такая выдающаяся характеристика стала воз-

можно благодаря использованию массива управляемых магнитным полем микрозатворов, т.е. МЭМС.

Прибор для работы в среднем диапазоне инфракрасного излучения содержит фотоприемную матрицу с разрешением 1024 на 1024 пикселей на основе кремния, легированного мышьяком. Отличительной особенностью прибора является рабочая температура 7 К. Прибор позволяет изучать красное смещение самых далеких галактик, которые смогли увидеть к настоящему моменту. Кроме этого, прибор позволит увидеть слабо видимые кометы и темные объекты в поясе Койпера, возможно открыть новые планеты в нашей солнечной системе.

Устройство формирования изображения в ближнем инфракрасном диапазоне и бесщелевой спектрограф предназначен для детального изучения экзопланет в трех диапазонах длин волн и проведения спектроскопических исследований.

Таким образом, развитие конструирования и технологии приемников ИК излучения наряду с разработкой более совершенной конструкции телескопов позволяет увидеть новые границы наблюдаемой части Вселенной, открывать и изучать новые космические объекты, узнавать новые характеристики уже известных объектов.

Библиографический список

1. Jian Chen, Jiuxu Wang, Xin L, Jin Chen, Feilong Yu, Jiale He, Jian Wang, Zengyue Zhao, Guanhai Li, Xiaoshuang, Wei Lu. Recent Progress in Improving the Performance of Infrared Photodetectors via Optical Field Manipulations Sensors, 2022. 22. 677.
2. <https://esahubble.org> (Дата обращения 29.02.2024 г.).
3. <https://webbtelescope.org> (Дата обращения 29.02.2024 г.).

СЕКЦИЯ «ПРОМЫШЛЕННАЯ СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ»

УДК 621.317; ГРНТИ 58.33.81.

МЕТОД НАБЛЮДЕНИЯ И АНАЛИЗА ПОКАЗАНИЙ СЧЕТЧИКОВ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ РАСПОЗНАВАНИЯ ТЕКСТА

А.В. Несудимов, В.С. Иванов

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

Аннотация. В работе рассматривается пример извлечения показаний аналоговых счетчиков из их фотографии с помощью алгоритмов распознавания образа и текста на базе компьютерной системы.

Ключевые слова: глубокое обучение, алгоритм You Only Look Once (YOLO), технология MICAPS, преобразование Хафа, алгоритм Чжан-Суэна, операторы Собеля, оптическое распознавание символов

METHOD OF MONITORING AND ANALYZING METER INDICATIONS BASED ON TEXT RECOGNITION TECHNOLOGIES

A.V. Nesudimov, V.S. Ivanov

Ryazan State Radioengineering University named after V.F. Utkin,
Russian Federation, Ryazan, zapasnouadres@gmail.com

Annotation. The paper discusses an example of extracting analog meter readings from their photographs using image and text recognition algorithms based on a computer system.

Keywords: Deep learning, You Only Look Once (YOLO) algorithm, MICAPS technology, Hough transform, Zhang-Suen algorithm, Sobel operators, optical character recognition

Интеллектуальное наблюдение и анализ на основе технологии распознавания изображений (рис.1) может обеспечить учет данных в режиме реального времени для энергетических систем, повышая эффективность и уровень управления энергопотреблением. В контексте Индустрии 4.0 и цифровой трансформации различные отрасли постоянно движутся в сторону интеллектуального развития. Энергетическая отрасль также движется в этом направлении и, если идти в ногу со временем, то может использовать распознавание изображений и другие технологические средства для интеллектуального наблюдения и анализа энергопотребления.

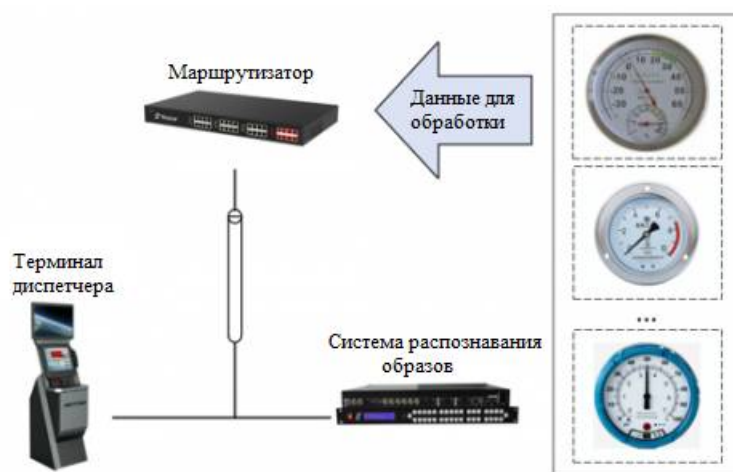


Рис. 1. Общая архитектура интеллектуальной системы наблюдения и анализа

Алгоритм глубокого обучения You Only Look Once (YOLO)[1] - база данных, содержит 10 000 изображений счетчиков электроэнергии, которая дополнительно включает в себя развороты в плоскостях пространства и улучшения масштабирования данных, чтобы сделать алгоритм глубокого обучения устойчивым к подобным изменениям изображений. Для обучения и оценки набор данных изображений аннотируется, чтобы получить достоверную информацию для всех изображений. Предложенный метод может оказаться очень полезным для сокращения времени и усилий, затрачиваемых на текущие показания счетчиков электроэнергии, т. е. посещения работниками домохозяйств, фотографирования счетчиков электроэнергии и ручного извлечения показаний из этих изображений.

MICAPS — это технология извлечения данных на основе изображений. MICAPS реализуется за счет интеграции Raspberry Pi с камерой Raspberry Pi cam. Код на языке Python используется для настройки камеры, захвата изображений и отправки их в облако базы данных Azure на платформе SQL Server. Это изображение представляет собой визуальный образ из семи сегментов. А для преобразования этого семи- сегментного образа в текст уже используется алгоритм оптического распознавания компьютерным зрением.

Предварительная обработка шкал аналоговых счетчиков

Для определения центра изображения счетчика примем:

$$\begin{aligned}x_c &= x - x_- / x_+ - x_{-1} \\y_c &= y - y_- / y_+ - y_{-1}\end{aligned}\quad (1)$$

Предположим что $C(n)$ отображает значение оттенка серого для точки пикселя (x, y) , а значения оттенков четырех расположенных рядом пикселей отображены как C_{--} , C_{+-} , C_{-+} и C_{++} . При прохождении по изображению, формула линейной интерполяции оттенка серого будет:

$$C_{(n)} = x_c [y_c C_{--(n)} + (1 - y_c) C_{+- (n)}] + (1 - x_c) [y_c C_{-+ (n)} + (1 - y_c) C_{++ (n)}] \quad (2)$$

После этого можно получить изображение счетчика, пригодное для дальнейшего анализа преобразованием Хафа — это метод, используемый для обнаружения определенных геометрических фигур на изображениях, таких как линии и круги. Так можно обнаружить края циферблата прибора, тем самым точно позиционируя сам циферблат. В то же время он может обнаруживать прямые линии на изображении, что помогает найти и обнаружить указатель, что уже используется для расчета угла указателя и расчета показаний. Для обнаружения круга пространство параметров включает координаты центра круга (x, y) и радиус r . Преобразование Хафа находит наиболее вероятную комбинацию параметров, представляющую круг, путем дискретизации и накопления в пространстве параметров. Перед выполнением преобразования сначала выполняется обнаружение края на изображении, чтобы извлечь информацию о краях циферблата прибора. Затем согласно уравнению окружности рисуется окружность в пространстве параметров для каждой краевой точки изображения, приняв точку в качестве точки на окружности, а центр окружности и радиус в качестве параметров. В пространстве параметров накапливаются все круги, соответствующие точкам края, и находится комбинация параметров с максимальным значением накопления, которое является обнаруженным круговым циферблатом. На рисунке 2 показана принципиальная схема обнаружения круга Хафа. Обнаружение находит круги с помощью механизма голосования. В частности, стандартное уравнение окружности:

$$(x - x_C)^2 + (y - y_C)^2 = R^2 \quad (3)$$

преобразуется в систему координат, которая имеет вид:

$$x_C = x - f \cos \varphi; y_C = y - f \sin \varphi \quad (4)$$

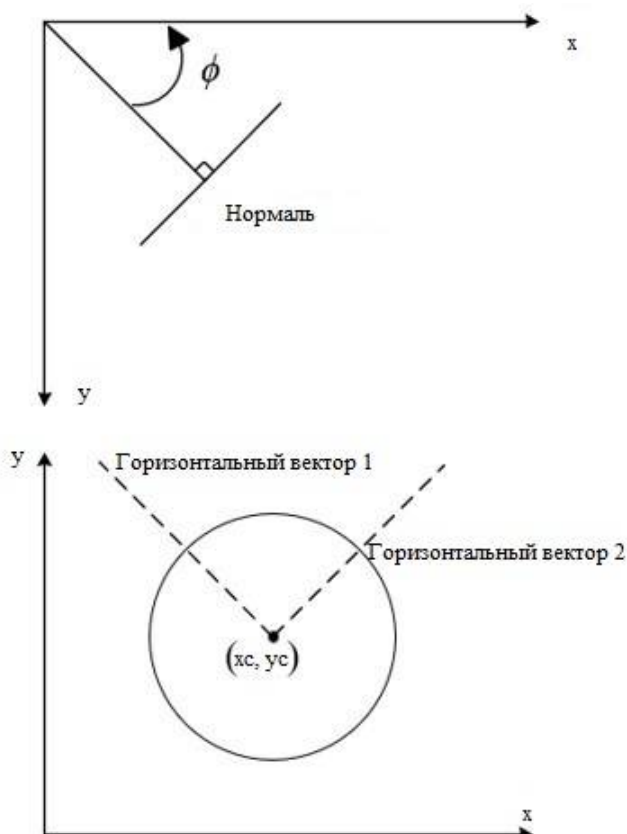


Рис. 2. Принципиальная схема обнаружения круга Хафа[2]

Обнаружение указателя аналоговых счетчиков

Обнаружение указателя и расчет угла указателя разделены на три этапа: определение местоположения области указателя и центра инструмента, уточнение указателя и подгонки линии, а также механизм определения направления указателя. На первом этапе определения области указателя и центра инструмента цель состоит в том, чтобы определить приблизительное положение указателя в инструменте относительно центра циферблата. Методы обработки изображения используются для предварительной обработки изображения и выделения края циферблата. Затем для поиска области циферблата используется анализ подключенной области или метод обнаружения контуров. Затем, вычисляя геометрический центр области циферблата или используя преобразование круга Хафа для определения центра, получают центральное положение инструмента. Наконец, анализируя информацию о цвете, оттенках серого или краях в области циферблата, можно предварительно определить область указателя.

На втором этапе уточнения указателя и подгонки линии цель состоит в том, чтобы извлечь скелет указателя и вычислить линию его подгонки. Алгоритм Чжан-Суэна можно использовать для обработки области указателя. Этот шаг может устранить различия в ширине указателя и сделать его шириной в один пиксель. Затем скелет указателя подгоняется с ис-

пользованием метода наименьших квадратов, получая линию, представляющую направление указателя. Эта линия может помочь вычислить угол между указателем и центром инструмента. [3]

Алгоритм Чжан-Суэна[4] — это классический алгоритм прореживания двоичных изображений. Он извлекает скелет изображения путем итеративного удаления краевых пикселей. При использовании алгоритма для извлечения скелета в области указателя важно выполнить операции предварительной обработки изображения перед выполнением алгоритма, чтобы улучшить его производительность. Они могут включать в себя операции шумоподавления, сглаживания и повышения резкости. Алгоритм может создавать несовершенные скелеты, имеющие небольшие разрывы и бифуркации. В практических приложениях операции постобработки (например, морфологические операции) могут использоваться для оптимизации результатов построения скелета и повышения точности обнаружения указателя и расчета угла. При преобразовании изображения области указателя в бинарное изображение следует выбрать соответствующий метод бинаризации. Различные методы бинаризации могут привести к разным эффектам уточнения, поэтому необходимо выбирать подходящий метод, исходя из реальной ситуации. Чтобы избежать бесконечных циклов, в качестве условия завершения алгоритма можно установить максимальное количество итераций. Когда количество итераций достигнет максимального значения, итерационный процесс следует прекратить, даже если изображение все равно изменяется. Кроме того, скелет указателя подбирается с использованием метода наименьших квадратов для подгонки линий. Метод наименьших квадратов заключается в вычитании фактического измеренного значения скелета указателя из теоретического значения и затем взятии минимальной суммы квадратов результатов расчета. Если имеется i точек подгонки $((x_n, y_n), (n=1, 2, \dots, i))$, а фактическая точка представлена y_{cn} , выражение подходящей линии имеет вид:

$$y(x) = x_c x + y_c \quad (5)$$

Формула суммы квадратичных отклонений:

$$h^2 = \sum_{n=1}^i (y_n - y(x_n))^2 = \sum_{n=1}^i (y_n - (x_c x_n + y_c))^2 \quad (6)$$

Чтобы найти значения x_c и y_c , которые обеспечивают минимальное h , находятся частные производные h по неизвестным x_c и y_c , и приравняются к 0 (Е). Следующая формула позволяет рассчитать x_c и y_c :

$$x_c = \frac{i \sum_{n=1}^i x_n y_n - \sum_{n=1}^i x_n \sum_{n=1}^i y_n}{i \sum_{n=1}^i x_n^2 - \left(\sum_{n=1}^i x_n \right)^2} \quad (7)$$

$$y_c = \frac{\sum_{n=1}^i x_n^2 \sum_{n=1}^i y_n - \sum_{n=1}^i x_n \sum_{n=1}^i x_n y_n}{i \sum_{n=1}^i x_n^2 - \left(\sum_{n=1}^i x_n \right)^2}$$

На третьем этапе работы механизма определения направления указателя, цель состоит в том, чтобы определить фактическое направление указателя и вычислить угол. На основе линии подгонки, полученной на предыдущем шаге, можно рассчитать угол между линией и

центром инструмента. Однако, поскольку указатель имеет два конца, необходимо дополнительно определить, какой конец является фактическим указательным концом. Это можно сделать исходя из длины, цвета, формы и других особенностей указателя. Например, заостренный конец указателя обычно короче и темнее по цвету. С помощью механизма определения направления указателя можно получить точный угол. Таблица 1 демонстрирует работу механизма определения направления указателя.

Таблица 1. Механизм определения направления указателя

хс	ус	Квадрант	Угол
$S_{хс} > E_{хс}$	$S_{ус} = E_{ус}$	у-положит. полуось	$\phi = 0^\circ$
$S_{хс} < E_{хс}$	$S_{ус} = E_{ус}$	у-отриц. полуось	$\phi = 180^\circ$
$S_{хс} < E_{хс}$	$S_{ус} < E_{ус}$	х-положит. полуось	$\phi = 90^\circ$
$S_{хс} = E_{хс}$	$S_{ус} > E_{ус}$	х-отриц. полуось	$\phi = 90^\circ$
$S_{хс} > E_{хс}$	$S_{ус} < E_{ус}$	Первый квадрант	$0^\circ < \phi < 90^\circ$
$S_{хс} > E_{хс}$	$S_{ус} < E_{ус}$	Второй квадрант	$90^\circ < \phi < 180^\circ$
$S_{хс} < E_{хс}$	$S_{ус} = E_{ус}$	Третий квадрант	$180^\circ < \phi < 270^\circ$
$S_{хс} > E_{хс}$	$S_{ус} < E_{ус}$	Четвертый квадрант	$270^\circ < \phi < 360^\circ$

Распознавание показаний аналогового счетчика

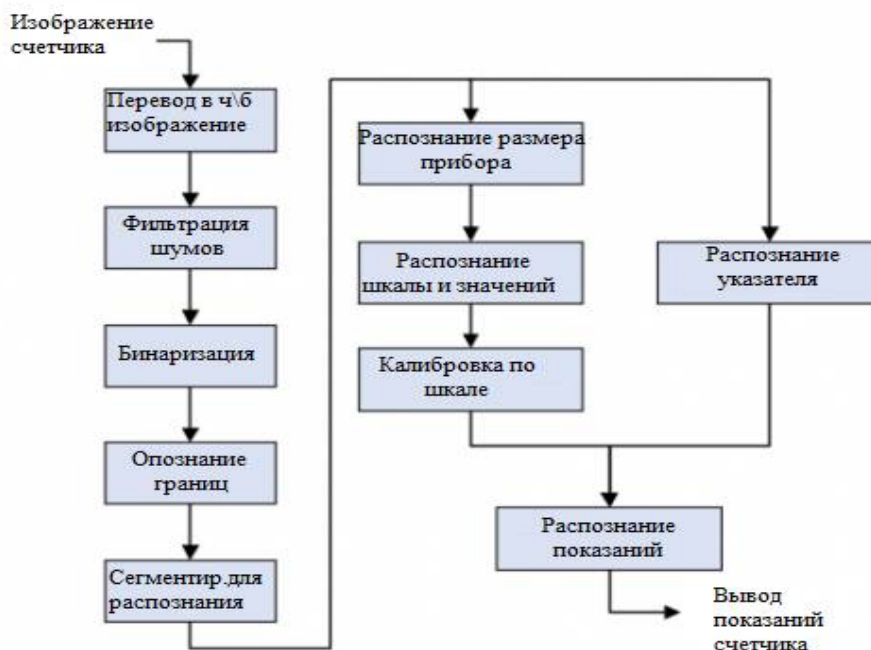


Рис. 3. Процесс распознавания показаний аналогового счетчика

На рисунке 3 представлен процесс распознавания показаний аналогового счетчика электроэнергии. После завершения предварительной обработки шкалы счетчика и обнаружения указателя необходимо извлечь шкалу счетчика. После обнаружения круглого циферблата счетчика для извлечения особенностей края циферблата используются алгоритмы обнаружения края или операторы Собеля[5]. Для изображения края циферблата для обнаруже-

ния линий масштаба используется преобразование Хафа. После обнаружения линий масштаба они фильтруются и классифицируются на основе таких характеристик, как длина и угол. Для отфильтрованных линий масштаба рассчитываются их углы с центром измерителя. Следует отметить, что метод расчета угла необходимо корректировать в соответствии с реальной ситуацией, чтобы адаптировать его к различным типам счетчиков. На основе углов линий шкалы и диапазона измерителя углы можно сопоставить с фактическими значениями. После расчета угла указателя он сопоставляется с извлеченными значениями масштаба.

Для распознавания текстовой области применяется технология оптического распознавания символов[6]. Распознанные значения шкалы сопоставляются с соответствующими основными линиями шкалы. Этого можно достичь путем сравнения положений области значений шкалы и основных линий. После завершения сопоставления получаются значения, соответствующие каждой основной линии шкалы счетчика.

После извлечения изображения значений шкалы дополнительно используется алгоритм быстрого распознавания символов на основе Вейвлетов [7] для распознавания значений шкалы. Вейвлет-преобразование может эффективно улавливать локальные особенности изображений, тем самым помогая повысить точность распознавания символов. Соответствующая базисная функция Вейвлета (например, Хаара, Добеши и т. д.) и уровень декомпозиции могут быть выбраны для удовлетворения потребностей распознавания. Проецируя изображение символов в двоичной сетке по вертикали и горизонтали, реализуется преобразование данных двумерного изображения в одномерные данные. Проецируемые данные разлагаются на два слоя вейвлетов, и информация об объектах извлекается из сглаженного компонента каждого слоя. Она сравнивается и анализируется с функциональной информацией символов шаблона, обеспечивая быстрое и эффективное распознавание символов.



Рис. 4. Результаты аппроксимации указателя прямой линией

На рисунке 4 показаны результаты аппроксимации указателя прямой линией. Наблюдая за этим результатом, можно обнаружить, что прямая линия подгонки скелета указателя очень близка к фактическому направлению указателя, что указывает на хороший эффект подгонки. В данной случае для аппроксимации скелета указателя используется метод наименьших квадратов с целью получить прямую линию с минимальной суммой расстояний от линии до каждой точки скелета указателя. Метод позволяет эффективно устранить влияние шума на изображении и на результат аппроксимации.

Заключение

В данной работе рассматривается метод наблюдения и анализа показаний стрелочных счетчиков на основе технологии распознавания изображений. Циферблат предварительно обрабатывается с помощью преобразования Хафа. После распознавания циферблата для обнаружения и расчета угла наклона стрелки используются анализ связанных компонентов, под-

гонка линий и механизм оценки направления стрелки. Приведены результаты подгонки линии стрелки, подтверждающие эффективность использования метода наименьших квадратов для подгонки скелета указателя. Распознано положение стрелок Ампер- и Вольтметра. Прогноз на будущее – применение методики для распознавания информации со всего спектра стрелочных счетчиков и указателей, применение распознавания текста на цифровых указателях, оценка эффективности метода, рассмотрение способов внедрения в системы SCADA управления.

Библиографический список

1. Joseph Redmon, Santosh Divvala, Ross Girshick, Ali Farhadi. (2016). You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection doi.org/10.48550/arXiv.1506.02640
2. Jiang, L., Wang, Z., Ye, Y., & Jiang, J. (2018). Fast circle detection algorithm based on sampling from difference area. Optik, 158, 424–433. doi:10.1016/j.jileo.2017.12.064 10.1016/j.jileo.2017.12.064
3. Wang, Z., Wang, K., Yang, F., Pan, S., & Han, Y. (2018). Image segmentation of overlapping leaves based on Chan–Vese model and Sobel operator. Information Processing in Agriculture, 5(1), 1–10. doi:10.1016/j.inpa.2017.09.005 10.1016/j.inpa.2017.09.005
4. Devyatkin, A.V., Muzalevskiy, A.R., Morozov, A.S. (2022). Computer vision system for image-based automated dial meter reading
5. Ravivarma, G., Gavaskar, K., Malathi, D., Asha, K. G., Ashok, B., & Aarthi, S. (2020). Implementation of Sobel operator based image edge detection on FPGA. Materials Today: Proceedings. doi:10.1016/j.matpr.2020.10.825 10.1016/j.matpr.2020.10.825
6. Automation in Construction Volume 157, January 2024, 105156 Deep learning-based text detection and recognition on architectural floor plans Phillip Schönfelder, Fynn Stebel, Nikos Andreou, Markus König - <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105156>
7. Ibissam, S., Abdelmoghit, Z., Wahban, A. O., Issam, A., & Abdellatif, H. (2020). An Automated License Plate Detection and Recognition System Based On Wavelet Decomposition and CNN. Array, 100040. doi:10.1016/j.array.2020.100040

УДК 621.311; ГРНТИ 44.29.29.

СПОСОБЫ ПОИСКА ПОВРЕЖДЕННОГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ И РЕЗИСТИВНО-ЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

В.В. Комаров, Е.В. Сливкин

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

Аннотация. В работе рассматриваются основные методы поиска поврежденного присоединения на подстанциях с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью. Даны характеристики сетей с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью. Приводятся особенности и характеристики методов быстрых преобразований Фурье и вейвлет-преобразований для поиска поврежденного присоединения.

Ключевые слова: изолированная нейтраль, резистивно-заземленная нейтраль, высшие гармоники, вейвлет-преобразование, однофазное замыкание.

METHODS FOR SEARCHING FOR DAMAGED CONNECTIONS IN SINGLE-PHASE EARTH FAULTS IN NETWORKS WITH ISOLATED AND RESISTIVELY GROUNDED NEUTRAL

V.V. Komarov, E.V. Slivkin

*Ryazan State Radioengineering University named after V.F. Utkin,
Russian Federation, Ryazan, vladimirkomarovrza@gmail.com*

Annotation. The paper discusses the main methods of searching for damaged connections at substations with insulated and resistively grounded neutral. The characteristics of networks with isolated and resistively grounded neutral are given. The features and characteristics of the methods of

fast Fourier transforms and wavelet transformations for searching for a damaged connection are given.

Keywords: isolated neutral, resistive-grounded neutral, higher harmonics, wavelet transform, single-phase short circuit.

Наиболее частым видом повреждения, встречающимся в распределительных сетях 6-35 кВ, являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) [1]. В большинстве случаев ОЗЗ происходят в сетях с изолированной нейтралью (рисунок 1 а), для которой данный режим является не аварийным, а ненормальным. В меньшей степени от ОЗЗ страдают сети с резистивно-заземленной нейтралью (рисунок 1 б).

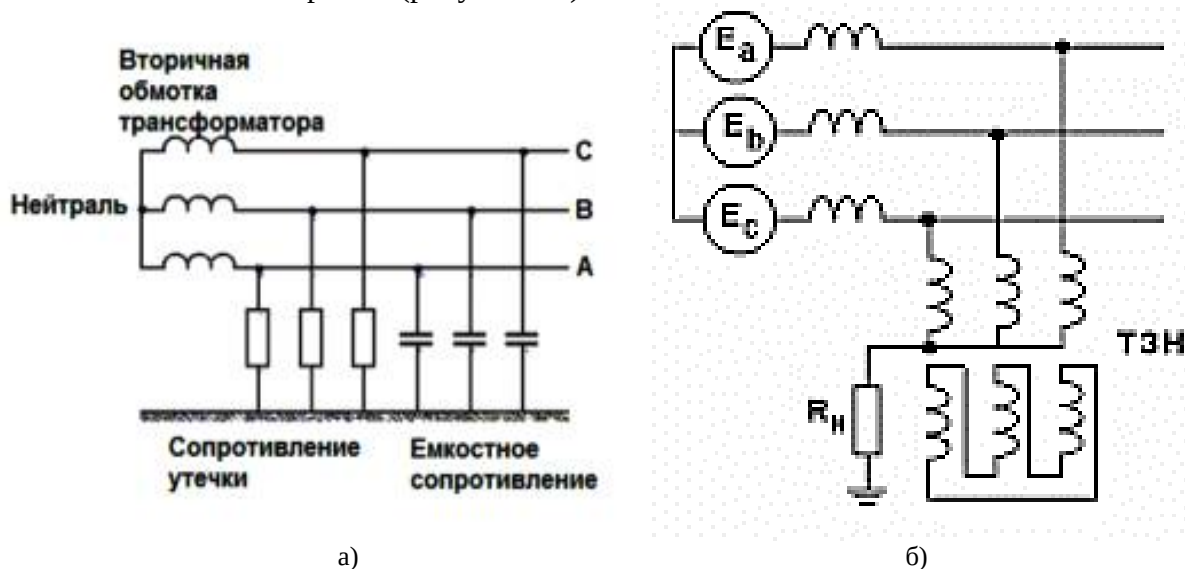


Рис. 1. Схема сети: а - с изолированной нейтралью, б- с резистивно-заземленной нейтралью

Поиск поврежденного присоединения в максимально короткие сроки является крайне важной задачей в связи с большой опасностью коротких замыканий как для человека, так и для сетей и присоединенного оборудования.

ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью

Сетью с изолированной нейтралью называется сеть, в которой нейтраль не присоединена к заземляющему устройству. Система с изолированной нейтралью была разработана и внедрена для обеспечения надежности электроснабжения большого числа потребителей. Данная система позволяет использовать отходящую линию после возникновения повреждения до 2-3 часов. Также для нее характерны малые токи замыкания на землю, что позволяет увеличить ресурс выключателей, и нарушение симметрии напряжений, так как при ОЗЗ фазное напряжение увеличивается до значений линейного.

Главным достоинством сети с изолированной нейтралью является возможность работы при возникновении однофазного замыкания на землю. Главными недостатками сети с изолированной нейтралью являются: долгий поиск поврежденной отходящей линии, повышенная опасность шагового напряжения, сложность построения селективных защит.

При математическом моделировании ОЗЗ в кабельной линии с изолированной нейтралью выделены следующие особенности. При повреждении в начале линии, в линию втекают токи прямой и нулевой последовательностей, которые уменьшаются до нуля к концу. При повреждении в конце линии, в начале линии есть только токи прямой и обратной последовательностей, отсутствуют токи нулевой последовательности. В конце линии есть одинаковые токи всех трех последовательностей, что приводит к тому, что остается ток в поврежденной фазе, а в остальных фазах токи нулевые [2].

ОЗЗ в сетях с резистивно-заземленной нейтралью

Резистивное заземление нейтрали – это заземление нейтрали через активное сопротивление. При однофазных замыканиях на землю в сетях с резистивно-заземленной нейтралью во всех присоединениях протекают собственные емкостные токи, а в поврежденном присоединении протекает еще и активный ток, создаваемый резистором.

Преимуществами данной системы являются: полное устранение феррорезонанса, снижение уровня дуговых перенапряжений, возможность построения селективных защит. Недостатками данной системы являются: увлечения тока ОЗЗ, нагрев резистора[3].

Ключевой особенностью является применение различных типов резисторов. Низкоомное резистивное заземление нейтрали применяется в случаях, когда поврежденный участок должен быть селективно отключен в течение минимального интервала времени, а максимальный ток находится в пределах 10 - 500 А [4]. В тех случаях, когда сеть должна иметь возможность длительной работы в режиме ОЗЗ до обнаружения персоналом места ОЗЗ, а максимальный ток не превышает 10 А применяется высокоомное резистивное заземление нейтрали.

Метод поиска поврежденного присоединения путем поочередного отключения отходящих линий

Наиболее простым методом определения поврежденного присоединения является поочередное отключение отходящих линий. Индикатором того, что отключено именно поврежденное присоединение является снижение напряжения нулевой последовательности до нуля [5]. Для определения возможных присоединений, на которых произошло ОЗЗ, устанавливают трансформаторы тока нулевой последовательности (рисунок 2). Главными недостатками данного метода являются высокая продолжительность поиска, связанная с прибытием и допуском бригады до подстанции, а также возможное нарушение надежности электроснабжения во время ошибочного отключения исправной отходящей линии.

Метод нормирования амплитуды высших гармоник. Быстрое преобразование Фурье

Данная методика раннего диагностирования ОЗЗ базируется на анализе спектра фазных токов и напряжений. Для повышения универсальности используется быстрое преобразование Фурье. Однако, при его реализации возникают особенности с интерпретацией результатов в виде нечетко выраженного максимума высших гармоник.



Рис. 2. Трансформатор тока нулевой последовательности ТЗЛ

В этом случае необходимо проводить предварительную нормировку ВГ фазных токов и напряжений нулевой последовательности. В силу незначительных величин токов ОЗЗ в ВЛ 6-10 кВ идеальным решением было бы использование фазного напряжения в месте замыкания отходящей линии на землю. Однако принято использовать для нормировки фазное напряжение на шинах подстанции, по гармоникам фазного напряжения поврежденного присоединения.

Применение преобразований Фурье предоставляет возможность определения фазы на начальном этапе возникновения ОЗЗ. Проводится анализ утроенного тока нулевой последовательности, его нормировка. Для измерений используется трансформаторы тока со схемой «полная звезда» (рисунок 3). [6]

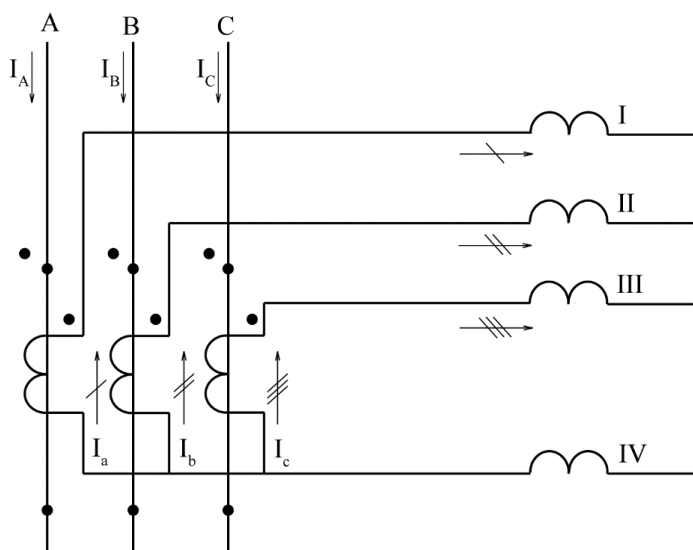


Рис. 3. Схема соединения трансформаторов тока полная звезда

Данный метод может использоваться в сети, в которой все отходящие линии имеют одинаковые длины, в связи с тем, что в неразветвленных системах с примерно одинаковыми емкостями больший ток будет именно на поврежденном присоединении [5]. В реальных сетях такие условия крайне трудно воспроизводимы.

Метод вейвлет-преобразований при определении поврежденного присоединения

Вейвлет-преобразование в последнее время широко используется для поиска поврежденной отходящей линии [1]. Вейвлет-преобразование одномерного сигнала – представление в виде ряда или интеграла Фурье, структурированного из исходного вейвлета, полученного из уровня высших гармоник тока нулевой последовательности и распределения энергии между гармоническими составляющими. В методе используется алгоритм фазового смещения, происходит сравнение фазы вейвлет-коэффициентов напряжения нулевой последовательности с токовыми сигналами.

Аппарат вейвлет-преобразований заменяет собой алгоритм частотного анализа, основанный на преобразовании Фурье, упомянутый выше. Дискретное преобразование рассматривается, как процесс фильтрации. Происходит разложение сигнала во временной области на несколько сигналов, располагающихся на разных уровнях разрешения. Сигнал пропускается через цифровой фильтр низких и высоких частот, по критерию Найквиста исключается часть выборок. На выходе получают последовательности, полученные фильтром

низких частот, которые получили название «аппроксимирующей» и высоких – «детализирующих» [7].

Широкое распространение нейронных сетей способствует применению их для диагностики ОЗЗ. Для анализа используется совмещение аппарата вейвлет-преобразования и нейронных сетей, что представляет возможным определять места замыканий на землю нейронными сетями по частотному спектру, полученному с помощью вейвлет-преобразований [8].

Стоит отметить, что в литературе недостаточно полно изучены эффективность применения метода вейвлет-преобразований при определении поврежденного присоединения в разветвленных кабельных сетях, возможность применения пунктов секционирования и использование схемы «полной звезды» для трансформаторов тока .

Заключение

Таким образом, принимая во внимание значительные недостатки применения метода поочередного отключения присоединений, необходимости создания практически «идеальных» условий для использования преобразований Фурье, наибольший интерес для дальнейшего развития представляет метод вейвлет-преобразований при определении поврежденного присоединения.

Библиографический список:

1. Н.Н. Долгих, Д.С. Осипов, А.О. Парамзин. Идентификация однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кв на основе вейвлет-преобразования // Вестник ЮГУ. 2023. №1 (68).
2. В. А. Бошняга, В. М. Суслов, И. П. Стратан, И. В. Добря, Особенности работы кабельной распределительной сети 6–35 кВ в установившемся режиме с изолированной и компенсированной нейтралью при однофазном замыкании на землю // Функционирование и развитие энергетических систем. Молдова, 2023.
3. Караник А. А. Резистивно-заземленная нейтраль электрических сетей // Актуальные проблемы энергетики, 2018
4. Е.Н. Рыжкова, Применение резистивного заземления нейтрали: вопросы и решения // Актуальные проблемы автоматизации и энергосбережения в ТЭК России, 2018
5. А.В. Булычев, А.А. Наволочный. Релейная защита в распределительных электрических сетях: Пособие для практических расчетов. – М.: ЭНАС, 2011. – 208 с.: ил.
6. Федотов А.И., Ахметвалеева Л.В., Басыров Р.Ш., Вагапов Г.В., Федотов Е.А. Нормирование амплитуды высших гармоник при определении фидера с однофазным замыканием на землю // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020.Т. 22.№ 1. С. 58-68.
7. Д.С. Осипов, Н.Н. Долгих, Д.С. Сатпаев, Е.Г. Андреева, Анализ режима однофазного замыкания на землю в сетях с комбинированным заземлением нейтрали с помощью вейвлет-преобразований // Омский вестник №5(161), 2018
8. Zwe-Lee G., Wavelet-based neural network for power disturbance recognition and classification // IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 4, pp. 1560-1568, Oct. 2004

УДК 621.311; ГРНТИ 44.29.29.

ЭФФЕКТ ОТ ЗАМЕНЫ УСТАРЕВШЕГО СИЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ И РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ НА ПОДСТАНЦИИ

С.С. Кудишин, В.С. Иванов

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

Аннотация. В работе рассматриваются эффект от замены устаревшего оборудования, установленного на подстанциях, на современное и актуальное.

Ключевые слова: масляные выключатели, элегазовые выключатели, вакуумные выключатели, трансформаторы тока и напряжения, цифровые трансформаторы тока и напряжения, цифровая подстанция

EFFECT OF REPLACING OBSOLETE POWER EQUIPMENT AND RELAY PROTECTION AT THE SUBSTATION

S.S. Kudishin, V.S. Ivanov

*Ryazan State Radiotechnical University named after V.F. Utkin,
Russian Federation, Ryazan, kudishinstrpan@gmail.com*

Annotation. The work examines the effect of replacing obsolete equipment installed at substations with modern and relevant ones.

Keywords: oil circuit breakers, SF6 circuit breakers, vacuum circuit breakers, current and voltage transformers, digital current and voltage transformers, digital substation

Введение

Электрооборудование всех действующих объектов электроэнергетики должно соответствовать требованиям, изложенным в нормативной документации. В процессе эксплуатации, электрооборудование изнашивается и требует замены. Для этого, электросетевые компании и прочие организации, в ведении которых имеются различные объекты электроэнергетики, разрабатывают различные проекты по реконструкции и техническому перевооружению.

Основным эффектом от проведенных реконструкций и технических перевооружений – является повышение надежности электроснабжения потребителей. Рассмотрим, как замена отдельных элементов влияет на достижение основного эффекта.

Основная часть:

Замена масляных силовых выключателей и системы с отделителем и короткозамыкателем

Разработанную для максимального удешевления систему с отделителем и короткозамыкателем необходимо заменить на выключатель по стороне высшего напряжения (рисунок 1). Принцип действия ОД КЗ заключается в том, что во время возникновения повреждения на трансформаторе или выключателе ввода, от панели защит идет команда на включение короткозамыкателя, который, в свою очередь, искусственно устраивает короткое замыкание, которое «чувствуют» защиты линии, которые в последствии отключают питающую линию. В этот момент отделитель отключается в безтоковую паузу, тем самым обесточивая подстанцию. После этого АПВ включает питающую линию. В случае возникновения неисправности на трансформаторе, имеющим выключатель по стороне высшего напряжения, релейная защита отключит выключатель, тем самым не отключая питающую линию для прочих отпавечных подстанций.

Одним из самых ответственных коммутационных аппаратов является выключатель, который предназначен для включения и отключения электрических цепей. Предназначен для работы при номинальных и аварийных режимах. [6]



Рис. 1. Отделитель и короткозамыкатель

Высоковольтный выключатель состоит из контактной схемы с дугогасительным устройством, токоведущей части, изоляции и привода. [8]

На большинстве подстанций установлены масляные выключатели, процесс гашения дуги в которых происходит в масле. За время эксплуатации были выявлены следующие недостатки данных выключателей: выключатели имеют достаточно сложную конструкцию, большее время отключения из-за вязкости масла, подвержены низкой температуре (происходит загустение масла), выгорание масла и появление взвеси в процессе эксплуатации, ограниченное число включений и отключений.

На замену масляным выключателям приходят вакуумные и элегазовые выключатели.

Основными преимуществами элегазового выключателя (рисунок 2) являются: процесс гашения дуги происходит в среде специального газа – «элегаза», гашение дуги происходит в доли секунды, имеют меньшие размеры, возможность применения в составе КРУЭ, большая безопасность. Главными недостатками являются высокая стоимость, трудности в обслуживании, невозможность работы при низких температурах, необходимость обогрева.



Рис. 2. Элегазовый выключатель

Основными преимуществами вакуумного выключателя (рисунок 3) являются: процесс гашения дуги происходит в вакууме, что не позволяет вновь загореться дуге, более компактны и легки, большой межремонтный период, большая безопасность для экологии ввиду отсутствия смеси газов [1]. Главным недостатком являются способность генерировать коммутационные перенапряжения [2].



Рис. 3. Вакуумный выключатель

Таким образом, замена масляных выключателей на современные вакуумные и элегазовые выключатели ведет к увеличению надежности при проведении оперативных переключений и отключении аварийных режимов.

Замена трансформаторов тока и напряжения на цифровые трансформаторы тока и напряжения

В качестве основных вспомогательных аппаратов применяются трансформаторы тока и напряжения, предназначенных для включения измерительных приборов в цепи переменного тока.

При прохождении тока через первичную обмотку, в магнитопроводе возникает переменный магнитный поток, под воздействием которого, во вторичной обмотке, возникает вторичный ток, имеющий номинал 1А или 5А. На данном принципе построены трансформаторы тока (рисунок 4) [3].



Рис. 4. Трансформаторы тока

Цифровой трансформатор тока (рисунок 5) состоит из чувствительного элемента в виде витков оптоволокну, помещенного в жесткую немагнитную оболочку. С их помощью можно повысить точность измерения значений тока и напряжения, заменить громоздкие цепи вторичной коммутации на оптоволокну [4].



Рис. 5. Цифровые трансформаторы тока

Применение цифровых трансформаторов тока и напряжения позволяет быстрее обнаружить и отключить аварийный режим.

Замена электромеханических реле на микропроцессорные терминалы

Замена устаревших электромеханических реле и электромеханических комплексов релейной защиты на микропроцессорные терминалы, которые поддерживают стандарт МЭК 61850, приведет к созданию цифровой подстанции, в которой все процессы контроля и управления происходят при помощи MMS-сообщений, протоколов SV и GOOSE.[5]

Микропроцессорные устройства релейной защиты заменяют большую группу электромеханических реле. В любом микропроцессорном модуле можно выделить такие части измерительная, преобразовательная, вычислительно-логическая, передающая и исполнительная. [7]

Применение цифровых подстанций приведет к полному переходу к дистанционному управлению подстанцией, а также более быстрому реагированию на возможные аварийные ситуации.

Выводы

Замена масляных выключателей и системы с отделителем и короткозамыкателем на вакуумные и элегазовые выключатели приведет к существенному повышению надежности как самого оборудования подстанции, так и электроснабжения потребителей. Замена трансформаторов тока и напряжения на цифровые (оптические) приведет к ускорению определения ненормальных и аварийных режимов, замена токовых цепей и цепей напряжения позволит увеличить безопасность персонала. Использование цифровых подстанций приведет к ускорению реагирования и упрощению использования, а также повышению безопасности персонала.

Библиографический список:

1. Масляные и вакуумные выключатели [Электронный ресурс] <https://clck.ru/38rey3> (дата обращения 04.02.2024)
2. Особенности защиты оборудования, коммутируемого вакуумными выключателями [Электронный ресурс] https://energetik-nn.ru/images/Docs/Uchmater/Prepod/Zashita_oborudov.pdf (дата обращения 05.02.2024)
3. В.Н.Вавин. Трансформаторы тока. Издательство «Энергия», Москва, 1966 год.
4. ЦИФРОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ. [Электронный ресурс] https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/37188/Cifrovye_transformatory_toka_i_napryazheniya.pdf;jsessionid=AAA07F9B3A6B2A9155FB543759980A39?sequence=1 (дата обращения 04.02.2024)
5. Корпоративный профиль ПАО «ФСК ЕЭС» МЭК 61850. [Электронный ресурс] https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-25.040.30.309-2020.pdf (дата обращения 04.02.2024)

6. Электрическая часть электростанций и подстанций: учебное пособие / В.А. Старшинов, М.В. Пираторов, М.А. Козина; под ред. В.А. Старшинова. — М.: Издательский дом МЭИ, 2015. — 296 с.: ил

7. М.В. Андреев, Н.Ю. Рубан, А.А. Суворов и др. Релейная защита электроэнергетических систем: учебное пособие.; Томский политехнический университет. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2018. — 167 с

8. Беленцов С.Е., Буденков А.И. Высоковольтные выключатели, Том 6 Наука молодых - будущее России 12-13 декабря 2023 года

УДК 621.315.177; ГРНТИ 44.29.20

ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНОГО КОНТРОЛЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ, КАК СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

И.С. Лабзин, В.Г. Ляпин

*Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А.Тимирязева,
Российская Федерация, Москва, ISLabzin@yandex.ru*

Аннотация. Рассматривается актуальная тема, связанная с использованием средств контроля для решения задач мониторинга и повышения надёжности воздушных линий электропередач с применением беспилотных летательных аппаратов и выделяются виды работ, реализуемых этой техникой.

Ключевые слова: воздушные линии электропередач, беспилотный летательный аппарат, мониторинг, диагностика, контроль.

APPLICATION OF UNMANNED MONITORING OF OVERHEAD POWER LINES AS A MEANS OF IMPROVING THE COST OF POWER SUPPLY TO AGRICULTURAL CONSUMERS

I.S. Labzin, V.G. Lyapin

*Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
Russian Federation, Moscow, ISLabzin@yandex.ru, lei1300@mail.ru*

The summary. A topical topic related to the use of control tools to solve the problems of monitoring and improving the speed of overhead power lines with the use of unmanned aerial vehicles is considered, and the types of work implemented by this equipment are highlighted.

Keywords: overhead power lines, unmanned aerial vehicle, monitoring, diagnostics, control.

Экономическое и хозяйственное благополучие Российской Федерации находится в прямой зависимости от электроснабжения сельскохозяйственных потребителей (СХП). Длительный перерыв в электроснабжении СХП способен нанести значительный ущерб сельскому хозяйству России, выражающийся недоотпуском продукции, и, как следствие, упущением экономической прибыли предприятий аграрного комплекса. Снизить риски отказов электрических сетей СХП способны мероприятия, направленные на повышение надёжности электроснабжения: проведение планово-предупредительных ремонтов; замена устаревающего оборудования, в т.ч. подвергнутого значительному износу на более современное с учётом применения новых технологий (например, применение инверторных преобразователей и интеллектуальных систем управления электрическими сетями уменьшают потери электрической энергии (ЭЭ) при её передаче и предотвращают перегрузки [1]); улучшение качества ЭЭ путём анализа данных системы контроля её качества, размещённых на проводах воздушных линий электропередач (ВЛ), либо на опорах (например, система «Гармоника» [2]) и других им подобных систем [3] с последующим применением соответствующих мер, направленных на повышение качества ЭЭ и надёжности электроснабжения. Также большую роль в обеспечении надёжности электроснабжения СХП составляет безопасность и обслуживание электросетей.

При обеспечении электроснабжения СХП посредством ВЛ в рамках планово-предупредительных ремонтов проводится плановый мониторинг линий электропередач (ЛЭП). В настоящее время мониторинг ВЛ осуществляется в большей мере традиционным способом проведения – наземными группами [4] с выделенными в табл. 1 недостатками. В качестве альтернативного способа проведения мониторинга ВЛ рассмотрим беспилотный мониторинг (БМ) с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Результаты анализа БМ ЛЭП показывают лучшую его производительность труда и экономическую эффективность (табл. 2) по сравнению с традиционным [4], использование БМ в 5,9 раз эффективнее с экономической точки зрения. Как и традиционный метод мониторинга, БМ имеет некоторые недостатки (табл. 1). Следует отметить, что значительная доля ЛЭП расположена на незаселенных территориях, часто покрытых лесом. С помощью БПЛА в России уже сделаны облеты ЛЭП 35–110 кВ для определения объемов расчистки и расширения просек.

Таблица 2. Недостатки способов проведения мониторинга ЛЭП

Способ мониторинга	Недостатки
Традиционный – наземными группами [4]	Возможность поражения персонала электрическим током вследствие непреднамеренного нарушения техники безопасности и вероятность производственного травматизма
	Продолжительность мониторинга по времени [5] ввиду низкой производительности, вызванной ручным обследованием ЛЭП и с применением ручного оборудования (тепловизоров и др.)
	Высокие затраты на горюче-смазочные материалы для технических средств и их амортизацию; в зимнее время – обогрев персонала; отключение осматриваемого участка ЛЭП на время проведения верхового осмотра [6]
	Невозможность проведения верховых осмотров ЛЭП, либо повышенная сложность их выполнения в труднодоступных районах нашей страны (горы Кавказа, Алтая), а также регионах со сложными метеорологическими условиями (Республика Карелия, Республика Коми, Магаданская область, Республика Саха – Якутия, Республика Калмыкия) и др. [7]
БМ	Зависимость от квалификации персонала, т.к. для управления БПЛА необходимо обучение высококвалифицированных операторов
	Зависимость от температуры эксплуатации, т.к. при изменении температуры окружающей среды ёмкость литий-ионных аккумуляторов БПЛА уменьшается [8]
	Невозможность проведения, либо экстренное прекращение выполнения задания БМ при ухудшении полётных условий (например, шквалистый ветер скоростью больше 50 км/ч [9])
	Небольшая дальность полёта и осматриваемый участок ЛЭП (максимальная дальность полёта БПЛА не превышает 210 км с учетом возвращения в точку старта)
	Низкая автоматизация процесса БМ

Таблица 2. Сравнение стоимости работ при обследовании ВЛ наземной группой специалистов и при использовании БПЛА

Параметр	Наземная группа	Геоскан 201 ¹
Число человек в рабочей группе	4	2
Число рабочих часов в день, ч	8	5
Скорость обследования, км/час	2	85
Зарботная плата специалистов на обслуживание 1 км ВЛ, руб.	245	20
Общая стоимость обследования 1 км ВЛ, руб.	245	41
Время обследования 1000 км ВЛ, дн.	63	5
Стоимость обследования 1000 км ВЛ, руб.	244654	41375

Примечание. ¹В источнике в качестве примерной модели построения системы мониторинга ЛЭП с помощью БПЛА используется комплекс, основанный на БПЛА типа «Геоскан 201»

Проводимый мониторинг и диагностика должны отражать: наличие нежелательной растительности (НР), которая является крайне опасной для эксплуатации ЛЭП; падение деревьев на провода и опоры; наличие травянистой и древесно-кустарниковой НР на террито-

рии охранной зоны. Предлагается система беспилотного контроля (БК) ВЛ, объединяющая в себе ряд разработок в области энергетики, электроники и электротехнологии (табл. 3).

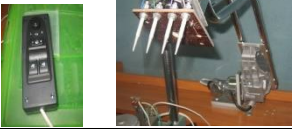
Принцип действия предлагаемой системы: искусственный интеллект в БПЛА анализирует внутренние параметры батареи, прогнозируемые погодные условия, полученные с метеостанции Сокол–М1; при помощи ПО «Спутник ЛЭП» и ГИС «Спутник» выявляет на трёхмерной карте местности проблемные участки ЛЭП, с учётом данных, полученных с датчиков системы мониторинга качества ЭЭ (провисы проводов и кабелей, залесённость, наличие и мониторинг электрофизических свойств травянистой, древесно-кустарниковой НР на территории охранной зоны, отклонение опоры ЛЭП относительно вертикали и горизонта, несанкционированные набросы); обозначает на карте трассы ЛЭП повреждённые изоляторы, обрывы проводов и другие типовые повреждения.

После получения информации об изменении погодных условий происходит расчёт оптимальной траектории полёта с учётом времени подзарядки аккумулятора на ближайшей зарядной станции. После выполнения полётного задания по одной стороне трассы ЛЭП БПЛА в режиме авторотации (зависания в воздухе) разворачивается и выполняет аналогичный маршрут мониторинга ВЛ. Затем посредством протокола связи трёхмерная карта маршрута БПЛА с указанием всех проблемных точек пересылается на компьютер диспетчера. Далее выполняют задание контроля беспилотные электротехнологические аппараты (БПЭ-ТА).

Таблица 3. Система БК ВЛ с использованием БПЛА

Ком- по- нент	Описание	Техническое решение
Конвертоплан	с возможностью вертикального взлёта и посадки InnoVtol разработки Центра Технологий компонентов робототехники и мехатроники Университета «Иннополис» [10]	
	с возможностью вертикального взлёта и посадки Supercam SX 350/SX 350F [11]	
	с интеллектуальной системы автоматического дистанционного мониторинга состояния ЛЭП (патент RU 2789896 C1) в связке с специализированным программным обеспечением (ПО) ГК «Геоскан» «ГИС Спутник» и «Спутник ЛЭП» [12]	
Мобильная метеостанция	типа «Сокол-М1» разработки ГК «Эскаорт» [13], размещаемая на опоре ВЛ	

Продолжение таблицы 3

Подсистема	мониторинга качества ЭЭ САТ–1 [14], состоящей из ПО и датчиков мониторинга ЛЭП, размещаемых на проводах ВЛ	
	мониторинга электрофизических свойств НР разработки НГАУ, состоящей из пульта управления (слева) или ПО и электродной системы (справа), размещаемых на БПЛА или наземном беспилотном электротехнологическом аппарате (БПЭТА) [15]	
	электрического повреждения НР на паровом фоне, полосе отчуждения дороги, ЛЭП и других объектах линейной инфраструктуры разработки ЧИМЭСХ	
	подзарядки аккумулятора электрического БПЛА (патент RU 2523420 C1) [16], размещаемая на опоре экстренного спасения БПЛА (пиропатрон с однокупольным парашютом) [17]	
БПЭТА	разработки британской компании "Small Robot Company" [18]. На платформе, включающей "роботи-зируемую руку" рычаг igus, закреплены различные технологии (химическая, механическая, электриче-ская). Три дельта-рычага igus, установленные на ро-боте Дик, могут уничтожать НР электрическим то-ком одновременно. Ременный привод обеспечива-ет параллельность перемещения электрода над почвой	
	разработки иранской компании Fateh Aseman Sharif. Может использоваться для распыления гербицидов, опрыскивания по листу НР, мониторинга и спектро-метрии [19]. Применяются на неровной местности, в предгорьях, на склонах холмов и т.д., задействовав радиолокационный модуль, поддерживающий по-стоянное расстояние между дроном и неровной по-верхностью. Являются электростатическими и могут заряжать частицы, способствующими быстрому по-глощению гербицидов листьями НР	

Применение вышеупомянутой системы позволит значительно увеличить производи-тельность мониторинга и контроля ЛЭП с помощью БПЛА, своевременно обнаружить склонные к аварии участки и принять меры к устранению предпосылок, а в случае аварии – последствий в наиболее краткие сроки, тем самым положительно сказавшись на надёжности электроснабжения СХП.

Библиографический список

- Ланге, Ф.Д. Способы повышения надёжности электроснабжения потребителей [Текст]/Ф.Д. Ланге, А.А. Поляков//Вестник науки, 2023, №7. – С. 361-364.
- Система мониторинга и анализа качества электроэнергии «Гармоника»//[Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://www.rtsoft.ru/project-cards/iuse/sistemy-monitoringa-parametrov-elektricheskoy-seti/sistema-monitoringa-i-analiza-kachestva-elektroenergii-pke.php>. Дата обращения 20.03.2024.
- Диагностика и мониторинг воздушных линий электропередач//[Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://extxe.com/21508/diagnostirovanie-i-monitoring-vozdushnyh-linij-jelektroperedach/>. Дата обращения 20.03.2024.
- Фисунова, Л.В. Беспилотный контроль состояния воздушных линий электропередачи [Текст]/Л.В. Фи-сунова//Научно-технический вестник Поволжья, 2023, №6. – С. 290–295.

5. Unmanned Aerial Vehicle for Transmission Line Inspection: Status, Standardization, and Perspectives// [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2021.713634/full>. Дата обращения 20.03.2024.
6. Сокол AI – система мониторинга ЛЭП//[Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://spec.innopolis.university/monitoringvl>. Дата обращения 20.03.2024.
7. Заболотник, С.И. Районирование территории России по суровости климатических условий/С.И. Заболотник/Наука и техника в Якутии, 2007, №1 (12). – С. 9-14//[Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raionirovanie-territorii-rossii-po-surovosti-klimaticheskikh-usloviy>. Дата обращения 20.03.2024.
8. Потапов, М.А. Влияние окружающей температуры на ёмкость литий-ионного аккумулятора [Текст]/М.А. Потапов, Я.К. Тучкова//Юный учёный, 2019. - №6. - С. 54–55.
9. При каком ветре нельзя летать на квадрокоптере//[Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://kopterinfo.ru/pri-kakom-vetre-nel-zya-letat-na-kvadrokoptere/>. Дата обращения 20.03.2024.
10. Конвертоплан VTOL//[Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://robotics.innopolis.university/project/konvertoplan-vtol/>. Дата обращения 20.03.2024.
11. Supercam SX350//[Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://supercam.aero/catalog/supercam-sx350>. Дата обращения 20.03.2024.
12. Патент RU 2789896 C1//[Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/75/e5/a2/3e4a92cd5a77d7/RU2789896C1.pdf>. Дата обращения 20.03.2024.
13. ГИС «Спутник»//[Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://www.geoscan.ru/ru/software/sputnik/gis>. Дата обращения 20.03.2024.
14. Самарин, А. Современные технологии мониторинга воздушных электросетей ЛЭП [Текст]/А. Самарин, В. Масалов//Control engineering Россия, 2013, №3. - С. 88–94.
15. Ляпин, В.Г. К методике и технике исследования системы электрод-растение-почва [Текст]/В.Г. Ляпин // Механизация процессов в растениеводстве и кормопроизводстве: сб. науч. тр. – Новосибирск: НГАУ. Ин-т мех. с.-х., 2000. – С. 50-58.
16. Патент RU 2523420 C1//[Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://patents.google.com/patent/RU2523420C1/ru>. Дата обращения 20.03.2024.
17. Лабзин, И.С. Повышение надёжности тепловизионного обследования линий электропередач с помощью беспилотных летательных аппаратов [Текст]/И.С. Лабзин, Н.Е. Ртищева// Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию со дня рождения первого Президента Кабардино-Балкарской Республики Валерия Мухамедовича Кокова. В 2-х ч. - г. Нальчик, 2021, Ч.2. – С. 284–287.
18. Автоматизированные роботы в сельском хозяйстве [Электронный ресурс]/ URL:<https://robroy.ru/avtonomnyij-fermerskij-robot-tom-unichtozhaet-sornyaki.html>. Дата обращения: 24.03.2024.
19. Быстроразборные иранские агродроны наделили электростатической силой [Электронный ресурс]/ <https://dzen.ru/a/ZALUjIdeDwlhbT7Z>. Дата обращения: 24.03.2024.

УДК 62-592.35; ГРНТИ 55.29.31

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ ОРБИТАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД МУФТЫ ТОРМОЗА КРИВОШИПНОГО ПРЕССА

Р.В. Прокудин*, А.М. Литвиненко**

*Воронежский Государственный Технический Университет
Воронеж, Россия, *prockudin.rom@yandex.ru, **itamix11@gmail.com*

Аннотация. В данной статье рассматривается вопрос повышения эффективности преобразователей рекуперированного напряжения кривошипно-шатунных механизмов. Приведена циклограмма работы кузнечного пресса. В программной оболочке Matlab Simulink создана модель повышающего преобразователя, приведены основные характеристики различных вариантов соединения конденсаторов, получены данные о динамике работы приводов. На основе разработанной модели построен график переходного процесса напряжения.
Ключевые слова: моделирование, рекуперация, орбитальный электропривод, конденсатор, повышающий преобразователь, муфта тормоза

ENERGY-SAVING ELECTRIC DRIVE OF THE CRANK PRESS BRAKE CLUTCH

R.V. Prokudin*, A.M. Litvinenko**

Voronezh State Technical University,

Russia, Voronezh, *prockudin.rom@yandex.ru, **itamix11@gmail.com

The summary. This article discusses the issue of improving the efficiency of converters of recuperable voltage of crank mechanisms. The cyclogram of the forge press operation is given. A model of a step-up converter has been created in the Matlab Simulink software shell, the main characteristics of various capacitor connection options are given, data on the dynamics of the drives are obtained. Based on the developed model, a graph of the transient voltage process is constructed

Keywords: modeling, recovery, orbital electric drive, capacitance, boost converter, brake clutch.

Кривошипные кузнечно—прессовые машины—это машины прерывистого действия с большим количеством разнообразных узлов и вспомогательных механизмов. Работа этих механизмов машины должна подчиняться общей программе при обеспечении необходимых блокировок, гарантирующих как безопасность для обслуживающего персонала, так и сохранность оборудования. В кузнечных машинах такую роль выполняют механизмы управления [1].

Логичным является вопрос о модернизации имеющегося оборудования по пути установки современных систем управления на базе существующих на рынке модулей и систем [2].

Особенно остро поднимается вопрос, касающийся эффективности работы кривошипно—шатунных механизмов в части энергосбережения.

Так как, электроприводы потребляют до 70 % вырабатываемой электроэнергии, наиболее существенная экономия электроэнергии может быть достигнута при использовании регулируемых электроприводов для управления технологическими процессами, что в сочетании с возможностями автоматизации может обеспечить оптимальное использование электроэнергии и других ресурсов [3].

Обобщая вышесказанное, использование преобразовательной техники особого назначения в структуре кривошипно—шатунных механизмов может позволить компенсировать часть потребленной основными приводами электроэнергии.

Для увеличения производительности, уменьшения потребления различных видов энергии, соответствия постоянно растущим запросам потребителей, выполнения принципиально новых изделий – необходимо модернизировать кузнечно—прессовое оборудование, отдельные его узлы и механизмы, в частности преобразователи энергии торможения и обратного хода маховика.

Принцип работы кривошипно-шатунного пресса легко понять с помощью кинематической схемы (рис. 1). Основной принцип действия любого прессового оборудования – это превращение вращательного движения ротора электродвигателя 1 в поступательное движение ползуна 7 пресса.

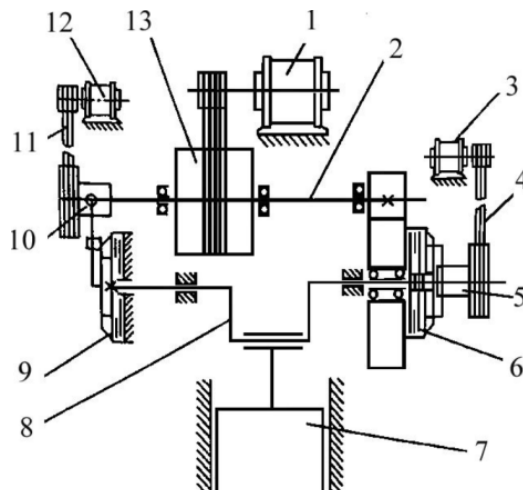


Рис. 1. Кинематическая схема КШП

1 – главный электродвигатель; 2 – промежуточный вал; 3 – электродвигатель управления муфтой;
 4, 11 – ременные передачи; 5, 10 – винтовые механизмы; 6 – муфта; 7 – ползун пресса;
 8 – эксцентриковый вал; 9 – тормоз; 12 – электродвигатель управления тормозом; 13 – маховик.

Изучив алгоритм работы кривошипных механизмов (рис. 2), можно определить моменты, в которые целесообразно производить съем электрической энергии. Очевидно, что имеет смысл рекуперировать энергию в тот случай работы КШП, когда механизм не совершает полезной работы, в отрезок времени обратного хода ползуна t_b .

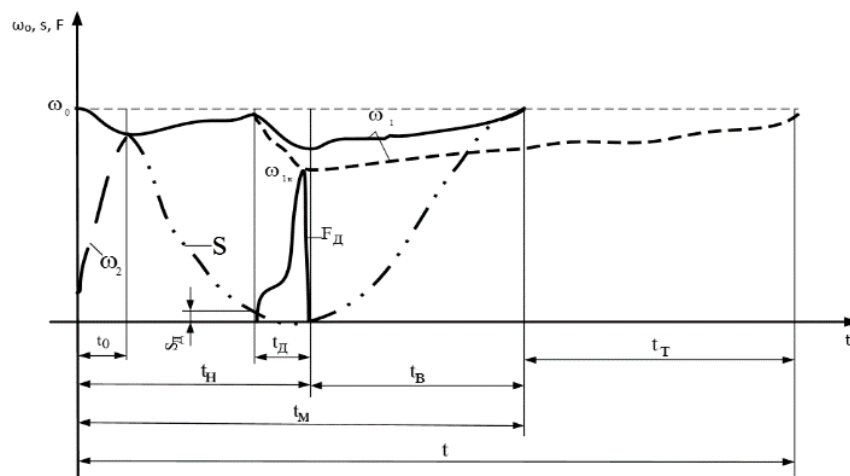


Рис. 2. Цикловая диаграмма работы кривошипных машин:

t_o – время включения муфты; t_d – время рабочего хода (деформирования);
 t_n – время хода ползуна вниз (вперед); t_b – время возвратного хода; t_t – время технологической паузы;
 t_m – время машинного цикла, t – время технологического цикла;
 ω_0 – угловая скорость установившаяся, ω_1 – угловая скорость ведущих дисков муфты,
 ω_2 – угловая скорость ведомых дисков муфты; S – перемещение ползуна;
 S_d – перемещение ползуна во время деформирования; F_d – технологическая сила деформирования поковки

Существует огромное количество литературы и исследований, посвященных кривошипным прессам и их устройству. Например, в патенте U 2 316 684 C1, автор предполагает установку генератора для съема кинетической энергии (рис. 3), при этом достигается возможность рекуперативного торможения, позволяющего утилизировать энергию торможения и возвращать ее в виде кинетической энергии маховика.

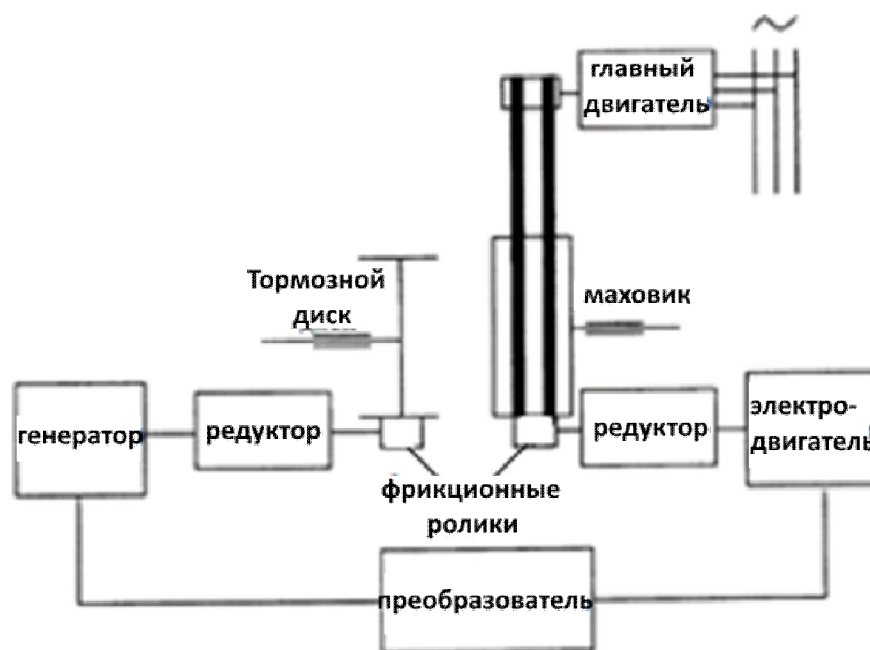


Рис. 3. Схема рекуперативного тормоза

Однако, для увеличения эффективности работы данного механизма требуется соответствующий повышающий преобразователь, с помощью которого появится возможность сохранять снимаемое с генератора напряжение на постоянном уровне в момент замедления маховика.

Целью данной статьи является исследование возможности поддержания рекуперированного напряжения в допустимых пределах при замедлении маховика и вала генератора к концу цикла торможения.

Предложенная схема силового преобразователя

Для осуществления реализации заданных характеристик, схематично представим замкнутую систему повышающего преобразователя (рис. 4). Регулируемый повышающий преобразователь постоянного напряжения включает в себя рекуперационный генератор, выпрямитель, конденсаторно-ключевой блок, нагрузку. На рисунке 5 показана принципиальная схема конденсаторно-ключевого блока, с использованием, ключей, осуществляющих переключение конденсаторов с параллельного соединения на последовательное, с помощью блока управления 8. Для определения момента переключения ключей конденсаторно-ключевого блока используется реле напряжения.



Рис. 4. Структурная схема повышающего преобразователя

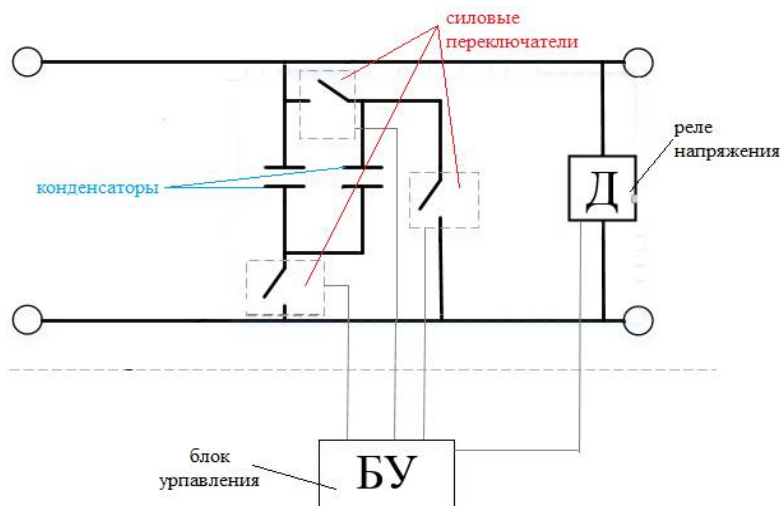


Рис. 5. Принципиальная схема конденсаторно-ключевого блока

Работа регулируемого повышающего преобразователя постоянного напряжения происходит следующим образом. В начальный момент времени, когда рекуперации энергии не происходит, генератор находится в состоянии покоя, конденсаторы с помощью ключей подключены параллельно (рис. 6).

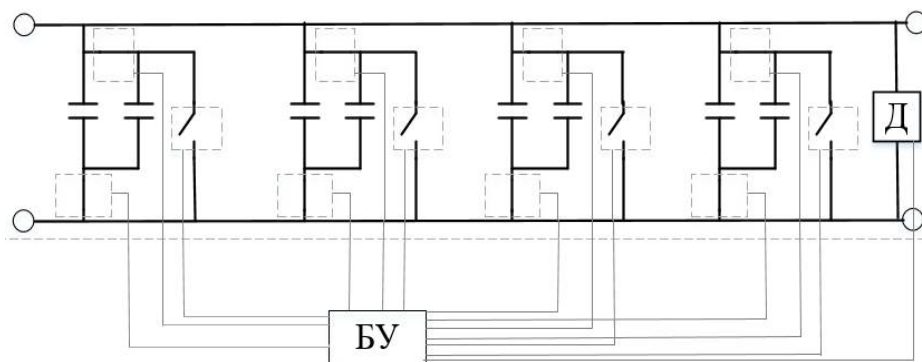


Рис. 6. Параллельное соединение конденсаторов

После начала работы, рекуперационные генераторы отдают энергию в выпрямитель. Происходит передача энергии на нагрузку (рис.6). В момент, когда рекуперация подходит к концу, рекуперационные генераторы выдают низкое напряжение и реле напряжения подает импульс в блок управления, ключи конденсаторно-ключевого блока изменяют схему подключения конденсаторов с параллельного соединения на последовательное (рис.7).

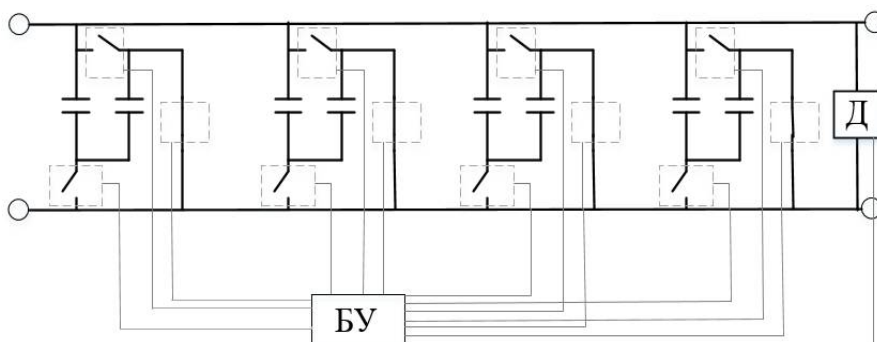


Рис. 7. Последовательное соединение конденсаторов

Происходит повышение напряжения на нагрузке, и рекуперация продолжается. После окончания работы, рекуперационные генераторы останавливаются, происходит обратное переключение конденсаторов с последовательного на параллельное для подготовки к следующему циклу рекуперации.

Результаты моделирования

Для проверки работоспособности данной системы и снятия необходимых характеристик электропривода, предлагается использовать возможности математического моделирования в программной среде Matlab Simulink с применением надстройки SimPowerSystem для моделирования в области электротехники (рис.8).

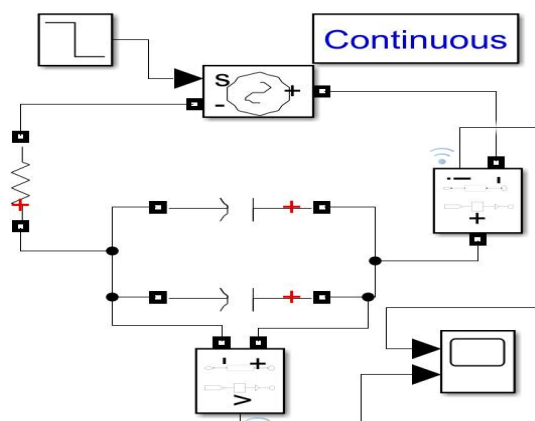


Рис. 8. Параллельное соединение конденсаторов

Для построения модели работы конденсаторов, предлагается использовать стандартные блоки библиотеки `simscape` с характеристиками, представленными на рисунке 9.

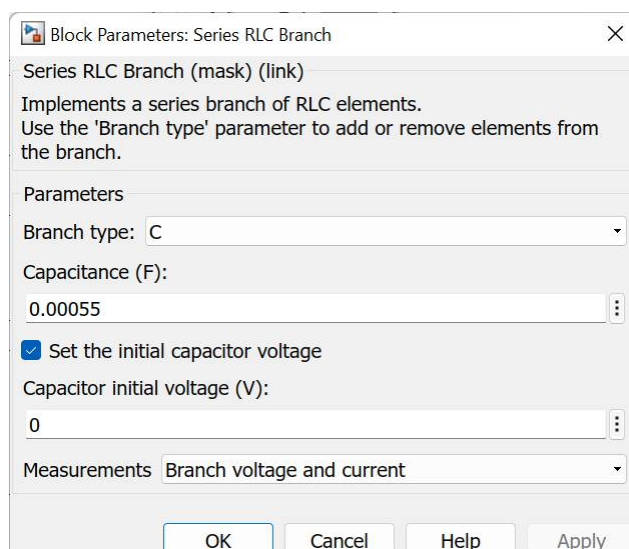


Рис. 9. Характеристики конденсаторов

В качестве источника напряжения используется элемент из библиотеки `simscape` “controlled voltage source”, который спустя $t=0.25$ с отключается, для реализации режима, когда источник напряжения отсутствует. Общее время моделирования - 0.5 с. Для осуществле-

ния отключения источника напряжения используется элемент “Step”, настройки которого приведены на рисунке 10.

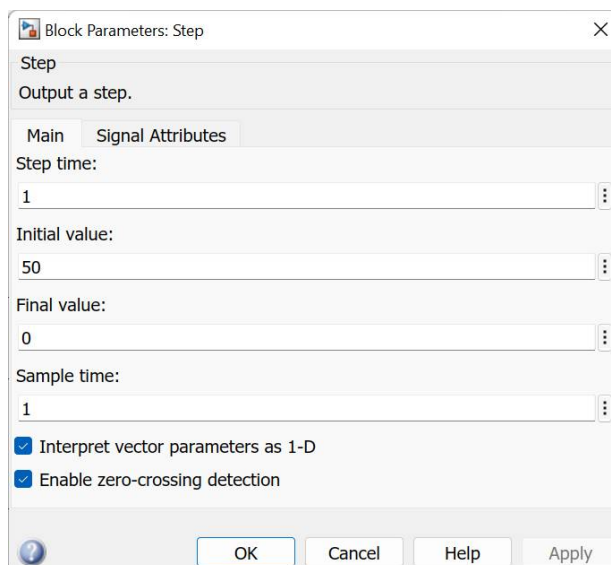


Рис.10. Характеристики блока “Step”

Для моделирования нагрузки используется нагрузочный резистор, Сопротивлением 5 Ом. Форма напряжения и тока на сопротивлении при параллельном соединении конденсаторов показана на рисунке 11.

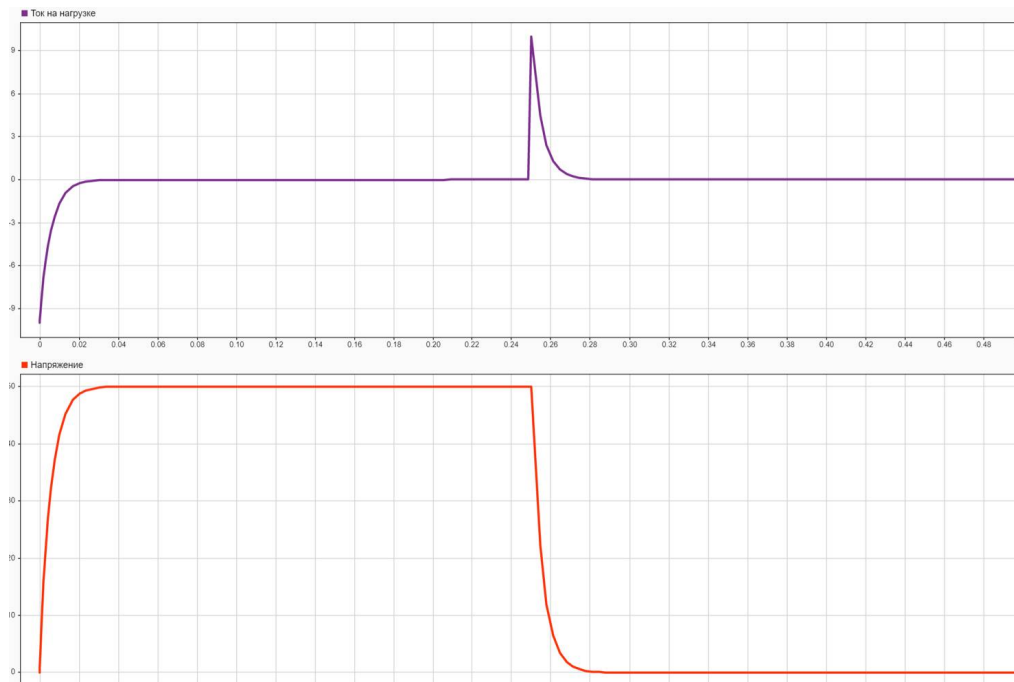


Рис. 11. Характеристики переходных процессов тока и напряжения

Для того, чтобы узнать время, за которое происходит разряд конденсаторов, воспользуемся курсорами (рис. 12). На графике видно что полный разряд конденсатора происходит за время $t_f = 0,04$ с.

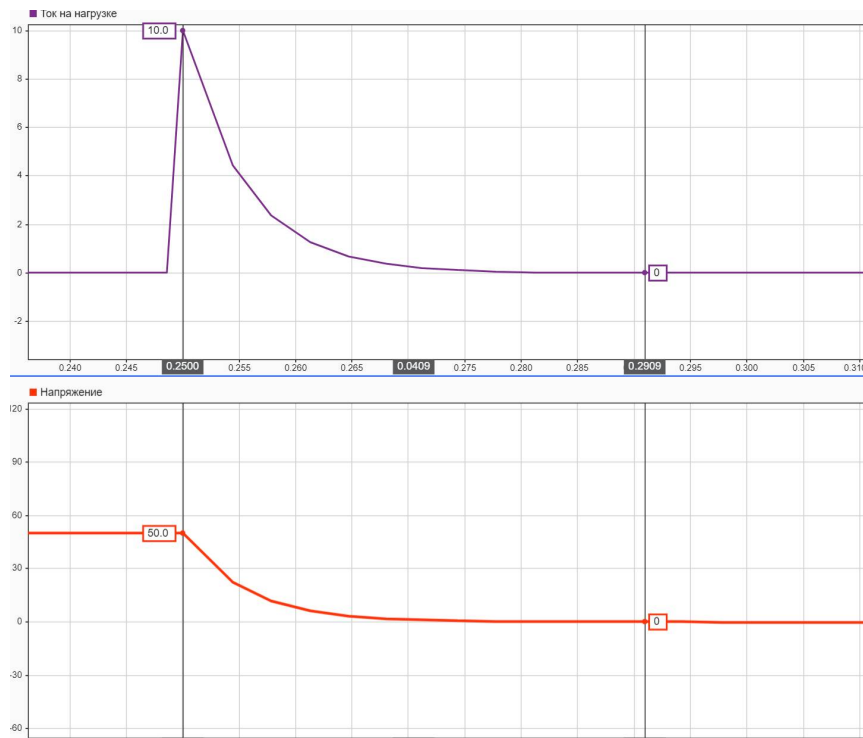


Рис. 12. Характеристики переходных процессов тока и напряжения

При прочих равных условиях, построим модель последовательного соединения конденсаторов (рис.13)

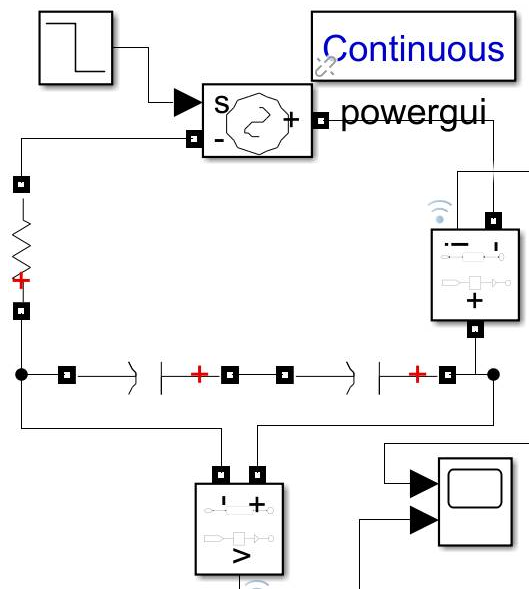


Рис. 13. Последовательное соединение конденсаторов

При таком соединении форма тока и напряжения, в момент отключения источника напряжения будет выглядеть как показано на рисунке 14. На графике видно, что при последовательном соединении конденсаторов, время полного разряда конденсаторов при последовательном соединении в 3,3 раза меньше чем при параллельном соединении и составляет $t_{p1} = 0,012$ с.

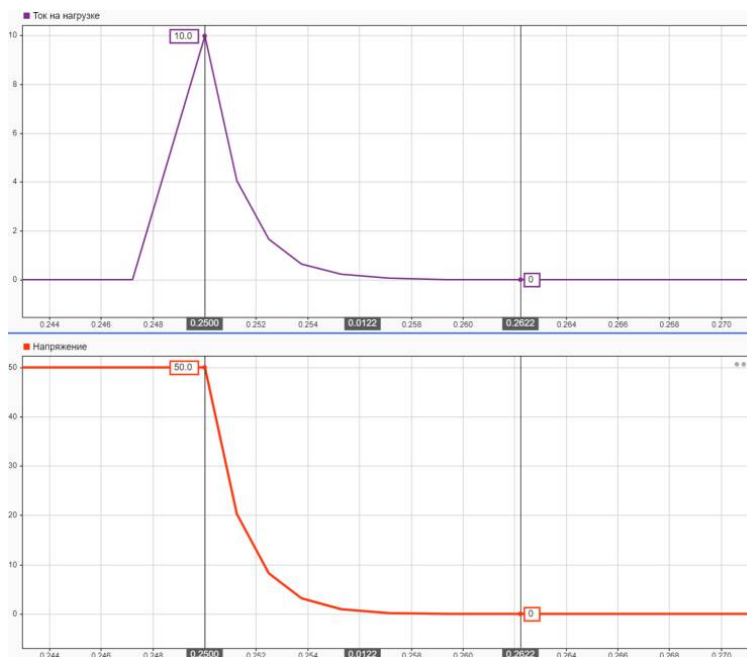


Рис. 14. Характеристики на нагрузке при последовательном соединении конденсаторов

На рисунке 15 показана модель, система управления которой осуществляет переключение конденсаторов с параллельного соединения на последовательное при помощи IGBT транзисторов стандартной библиотеки Simulink. Время переключения задается единичным ступенчатым сигналом в момент времени $t=0.0025\text{c}$ (рис. 15).

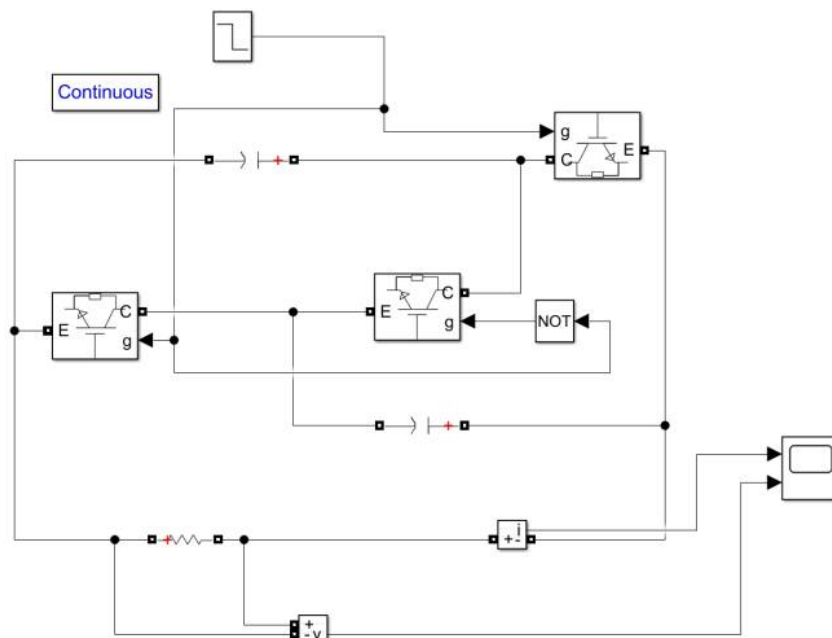


Рис. 15. Имитационная модель повышающего преобразователя

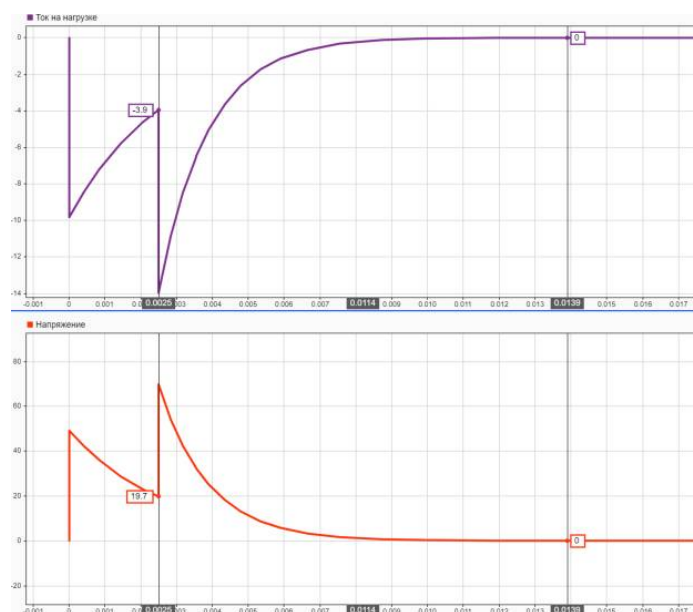


Рис. 16. Переходный процесс тока и напряжения на нагрузке при переключении

Анализируя график рекупируемого напряжения (рис.16), при изменении схемы подключения конденсаторов, происходит скачок разницы потенциалов на нагрузке, что говорит о возможности практического применения данного метода в преобразовательной технике.

Заключение

Обобщая результаты исследования, можно сделать вывод о серьезных перспективах развития преобразовательной техники специального исполнения для кривошипно—шатунных механизмов, обладающих требуемым быстродействием.

Вариантом для дальнейших исследований в этой области может послужить улучшение характеристик быстродействия предложенной схемы.

Библиографический список

1. В.И. Власов, “Муфты, тормоза и механизмы управления кривошипных кузнечно-прессовых машин”, Машиностроение, Москва 1963
2. Т.В. Федоров, К.А. Волобуев, «Анализ частотной системы регулирования кривошипного пресса» Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, Орел, 2013
3. Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов., В.Н. Поляков. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. 256 с.
4. В.В. Бальбук, Л.Д. Панкратьев, В.А. Полковников, “Динамические свойства релейных и импульсных следящих электроприводов,” Энергия, Москва, 1972.
5. R.V. Prokudin. A.M. Litvinenko, “APPLICATION OF THE RECUPERATING GENERATOR IN THE BRAKE CLUTCH OF THE CRANK PRESS,” антропоцентрические науки: инновационный взгляд на образование и развитие личности материалы XIV международной научно—практической конференции. Воронеж, 2021
6. Р.В. Прокудин, А.М. Литвиненко “Тормоз кривошипного пресса,” патент на изобретение RU 2766616 С1, номер заявки 2021118772, 2022
7. А.М. Литвиненко, Г.В. Воскресенский, В.А. Крук, А.П. Шальнев «Тормоз кривошипного пресса» патент на изобретение RU 316684 С1, номер заявки 2006125675/11, 2006.07.17, 2008

УДК 621.311; ГРНТИ 44.29.29.

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ВЛ 10 КВ

В.А. Михалёв

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, Vlad-mikhalev-2001@mail.ru*

Аннотация. В работе рассматриваются способы повышения надежности электроснабжения потребителей при использовании ВЛ 10 кВ.

Ключевые слова: воздушная линия, неизолированные провода, самонесущий изолированный провод, реклоузер

WAYS TO INCREASE THE RELIABILITY OF ELECTRIC SUPPLY 10 KV OHL

V.A. Mikhalev

*Ryazan State Radiotechnical University named after V.F. Utkin,
Russian Federation, Ryazan, kudishinstrpan@gmail.com*

Annotation. The paper discusses ways to increase the reliability of power supply to consumers when using 10 kV overhead lines.

Keywords: overhead line, bare wires, self-supporting insulated wire, recloser

Распределительные сети 6-10 кВ являются самыми обширными на всей территории Российской Федерации (рисунок 1). Большая часть всех воздушных линий находится вдали от дорог, что делает крайне трудным их обслуживание, особенно в весенне-зимне-осенний период. В процессе роста числа потребителей, нагрузка на электрические сети сильно возрастает. В данном вопросе обязательно необходимо учесть вопросы отклонения и потери напряжения, так как зачастую потребители располагаются на весьма дальних расстояниях (при допустимых 10 километрах, некоторые линии достигают 30 километров). Большая часть распределительных сетей построены в период с 1961 по 1985 год. Большая часть уже нуждается в проведении реконструкции.



Рис. 1. Распределительные сети 10 кВ

Текущие состояние линий 10 кВ

Львиную долю всех распределительных сетей составляют голые провода марок АС и А. Неизолированные провода применяются на напряжении свыше 1000 В. Из-за нахождения на воздухе и открытой местности зачастую подвержены воздействию атмосферных явлений и прочих как природных, так и искусственных элементов, которые могут воздействовать на них. Они должны иметь защиту от коррозии.

Провод марки АС состоит из двух материалов: стального сердечника и проволоки из алюминия. Направление соседних повивав скрутки строго противоположное. Провод марки АС применяется для передачи электроэнергии в различных условиях при температуре от -60°C до 40°C . (рисунок 2)



Рис. 2. Провод АС

Провод марки А (рисунок 3) состоит из алюминиевой проволоки. Наружные витки направлены вправо, а внутренние влево. Данный вид провода применяется вдали от воды, допустима температура до 90°C . Срок эксплуатации составляет 45 лет [1].



Рис. 3. Провод А

Линии 6-35 кВ подвержены возникновению однофазных замыканий на землю, что влияет как на надежность электроснабжения, так и, в большей степени, угрозе для безопасности человека и техники из-за возникновения шагового напряжения.

Самонесущий изолированный провод

В качестве современной альтернативы неизолированным проводам используются самонесущие изолированные провода. Достоинствами СИП являются: неподверженность налипанию снега на провода, не требуют специальных условий для транспортировки и монтажа. Немаловажной особенностью является то, что применение СИП снижает количество незаконных присоединений к сети [2].

Изоляция СИПа состоит из полиэтилена, устойчивого к солнечным лучам. На линии 6-35 кВ устанавливается СИП-3 (рисунок 4). Данный провод рассчитан на применение на берегах морей, соленых озерах и промышленных районах. Диапазон температур при эксплуатации от -60°C до $+50^{\circ}\text{C}$. Срок службы проводов - не менее 40 лет [3.]



Рис. 4. СИП-3

Главными преимуществами при применении СИПа являются: безопасность при обслуживании, защита при перехлесте проводов. Исключается возможность перехлеста между фазами и замыканий на землю, снижены габариты подвески, что увеличивает экономию на опорах, дает возможность подвески на одной опоре линий разных напряжений [4]. Недостатки СИП: большая масса, большая стоимость, большие реактансы при сравнении с А и АС.

Реклоузеры

Новой вехой в развитии распределительных сетей - является повсеместное применение реклоузеров. Реклоузер - устройство для секционирования линии (рисунок 5).



Рис. 5. Реклоузер

Реклоузер – устройство, предназначенное для отключения линии, а также проведения АПВ в режимах с устойчивым КЗ, а также без него. Реклоузер способен осуществлять реконфигурацию электрической сети без участия оперативного персонала. Данные устройства используются в сетях до 35 кВ [5].

Вероятность возникновения короткого замыкания на линии при воздействии погодных условий или, к примеру, обвалившегося дерева, достаточно велика, из-за чего релейная защита полностью отключит поврежденную линию. При помощи реклоузеров воздушную линию делят на участки, и, в случае возникновения короткого замыкания, будет отключаться только поврежденный участок, тем самым будет обеспечена селективность. Реклоузер включает в себя комплекс элементов мониторинга и управления, а также автоматики повторного

включения. Реклоузер состоит из вакуумного выключателя, трансформаторы тока и напряжения, микропроцессорные устройства релейной защиты, собственных нужд, структура показана на рисунке 6 [6].



Рис. 6. Структура реклоузера

Таким образом, можно сделать вывод о необходимости замены устаревших проводов марки А и АС на самонесущий изолированный провод СИП-3, имеющий большее количество достоинств, которые позволяют нивелировать основные проблемы сетей с изолированной нейтралью, а также применения реклоузеров, для обеспечения секционирования и более надежного электроснабжения.

Библиографический список

1. Голые провода линий электропередачи. [Электронный ресурс] <https://cable.ru/articles/1154-golye-provoda-dlya-linij-elektroperedach> (дата обращения 04.02.2024)
2. СИП. Виды, маркировка, свойства, арматуры, применение [Электронный ресурс] <https://www.ekk.by/articles/sip-vidy-markirovka-svojstva-armatura-primenenie> (дата обращения 05.02.2024)
3. Провод СИП-3 – описание. [Электронный ресурс] https://cable.ru/cable/group-sip_3_description.php (дата обращения 04.02.2024)
4. Горюнов В.Н., А.А. Бубенчиков, С.С. Гиршин, Е.В. Петрова, А.А. Левченко, Эффективность применения самонесущих изолированных проводов в современных электроэнергетических системах, Энергетика. Электро-техника, Омский научный вестник, 2009
5. Сивеев Т.М., Сорокин А.С., Груздов А.Г., Дяттерев Д.А. РЕКЛОУЗЕР КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ, Столыпинский вестник №5/2022
6. Что такое реклоузер? [Электронный ресурс] <https://tmtrade.ru/chto-takoe-reklouzer> (дата обращения 04.02.2024)

УДК 004.932.4; ГРНТИ 28.23.15

УМЕНЬШЕНИЕ ШУМОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ РЕНТГЕНОВСКОГО ДЕТЕКТОРА МАРК 1215С

Д.Н. Уфимцева, Е.Ю. Грачев

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

Аннотация. В работе рассмотрены способы улучшения качества цифровых изображений рентгеновского детектора Марк 1215С. Приведены причины зашумления цифровых изображений и виды возможных шумов. Описаны процедуры темновой коррекции, коррекции усиления и алгоритм усреднения кадров. Показаны результаты обработки изображений с помощью алгоритмов коррекции плоского поля и коррекции усиления, приведена зависимость отношения сигнал-шум от количества усредняемых кадров.

Ключевые слова: шум, SNR, усреднение кадров, коррекция усиления, темновая коррекция, цифровой матричный детектор.

WIRELESS COMMUNICATION CHANNELS MODELS

E.U. Grachev, D.N. Ufimzeva

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, monopol_rus@mail.ru, dashayfimzeva@gmail.com

The summary. The paper provides ways to improve the quality of digital images of the Mark 1215C X-ray detector. The causes of noise in digital images, types of noise, signal-to-noise ratio (SNR), and methods for improving image quality are considered. The procedures for dark correction, gain correction, and frame averaging algorithm are described in detail. Graphs are shown illustrating the results of gain correction and the dependence of SNR on the number of averaged frames.

Keywords: noise, SNR, frame averaging, sensation correction, dark correction, flat panel detector.

На сегодняшний день методы цифровой рентгенографии являются востребованными во многих областях медицины, промышленности, научных исследованиях. Получаемые в цифровом виде изображения имеют высокое качество и возможность быстрой компьютерной обработки, минуя процедуру оцифровки, в отличие от снимков на пленке в аналоговых методах.

Одной из основных проблем получения качественных цифровых рентгеновских изображений является наличие шумов, которые снижают четкость и визуальное восприятие снимков. Для получения рентгеновских изображений в реальном времени используют матричный цифровой детектор (DDA). Рентгеновская трубка генерирует излучение, которое проходит сквозь объект исследования. Далее рентгеновское излучение попадает на активную область детектора (сенсор), преобразует его в электронные сигналы и передает на рабочую станцию. Часто захват изображения выполняется в условиях низкой дозовой нагрузки, в результате качество получаемого изображения значительно снижается, так как при увеличении чувствительности детектора возрастает зашумленность получаемого снимка.

Понятие шум цифрового изображения подразумевает собой случайное изменение интенсивности. Уровень шума влияет на четкость изображения и возможность различать объекты близкие по яркости. В случае, если уровень шума большой, изображение будет сложно интерпретировать даже при высоком разрешении. Поэтому часто требуется применение процедур коррекции изображений, позволяющих снизить шумовую составляющую рентгеновских снимков. [1]

Цифровое рентгеновское изображение представляет собой набор усредненных уровней яркости, фона и случайных составляющих, присутствующих на всей площади снимка. Кадр, который зарегистрирован с небольшим числом рентгеновских квантов обычно имеет высокий уровень шумов. Следовательно, шум увеличивает “неопределенность” при регистрации объектов на изображении. Для оценки качества изображений используется величина – отношение сигнал-шум (SNR). Данный параметр изображения сравнивает уровень полезного

сигнала с уровнем нежелательного шума на снимке. Согласно [2], SNR является отношением среднего значения линейаризованных значений градации серого к стандартному отклонению линейаризованных градаций серого (шум) в области цифрового изображения, представляющей интерес.

Необходимое пользователю отношение сигнал-шум – это компромисс между уровнем сигнала и шумоподавлением [3].

Виды шума

При обработке цифровых рентгеновских изображений приходится сталкиваться со следующими видами шумов[4]:

А) Шум считывания. Шумы считывания возникают из-за колебаний выходного сигнала. Эти колебания вызваны тепловым эффектом в считывающей электронике и могут быть уменьшены за счет снижения скорости считывания данных с датчика.

Б) Фиксированный структурный шум. Он возникает из-за наличия пикселей, которые обеспечивают одинаковую или непропорциональную реакцию по сравнению с другими пикселями, даже если параметры экспозиции отличаются.

В) Фотонный шум. Этот вид шума возникает из-за квантованности излучения, он характеризуется изменением количества фотонов, попадающих на детектор. Эффективным методом его уменьшения является метод плоскопольной коррекции, которая включает в себя калибровку усиления элементов детектора.

Г) Темновой шум. Даже в неэкспонированном состоянии активные элементы сенсора детектора генерируют небольшой ток, вызванный термически возбужденными электронами. Этот темновой ток со временем создает сигнал, а его случайные колебания приводят к появлению темнового шума.

Д) Случайный шум. Наличие электронной части в любом DDA всегда приводит к появлению шума на изображении. Этот шум носит случайный характер даже при непрерывном воздействии излучения. Уровень шума можно уменьшить с помощью метода усреднения кадров.

Процедура калибровки матричного цифрового детектора позволяет повысить качество получаемых рентгеновских изображений и снизить уровень перечисленных видов шумов. Из-за наличия разных видов шумов на изображениях, получаемых с любого цифрового детектора, калибровка этих изображений всегда выполняется в несколько этапов: темновая коррекция, калибровка усиления, формирование карты дефектных пикселей [5].

Темновая коррекция

Процедура темновой коррекции заключается в вычитании темного кадра из экспонированного изображения. Темновая коррекция выполняется при выключенном источнике ионизирующего излучения. Настройки детектора, используемые для темных и экспонированных изображений, должны быть одинаковыми. Яркость темного кадра напрямую зависит от температуры детектора. Из-за случайного характера темнового шума его уровень в некоторых случаях может превышать уровень полезного сигнала. Следовательно, прежде чем вычесть темный кадр, яркость экспонированного изображения необходимо увеличить на некоторое значение (темновой сдвиг).

Калибровка усиления

Процедура калибровки усиления заключается в устранении неравномерности яркости изображения, обусловленной особенностями рентгеновской системы (тип источника излучения, расположение детектора относительно источника излучения и т.п.).

После проведения калибровки усиления формируется набор таблиц, содержащих корректирующий коэффициент для каждого пикселя DDA. Для получения таблиц усиления необходимо несколько экспонированных изображений «плоского поля» (изображения, полученные с рентгеновского детектора, без каких-либо объектов). Анодное напряжение должно соответствовать значению, установленному для корректируемого изображения. Все изображения, применяемые для калибровки усиления, проходят темновую коррекцию. Процедура коррекции выполняется в соответствии с выражением [6]:

$$C = (R - D) * VFF, \quad (1)$$

где C – изображение после коррекции,

R – исходное изображение без обработки,

D – темновой кадр,

$VFF = m / (F - D)$ – коэффициент усиления применяемый для коррекции,

F – изображение «плоского поля»

m – усредненное по изображению значение $F - D$.

По вышеописанной методике была произведена обработка экспериментального рентгеновского изображения. На рисунках 1 и 2 показаны исходные данные изображения в виде уровней яркости пикселей одной строки и результаты обработки изображения в виде уровней яркости строки пикселей, полученные после процедуры темновой коррекции и процедуры коррекции усиления.

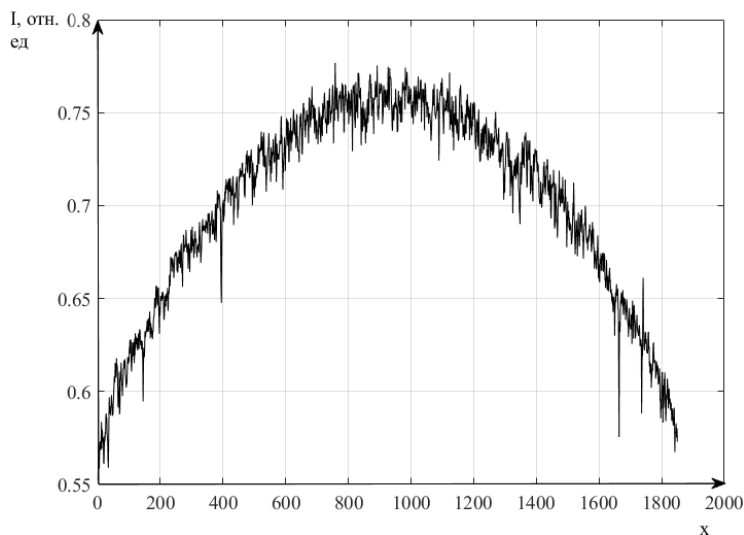


Рис. 1. Уровень яркости строки пикселей до процедуры коррекции усиления

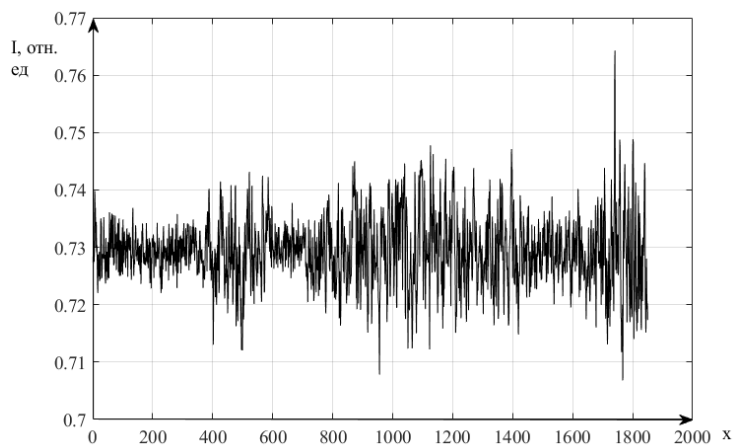


Рис. 2. Уровень яркости строки пикселей после процедуры коррекции усиления.

Метод усреднения кадров

Метод усреднения кадров заключается в том, получают необходимое количество изображений, снятых при одинаковых условиях и имеющие одинаковое разрешение, все они попиксельно складываются между собой, а далее вычисляется среднее значение. При помощи метода усреднения легко убрать все случайные шумы с изображения. Для получения наилучшего результата кадры, которые будут участвовать в усреднении, стоит предварительно подвергнуть процедуре калибровке усиления.

Усреднение изображения работает, исходя из предположения, что шум на полученном изображении действительно случайный. Таким образом, случайные колебания выше и ниже среднего уровня интенсивности изображения будут постепенно выравниваться по мере усреднения все большего количества изображений.

На рисунке 3 показана зависимость отношения сигнал-шум от количества усредняемых изображений, полученная в результате обработки 30 экспериментальных изображений.

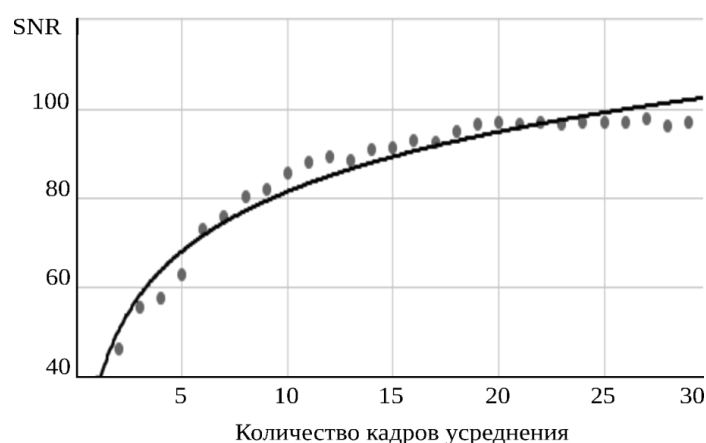


Рис. 3. График зависимости отношения сигнал-шум от количества усредняемых изображений

Как видно из рисунка 3, после некоторого количества усредняемых кадров, определяемого стоящими задачами, значение сигнал-шум изменяется экспоненциально и дальнейшее усреднение перестает быть эффективным. В методике усреднения кадров величина шума падает на квадратный корень из числа усредненных изображений. После определенного момента не будет заметной разницы в шумоподавлении при усреднении дополнительных кадров. Количество кадров, усредненных в поправках детектора (смещение и усиление), будет влиять на SNR полученного изображения.

Реализация ПО для детектора Марк 1215С

В настоящее время ведется разработка программного обеспечения для реализации методов коррекции цифровых изображений. В автоматическом режиме будет проводится коррекция плоского поля по заранее сохраненным кадрам «плоского поля», и добавлена возможность усреднения кадров по количеству, выбранному пользователем.

Библиографический список

1. SYSTEM QUALIFICATION OF DIGITAL DETECTOR ARRAY (DDA) Soraia R. Azeredo, Davi F. Oliveira, Joseilson R. Nascimento, Ricardo T. Lopes
2. ГОСТ ISO 17636-2-2017
3. [Электронный ресурс] URL: <https://4nsi.com/optimizing-image-signal-to-noise-ratio-using-frame-averaging/>; Дата обращения: 22.05.22
4. X-Ray Detector Characterization- a comparison of scintillators JAKOB LARSSON

5. РУКОВОДСТВО ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ ДЕТЕКТОР ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ «МАРК»

6. Flat-field correction technique for digital detectors J. Anthony Seibert, John M. Boone, and Karen K. Lindfors Department of Radiology, University of California Davis Medical Center Sacramento, CA 95817.

УДК 621.386.22; ГРНТИ 47.29.39

МИКРОФОКУСНЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ИСТОЧНИКИ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

П.А. Дудин

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

Аннотация. На протяжении более столетия конструкция источников рентгеновского излучения оставалась неизменной, опираясь на одну и ту же базовую технологию, несмотря на ее ограничения. Традиционные источники, хотя и просты в изготовлении, но с трудом справляются с требованиями передовых приложений в области медицинской визуализации, досмотра и высокоточного производства. С целью преодолеть эти ограничения, исследователи активно изучают революционную альтернативу: источники автоэмиссионного рентгеновского излучения на основе углеродных нанотрубок. В статье рассматриваются достижения этой многообещающей технологии, изучаются различные методы создания таких источников и подчеркиваются многочисленные преимущества, которые они предлагают. Такие преимущества включают в себя возможность создавать значительно меньшие и более конкретные формы электронного луча, что приводит к повышению разрешения изображения и гибкости в различных приложениях. Кроме того, эти источники обладают улучшенной временной стабильностью, обеспечивая стабильную генерацию рентгеновских лучей, и открывают путь к разработке более быстрых импульсных источников, имеющих решающее значение для конкретных методов визуализации.

Ключевые слова: рентгеновское излучение; микрофокусные рентгеновские источники, полевая эмиссия; источник электронов; углеродные нанотрубки.

MICROFOCUS X-RAY TUBES BASED ON CARBON NANOTUBES

P.A. Dudin

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

The summary. For well over a century, the design of X-ray sources remained stagnant, relying on the same basic technology despite its limitations. These traditional sources, while simple to manufacture, struggle to keep pace with the demands of advanced applications in medical imaging, security screening, and high-precision manufacturing. To overcome these limitations, researchers are actively exploring a revolutionary alternative: carbon nanotube-based field emission X-ray sources. This article delves into the cutting edge of this promising technology, exploring the various methods for creating these sources and highlighting the numerous advantages they offer. These benefits include the ability to produce significantly smaller and more specific shapes for the electron beam, leading to enhanced image resolution and flexibility in various applications. Furthermore, these sources boast improved temporal stability, ensuring consistent X-ray generation, and pave the way for the development of faster, pulsed sources crucial for specific imaging techniques.

Keywords: X-ray; microfocus X-ray sources, field emission; electron source; carbon nanotubes.

Электронная эмиссия

Основой коммерческих источников рентгеновского излучения является источник электронов, испускаемых катодом и направляемых к положительно заряженному аноду в высоком вакууме. Эмиссия электронов происходит с поверхности металла при воздействии высокого электрического поля. Существуют три основные формы электронной эмиссии: фотоэмиссия (ФЭ), термоэлектронная эмиссия (ТЭ) и полевая эмиссия (ПЭ).

Фотоэмиссия возникает, когда металл облучается оптическим излучением, длина волны которого превышает работу выхода ϕ эмиттера, и обычно находится в ультрафиолетовом диапазоне. В результате электроны возбуждаются и проходят через потенциальный барьер. Источники ФЭ имеют низкую энергоэффективность: большая часть падающего оптического излучения поглощается материалом эмиттера, и только небольшая часть популяции фотонов способствует прямому излучению. Хотя источники ФЭ могут достигать очень больших скоростей отклика и высокой пропускной способности, они не получили широкое распространение из-за очень низких эмиссионных токов.

Термоэлектронная эмиссия может создавать значительные плотности тока, способные стимулировать рентгеновское излучение. Высокие плотности тока и нагрев требуют использования системы вращающегося анода и активного охлаждения в источниках ТЭ. В системах с термоэлектронной эмиссией электроны высвобождаются из металлической нити, часто сделанной из вольфрама, которая нагревается до температуры выше 1000°C . Поскольку эмиссия зависит от температуры нити, ее повышение позволяет большему числу электронов преодолеть барьер. В источниках ТЭ пучок контролируется анодным током и регулировкой температуры нити с помощью замкнутой системы управления. Тепловая инерция нагретой нити и задержка отклика системы обратной связи приводят к сравнительно медленному временному отклику, часто в несколько сотен миллисекунд. Также важно ограничивать ток нити, чтобы предотвратить перегрев и повреждение. Ключевым параметром является размер фокусного пятна, связанный с размерами области эмиссии электронов. В случае источников ТЭ размер нити обычно составляет около 2 мм в диаметре и 10 мм в длину. Некоторые рентгеновские трубки ТЭ оснащены двумя нитями, что позволяет выбрать размер фокусного пятна, но снижает максимальный ток и выход фотонов. Для дальнейшего уменьшения размера фокусного пятна часто применяют электростатические и магнитные методы фокусирования, что увеличивает сложность и размеры источника.

Полевая эмиссия обладает рядом значительных преимуществ, такими как компактный размер, работа при комнатной температуре (не требуется нагревательный элемент). ПЭ является туннельным процессом и обеспечивает практически мгновенную эмиссию с временем нарастания менее 50 мкс. Электроны испускаются под воздействием высокого электрического поля, обычно порядка нескольких В/мкм, и затем туннелируют через узкий потенциальный барьер. Ток автоэмиссии I аппроксимируется уравнением:

$$I = \left(\frac{A\beta^2 V^2}{\phi} \right) \exp \left(\frac{-B\phi^{\frac{3}{2}}}{\beta V} \right), \quad (1)$$

где V — приложенное напряжение, ϕ — работа выхода эмиттера, β — коэффициент усиления поля, а A и B связаны с физическими константами.

Для учета высоких температур во время эмиссии и сильной кривизны на вершинах наноматериалов, использующихся в качестве эмиттеров, были предложены различные уточнения модели. Высокое электрическое поле, необходимое для полевой эмиссии, тесно связано с кривизной и соотношением длины к диаметру излучающего материала. Коэффициент усиления поля зависит от геометрических параметров, таких как форма и ориентация. В целом, острые кончики типа "усиков" излучают при значительно более низком напряжении по сравнению с материалами с плоской поверхностью. Данные аргументы объясняют использование нанотрубок в приложениях полевой эмиссии.

В 1968 году был разработан метод создания системы полевых эмиттеров на основе конических структур из молибдена. Такие эмиттеры использовались в различных системах электронной эмиссии, таких как дисплеи с полевой эмиссией и высокоскоростные устройства ра-

диочастотной связи. Данные эмиттеры обладали высокими плотностями тока до 20 А/см², однако проблема разработки материалов с высокими плотностями тока и низкими напряжениями включения оставалась актуальной из-за требований к эмиттерному материалу. Новые материалы, такие как нанотрубки и нановолокна, позволили создавать эмиттеры с высокими соотношениями между высотой и шириной структуры, что привело к увеличению коэффициента усиления поля и снижению напряжения включения. Углеродные нанотрубки (УНТ) продемонстрировали высокую эффективность в электронной эмиссии благодаря своей уникальной форме.

Автоэмиссионное применение УНТ

Открытие углеродных нанотрубок (УНТ) в начале 1990-х годов привело к повышенному интересу, и в 1995 году были проведены одни из первых исследований по полевой эмиссии с использованием УНТ. К началу следующего десятилетия были выявлены различные области применения УНТ в качестве полевых эмиттеров, включая микроскопы с высоким разрешением, плоские панельные дисплеи, устройства радиочастотной связи, литографию электронного луча и рентгеновские катодные источники.

Углеродные нанотрубки обладают высоким соотношением длины к диаметру, высокой теплопроводностью и низкой химической активностью. Однако для стабильной работы требуется сверхвысокий вакуум ($<10^{-8}$ мбар), что ограничивает их применение.

Технология создания источников на основе УНТ столкнулась с серьезными проблемами, такими как надежность, стабильность во времени, пространственная однородность и воспроизводимость, что препятствовало их широкому распространению. Несмотря на это, рентгеновские источники на основе УНТ были предложены в работе [1]. В этой работе выращивали нанотрубки, выровненные вертикально на подложках из вольфрама, покрытых кобальтом. Эта установка давала пучковой ток всего 1,5 мкА, но была достаточной для создания изображений на рентгенчувствительной пленке различных образцов. Срок службы катодной сборки составлял чуть больше часа, и изображения имели серьезные дефекты. Тем не менее, эта работа убедительно демонстрировала потенциал УНТ, одновременно выявляя критические проблемы, такие как флуктуации в токе пучка, которые требовалось решить.

В работе [2] УНТ и углеродные нановолокна, выращенные на подложках из палладия, использовались в качестве источника эмиссии, при этом не использовались контрэлектрод и затвор для управления пучком электронов. Такое устройство работало в течение нескольких часов при напряжении 30 кВ с током пучка 50 мкА. Получались четкие изображения, но требовалось длительное и технологически неприемлемое время на накопление информации. Та же группа создала триодную конфигурацию (с включением затворного электрода), что увеличило ток пучка до примерно 1 мА. Было опубликовано и множество других примеров использования аналогичных триодных конфигураций, включая конструкции с дополнительными фокусирующими электродами [3, 4].

Изготовление катода

Рентгеновские трубки требуют генерации пучка электронов, направленного к аноду, который генерирует рентгеновские лучи. Катод является источником электронов, и его конструкция и материалы значительно влияют на производительность. Первые эмиттеры УНТ основывались на углеродных наноструктурах, осажденных на металлические наконечники с использованием химического осаждения из газовой фазы (CVD). Современные разработки сосредоточены на плоских подложках для создания более воспроизводимых устройств. УНТ могут быть осаждены различными методами, такими как вакуумная фильтрация, распыление и трафаретная печать, которые позволяют структурировать тонкие пленки УНТ.

Методы жидкофазного осаждения ограничены разрешением около 100 мкм из-за растекания УНТ-чернил (суспензия углеродных нанотрубок в жидкости). Нанолитография и струйная печать позволяют достигать разрешения до 1 мкм, но УНТ остаются неупорядоченными. Микроконтактная печать и субтрактивные методы, такие как кислородное плазменное травление, обеспечивают разрешение до 0,4 мкм.

Процессы химического осаждения из газовой фазы (CVD) позволяют достичь разрешения менее 0,1 мкм и обеспечивают рост вертикально ориентированных УНТ, но требуют подложек, совместимых с высокими температурами ($> 300\text{ }^{\circ}\text{C}$) [5]. Метод CVD обеспечивает наилучшую равномерность толщины пленки по сравнению с другими методами.

Большинство источников УНТ для рентгеновских трубок изготавливаются методами жидкофазного осаждения из-за простоты обработки и снижения затрат. Рассмотрены основные методы изготовления тонких пленок УНТ для рентгеновских трубок с акцентом на применяемые в эмиттерах УНТ.

Методы нанесения УНТ

Методы формирования пленок путем капельного нанесения, литья и распыления являются одними из распространенных подходов к созданию пленок на основе углеродных нанотрубок (УНТ). УНТ-чернила (углеродно-нанотрубные) представляют собой суспензию углеродных нанотрубок, равномерно диспергированных в жидкой среде, в растворителе или связующем веществе.

При капельном методе нанесения, чернила на основе УНТ наносятся непосредственно на подложку в виде капель. Данный метод обычно используется для нанесения тонких слоев на небольшие площади и обеспечивает простоту применения.

Метод литья предполагает нанесение УНТ-чернил на подложку путем заливки раствора на поверхность, которая затем высыхает, образуя тонкий слой материала. Такой метод характеризуется высокой простотой и широким спектром применения.

Метод распыления включает в себя распыление УНТ-чернил на поверхность подложки с использованием давления газа, образуя тонкий равномерный слой материала. Метод позволяет покрывать большие поверхности и обеспечивает равномерное распределение материала.

Все эти подходы изначально требуют процесса обработки углеродных нанотрубок, полученных при выращивании, с использованием жидкостей (диспергирование, функционализация, очистка), что ограничивает производительность полученного рентгеновского источника. Использование мощной ультразвуковой обработки и вакуумно-нестабильных ПАВ, необходимых для формирования стабилизированных, однородных чернил, приводит к снижению временной стабильности, появлению нежелательного гистерезиса и общему ухудшению характеристик излучения.

Электроосаждение

Электроосаждение является методом нанесения материалов из жидкой фазы, включающим транспортировку, размещение и возможное выравнивание капельно осажденных или распылением углеродных нанотрубок. Такой метод использует неравномерное распределение заряда УНТ и его взаимодействие с электрическим полем. Применяется для нанесения однослойных УНТ на различные подложки, такие как нержавеющая сталь или легированный кремний. Композитные пленки УНТ, осажденные методом электроосаждения, характеризуются контролируемой плотностью поверхности, хорошими характеристиками полевой эмиссии, высокой плотностью тока и долгосрочной стабильностью при высоких напряжениях. Данные свойства делают их пригодными для использования в качестве источника электронов для высокоразрешающей рентгеновской визуализации.

Углеродные нанотрубки осаждаются на электродах из хрома и меди, которые располагаются на окисленной кремниевой подложке с промежуточным слоем стекла для улучшения адгезии. Эмиттеры подвергаются нагреву до 480°C в течение 30 минут для активации стеклянного слоя и уменьшения межфазного сопротивления. Для снижения порога включения эмиттеры подвергаются механической активации, достигая порогового поля 3.5 В/мкм при плотности тока эмиссии 10 мкА/см^2 . Электроосаждение является простым и дешевым методом формирования зон эмиссии, однако зоны имеют относительно большие диаметры катодов порядка 2 мм, что снижает функциональность системы.

Использование электроосаждения в жидкой фазе позволяет структурировать неупорядоченные многослойные УНТ в однородном растворе с хлоридом магния (MgCl_2) и стеклообразующими добавками. Толщина пленки контролируется временем осаждения и величиной приложенного напряжения, однако точное воспроизведение образцов и контроль толщины с погрешностью менее 10 нм являются сложной задачей. Такие техники характеризуются низкой однородностью и воспроизводимостью, что является следствием простоты обработки. Связывающие материалы содержат примеси, что затрудняет анализ механизмов эмиссии. Как и при других методах нанесения из жидкой фазы, эмиттеры требуют механической обработки, тем не менее электроосаждение является быстрым и простым методом.

Вакуумная фильтрация и трафаретная печать

Многие источники рентгеновского излучения на основе полевой эмиссии используют тонкие пленки углеродных нанотрубок, полученные методом трафаретной печати или вакуумной фильтрации. Растворы УНТ наносятся в макромасштабе, формируя дезорганизованные сети с несколькими УНТ, стоящими вертикально.

При вакуумной фильтрации чернила УНТ наливают на пористую целлюлозную мембрану, на противоположную сторону которой подается частичный вакуум. Пониженное давление заставляет растворитель проходить через мембрану, оставляя УНТ на ее поверхности. После промывки пленка УНТ переносится на подложку при умеренном давлении (40 г/см^2) и нагревании (около 70°C). Мембрану затем растворяют ацетоном или метанолом.

Метод вакуумной фильтрации используется более десяти лет. Он предлагает быстрый и недорогой способ создания пленок УНТ, не требующий значительного технологического оборудования. Однако для стабилизации чернил используют поверхностно-активные вещества, такие как натриевая соль додецилбензолсульфоокислоты, что ухудшает свойства УНТ. Интенсивная обработка кислотами и ультразвуком снижает длину, кристалличность и электронные свойства УНТ. Чернила наносят на металлические диски с помощью трафаретной печати или вакуумной фильтрации через целлюлозные мембраны, растворимые в ацетоне. Пленки имеют хаотичную структуру без выраженных острых выступов, что снижает их эффективность в полевой эмиссии. Для улучшения характеристик таких эмиттеров требуется их механическая обработка.

С целью улучшения адгезии УНТ к подложке используются пасты, содержащие частицы сплава серебра и никеля в растворителе из этилцеллюлозы и терпинеола, нанесенные на подложки из стекла с покрытием из оксида индия и олова. После запекания при 300°C покрытия показывают хорошую адгезию и воспроизводимость с плотностью тока до 350 мА/см^2 . Тем не менее, процесс измельчения ухудшает качество углеродных нанотрубок, что негативно влияет на их долговременную стабильность.

Основной проблемой трафаретной печати является ограничение разрешения рисунка. УНТ в чернилах имеют длину около 5 мкм, что может приводить к засорению сетки и снижению пористости. Формирование стабилизированных однородных чернил УНТ важно для капельного, литьевого, распылительного нанесения, вакуумной фильтрации и трафаретной печати. Создание таких чернил требует ультразвуковой и кислотной обработки, ухудшающей свойства углеродных нанотрубок. Хотя эти методы обеспечивают простой и недорогой

способ изготовления эмиттеров, УНТ покрываются вредными веществами, которые можно удалить только высокотемпературной обработкой.

Трафаретная печать подходит для обработки больших площадей, но имеет низкое разрешение. Плазменное травление в сочетании с литографией является альтернативным способом, однако значительная шероховатость поверхности УНТ снижает конечную точность. Электроосаждение может обеспечить выравнивание УНТ, но для достижения максимальной эффективности необходимо использовать методы, способные массово выравнивать УНТ, например такие как химическое осаждение из газовой фазы (CVD), который является наиболее перспективным.

Химическое осаждение из газовой фазы

Химическое осаждение из газовой фазы (CVD) предоставляет более контролируемый способ выращивания углеродных нанотрубок (УНТ). В процессе самосборки из атомных единиц, УНТ формируются в высокопараллельном процессе, который в сочетании с литографическими методами позволяет создавать наноструктуры на уровне нанометров. Техника CVD регулирует рост неупорядоченных или выровненных тонких пленок УНТ в зависимости от подложки и катализатора.

Обычно, на кремниевую подложку наносят металл-катализатор, который затем структурируют с помощью литографии или маскирования, например, методом магнетронного распыления или плазменного травления. Подложка нагревается до температуры выше 500°C , и рост УНТ инициируется подачей углеводородного газа, такого как метан (CH_4) или ацетилен (C_2H_2), в сочетании с газом, вытравливающим углерод, обычно водородом (H_2) или аммиаком (NH_3).

В работе [6] использовали термическое химическое осаждение из газовой фазы для синтеза многослойных УНТ, нанесенных на подложки из молибдена или кремния, и получили плотность тока выше $1 \text{ A}/\text{cm}^2$. При этом УНТ были длиной несколько микрометров и случайно ориентированы. CVD-технологии позволяют выравнивать УНТ, но случайная ориентация все же возможна. Было отмечено, что напряжение включения составляет примерно $2 \text{ В}/\text{мкм}$. Дезорганизованные пленки обладают структурной динамикой под воздействием высокого электрического поля, что улучшает их эмиссионные характеристики. Однако кратковременная стабильность таких устройств невысока из-за неконтролируемой микроструктуры эмиттера. Как в случае и трафаретной печати, и вакуумной фильтрации, одной из проблем является степень адгезии между УНТ и подложкой при воздействии высоких электрических полей. Управление каталитическим процессом показало, что эту проблему можно решить. Было продемонстрировано очень низкое изменение анодного тока ($< \pm 0.7\%$) при постоянной эмиссии в течение 200 часов с использованием двуслойного катализатора из оксида индия-олова и никеля (Ni) толщиной 10 нм.

Использование метода CVD для нанотехнологии рентгеновских источников пока находится на начальной стадии из-за трудностей с контролем роста материала. Тем не менее, недавние успехи в понимании катализа нанотрубок ускоряют использование УНТ и углеродных нановолокон (УНВ) в рентгеновских источниках на основе полевой эмиссии, и делают их перспективным кандидатом для коммерциализации.

Диодные и триодные способы конфигурации рентгеновских источников

Первые примеры рентгеновских излучателей, использующих электронные источники на основе полевой эмиссии, использовали диодные конфигурации, состоящие только из катода и анода. Однако в таких устройствах ток эмиссии зависел только от напряжения на аноде. В результате, такие диодные конфигурации обеспечивали ограниченный контроль над величиной тока эмиссии для большинства приложений. Для более точного контроля тока

эмиссии, а также для обеспечения некоторой защиты, стало стандартной процедурой добавление третьего электрода. Этот управляющий электрод создаёт триодную конфигурацию.

На ранних этапах разработки рентгеновских источников на основе УНТ, был введён контрэлектрод. Контрэлектрод представляет собой дополнительный электрод, который помогает управлять направлением и интенсивностью электронного пучка. Поскольку это естественным образом создавало анизотропный пучок, предпочтительным механизмом управления стала перфорированная сетка или управляющий электрод. Целью управляющего электрода является создание локального электрического поля, которое отводит электроны от основного пучка эмиссии. Впрочем на практике значительная часть излучаемых электронов будет притягиваться к управляющему электроду. Поэтому управляющий электрод должен быть достаточно прозрачным, чтобы максимальное количество электронов могло пройти к аноду. Обычно более 50% тока катода направляется на управляющий электрод, что ограничивает эффективность таких устройств. Однако недавно были проведены исследования [7] по улучшению прозрачности управляющего электрода за счёт включения графеновых слоёв, что показало значительное улучшение эффективности до примерно 60%, но такая техника ещё не применялась к рентгеновским источникам. Кроме того, было описано и добавление четвёртого электрода, установленного непосредственно над управляющим электродом. Заявленная пропускная способность электронов катода УНТ к аноду достигала 80%. Также существует множество примеров добавления дополнительных фокусирующих электродов, используемых для уменьшения размера фокусного пятна.

Библиографический список

1. Sugie, H. Carbon nanotubes as electron source in an x-ray tube. // Appl. Phys. Lett. – 2001. – Т. 78. – № 17. – С. 2578-2580.
2. Haga, A. A miniature x-ray tube. // Appl. Phys. Lett. – 2004. – Т. 84. – № 13. – С. 2208-2210.
3. Choi, H. Y., Chang, W. S., Kim, H. S., Park, Y. H., & Kim, J. U. Acquisition of X-ray images by using a CNT cold emitter. // Phys. Lett. A. – 2006. – Т. 357. – № 1-2. – С. 36-41.
4. Pirio, G. Fabrication and electrical characteristics of carbon nanotube field emission microcathodes with an integrated gate electrode. // Nanotechnology. – 2002. – Т. 13. – № 1. – С. 1.
5. Milne, W. I., & Zhang, Q. Advances in Nanodevices and Nanofabrication. – Singapore : Pan Stanford Publishing, 2012.
6. Sarrazin, P. Carbon-nanotube field emission x-ray tube for space exploration XRD/XRF instrument. // Adv. X-Ray Anal. – 2004. – Т. 47. – № 8. – С. 2481-2487.
7. Li, C., Cole, M. T., & Lei, W. Highly electron transparent graphene for field emission triode gates. // Adv. Funct. Mater. – 2014. – Т. 24. – № 8. – С. 1218-1227.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИЯ О VII МЕЖДУНАРОДНОМ ФОРУМЕ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» СТНО-2024».....	3
МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ. РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА».....	6
Секция «МИКРОВОЛНОВАЯ, ОПТИЧЕСКАЯ И КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА».....	6
Роговин В.И., Чистяков И.А. Особенности проектирования импульсной ЛБВ Ку-диапазона с низковольтной модуляцией по фокусирующему электроду.....	6
Бессонов Д.А., Богачев Р.Ю., Журавлев С.Д., Крачковская Т.М., Шестеркин В.И. Формирование двойных сеточных структур в катодно-сеточных узлах электровакуумных приборов методом лазерного фрезерования.....	12
Богачев Р.Ю., Бессонов Д.А., Журавлев С.Д., Крачковская Т.М., Шестеркин В.И. Неразъемное соединение углеродосодержащих деталей с металлами методом лазерного заклёпывания.....	16
Морев С.П., Филин Ю.Ю., Коломийцева Н.М., Именина К.С., Кривошей Н.А. Особенности использования модуляции «плюс-минус» в электронно-оптической системе с кольцевым катодом и низковольтным бессеточным управлением.....	19
Морев С.П., Сычев Н.А. Применение модели электронного потока с ненулевым фазовым объемом для проектирования ЭОС СВЧ приборов О-типа, работающих в W-диапазоне.....	22
Базылев В.К., Жидков А.М., Коротченко В.А. Измерение скорости испарения активного вещества катода в отпаянных электровакуумных приборах на основе поверхностной ионизации.....	26
Горлин О.А., Климаков В.В. Моделирование тепловых характеристик мощного развязывающего устройства.....	32
Саблин В.М., Дармаев А.Н., Морев С.П., Потрахов Н.Н., Ханбеков И.Ф., Ли И.П. Особенности формирования электронного потока в электронных пушках рентгеновских трубок с прямонакальными катодами.....	36
Галдецкий А.В., Голованов Н.А., Морев С.П. Резонаторная система сверхмощного многолучевого клистрона с радиальным расположением лучей.....	39
Чиркин М.В., Астанкович А.Д., Мишин В.Ю., Серебряков А.Е., Устинов С.В., Шурмин Д.С. Оценка частоты реакции Пеннинга в положительном столбе разряда в кольцевом гелий-неоновом лазере.....	44
Иванов С.Ю., Мишин В.Ю. Анализ и оценка эффективности электрического счетчика марки «ФОБОС».....	49
Сафронов С.А., Климаков В.В. Моделирование работы пьезолопасти электронного модуля охлаждения.....	52

Чиркин М.В., Иваненко Ю.Р., Серебряков А.Е., Мишин В.Ю., Давыдов Г.В. Устойчивость метода компенсации динамического захвата лазерного гироскопа к возмущениям параметров его первичных сигналов.....	60
Секция «ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ, МИКРО-И НАНОЭЛЕКТРОНИКА» 70	
Линьков В.А., Линькова С.Ю. Поиск излучающих наночастиц в окрестностях точек либрации планет солнечной системы для синтеза телеуправляемых нанообъектов, запускающих механизмы регенерации элементов биологических систем.....	70
Логинов Д.С., Шерова И.Ф., Холомина Т.А. Прогнозирование надежности электронных компонентов по параметрам низкочастотного шума.....	80
Косорукова А.М., Литвинов В.Г. Современное состояние сканирующей микроскопии сопротивления растекания.....	83
Моргунов А.С., Полагин М.В., Литвинов В.Г., Мишустин В.Г. Лабораторный стенд для изучения магнитных свойств ферромагнитных материалов.....	87
Трусов Е.П., Ермачихин А.В., Воробьев Ю.В., Литвинов В.Г. Исследование электрических характеристик аморфных пленок GST225.....	91
Моргунов А.С., Гудзев В.В. Виртуальный стенд для лабораторной работы по изучению емкостной релаксационной спектроскопии глубоких уровней.....	97
Рыбин Н.Б., Рыбина Н.В., Трегулов В.В., Иванов А.И. Исследование поверхности металлических образцов с помощью фрактального анализа.....	101
Денисова Ю.Н. Особенности моделирования многослойных полупроводниковых гетероструктур.....	105
Вишняков Н.В., Гудков Ю.Д., Мишустин В.Г. Моделирование оптического поглощения в многослойных полупроводниковых структурах.....	110
Андрианов И.А., Миронов М.С. Исследование эффективности GaN-транзисторов.....	113
Васин А.В. Современное состояние электрофизических методов локального исследования полупроводниковых микро- и наноструктур.....	117
Зайцев К.С., Литвинов В.Г. Тестовые структуры и основные измеряемые параметры полупроводниковых приборов...	125
Литвинова Д.В., Литвинова В.С. Обзор влияния использования современных фотоприемников ИК диапазона на космологические исследования.....	129

Секция «ПРОМЫШЛЕННАЯ СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ».....	133
Несудимов А.В., Иванов В.С. Метод наблюдения и анализа показаний счетчиков на основе технологий распознавания текста.....	133
Комаров В.В., Сливкин Е.В. Способы поиска поврежденного присоединения при однофазных замыканиях на землю в сетях с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью.....	139
Кудишин С.С., Иванов В.С. Эффект от замены устаревшего силового оборудования и релейной защиты на подстанции.....	144
Лабзин И.С., Ляпин В.Г. Применение беспилотного контроля воздушных линий электропередач, как средства повышения надёжности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей.....	148
Прокудин Р.В., Литвиненко А.М. Энергосберегающий орбитальный электропривод муфты тормоза кривошипного пресса.....	152
Михалёв В.А. Способы повышения надежности электроснабжения ВЛ 10 кВ.....	162
Уфимцева Д.Н., Грачев Е.Ю. Уменьшение шумовой составляющей цифровых изображений рентгеновского детектора Марк 1215С.....	166
Дудин П.А. Микрофокусные рентгеновские источники на основе углеродных нанотрубок.....	170

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ**Научное издание****В 10 томах****Том 2**

Под общей редакцией О.В. Миловзорова.

Подписано в печать 15.06.24. 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 978-5-7722-0403-0



9 785772 204030 >