

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ ИНФОРМАТИЗАЦИИ
СОЮЗ МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ
РЯЗАНСКОЙ ОБЛАСТИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ

СТНО-2019

II МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО- ТЕХНИЧЕСКИЙ ФОРУМ

Сборник трудов

Том 2

Рязань
Book Jet
2019

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

Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2019 [текст]: сб. тр. II междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.2./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2019; Рязань. – 150 с.,: ил.

Сборник включает труды участников II Международного научно-технического форума «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2019.

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

Авторская позиция и стилистические особенности сохранены.

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

ISBN 978-5-7722-0301-9

© Рязанский государственный
радиотехнический университет, 2019
© Издательство «Book Jet»,
макет, 2019

ИНФОРМАЦИЯ О МЕЖДУНАРОДНОМ ФОРУМЕ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» СТНО-2019

II Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2019 состоялся 27.02.2019-01.03.2019 в г. Рязань в Рязанском государственном радиотехническом университете.

В рамках II Международного форума «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2019 состоялись четыре Международные научно-технические конференции:

«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;
- Современные методы обработки данных;
- Актуальные задачи химических технологий;

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

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

• Информационно-измерительные устройства и системы в технике и медицине;

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

• Проблемы рынка: экономика и управление;

• Актуальные проблемы государственного, муниципального и корпоративного управления;

- Менеджмент и организация производства;
- Бухгалтерский учет, анализ и аудит;
- Управление персоналом;
- Экономическая безопасность;

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

- Современные технологии электронного обучения;
- Иностранный язык в техническом вузе;
- Лингвистика и межкультурная коммуникация;
- Направления и формы гуманитаризации высшего образования;
- Методы преподавания и организация учебного процесса в вузе;
- Гуманитарная подготовка студентов;
- Физико-математическая подготовка студентов;
- Технологии обучения и воспитания на военной кафедре.

Организационный комитет Форума:

Чиркин М.В., и.о. ректора, д.ф.-м.н., проф. – председатель

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

Бухенский К.В., проректор по учебной работе, к.ф.-м.н., доц. – зам. председателя;

Миловзоров О.В., зам. директора института магистратуры и аспирантуры, к.т.н, доц. – координатор;

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

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

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

члены оргкомитета:

Авилкина С.В., к.п.н., доцент кафедры «Государственное, муниципальное и корпоративное управление»;

Алпатов Б.А., д.т.н., профессор кафедры «Автоматика и информационные технологии в управлении»;

Бабаян П.В., к.т.н., доц., зав. кафедрой «Автоматика и информационные технологии в управлении»;

Витязев В.В., д.т.н., проф., зав. кафедрой «Телекоммуникации и основы радиотехники»;

Евдокимова Е.Н., д.э.н., проф., декан Инженерно-экономического факультета; зав. кафедрой «Экономика, менеджмент и организация производства»;

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

Ерзылева А.А., к.э.н., доцент кафедры «Экономика и финансовый менеджмент»;

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

Жулев В.И., д.т.н., проф., зав. кафедрой "Информационно-измерительная и биомедицинская техника";

Иваненко Р.В., полковник, начальник Военной кафедры;

Кириллов С.Н., д.т.н., проф., зав. кафедрой "Радиоуправление и связь";

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

Ключко В.К., д.т.н., профессор кафедры «Автоматика и информационные технологии в управлении»;

Коваленко В.В., к.т.н., доц., зав. кафедрой «Химическая технология»;

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

Костров Б.В., д.т.н., проф., зав. кафедрой «Электронные вычислительные машины»;

Кошелев В.И., д.т.н., проф., зав. кафедрой «Радиотехнические системы»;

Круглов С.А., к.т.н., доц., зав. кафедрой «Промышленная электроника»;

Куприна О.Г., к.п.н., доцент кафедры Иностранных языков;

Лукьянова Г.С., к. ф.-м.н., доцент кафедры «Высшая математика»;

Мусолин А.К., д.т.н., проф., зав. кафедрой «Автоматизация информационных и технологических процессов»;

Овечкин Г.В., д.т.н., профессор кафедры «Вычислительная и прикладная математика»;

Паршин Ю.Н., д.т.н., проф., зав. кафедрой «Радиотехнические устройства»;

Перфильев С.В., д.э.н., проф., зав. кафедрой «Государственное, муниципальное и корпоративное управление»;

Пржегорлинский В.Н., к.т.н., доц., зав. кафедрой «Информационная безопасность»;

Пылькин А.Н., д.т.н., проф., декан факультета Вычислительной техники, зав. кафедрой «Вычислительная и прикладная математика»;

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

Серебряков А.Е., к.т.н., зам. зав. кафедрой «Электронные приборы»;

Соколов А.С., д.и.н., зав. кафедрой «Истории, философии и права»;

Таганов А.И., д.т.н., проф., зав. кафедрой «Космические технологии»;

Холомина Т.А., д.ф.-м.н., проф., зав. кафедрой «Микро- и наноэлектроника»;

Чеглакова С.Г., д.э.н, проф., зав. кафедрой «Экономическая безопасность, анализ и учет»

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

СЕКЦИЯ «МИКРОВОЛНОВАЯ, ОПТИЧЕСКАЯ И КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»

УДК 621.373; ГРНТИ 47.29.37

КРУПНОСТРУКТУРНЫЕ АВТОЭМИССИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА ДЛЯ ВАКУУМНЫХ СВЧ ПРИБОРОВ: РАСЧЕТЫ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ

С. П. Морев^{*,**}, А. Н. Дармаев^{*}, Д. А. Комаров^{*}, К. В. Кузьмич^{*},
С. П. Масленников^{**}, Э. К. Муравьев^{*}, В. М. Саблин^{*}

^{*} АО Научно-производственное предприятие «Торий», г. Москва, morev.sp@toriy.ru

^{**} Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, г. Москва,

Аннотация. Представлены результаты расчетов и экспериментальные исследования крупноструктурных автоэмиссионных катодных ячеек, предназначенных для использования в СВЧ приборах.

Ключевые слова: автоэмиссионные катоды, электронно-оптическая система, СВЧ приборы О типа

LARGE-SCALE FIELD EMISSION SOURCES OF ELECTRICITY FOR VACUUM MICROWAVE DEVICES: CALCULATIONS AND EXPERIMENTS

С. П. Морев^{*,**}, А. Н. Дармаев^{*}, Д. А. Комаров^{*}, К. В. Кузьмич^{*},
С. П. Масленников^{**}, Э. К. Муравьев^{*}, В. М. Саблин^{*},

^{*} JSC "RPE "Toriy", Moscow, Russia, morev.sp@toriy.ru

^{**} National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

Abstract. The results of calculations and experimental studies of large-structure field emission cathode cells intended for use in microwave devices are presented.

Keywords: field emission cathodes, the electron-optical system, O-type microwave devices.

1. Введение

Первые образцы СВЧ приборов, использующих автокатоды (фемитроны), появились в 1958 г. Однако из-за возможности получать гораздо более высокие параметры приборов на термокатодах работ в этом направлении были прекращены. Интерес к приборам с автоэмиссией возобновился после публикаций работ Ч. Спиндта. Первоначально значительное количество публикаций (достаточно посмотреть на материалы конференций IVEC и IVESC за период 1980-2019 гг.) было посвящено исследованию различных аспектов формирования структур, включающих матричные катоды, лезвийные катоды или нанотрубки, затем, начиная с 2004 г., появились публикации о создании образцов ЛБВ с выходной мощностью порядка 45 Вт в диапазоне 4 ГГц.

Из-за возможности получения стабильной автоэлектронной эмиссии катодов при техническом вакууме перспективными материалами для автоэмиссионных катодов различных электровакуумных устройств продолжают быть модификации углеродных материалов (углеродные нанотрубки и волокна, острия из стеклоуглерода, алмазоподобные пленки и тому подобное).

В статье представлены материалы теоретических и экспериментального исследования автоэмиссионных структур, обеспечивающих устойчивую эмиссию электронного потока с усредненной плотностью тока 0,3 А/см² в течении более чем десятков часов.

2. Электронная пушка с автоэммиттерами

Экспериментально исследовался макет электронной пушки (рис. 1), в которой размещались одиночные ячейки с катодом из разных материалов (табл. 1). На управляющий, формирующий электроды и анод пушки подавался одинаковый потенциал и, вследствие этого, электронный поток распространялся в эквипотенциальном пространстве.

Измерения проводились при непрерывной откачке при давлении остаточных газов $5.0 \cdot 10^{-7}$ – $6.0 \cdot 10^{-8}$ Торр. Режим испытаний непрерывный.

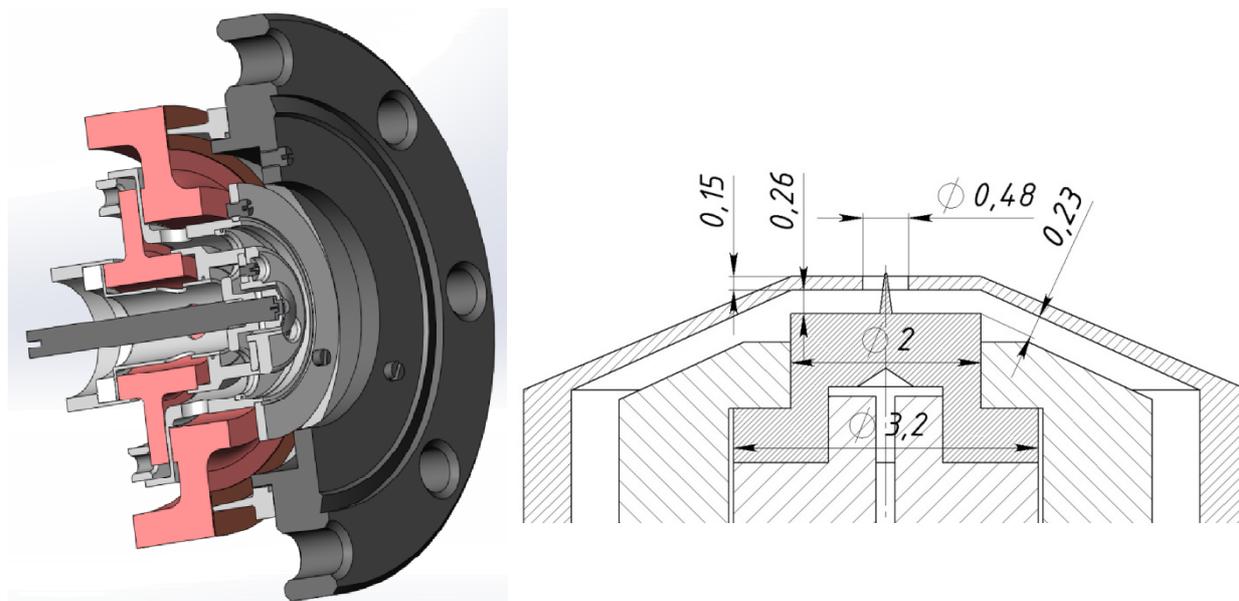
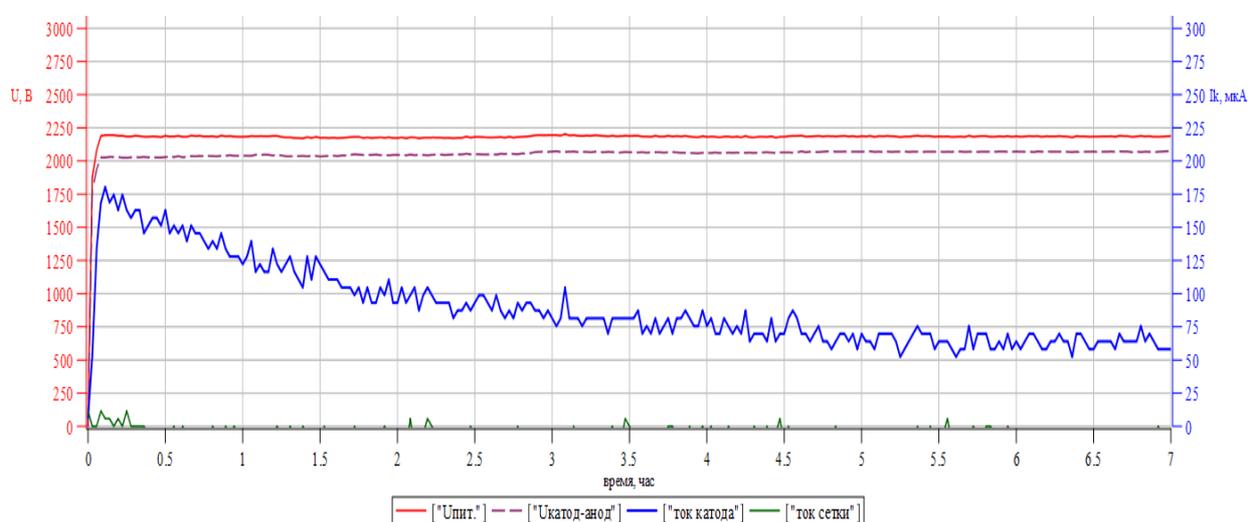
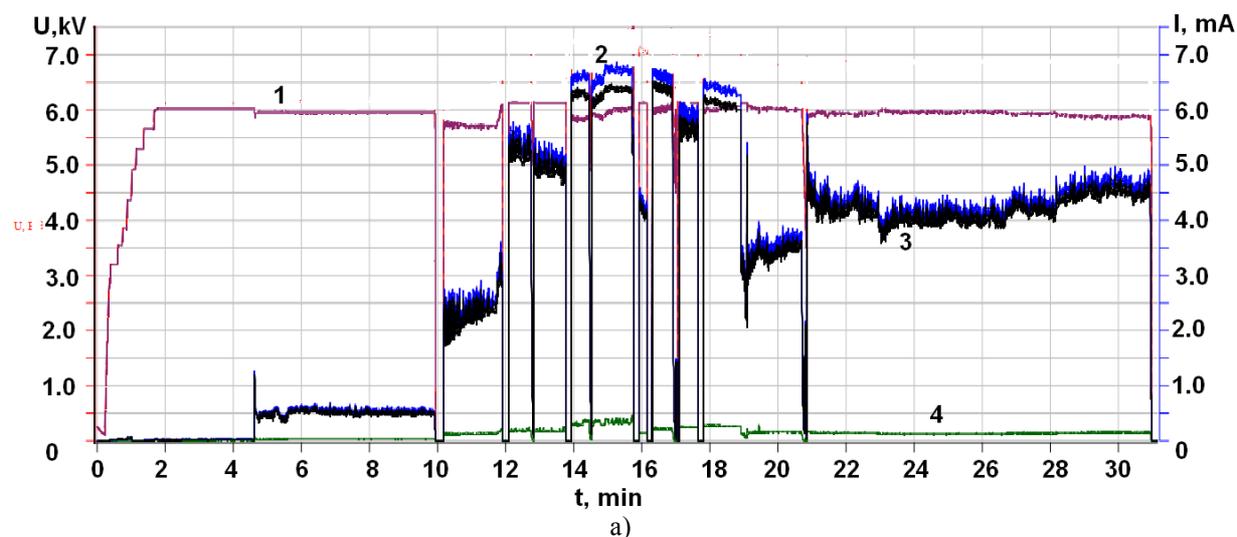


Рис. 1. Конструкция макета электронной пушки (а) и эскиз катодно-сеточного узла (б)

Таблица 1. Основные размеры автоэмиссионных ячеек

Размеры	молибден	вольфрам	стекло-углерод
Диаметр отверстия в сетке, мкм	480	480	480
Высота иглы, мкм	720-850	690-1500	370-1450
Радиус кривизны вершины, мкм	3.5-21.0	3.5	2.0-11.0

Максимальные значения достигнутых катодных токов составили 1.5 мА при напряжении 2500 В для стеклоуглерода, 4.5 мА при напряжении 4300 В для молибдена и 5.7 мА при напряжении 5000 В. Токи на сетку составляли от 1 до 3% катодного тока. Зависимости токов от времени для вольфрамового эмиттера представлены на рис. 2а, а для эмиттера из стеклоуглерода на рис. 2б.



б)

Рис. 2. Изменение потенциала управляющего электрода и анода (1), тока на анод (2), тока катода (3) и тока на управляющий электрод (4) от времени

Разрывы в зависимостях напряжений и токов от времени, представленных на рис. 2а, обусловлены пробоями, которые возникали на этапе процесса так называемой «формовки» катода и характерны для первых включений (начального периода проведения измерений).

Наблюдаемая деградация катодного тока может быть легко скомпенсирована подстройкой потенциала на сетке.

На рис. 3 представлены фото вольфрамового автоэмиттера до и после испытаний в течение семи часов. Видно, что эмиттер не теряет свою форму, однако на вершине острия происходит перестройка поверхности.

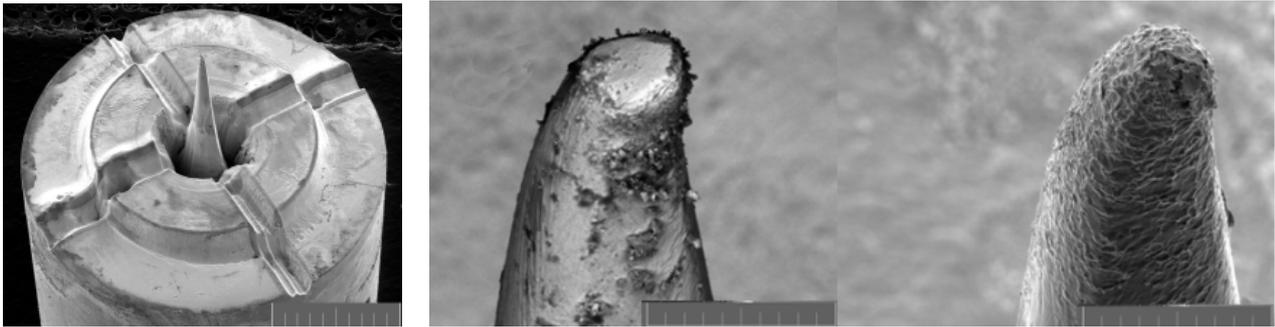
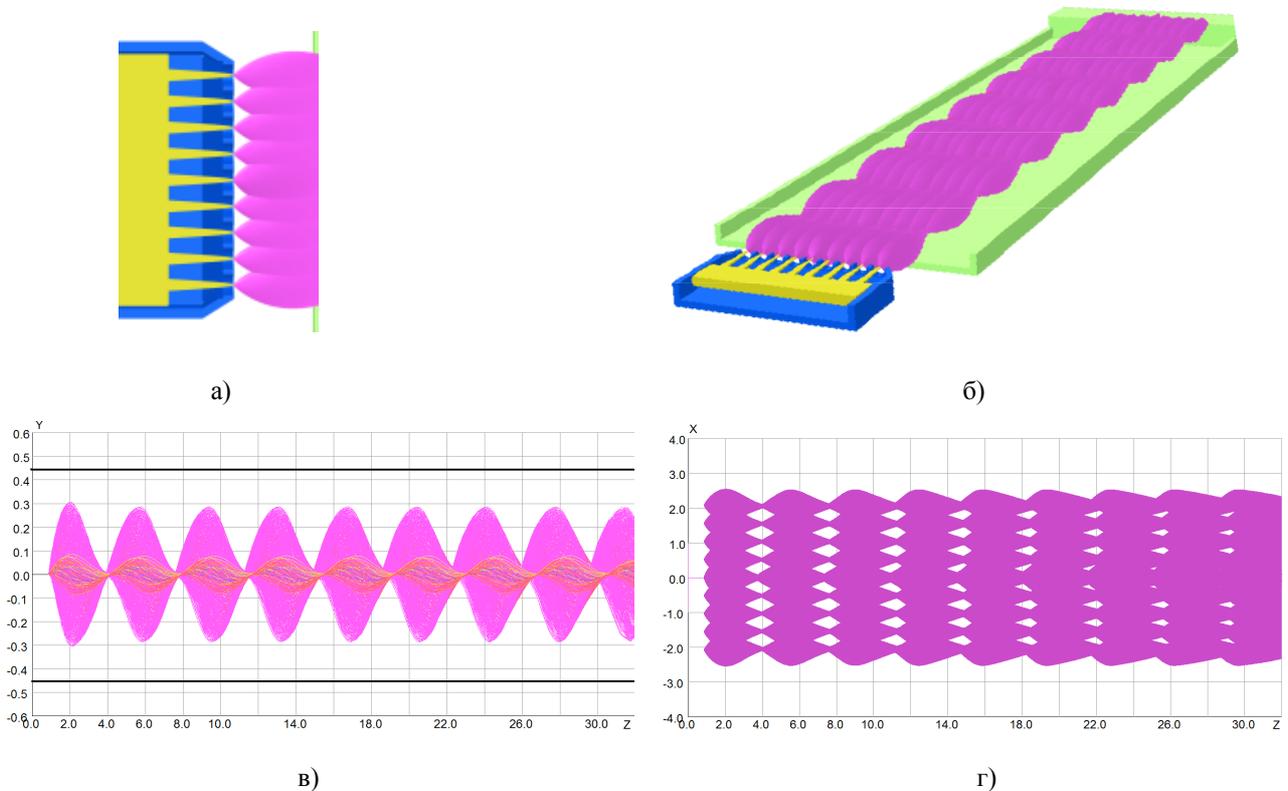


Рис. 3. Вольфрамовый автоэмиссионный катод (а) и фото острия катода до (б) и после (в) проведения экспериментальных измерений

3. Электронно-оптическая система

В качестве примера использования автоэмиссионного катода была рассмотрена электронно-оптическая система, включающая в себя тетродную электронную пушку с девятью расположенными в один ряд вольфрамовыми катодами, управляющим и формирующим электродами, а также анодом.

На рис. 4 представлен результат расчета ЭОС с автоэмиссионной катодной матрицей в магнитной фокусирующей системе на постоянных магнитах с однородным магнитным полем (табл. 2). Для наглядности верхняя половина пушки и канала транспортировки сделана прозрачной.



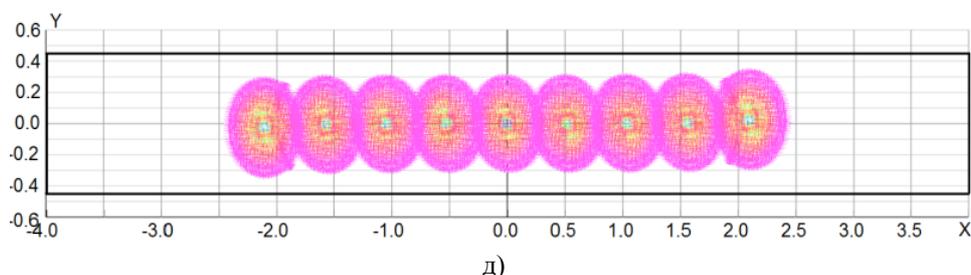


Рис. 4. Фрагмент парциальной пушки (а) и канала транспортировки (б), траектории девяти лучевого потока в y - z координатах (в), в x - z координатах (г) и в x - y координатах (д) при $z=2.0$ мм

Таблица 2. Параметры ЭОС

Ток пучка, мА	43
Ускоряющее напряжение, кВ	20
Напряжение на сетке, кВ	4,5
Микропервеанс, $\mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$	0,015
Размер канала, мм	0,9x8,0
Амплитуда магнитного поля B_0 , Т	0,8
Число пучков	9

Как показали результаты расчетов, электронный поток проходит через прямоугольный канал транспортировки 0.9×8.0 мм² длиной 30 мм без потерь.

УДК 621.385.6; ГРНТИ 47.29.37

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАВЕДЕННЫХ ТОКОВ КОЛЛЕКТОРА МНОГОЛУЧЕВОГО КЛИСТРОНА

Д.А. Калашников, Ю.Н. Парамонов

АО «НПП «Торий»,

Россия, г. Москва, Paramonov.y.n@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривалось влияние внешних электрических цепей на режим работы коллекторов многолучевых мощных клистронов. Предложена математическая модель, позволяющая учесть распределение электрических полей в пространстве между резонаторным блоком и коллектором. Показана возможность уменьшить напряжение, наводимое на емкости коллектора, при использовании внешних конденсаторов и новой конструкции коллектора.

Ключевые слова: мощный клистрон, многолучевые приборы, коллекторы

SIMULATION OF COLLECTOR INDUCED VOLTAGE IN HIGH-POWER MULTIPLE-BEAM KLYSTRON

Denis A. Kalashnikov, Yury N. Paramonov

JSC "SPE" Toriy",

Russia, Moscow, Paramonov.y.n@gmail.com

The summary. The paper deals with the effect of external electrical circuits on the conditions in high-power multiple-beam klystron collectors. A mathematical model describing the induced voltage on the collector of the O-type devices with allowance for external electrical circuits taking into account the electric field distribution is presented. The possibility of reducing the collector induced voltage when using external capacitive elements and new collector design is shown.

Keywords: high-power klystron, multiple-beam devices, collectors.

При экспериментальном исследовании многолучевого клистрона КИУ-271 было обнаружено влияние внешней цепи питания на работу прибора [1]. В динамическом режиме работы мощного клистрона между резонаторным блоком и коллектором возникал высоковольтный пробой, при том, что и блок резонаторов и сам коллектор находились на потенциале земли. Связано это было с тем, что любая конфигурация электродов в электростатическом поле характеризуется электрической емкостью, а, следовательно, помимо переноса заряда в вакууме будет наблюдаться зарядка электростатической емкости наведенными токами. Качественно объяснить данное явление позволила представленная аналитическая модель идеального конденсатора. Однако же, не было учтено влияние реальной геометрии коллектора, которая позволяла бы учесть характер наведенного тока для соответствующего конструктива распределения продольной составляющей напряженности электрического поля. Кроме того, не было исследовано влияние длины пролета сгустков, при которой следующий сгусток влетал в тот момент, когда предыдущий еще не успел покинуть коллекторную область, тем самым вносил бы вклад в наводимый ток. Таким образом, представленная модель требовала корректировки.

Постановка задачи и метод решения

Основным исходным допущением математической модели являлось задание на границе области постоянного во времени распределения электростатического потенциала. Сгустки представлялись в виде точечных объектов. Не исследовалось влияние электрического поля на скорость и траектории сгустков. Кроме того, пренебрегалось влияние, которое оказывали сгустки друг на друга.

В качестве эквивалентной схемы коллектора использовалась схема (рис. 1), представленная в работе [1].

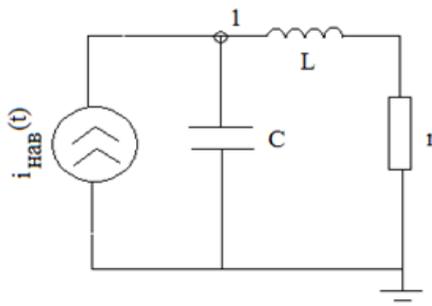


Рис. 1. Эквивалентная схема коллектора клистрона

Сгустки, попадая в пространство коллектора, наводили ток (J), который вызывал изменения напряжения через емкость коллектора (U_C) и тока через индуктивность внешней цепи питания (i_L). Переходные процессы данной схемы описывались двумя дифференциальными уравнениями (1):

$$\begin{cases} \frac{dU_C}{dt} = \frac{J(t)}{C} - \frac{i_L(t)}{C} \\ \frac{di_L}{dt} = \frac{U_C(t)}{L} - \frac{i_L(t) \cdot R}{L} \end{cases} \quad (1)$$

Для решения представленной системы уравнений использовался метод Рунге-Кутты третьего порядка. Начальные значения тока через индуктивность внешней цепи и напряжения через емкость коллектора задавались на основании законов коммутации. Значение наведен-

ного тока определялось по теореме Шокли-Рамо, где заряд сгустка, как и в работе [1], определялся импульсным током клистрона и частотой следования сгустков. Величина продольной составляющей напряженности электрического поля, определялась решением уравнения Лапласа в аксиально-симметричной сеточной модели [2].

Моделирование и результаты теста

Была создана программа «Collector Bunch Solver». Испытана на тестовом примере идеального конденсатора. При пространственном шаге 0.05 мм и временном шаге 0.001 нс погрешность составила 0.34%.

Результаты расчета программы были сопоставлены с экспериментальными данными, полученными на мощном многолучевом клистроне КИУ-271. Как отмечалось в работе [1], амплитуда выбросов определялась емкостью коллектора. Было произведено моделирование наведенного напряжения на емкости коллектора при различных значениях емкостей (рис. 2)

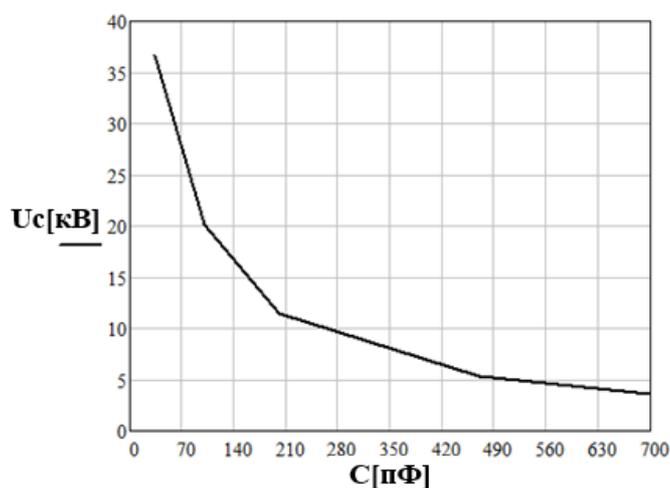


Рис. 2. Зависимость наведенного напряжения на емкости коллектора от величины емкости

Как показано на графике, увеличение емкости до 470 пФ позволило снизить максимальные выбросы напряжения на коллекторе с 36кВ до 5 кВ. Дальнейшее увеличение емкости до 700 пФ не вело к значительным изменениям, что подтверждало экспериментальные результаты [1] при введении дополнительных конденсаторов во внешнюю цепь коллектора (рис. 3).

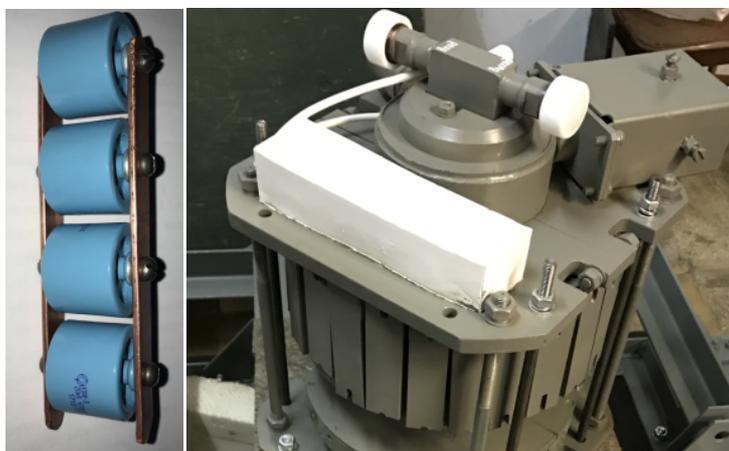


Рис. 3. Внешний вид клистрона КИУ-271 с блоком внешних конденсаторов

Была предложена новая конструкция коллектора (рис..4).

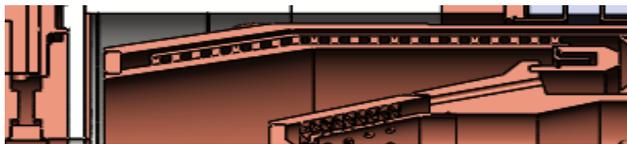


Рис. 4. Конструкция коллектора клистрона КИУ-273

Отличием от предыдущей конструкции было то, что протяженность коллекторного пространства была значительной. В случае прямоугольного профиля коллектора, следующий сгусток попадал в область коллектора, до того, когда предыдущий успевал его покинуть или оказаться в области нулевой напряженности. Таким образом в общий наведенный ток оказывали вклад несколько сгустков. В тоже время, в реальной конструкции с начальным наклоном коллектора, пространство ненулевой напряженности оказывалось меньше (рис. 5) и в наведении тока участвовал только один сгусток (рис. 6).



Рис. 5. Распределение потенциалов в коллекторе КИУ-273



Рис. 6. Зависимость наведенного тока и напряжения на емкости коллектора

Введение новой конструкции коллектора позволило на практике получить стабильную работу клистрона без внешних конденсаторов.

Заключение

Было проведено исследование влияния увеличенной длины коллектора и учтено распределение электрического поля коллектора клистронов КИУ-271 и КИУ-273. Результаты моделирования показали необходимость увеличения емкости коллектора до 470 пФ, что соответствовало экспериментальным результатам. В дальнейшем предполагалось учесть влияние наведенного напряжения на динамику сгустков и взаимное влияние сгустков.

Библиографический список

1. Komarov D.A., Maslennikov S.P., Paramonov Y.N., Yakushkin E.P. Effect of external electrical circuits on the operating conditions of high-power multiple-beam klystron collectors. IVEC 2018
2. Ч.Бэдсел, А.Ленгдон Физика плазмы и численное моделирование // М.: Энергоатомиздат - 1989..

УДК 621.385.6; ГРНТИ 47.29.37

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖЕКТОРНОГО ФИЛЬТРА МАГНЕТРОНА ДЕЦИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Д.А. Калашников, Ю.Н. Парамонов,

АО «НПП «Торий»,

Россия, г.Москва, Paramonov.y.n@gmail.com

Аннотация. В работе рассматривается моделирование режекторного фильтра магнетрона с длинным анодом дециметрового диапазона. Показана возможность его настройки

Ключевые слова: магнетрон с длинным анодом, режекторный фильтр, альсифер.

SIMULATION OF REJECTION FILTER IN L-BAND MAGNETRON

Denis A. Kalashnikov, Yury N. Paramonov,

JSC "SPE" Toriy",

Russia, Moscow, Paramonov.y.n@gmail.com

The summary. The paper deals with the simulation of rejection filter in L-band magnetron with long anod. electrical circuits on the conditions in high-power multiple-beam klystron collectors..

The possibility of tuning is shown.

Keywords: magnetron with long anod, rejaection filter, sendust.

Одной из главных проблем магнетрона является генерация на паразитных видах колебаний. Чтобы подавить нежелательные виды колебаний, в магнетронах с длинным анодом применяют режекторные фильтры (рис.1), которые представляют из себя систему в виде трёх контуров, центрального проводника, настроенного кольца и нагрузочного стержня. Четвертьволновые контуры предназначены для отражения основного вида колебаний, а паразитные виды поглощаются альсифером, нанесенным на нагрузочный стержень и внутреннюю поверхность одного из контуров.



Рис. 1. Внешний вид режекторного фильтра

По техническому требованию значения КСВ режекторного фильтра в диапазоне частот 1885-2200 МГц должны соответствовать данным, приведенным в таблице 1.

Таблица 1. Технические требования режекторного фильтра

f, МГц	1886	1913	1930	2030-2300
КСВН	>70	<30	<15	<2

На рисунке 2 представлены результаты электродинамических измерений фильтра на панораме Rohde&Schwarz.

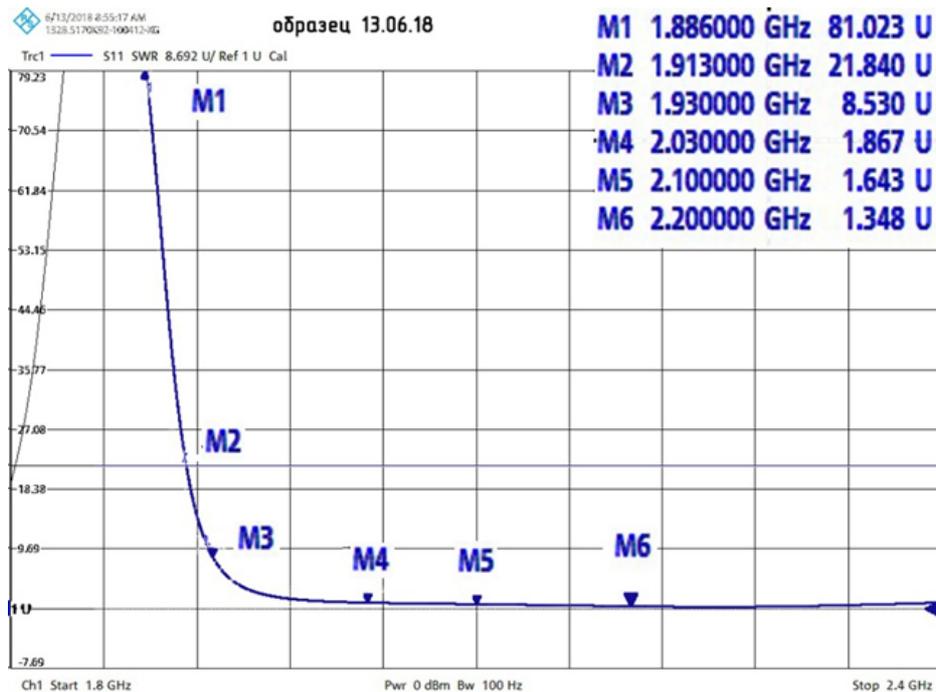


Рис. 2. Экспериментальная характеристика режекторного фильтра

Для определения возможных причин отклонений характеристик фильтра от требуемых и качественного прогнозирования результатов настройки было произведено моделирование. Трехмерная модель режекторного фильтра в программе трехмерного моделирования представлен на рисунке 3.

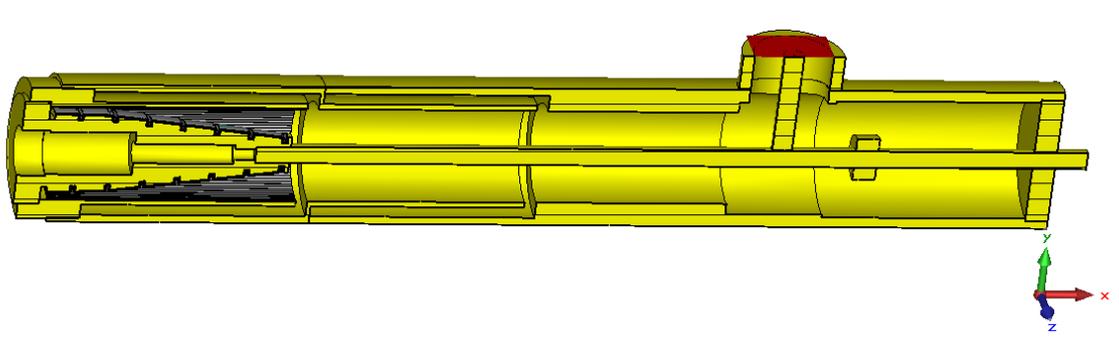


Рис. 3. Режекторный фильтр в программе трехмерного моделирования

В результате моделирования была получена характеристика фильтра, представленная на рисунке 4, удовлетворяющая требованию технического задания.

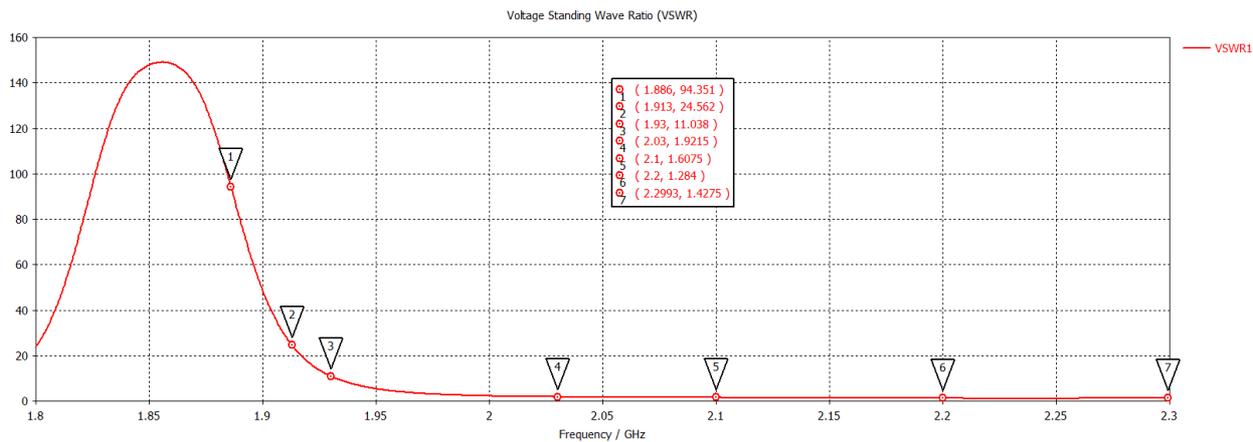


Рис. 4. Характеристика фильтра, полученная в результате моделирования

При сравнении результатов расчета и эксперимента (рис. 5) погрешность в области высоких КСВ составила 16%, в области низких КСВ – 4.7%.

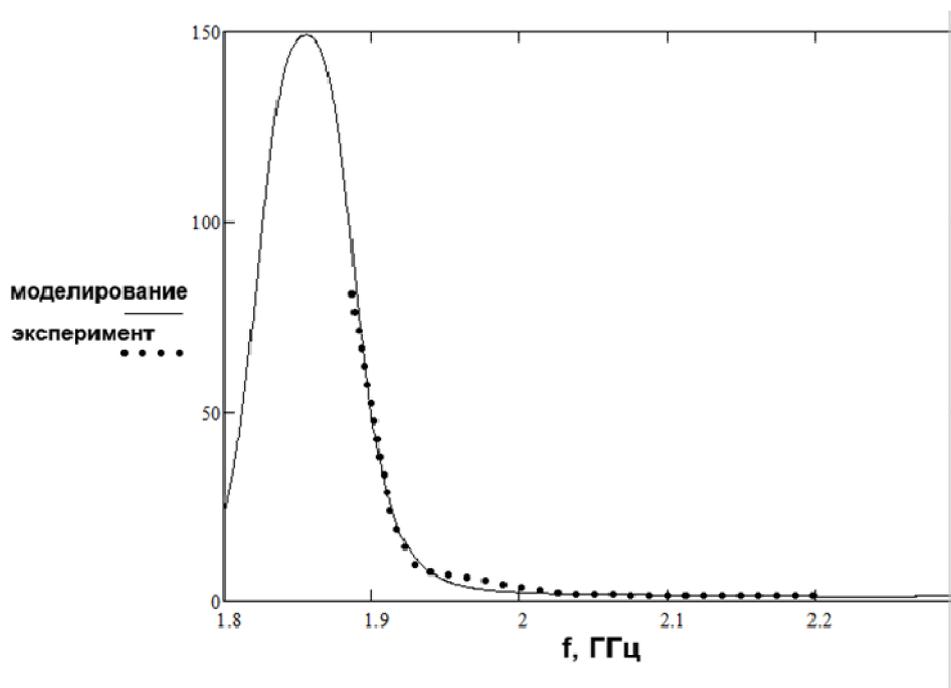


Рис. 5. Сравнение результатов моделирования и эксперимента

Далее был рассмотрен процесс настройки режекторного фильтра путем перемещения вдоль центрального проводника настроечного кольца. Результат моделирования представлен на рисунке 6, где параметр move – расстояние относительно положения кольца по чертежу.

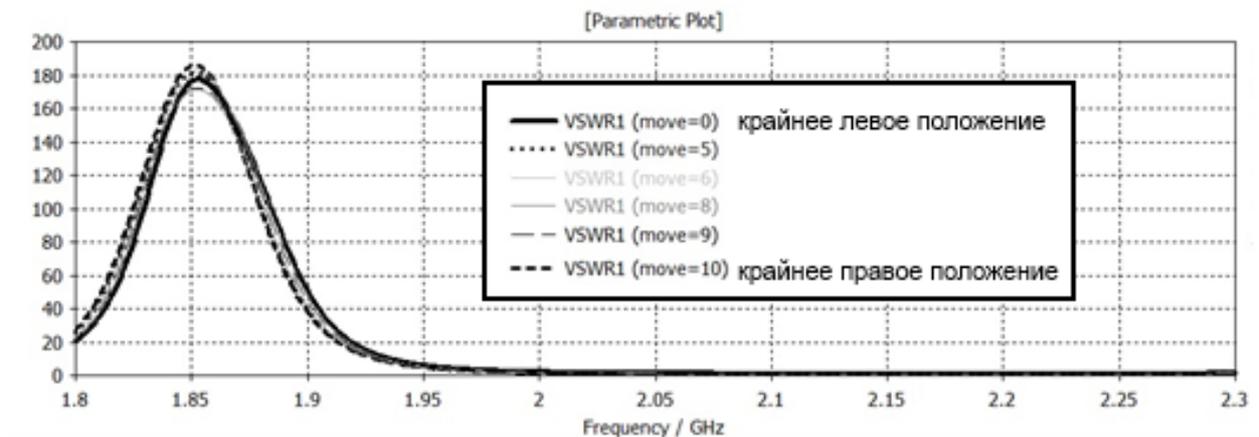


Рис. 6. Влияние положения настроенного кольца на характеристику режекторного фильтра

При перемещении настроенного кольца от положения коаксиального ввода режекторного фильтра резонанс смещается в область низких частот, при этом значения КСВ контрольных частот понижается (рис. 7). При смещении кольца на 1 см уменьшение КСВ составило 16%.

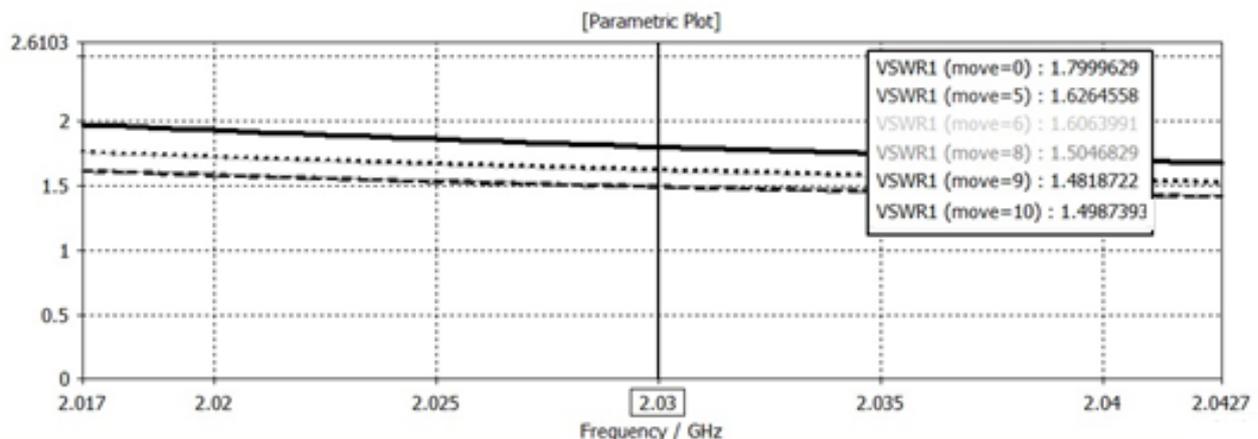


Рис. 7. Влияние положения настроенного кольца на характеристику режекторного фильтра в области 2300 МГц

Заключение

Было проведено моделирование режекторного фильтра. Определена возможность уменьшения КСВ режекторного фильтра в области паразитных видов колебаний. В дальнейшем, чтобы предотвратить нагрузку основного вида колебаний и упростить конструкцию фильтра, планируется исключить необходимость настроенного элемента с помощью увеличения крутизны характеристики режекторного фильтра.

УДК 537.86.029; ГРНТИ 29.35.33

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПОЛЯРИЗАТОРОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАКТА КВЧ ТЕХНИКИ

Д.С. Бодажков

*Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Российская Федерация, Томск, bdtsu@mail.ru*

Аннотация. В работе показана возможность использования аддитивной технологии горячего экструдирования для изготовления поляризаторов крайневысокочастотного диапазона.

Ключевые слова: аддитивная технология, 3D-моделирование, крайневысокочастотный диапазон, КВЧ, СВЧ.

ADDITIVE TECHNOLOGY OF CREATING POLYRIZERS OF THE MEASURING TRACT OF EHF TECHNOLOGY

D.S. Bodazhkov

*National Research Tomsk State University,
Russia, Tomsk, bdtsu@mail.ru*

The summary. The paper shows the possibility of using additive hot extrusion technology for the manufacture of polarizers of the extreme high-frequency range.

Keywords: additive technology, 3D modeling, ultrahigh-frequency range, EHF, microwave.

На сегодняшний день нельзя не заметить активное использование аддитивной технологии в современной жизни и деятельности человека. Существует большое количество аддитивных технологий. Одной из них является метод селективного лазерного спекания (SLS-технология). Например Danezan с коллегами показал возможность с помощью данной технологии изготавливать изделия из фарфора [1]. Сударев А. разработал наноструктурные керамические порошки имеющие минимальную усадку при последующей термообработке после лазерного спекания [2]. Метод прямого лазерного спекания металлов является разновидностью SLS-технологии с применением порошков металлов. К примеру, авторы работы [3] в своей работе показал возможность создания поверхностей с низкой шероховатостью данным способом, которые могут быть использованы в аэрокосмической, оборонной и морской промышленности. Также стоит отметить метод избирательного теплового спекания, при котором порошок запекается под действием ультрафиолета. Schade с напарниками исследовал свойства тонких пленок наночастиц титана анатаза (TiO_2NP) толщиной около 500 нм при тепловом воздействии на них [4].

Имеет место быть метод фотополимеризации, который имеет две разновидности: стереолитография (SLA-технология) и технология Polyjet, основанная на послойном отверждении жидкого материала под воздействием ультрафиолетового излучения. В первом методе используемым материалом является фотополимерная смола в то время как в технологии Polyjet используется жидкий фотополимер. В работе [5] продемонстрирована возможность изготовления цельнокерамических зубов на основе диоксида циркония с помощью стереолитографии. Авторы статьи [6] описали разработку аддитивной технологии Polyjet для проектирования и создания акустических метаматериалов с высоким поглощением звука.

Стоит выделить метод горячего экструдирования или метод послойного наплавления (FDM-технология). Суть данного способа заключается в создании различных трехмерных объектов путем расплавления сырья с помощью экструдера и дальнейшего его застывания в заданной нами форме. В частности уже печатаются анизотропные композиты для управления терагерцовым излучением [7].

Вместе с развитием аддитивной технологии стоит отметить высокий интерес к ТГц излучению. Так, например, Калугин с коллегами показал, что с помощью терагерцового диапазона частот можно обнаружить скрытые неоднородности древесины [8].

ТГц-техника состоит из множества различных элементов: генератор, модулятор, линзы, детектор, поляризаторы, фильтры и др. Одним из недостатков ТГц исследований является

ся дороговизна и труднодоступность оборудования и техники. В данной работе описан способ изготовления поляризатора с помощью метода послойного наплавления, который может быть использован в измерительном тракте терагерцового спектрометра.

Технология изготовления поляризатора

Изначально была спроектирована трехмерная модель будущего образца поляризатора, состоящего из диэлектрической подложки с нанесенными проводящими полосами. Период повторения полос составлял 1,5 мм, ширина и высота проводящих полос 1 мм. Изображение наглядной трехмерной модели образца вы можете наблюдать на рисунке 1.

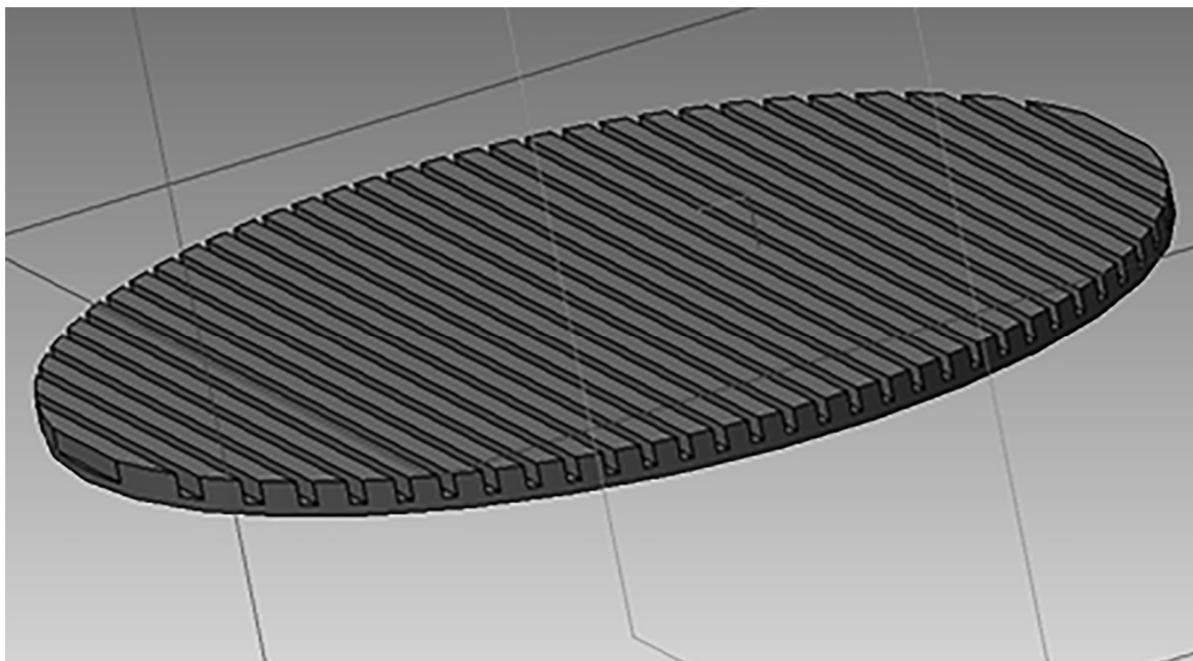


Рис. 1. Трехмерная модель поляризатора

Следующим шагом был процесс изготовления спроектированной модели. С использованием филамента на основе АБС-пластика методом горячего экструдирования была изготовлена диэлектрическая подложка толщиной приблизительно 400 мкм, на которой в дальнейшем были наплавлены токопроводящие полосы из композитного углеродосодержащего проводящего филамента. Геометрические размеры готового образца имели погрешности в сравнении с чертежом, которые не превышали ± 200 мкм. Это связано с техническими особенностями метода изготовления. Внешний вид готового образца представлен на рисунке 2.



Рис. 2. Внешний вид полученного поляризатора

Анализ электромагнитных характеристик поляризатора

Следующим шагом было помещение изготовленного образца в измерительный тракт терагерцового спектрометра СТД-21 (рис. 3) с целью проверки и оценки его электромагнитных характеристик.

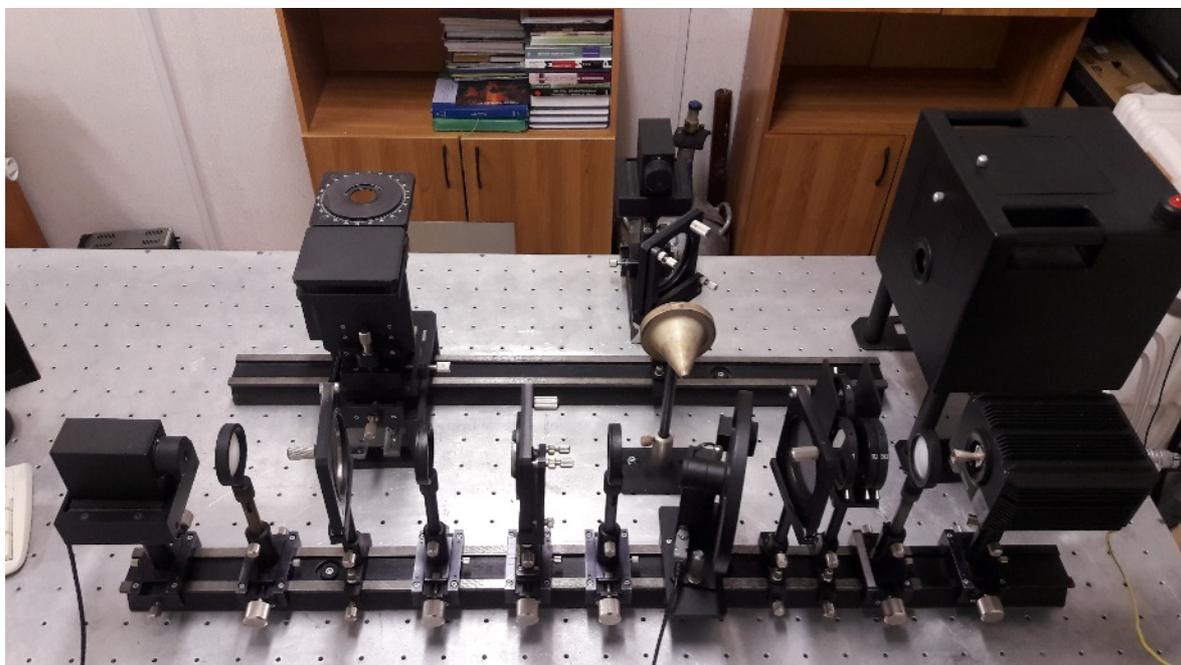


Рис. 3. Измерительный тракт ТГц-спектрометра СТД-21

Измерения проводились при двух положениях поляризатора относительно падающего излучения (ортогональном и перпендикулярном) в диапазоне частот от 36 до 177 ГГц. После анализа и оценки полученных измерения стало ясно, что при изменении угла поляризации изменяется коэффициент прохождения ТГц электромагнитной волны, что наглядно

представлено графиком на рис. 4. Также стоит отметить, что полученный образец обладает резонансным поглощением на частотах 104 ГГц и 164 ГГц в случае ортогональности направления нанесения полос и поляризации электромагнитной волны.

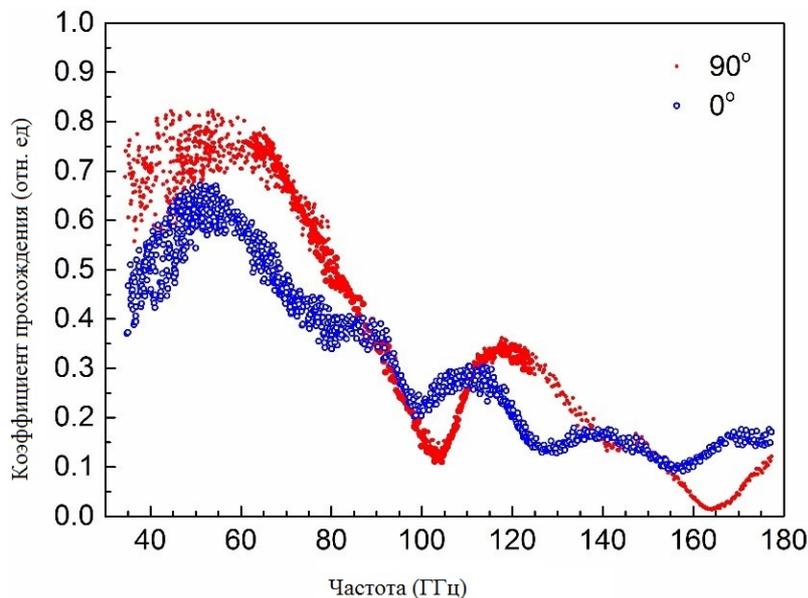


Рис. 4. Зависимость коэффициента прохождения от частоты

Вывод

На сегодняшний день исследования в терагерцовом диапазоне частот затруднены дорогостоящим оборудованием. Из проведенного литературного обзора и полученных экспериментальных результатов можно сделать вывод, что аддитивная технология послойного наплавления может быть применена для изготовления поляризаторов, используемых в измерительных трактах терагерцовой техники.

Библиографический список

1. Danezan A. et al. Selective laser sintering of porcelain // *J. Eur. Ceram. Soc. Elsevier*, 2018. Vol. 38, № 2. P. 769–775.
2. Sudarev A., Konakov V., Chivel Y. Selective laser sintering of ceramic turbomachine components // *Procedia CIRP*. – 2018. – Т. 74. – С. 264-267.
3. Mohammadi M., Asgari H. Achieving low surface roughness AlSi10Mg_200C parts using direct metal laser sintering // *Additive Manufacturing*. – 2018. – Т. 20. – С. 23-32.
4. Schade L. et al. Sintering of thin titanium dioxide nanoparticle films via photothermal processing with ultraviolet continuous-wave lasers // *Applied Surface Science*. – 2013. – Т. 278. – С. 336-340.
5. Liu K. et al. Gelcasting of zirconia-based all-ceramic teeth combined with stereolithography // *Ceramics International*. – 2018. – Т. 44. – № 17. – С. 21556-21563.
6. Vdovin R. et al. Implementation of the additive PolyJet technology to the development and fabricating the samples of the acoustic metamaterials // *Procedia Engineering*. – 2017. – Т. 176. – С. 595-599.
7. Badin A. V. et al. Anisotropy of electrical properties of 3D-printing MWCNT composites at the THz frequency range // *2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*. – IEEE, 2018. – С. 1-2.
8. Бодажков Д.С., Калугин А.А., Тимофеев Ю.В. Исследование неоднородностей многослойной древесины в терагерцовом диапазоне частот // *Материалы 56-й Международной научной студенческой конференции “МНСК-2018: физические методы в естественных науках”* – 2018. – С. 29.

УДК 621.385.7; ГРНТИ 47.29.37

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЪЕМНОГО ЗАРЯДА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЭМИССИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОФЛУКТУАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ

М.Д. Воробьев, Д.Н. Юдаев

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

Аннотация. Предложен вариант шумовой модели эмитирующей поверхности, учитывающий неодинаковый вклад в результирующий шумовой ток различных скоростных групп электронов. Показано согласование экспериментальных результатов с основными положениями модели на примере металлопористых и оксидных катодов.

Ключевые слова: демпфирование шумов пространственным зарядом, термоэлектронный катод, низкочастотные шумы, дефекты, дробовый шум.

EFFECT OF ELECTRONIC SPACE CHARGE IN THE STUDY OF EMISSION MATERIALS BY ELECTROFLUCTUATION DIAGNOSTICSMETHODS

M.D. Vorobyev, D.N. Yudaev

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

Abstract. A variant of the emitting surface noise model is proposed, taking into account the unequal contribution to the resulting noise current of electrons with different velocity groups. The experimental results agreement with main provisions of the model on the example of metal-porous and oxide cathodes is shown.

Keywords: space charge noise damping, thermionic cathode, low-frequency noise, defects, shot noise.

Введение

Контроль качества материалов, элементов и узлов электровакуумных приборов (ЭВП), к которым предъявляются требования высокой надежности и долговечности, играет важную роль как в процессе производства, так и при испытаниях готовых изделий. В связи с этим используемые методы контроля нуждаются в постоянной модернизации, одним из направлений которых является развитие и совершенствование электрофлукуационной диагностики (ЭФД), обладающей повышенной чувствительностью по сравнению с традиционно используемыми. Неоднократно было показано, что контроль эмиссионных свойств в сочетании с измерением шумовых характеристик и параметров, включая дробовую и фликкерную компоненты низкочастотных шумов, может приводить к существенному увеличению чувствительности [1,2]. Условием проведения ЭФД во многих случаях является режим ограничения тока пространственным зарядом, при котором отбираемый с эмитирующей поверхности (катода) ток в среднем значительно меньше тока эмиссии и не оказывает на него влияния ($I_k \ll I_0$). Несмотря на кажущуюся простоту такого режима, облегчающего анализ флукуационных явлений, для достижения лучшего понимания сущности методов ЭФД и их модернизации есть необходимость более детального рассмотрения классических представлений об уровне шумов тока в анодной цепи. Обычно оценивают с использованием интегрального коэффициента депрессии Γ^2 , характеризующего ослабление флукуаций при передаче их в анодную цепь [2] за счет неизбежно возникающего при рабочих температурах и $I_k \ll I_0$ объемного заряда над эмитирующей поверхностью:

$$S_{i \text{ дроб}} = 2eI_a\Gamma^2 = 2eI_{ш}, \quad (1)$$

где $S_{i \text{ дроб}}$ – дробовая компонента спектральной плотности флуктуаций анодного тока I_a ;
 e – заряд электрона;
 $I_{ш}$ – шумовой ток.

Интерпретация экспериментальных результатов может приобрести более полный характер и устранить ряд противоречий, если в обычно используемые на основе (1) представления внести уточнения. В настоящей работе предложен вариант флуктуационной модели диодного промежутка с термоэлектронным катодом, в котором при передаче флуктуаций в анодную цепь принимается во внимание различная степень их ослабления в зависимости от начальных энергий образующих токи электронов [3]. Так, например, для токов, образованных электронами с относительно высокой энергией, ослабление флуктуаций за счет влияния объемного заряда происходит в значительно меньшей степени, чем при малых начальных энергиях электронов. Таким образом, эти токи могут нести более полную информацию о флуктуациях и создавать эффекты, подобные тому, что наблюдаются при отсутствии объемного заряда над эмитирующей поверхностью с повышенной работой выхода. С помощью предлагаемого варианта модели может быть достигнуто понимание наблюдаемых зависимостей уровня шумов от отбираемого с катода тока и температуры катода на примере диодных промежутков с металлопористыми и оксидными катодами, а также сформированы скорректированные шумовые параметры для сравнительной оценки качества катодов.

Демпфирование дробового шума объемным зарядом

Модель демпфирования дробового шума прикатодным объемным зарядом для термоэлектронного катода по умолчанию с идеально гладкой и однородной эмитирующей поверхностью была рассмотрена и проанализирована в ряде работ [например, 3]. Получены алгоритмы расчета значений коэффициента Γ^2 , являющиеся результатом интегрирования по всем начальным скоростям эмитированных электронов. Для того, чтобы установить, в какой мере теоретический расчет Γ^2 согласуется с экспериментом для современных эффективных термокатодов, были проанализированы существующие и проведены дополнительные измерения спектральных характеристик шума $S_i(f)$ в диапазоне частот f , включающем как области преобладания дробовой и фликкерной компонент шума, так и переходную область. Экспериментальные образцы имели плоскопараллельную диодную конструкцию с оксидными (ОК) и металлопористыми (МП) катодами. Как было установлено, для минимального воздействия отбираемого с катода тока на его эмиссионные и шумовые характеристики, а также надежного выделения дробовой и фликкерной компонент шума при выборе режимов измерения необходимо использовать режимограничения тока пространственным зарядом ($I_k \ll I_s$), что в целом для катодов в экспериментальных образцах соответствует плотностям отбираемых токов в диапазоне $j_k = 0,05 \dots 0,5 \text{ А/см}^2$ и диапазону частот $10 \dots 100000 \text{ Гц}$.

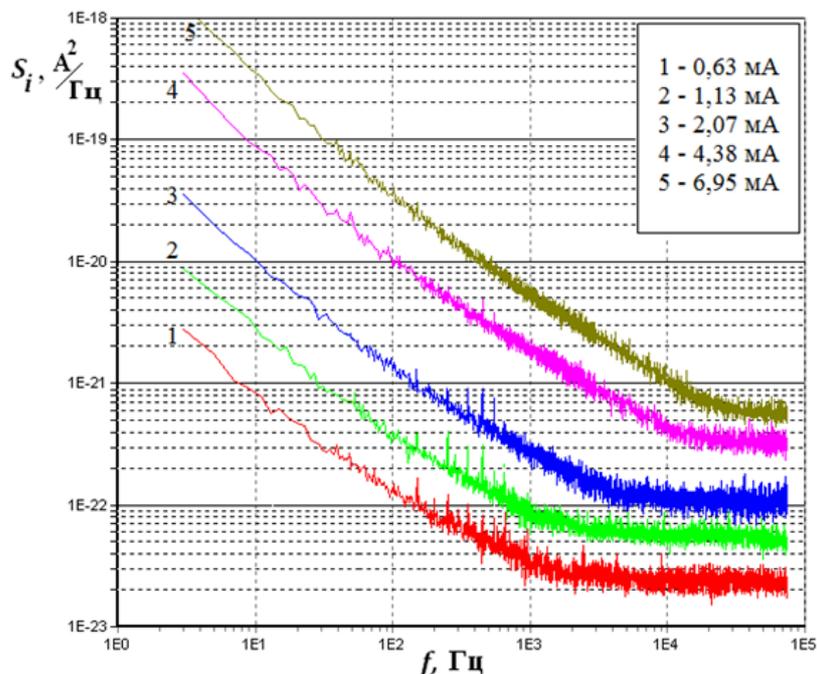


Рис. 1. Спектральные характеристики шума образца с МП катодом при различных отбираемых токах

На рисунке 1 показаны типичные спектральные характеристики шума одного из экспериментальных образцов с МП катодом, а на рисунках 2 и 3 – найденные по спектральным характеристикам шума, подобным приведенным на рисунке 1, значения коэффициента Γ^2 для образцов с МП и (ОК) катодами приблизительно одинаковой площади, изготовленными различными производителями в различные периоды времени. Как видно, экспериментальные значения Γ^2 значительно превосходят рассчитанные, составляющие менее 0,01 [4]. В то же время уровень дробовой компоненты шума, по которой определялись Γ^2 , в целом линейно связан с отбираемым током, о чем свидетельствует относительная стабильность значений Γ^2 , концентрирующихся в диапазоне 0,1...0.2. Некоторые отклонения от линейной зависимости можно отнести за счет существования на эмитирующей поверхности участков с повышенной работой выхода и переходом их в режим насыщения, как это было сделано в [5].

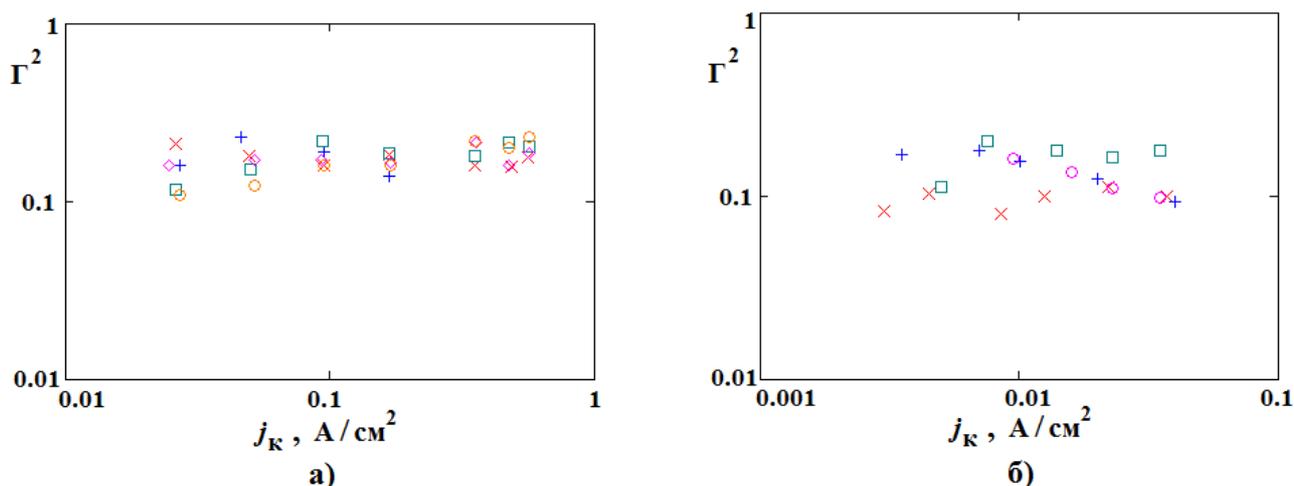


Рис. 2. Значения коэффициента Γ^2 при различных плотностях токов j_k .
 а) МПК от одного производителя (2010 – 2015гг)
 б) МПК от разных производителей (1980 – 1995гг)

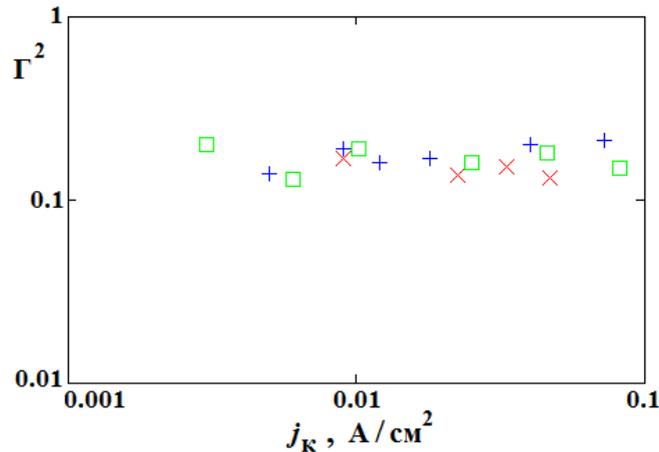


Рис. 3. Значения коэффициента Γ^2 при различных плотностях токов j_k для экспериментальных образцов с оксидным катодом

Проявление, однако, на шумовых характеристиках таких участков возможно только в случае, если области с уменьшенным или отсутствующим объемным зарядом заметно выделяются и не маскируются общим объемным зарядом надэмитирующей поверхностью, то есть поверхность обладает крупными эмиссионными неоднородностями, значительными по своим размерам. Таким образом, аномально высокие по сравнению с расчетными значения Γ^2 , как и их концентрация в узком диапазоне значений для отличающихся технологией производства эмитирующих поверхностей представляет собой проблему, решение которой могло бы представлять интерес с точки зрения дальнейшего выяснения механизмов возникновения и возможности снижения уровня различных составляющих шума, а также уточнения методов ЭФД.

Ток, отбираемый с эмитирующей поверхности в режиме ограничения пространственным зарядом, и его флуктуации

Любые попытки решения обозначенной выше проблемы неизбежно связаны с представлениями о механизме отбора тока с эмитирующей поверхности, при наличии над ней электронного пространственного заряда. Все электроны, достигающие анода в этом режиме, должны иметь энергию, достаточную для преодоления потенциального барьера U_m , созданного пространственным зарядом. Демпфирование флуктуаций токов, образованных электронами с учетом их энергий, было рассмотрено в [3] и привело к введению интегрального коэффициента Γ^2 . Вместе с этим приближенное представление о связи демпфирования с энергией электронов может быть полезным при разработке методов ЭФД и интерпретации получаемых результатов.

Поток электронов можно в первом приближении представить состоящим из двух частей. Первая (преобладающая) состоит из электронов с относительно малой энергией, флуктуации тока которых демпфированы объемным зарядом в значительной степени и потому существенного вклада в шумы анодного тока не вносят. Вторая часть потока образована электронами с относительно высокими энергиями, флуктуации тока которых демпфируются значительно меньше, вследствие чего этот поток электронов создает ток, подобный току диода в режиме насыщения. Флуктуации этой части тока анода будут в рамках приближенных представлений определять результирующий шум всего анодного тока I_a . Используемый при этом коэффициент Γ^2 , следовательно, не является интегральным параметром и определяет не ослабление флуктуаций, а величину «шумящего» тока или, как его принято называть в практике измерений - эквивалентного шумового тока $I_{ш}$.

Количественная оценка величины $I_{ш}$ может быть сделана на основании результатов измерения дробового шума. Вместе с тем $I_{ш}$ определяет уровень фликкерной компоненты

шума, которую с учетом её известной квадратичной зависимости от тока можно выразить с использованием универсального шумового параметра A [6] как

$$S_{i\phi}(f) = A(f)I_{ш}^2. \quad (2)$$

Таким образом, с учетом описанных выше представлений в процедуру нахождения параметра A для сравнительной оценки шумов различных эмиссионных материалов и катодов должны быть внесены изменения. Построенные на рис.4 зависимости фликкерной составляющей МПК и $OKS_i(f=10 \text{ Гц})$ от $I_{ш}$, найденные по результатам измерения спектральных характеристик шума, в целом сохраняют квадратичный характер и одновременно свидетельствуют о близости по уровню шумов МПК и ОК.

При использовании описанных выше представлений находят объяснение наблюдаемые экспериментально и квадратичные по характеру зависимости фликкерной компоненты $S_{i\phi}(f)$ от I_a даже в том случае, когда на эмитирующей поверхности имеются слабоэмитирующие участки малой суммарной площади, переходящие или перешедшие в режим насыщения. Ввиду того, что шумовой ток является постоянной по величине частью анодного I_a , а I_a слабо зависит от температуры катода T_k , фликкерная компонента шума $S_{i\phi}(f)$, как и дробовая, слабо зависят от T_k .

Если в режиме глубокого пространственного заряда увеличить анодное напряжение U_a , то в результате уменьшения высоты прикатодного потенциального барьера U_m большее число эмитированных с катода электронов будут способны преодолеть барьер, что приведет к увеличению I_a и той его части, которая образует $I_{ш}$.

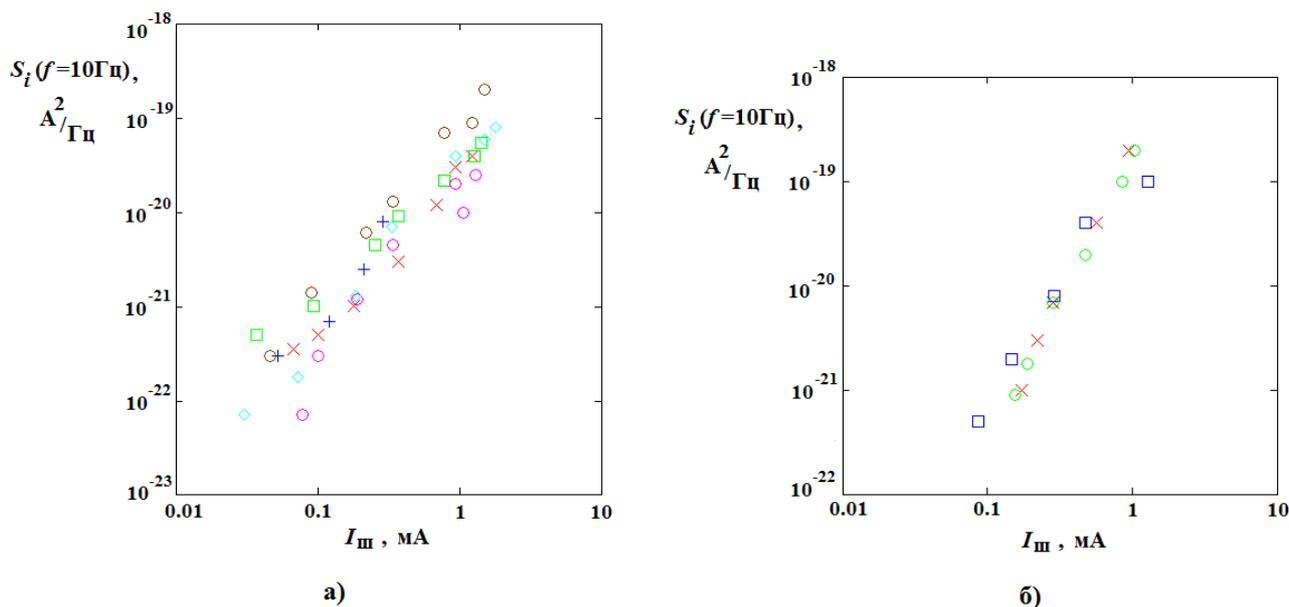


Рис. 4. Зависимости фликкерной компоненты шума от шумового тока:
а) МПК, $T \approx 1280 \text{ K}$, б) ОК, $T \approx 1020 \text{ K}$

Увеличение T_k при $U_a = \text{const}$ приведет к увеличению эмиссии электронов и одновременно к увеличению U_m , в результате чего $I_a \approx \text{const}$ или незначительно возрастет. Такой же закономерности будет следовать $I_{ш}$, являющийся частью I_a . Таким образом, связывать наблюдаемые экспериментально шумы с наличием отдельных «насыщенных» участков на эмитирующей поверхности не обязательно. Скорее всего, шумы обусловлены теми эмитированными электронами, которые при прохождении к аноду вызывают незначительную реакцию пространственного заряда, то есть создают эффект насыщения источника эмиссии.

Выводы

Предложена модель возникновения шумов, в которой для части электронов (с малыми скоростями) демпфирование флуктуаций создаваемых ими тока происходит почти полностью, в то время как для электронов с большими скоростями демпфирование почти отсутствуют. Именно флуктуации тока, образованные этими электронами с относительно большей энергией, и определяют появление низкочастотного шума с дробовой и фликкерной компонентами. Абсолютное значение этого тока может быть найдено из результатов измерения дробовой компоненты.

Библиографический список

1. Y.Y.Lau, K.L.Jensen, V.Levich. A Comparison of Flicker Noise and Shot Noise on a Hot Cathode //IEEE Transaction on plasma science, v.28, No.3, June 2000, p.794-797.
2. А.П.Кислицын. Контроль эмиссионной неоднородности рабочей поверхности термокатода в процессе эмиссионных испытаний//Авиационно-космическая техника и технологии, 2015, №4, с.90-95.
3. Шумы в электронных приборах. Под ред. Л.Д.Смуллина и Г.А.Хауса// М.: изд-во «Энергия», 1964, 484с.
4. М.Д.Воробьев, М.Н.Чирков, И.С.Кораблин, А.П.Макаров. Сравнительная оценка шумовых характеристик термокатодов различных типов//Материалы международного научно-методического семинара «Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах» М: МТОРЭС им. Попова, МЭИ, 2012, с.56-60.
5. М.Д.Воробьев, М.Н.Чирков. Шумовое зондирование эмитирующей поверхности термокатодов //Материалы международного научно-методического семинара «Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах» М: МТОРЭС им. Попова, МЭИ, 2011, с.234-238.
- 6.М.Д.Воробьев, Д.Н.Юдаев. Шумовая диагностика термокатодов в составе электронно-лучевой пушки// Прикладная физика, №5, 2010, с. 60-65.

УДК 537.525 ГРНТИ 29.27.43

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА

М.М. Гарипов

*ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ», Казанский национальный технический университет
им. А. Н. Туполева-КАИ, Казань, Россия, maratnua@ya.ru*

Аннотация. В данной статье экспериментально получены вольтамперные характеристики тлеющего разряда с потоком газа. Межэлектродное расстояние a между полыми электродами изменялось от двух до восьми сантиметров. Вольтамперные характеристики имеют отрицательное дифференциальное сопротивление. Исследование показало, как межэлектродное расстояние и поток газа влияют на указанные характеристики.

Ключевые слова: тлеющий разряд, разрядная камера, вольтамперные характеристики, газодинамические параметры.

THE RESEARCH OF CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF GLOW DISCHARGE

M.M. Garipov

*Kazan National Research Technical University
named by A.N. Tupolev, Kazan, Russia, maratnua@ya.ru*

Abstract. This article experimentally obtained the current-voltage characteristics of a glow discharge with a gas flow. The interelectrode distance varied from two to eight centimeters. Current-voltage characteristics have a negative differential resistance. The study showed how the interelectrode distance and the gas flow affect the specified characteristics.

Keywords: glow discharge, discharge chamber, current-voltage characteristics, gas-dynamic parameters.

Особенностью тлеющего разряда [1] по сравнению с другими видами разрядов является значительное превышение температуры электронов над температурой нейтральных час-

тиц. Эта особенность позволяет использовать тлеющий разряд в различных технологических процессах, требующих невысоких температур газа (плазмохимия, катодное распыление металлов, нанесение пленок, модификация поверхности). Первоначально тлеющий разряд использовался в закрытых устройствах как источник излучения [2,3]. В современных разрядных камерах с тлеющим разрядом активно используются газовые потоки. В работах [4-7] методом контактной диагностики исследовано температурное поле в плазме продольного тлеющего разряда. Получены зависимости температур от тока разряда, вкладываемой в него мощности и расхода газа. Показано, что при определенном расходе воздуха происходит сжатие тлеющего разряда. Также получены распределения температуры нейтральной компоненты вдоль оси разрядной камеры и проведены расчетные данные по двум моделям положительного столба разряда: диффузионной и рекомбинационной. Показано, что диффузионная модель столба лучше описывает температуру вблизи стенки разрядной камеры, а рекомбинационная модель точнее отражает температуру на оси разрядной камеры. В работах [8-11] были изучены переходные процессы, происходящие при малых токах разряда, когда он существенно меняет свой внешний вид. Фактически исследовался переход от обычного нормального тлеющего разряда к темному разряду без видимого свечения положительного столба разряда. Было показано, что поток газа вызывает увеличение тока разряда, при котором совершается переход к темной форме разряда. Также были обнаружены высокочастотные пульсации напряжения порядка сотен килогерц. вольтамперные характеристики для одного межэлектродного расстояния. Выявлены переходные участки от обычного режима горения разряда к темной его форме, без видимого свечения положительного столба разряда. Важность исследования таких характеристик разряда связана с тем, что они позволяют работать и автоматизировать технологический процесс плазменной обработки материалов. Целью данной работы является дальнейшее исследование влияния геометрии разрядной камеры и параметров газа на вольтамперные характеристики продольного тлеющего разряда.

Схема разрядной камеры представлена на рисунке 1. Разрядная камера (рис.1) состоит из медных полых электродов 1 и 2, кварцевой трубки 3, кольца 4 с уплотнительной прокладкой и монтажных элементов 5. Изменяя положение электрода 1 можно регулировать межэлектродное расстояние от минимального значения до $a = 0,08$ м. Газ в разрядную камеру поступает по внутреннему каналу электрода 1, проходит через зону разряда, где переходит в плазменное состояние и выносится в вакуумную систему по внутреннему каналу неподвижного электрода 2.

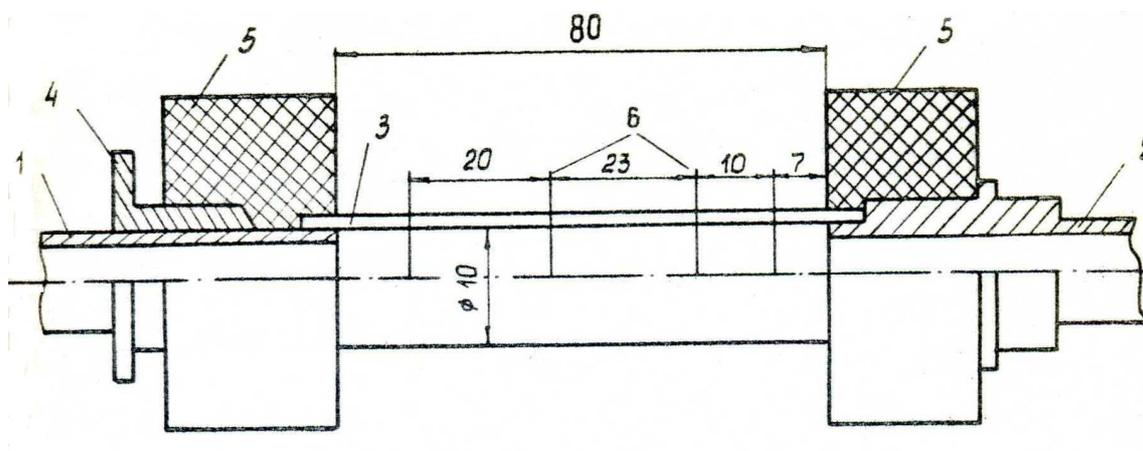


Рис. 1. Конструкция разрядной камеры для исследования продольного тлеющего разряда

Схема экспериментальной установки показана на рисунке 2.

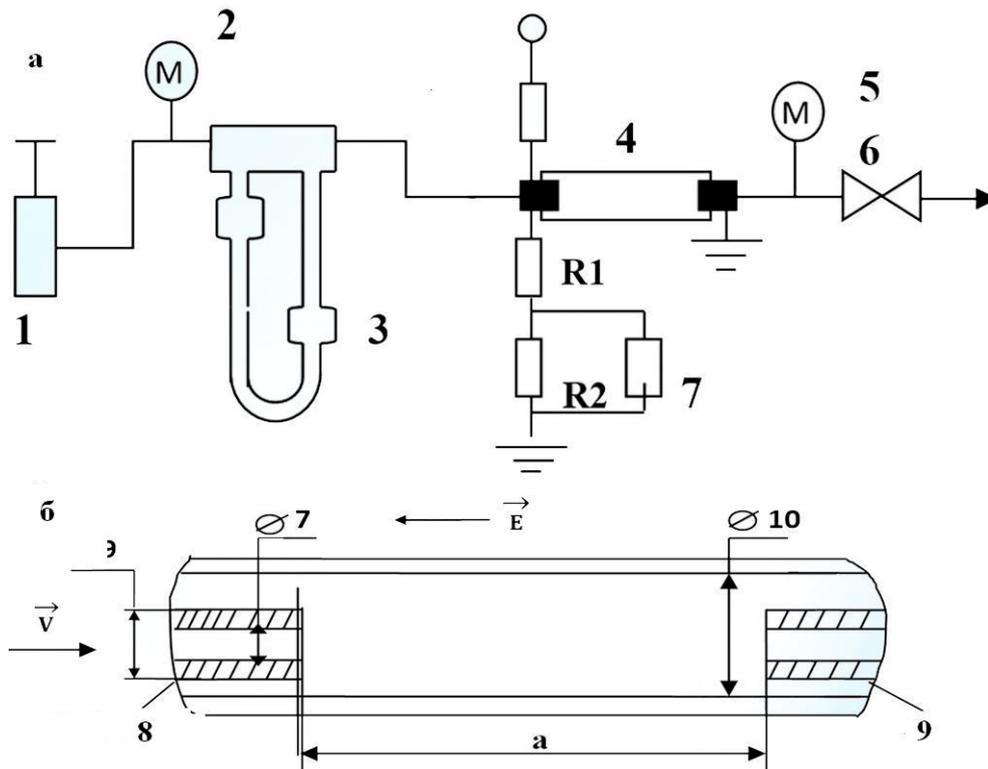


Рис.2. Схема экспериментальной установки: а – газодинамический тракт; б – разрядная камера

Воздух через игольчатый натекатель **1** и измеритель расхода **3** (реометр РДС-10) подавался в РК **4**. РК представляет собой кварцевую трубку (рис.1.б). Разряд зажигался в продольном потоке между медными полыми цилиндрическими электродами: катодом **8** и анодом **9**. Расстояние между электродами можно было изменять в диапазоне от 2 см до 8 см. Отработанная среда из РК поступала в ёмкость и удалялась в атмосферу вакуумным насосом ВВН-12. Измерение статического давления в РК производилась U-образными ртутными манометрами **2** и **5**. Скорость потока и величина давления P регулировалась с помощью вентиля **6**. Колебания напряжения разряда регистрировались осциллографом **7** типа СИ-48Б, а вольт-амперная характеристика (ВАХ) разряда снималась двухкоординатным самописцем типа Н-306. В цепь разряда было включено балластное сопротивление $R_b = 36$ кОм.

На рисунке **3** приведены вольтамперные характеристики тлеющего разряда для различных значений межэлектродного расстояния. Все они имеют отрицательное дифференциальное сопротивление. При фиксированном межэлектродном расстоянии с уменьшением тока крутизна характеристики увеличивается. Ее значение составляет $\sim (1-23)$ В/мА и возрастает с увеличением межэлектродного расстояния. С изменением межэлектродного расстояния от $a = 0,02$ м до $a = 0,08$ м напряжение разряда увеличивается на 100%. Скорость изменения напряжения разряда с увеличением a находится в пределах (90-170) В/см и растет с уменьшением тока.

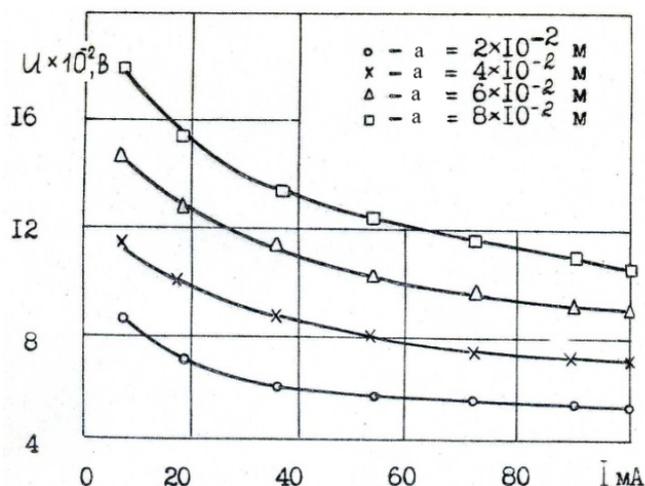


Рис. 3. Вольтамперные характеристики тлеющего разряда при различных межэлектродных расстояниях $a = (0,02 - 0,08)$ м, $P = 3,19$ кПа, - $G=0$

При прокачке газа через разрядную камеру качественно вольтамперные характеристики не изменяются, но напряжение разряда и крутизна характеристик повышаются по сравнению с разрядом без потока газа (рис.4.) При этом относительное повышение напряжения увеличивается с ростом межэлектродного расстояния. Напряжение разряда для тока $I = 20$ мА увеличивается в интервале расхода воздуха $G = (0 - 0,02)$ г/с в среднем на 30%. В случае $a = 0,02$ м с дальнейшим увеличением расхода воздуха в диапазоне $G = (0,02 - 0,043)$ г/с напряжение разряда практически не изменяется. Тогда как для межэлектродного расстояния $a = 0,08$ м при тех же условиях напряжение разряда возрастает на 18%. С повышением давления напряжение увеличивается в среднем со скоростью 0,3В/Па для указанного межэлектродного расстояния. Чем больше межэлектродное расстояние, тем более чувствителен разряд к изменению давления.

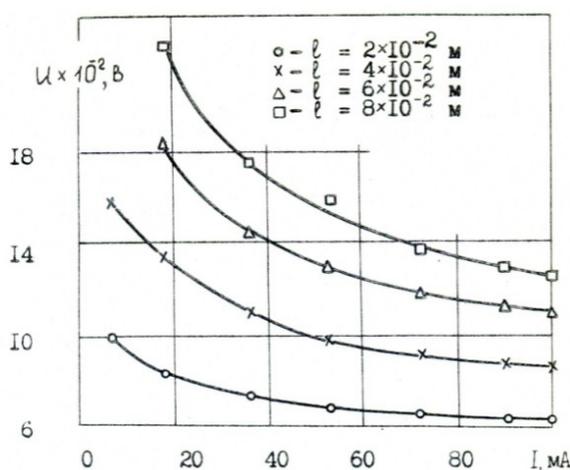


Рис. 4. Вольтамперные характеристики тлеющего разряда в продольном потоке воздуха при различных межэлектродных расстояниях $a = (0,02 - 0,08)$ м, $P = 3,19$ кПа, $G = 0,02$ г/с

В данной статье экспериментально получены вольтамперные характеристики продольного тлеющего разряда для различных межэлектродных расстояний, давлений и расходов воздуха. Выявлено влияние расхода воздуха, межэлектродного расстояния, давления на вид и количественные соотношения зависимости напряжения от тока разряда. В диапазоне исследованных параметров падения потенциала в положительном столбе разряда и вблизи

электродов были одного порядка. Полученные результаты могут найти применение для моделирования процессов в газовом разряде, обобщения на основе теории подобия, разработки технологических процессов, основанных на энергетике тлеющего разряда.

Библиографический список

1. Райзер, Ю.П. Физика газового разряда/ Ю.П. Райзер – М.: Наука, 1987. -592 с.
2. Чижиков А.Е., Дуононов В.В. Исследование временных характеристик излучения газоразрядных источников//Современные технологии в науке и образовании. СТНО-2018. Международный научно-технический форум. Сборник трудов. Том 2. Рязань. 2018. С.16-21.
3. Юнусов Р.Ф. Значение шара Тесла для понимания явлений газового разряда//Вестник Казанского государственного университета им. А.Н.Туполева. 2017. Т. 73. № 3. С. 5-9.
4. Yunusov R.F. Heat transfer in a longitudinal glow discharge// Journal of Physics: Conf. Series 789 (2017) 012069.
5. Гарипов М.М., Юнусов Р.Ф. Экспериментальное исследование теплообмена в тлеющем разряде// Всероссийская (с международным участием) конференция «Физика низкотемпературной плазмы» ФНТП-2017. Казань. 2017. С.84.
6. Yunusov R.F., Garipov M.M., Yunusova E.R. Heat Balance in the Positive Column of a Glow Discharge//Journal of Physics: Conf. Series 1058 (2018) 012051.
7. Yunusov R.F., Garipov M.M. Experimental study of heat transfer in the longitudinal glow discharge//Journal of Physics: Conf. Series 927 (2017) 012076.
8. Гарипов М.М., Юнусов Р.Ф. Экспериментальное исследование пульсаций напряжения в тлеющем разряде с потоком газа//Всероссийская (с международным участием) конференция «Физика низкотемпературной плазмы» ФНТП-2017. Казань. 2017. С.83.
9. Гарипов М.М. Пульсации напряжения в продольном тлеющем разряде//Наука в движении: от отражения к созданию реальности. Материалы II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Альметьевск. 2017. С.238 -243.
10. Yunusov R.F., Garipov M.M. Experimental study of voltage fluctuations in the longitudinal glow discharge//Journal of Physics: Conf. Series 927 (2017) 012077.
11. Yunusov R.F., Garipov M.M., Yunusova E.R. Transients in the longitudinal Glow Discharge//Journal of Physics: Conf. Series 1058 (2018) 012050.

УДК 535.015; ГРНТИ 29.35.19

К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СИСТЕМ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИМИДЖИНГА

С.Н. Жакупов

*Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, Томск, Zhak.sn@yandex.ru*

Аннотация. В данной работе представлена актуальная информация о методах анализа неоднородных объектов, основанных на использовании электромагнитного излучения терагерцового диапазона частот. В частности, рассматривается вопрос о повышении разрешающей способности систем, используемых для проведения бесконтактного анализа и выявления внутренней структуры объектов.

Ключевые слова: терагерцовая визуализация, разрешающая способность, дифракционный предел.

TO THE QUESTION OF INCREASING THE RESOLVING CAPABILITY OF TERAHERTZ IMAGING SYSTEMS

S.N. Zhakupov

*National Research Tomsk State University,
Russia, Tomsk, Zhak.sn@yandex.ru*

Abstract. This paper presents current information on methods for analyzing inhomogeneous objects based on the use of electromagnetic radiation in the terahertz frequency range. In particular, the issue of increasing the resolution of the systems used for non-invasive analysis and identifying the internal structure of objects is considered.

Keywords: terahertz imaging, resolution, diffraction limit.

Ни для кого не секрет, что в настоящее время, всвязи с быстрым ростом технического прогресса, постоянно открываются и получают развитие все новые и новые методы много-стороннего анализа физических - материальных объектов. Среди множества которых стоит выделить методы, основанные на использовании электромагнитного излучения терагерцового диапазона частот (ТГц). К основным достоинствам данного излучение можно отнести наличие характерных особенностей в ТГц спектре, что позволяет определять природу вещества [1]. Вторым немаловажным достоинством является слабая степень ионизации относительно рентген излучения, наличие данного аспекта позволило использовать терагерцовое излучение в системах безопасности – сканеры тела человека и в медицине - для анализа и диагностики рака кожи человека [2].

Одним из перспективно развивающихся направлений анализа неоднородных материалов является терагерцовый имиджинг. Он представляет собой визуализацию внутреннего строения объекта. В частном случае, при использовании спектрометра терагерцового диапазона с источником непрерывного излучения проводится анализ распределения интенсивности и сдвига фазы проходящего через образец электромагнитного излучения. Данный метод позволяет наглядно демонстрировать все внутренниенеднородности исследуемого объекта, начиная от скрытых дефектов – полости, трещины, заканчивая выявлением вещественного состава, таким образом позволяя проводить детальный бесконтактный анализ неоднородных объектов. Одним из качественных показателей данного метода является его пространственная разрешающая способность. Данную характеристику можно трактовать как минимальное линейное или угловое расстояние между двумя точками, при котором они не сливаются в одно целое и детектор способен их различить.

Рассмотрим один из результатов эксперимента (рисунок 1) [3] с использованием установки ТГц спектрометра СТД-2. Эксперимент заключался в обнаружении изображения, скрытогоза оптически непрозрачным слоем бумаги, за счет анализа распределения амплитуды электромагнитного излучения при прохождении через объект. В качестве исследуемого образца использовалась склейка из двух листов бумаги, один из которых служил в качестве экрана-поглотителя с нанесенной на поверхность черной краской, второй нес информативную функцию и на нем находился рисунок, выполненный графитовым грифелем карандаша. Эксперимент проводился на частоте $f = 900$ ГГц. Итоговая картина получилась достаточно хорошоразборчивой, присутствуют плавные переходы элементов и отображены мелкие детали. Например, как фрагментлинии ограничительной рамки сверху рисунка, которая имеет толщину порядка десятых долей миллиметра. Отсутствие остальной части линии, как и размытость изображения (отсутствие жестких переходов), как раз и связано с ограничениями разрешающей способности. В нашем случае пространственная разрешающая способность может быть повышена несколькими путями. В первом случае можно увеличить частоту излучения, однако приведетк росту поглощения энергии электромагнитной волны в образце. Что неминуемо ведет к снижению итоговой интенсивности излучения, и детектор не зарегистрирует полезный сигнал. Второй способ имеет конструктивный характер, и он заключается в совершенствовании фокусирующей системы – минимизация диаметра пятна сфокусированного квазиоптического пучка. Второй вариант является наиболее интересным.

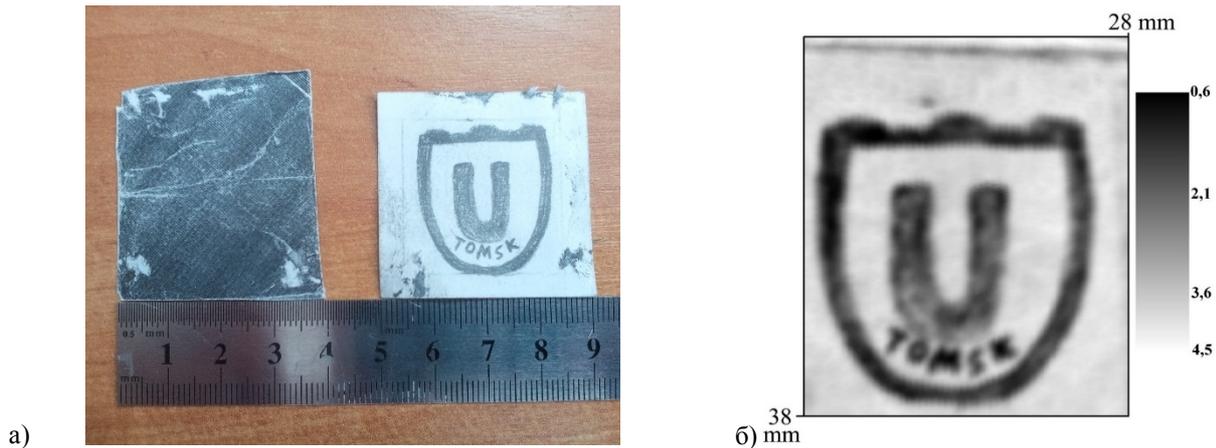


Рис. 1. Внешний вид непрозрачного экранирующего листа бумаги и исследуемый образец (а); двумерная картина распределения интенсивности электромагнитной волны, прошедшей через образец (б)

В настоящее время известно несколько структур, позволяющих создавать так называемые фотонные струи, которые имеют субволновые размеры пятна рассеяния, а в некоторых случаях близки и даже преодолевают дифракционный предел. Одной из данных структур является диэлектрическая микросфера, которая в зависимости от диаметра и составного материала, т.е. коэффициента преломления позволяет формировать фотонные струи порядка половины длины волны [4, 5]. Так же интересен факт применения сфер с линейным градиентным изменением показателя преломления [6], что позволяет устанавливать глубину фокусировки. Однако в большинстве своем представленная информация о взаимодействии микросфер с электромагнитным излучением является результатом компьютерного моделирования. В связи с чем встает вопрос о размещении данных микросфер в системе и степени влияния контактируемых с ними элементов.

Еще одной структурой, позволяющей формировать фотонные струи являются так называемые кварцевые микроступени [7], представляющие собой прямоугольный параллелепипед, расположенный на подложке. Аналогично микросферам данные ступени формируют фотонные струи в своей ближней зоне, при этом диаметр пятна рассеяния, оцениваемый по уровню полной ширины на уровне половинной амплитуды, составляет меньше половины длины волны, что демонстрирует преодоление дифракционного предела. При этом интенсивность выходного излучения превышает входное в 6 раз. Помимо этого, известна зависимость фокусного расстояния (расстояние вдоль оси распространения излучения от поверхности ступени до максимума интенсивности) от габаритных размеров основания ступени. При длине стороны квадрата основания меньшей длины волны пик интенсивности смещается внутрь «ступеньки», вблизи ее поверхности. Соответственно при увеличении длины стороны квадрата пик интенсивности уходит наружу, и при дальнейшем увеличении ширины ступени происходит увеличение фокусного расстояния.

Еще одной структурой, применяемой для фокусировки терагерцового излучения, являются конусовидные металлические проводники миллиметровой длины [8]. Захватывая падающие на них электромагнитные волны, данные проводники действуют как антенны и преобразуют их в ограниченные поля в ближней зоне на конической вершине. При изменении данного поля неоднородным объектом, рассеянное излучение несет информацию о локальных диэлектрических свойствах образца. Данная информация фиксируется дистанционно установленным детектором и может быть преобразована в изображение. Представленный метод ТГц имиджинга демонстрирует рекордную разрешающую способность (~ 40 нм), при этом достигается высокая контрастность изображения и скорость захвата и обработки сигнала.

Продолжая тему фокусировки электромагнитного излучения стоит также упомянуть о наличии так называемых метаматериалов. Как известно, данные композиционные материалы могут обладать особыми электромагнитными свойствами, не встречающимися в природе, например, иметь отрицательные значения диэлектрической и магнитной проницаемости. Данные свойства достигаются за счет особых вариаций искусственно созданной периодической структуры материала. Что и позволяет управлять законами преломления, отражения и дисперсии электромагнитных волн в метаматериале. Известно предположение, что, используя метаматериалы с отрицательным показателем преломления можно преодолеть дифракционный предел за счет свойств частотной дисперсии “левой” среды. Примером применения метаматериала может являться спектральная-широкополосная линза с градиентным изменением показателя преломления [9], которая позволяет фокусировать ТГц излучение с пятном рассеяния равным длине волны. Стоит отметить, что данные линзы имеют субволновую толщину и высокую силу фокусировки, что позволяет создавать компактные системы ТГц визуализации с высоким пространственным разрешением. Структура метаматериала представляет собой чередование слоев бензоциклобутена и структурированной меди. Медный лист содержит массив колец (щелей), а градиентный переход показателя преломления осуществляется за счет плавного изменения радиуса колец от центра листа к его границам. Хотя в данной работе и добились фокусировки излучения до субволнового уровня, по сравнению с микросферами и микроступенями усиления интенсивности излучения на выходе фокусирующей структуры не происходит.

Анализируя доступную информацию в области фокусировки высокочастотного электромагнитного излучения можно прийти к выводу, что оптимальным является использование в качестве фокусирующих элементов микроступени. Несмотря на то, что данные структуры не обладают широкополосностью, т.е. к каждой частоте оптимально создавать персональную микроступень, за счёт их малых габаритных размеров и простой формы исполнения они могут быть легко созданы с помощью аддитивных технологий. К тому же данные микроступени обеспечивают максимальную фокусировку излучения с усилением интенсивности прошедшего через них электромагнитного излучения.

Библиографический список

1. Dorney T. D., Baraniuk R. G. & Mittleman D. M. Material parameter estimation with terahertz time-domain spectroscopy. // *Journal of the Optical Society of America A.* – 2001. – V. 18(7). – P. 1562 – 1571.
2. Pickwell E., Cole B. E., Fitzgerald A. J., Pepper M. & Wallace V. P. In vivo study of human skin using pulsed terahertz radiation. // *Physics in Medicine and Biology.* – 2004. – V. 49(9). – P. 1595–1607.
3. Zhakupov S.N., Badin A.V. Detection of hidden images based on contrast of intensity distribution of terahertz radiation. // 14th International scientific-technical conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE). – 2018. – V. 1(3). – P. 141 – 143.
4. Lu Y.F., Zhang L., Song W. D., Zheng Y. W. & Luk'yanchuk B. S. Laser Writing of a Subwavelength Structure on Silicon (100) Surfaces with Particle-Enhanced Optical Irradiation. // *JETP Letters.* – 2000. – V. 72(9). – P. 457-459.
5. Yang Y., Liu H., Yang M., Cui B., Zhang W. Dielectric sphere-coupled THz super-resolution imaging // *Appl. Phys. Lett.* – 2018. V. 113. No 3. – P. 031105-1 - 031105-5.
6. Kong S.-C., Taflov A. & Backman V. Quasi one-dimensional light beam generated by a graded-index microsphere. // *Optics Express.* – 2009. – V. 17(5). – P. 3722-3731.
7. Котляр В.В., Стафеев С.С., Фельдман А.Ю. Фотонные струи, сформированные квадратными микроступенями. // *Компьютерная оптика.* – 2014, №1. – С. 72 – 80.
8. Huber A. J., Keilmann F., Wittborn J., Aizpuru, J. & Hillenbrand R. Terahertz Near-Field Nanoscopy of Mobile Carriers in Single Semiconductor Nanodevices. // *Nano Letters.* – 2008. – V. 8(11). – P. 3766–3770.
9. Neu J., Krolla B., Paul O., Reinhard B., Beigang R. & Rahm M. Metamaterial-based gradient index lens with strong focusing in the THz frequency range. // *Optics Express.* – 2010. – V. 18(26). – P. 27748-27757.

УДК 621.385.6

**ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
МОДУЛИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ
С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ В ВЫХОДНОМ РЕЗОНАТОРЕ
МНОГОЛУЧЕВОГО КЛИСТРОНА**

Ю.Н. Парамонов, О.В. Яковлев, С.В. Сурков

ФГУП «НПП «Торий»

Российская федерация, Москва, yakovlevov95@mail.ru

Аннотация. В настоящей работе представлены результаты расчетов и экспериментов по оптимизации выходного каскада мощного многолучевого клистрона. Представлен метод выравнивания электрических полей в многолучевых системах. Показаны экспериментальные результаты увеличения КПД прибора КИУ-271.

Ключевые слова: многолучевой клистрон, электрическое поле в многолучевой системе, резонатор многолучевого клистрона

**3D MODELING OF INTERACTION OF MODULATED
ELECTRON BEAMS WITH ELECTROMAGNETIC FIELD
IN OUTPUT CAVITY OF THE MULTIPLE-BEAM KLYSTRON**

Yu.N. Paramonov, O.V. Yakovlev, S.V. Surkov

JSC "RPE "Torij"

Russian Federation, Moscow, yakovlevov95@mail.ru

Abstract. This paper presents the results of calculations and experiments to optimize the output cavity of the high-power multiple-beam klystron. A method for equalizing the electric fields in multiple-beam systems is presented. The experimental results for increased efficiency of the KIU-271 klystron are shown.

Keywords: multibeam klystron, the electric field in a multibeam system, the cavity multiple-beam klystron

Характерной особенностью многолучевых клистронов является неравномерность волнового сопротивления в ВЧ зазоре выходного резонатора. Это связано с наличием неоднородности в виде щели связи, связывающей активный контур с выходным трактом. Таким образом, требуемое волновое сопротивление для идеального согласования можно получить только в нескольких пролетных каналах многолучевой системы, в остальных же каналах отбор энергии у электронного потока будет не эффективным. И как следствие, будут существенные потери КПД [1]. В качестве примера на рисунке 1 представлен выходной резонатор мощного многолучевого клистрона КИУ-271, разработанный и серийно выпускаемый на АО «НПП «Торий». Данный выходной каскад представляет собой кольцевой резонатор с 30 пролетными каналами, центральной втулкой, используемой в качестве настроечного элемента, и волноводным трансформатором, связанным с выходным резонатором щелью связи.

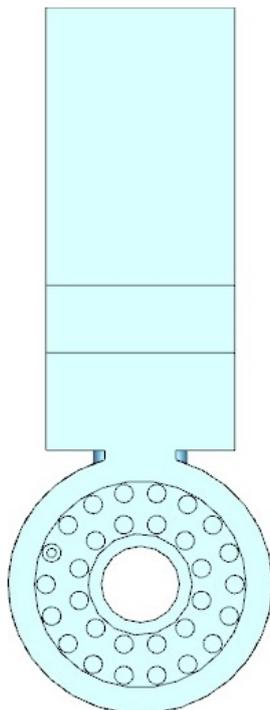


Рис. 1. Модель выходного резонатора

Его распределение электрического поля на рабочей частоте 5712 МГц вдоль линии, проходящей через внешний ряд пролетных каналов, представлено на рисунке 2. Как видно, уровень тормозящего электрического поля в различных каналах отличается практически в 2 раза.

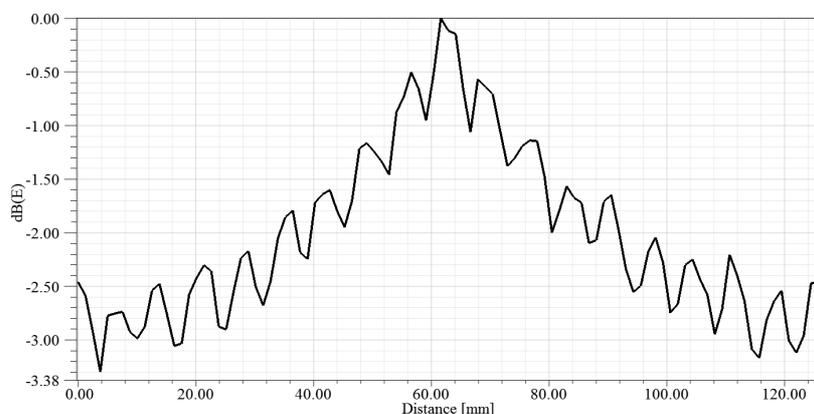
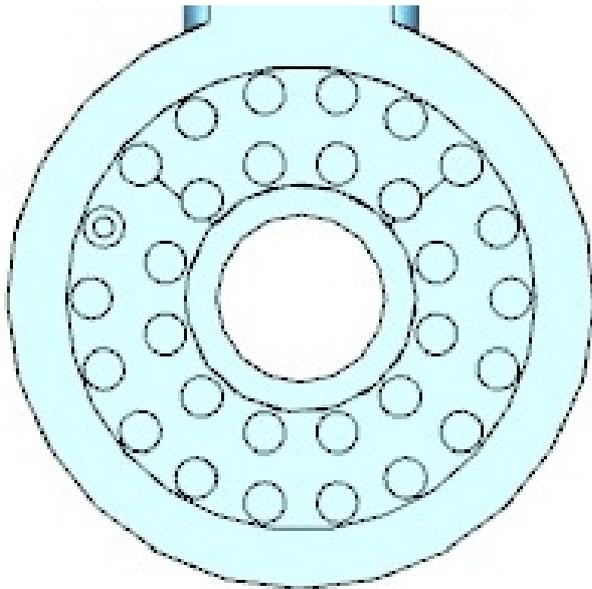


Рис. 2. Распределение поля внутри пролетных каналов

В [1] предложен метод, основанный на использовании различных длин высокочастотных зазоров, который позволяет выровнять уровень электрического поля. Результаты численного моделирования показали, что при увеличении величины высокочастотного зазора на 0.7 мм в области щели связи (рис. 3(а, б)), распределение поля существенно выравнивается. При этом частота и добротность резонансного контура изменится, и ее необходимо подстроить за счет размеров центральной втулки и щели связи. Результаты расчета представлены на рисунке 4 (а, б).

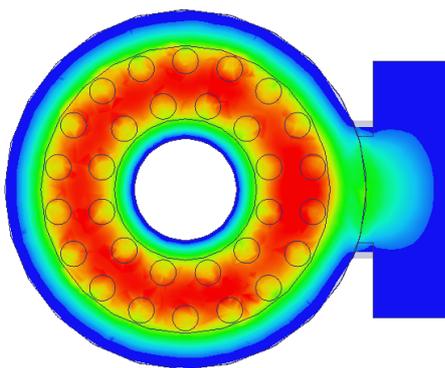


а) модель в программе

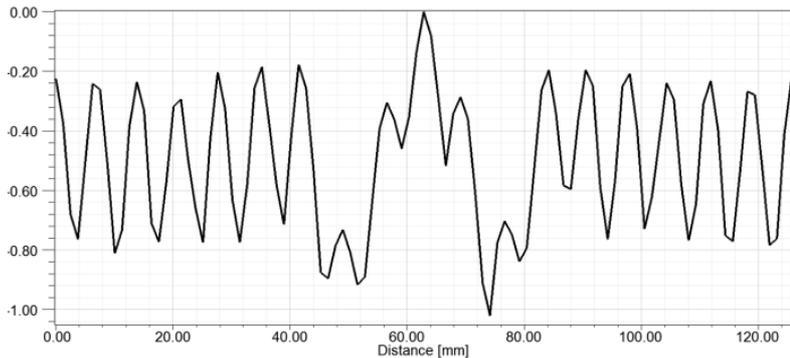


б) фрезеровка в реальном приборе

Рис. 3 (а, б). Выходной резонатор с фрезеровкой



а) в плоскости



б) вдоль линии, проходящей по внешним пролетным каналам

Рис. 4. Распределение поля внутри резонатора

Для оценки КПД клистрона с измененной конструкцией было проведено моделирование взаимодействия электронных потоков в пролетных каналах и создаваемого в резонаторе электромагнитного поля. Для данного расчета требуется подобрать параметры, соответствующие требуемой резонансной частоте и добротности. С помощью изменения радиуса центральной втулки и щели связи были получены требуемые резонансная частота и добротность (таблица 1). Произведен расчет зависимостей параметра S_{12} от частоты по 15 пролетным каналам. Путем усреднения полученных кривых был выбран характерный пролетный канал.

Таблица 1. Параметры исходной системы

$R_{вт}$, мм	$f_{рез}$, ГГц	Q
8.31	5.710	53

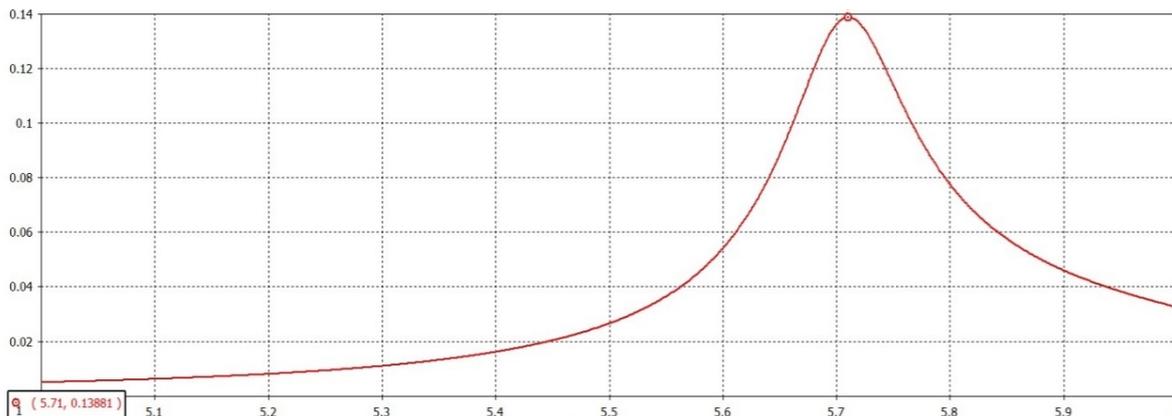


Рис. 5. Зависимость S_{12} от частоты

Далее были получены требуемые резонансная частота и добротность для модели с фрезеровкой. Соответствующие характеристики представлены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры системы с вырезом

$R_{вТ}$, мм	$f_{рез}$, ГГц	Q
8.07	5.711	53

Расчет параметров пучка для моделирования

На рисунке 6 изображен выходной резонатор с источником частиц на каждом из пролетных каналов. Была выбрана модель пучков, в которой распределение плотности заряда соответствует распределению Гаусса (рисунок 7).

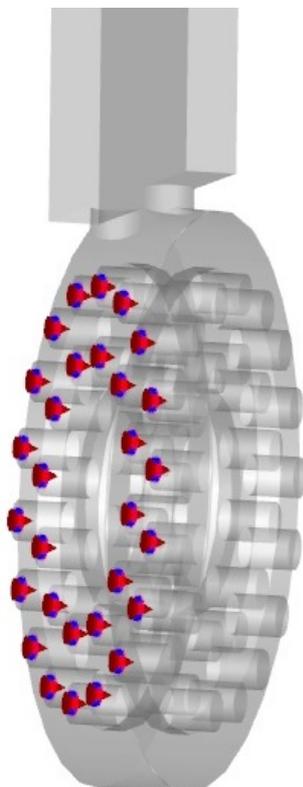


Рис.6. Источники частиц на резонаторе

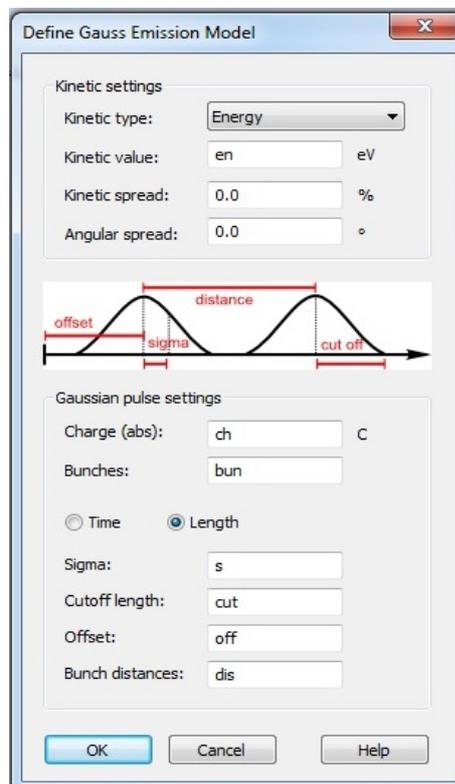


Рис. 7. Внесение характеристик в модель

Таблица 3. Исходные характеристики системы

f, МГц	I, А	U, кВ	N	$t_{и}$, мкс
5712	150	45	30	7

Принимая во внимание исходные характеристики системы (табл. 3), были рассчитаны параметры пучка, для корректного его определения. Заполнение пролетных каналов в этой модели составляет 50%.

Результаты моделирования

Были произведены расчеты взаимодействия пучков электронов, движущихся в пролетных каналах, с электромагнитным полем, возбуждаемым в резонаторе, для моделей с фрезеровкой и без. На рисунках 8, 9 приведены результаты расчета выходных характеристик исходной модели.

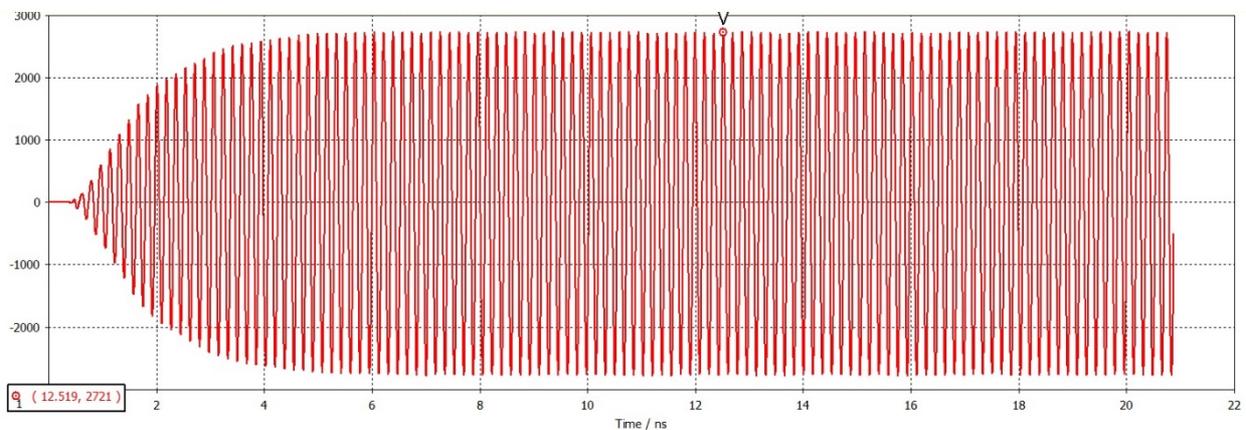


Рис. 8. Зависимость амплитуды сигнала от времени на выходе из волновода (в условных единицах)

Оценить выходную мощность сигнала можно по формуле:

$$P_{\text{вых}} = \frac{2721^2}{2} = 3.702 \text{ МВт.}$$

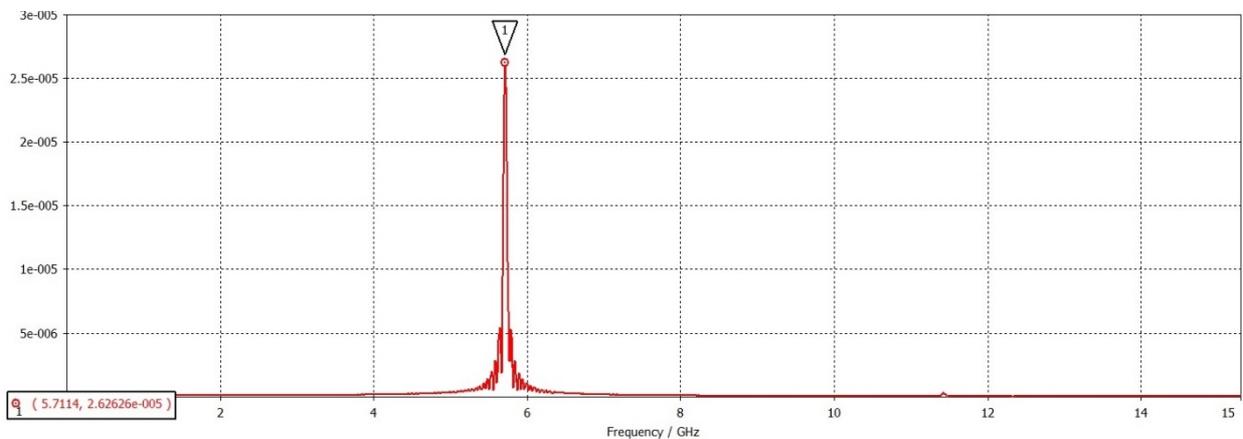


Рис. 9. Спектральная характеристика выходного сигнала

Резонансная частота получаемого на выходе электромагнитного поля составила $f_{рез} = 5.711$ ГГц. КПД составляет $\eta = 54.8$ %.

Также были проведены расчеты выходных характеристик на модели с фрезеровкой на стенке резонатора.

$$P_{вых} = \frac{2824^2}{2} = 3.986 \text{ МВт.}$$

Резонансная частота получаемого на выходе электромагнитного поля составила $f_{рез} = 5.711$ ГГц. КПД увеличилось до $\eta = 59.1\%$ (увеличилось на 4,3%).

Данные конструктивные изменения были реализованы на экспериментальном макете (рис. 3,б). Результаты электродинамических измерений экспериментального макета показали хорошее соответствие с результатами расчета. Был испытан прибор с измененной конструкцией выходного резонатора, которая позволила увеличить КПД прибора с 53 до 60 %.

Также были проведены расчеты амплитуды выходного сигнала для разной добротности резонатора без сектора, результаты представлены таблице 4. Исходя из этих данных можно судить о том, что значение добротности, выбранное для реализации в приборе, является близким к оптимальному.

Таблица 4. Зависимость выходной мощности от добротности резонатора

Q	f, ГГц	P _{out} , МВт	η , %
53	5.710	3.702	54.8
63	5.711	3.372	49.9
73	5.711	3.202	47.4

1. D. A. Komarov, E. P. Yakushkin, Y. N. Paramonov, S. E. Sharkov. Increased efficiency of high-power multiple-beam klystrons based on optimization of the output cavity. IVEC 2018.

УДК 621.396; ГРНТИ 47.47

ВЛИЯНИЕ ПАРОВ ЙОДА НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТЕА-СО₂ ЛАЗЕРА

Н.В. Сухорукова

Рязанский государственный радиотехнический университет,

Российская Федерация, Рязань, notiya2804@gmail.com

Аннотация: Данная работа направлена на изучение влияния добавок паров йода в рабочие смеси ТЕА-СО₂ лазера на уровень начальной ионизации и величину энергии лазерного излучения в импульсе.

Ключевые слова: ТЕА-СО₂ лазер, объемный разряд, предьонизация, ВУФ-излучение, потенциал ионизации, легкоионизируемые примеси, компоненты рабочей смеси, концентрация электронов в разрядном промежутке.

EFFECT OF IODINE VAPORS ON THE ENERGY PARAMETERS OF TEA-CO₂ LASER

N.V. Suchorukova

Ryazan State Radio Engineering University,
Russia, Ryazan, notiya2804@gmail.com

The summary: This paper is aimed at studying the effect of iodine vapors additions in TEA-CO₂ laser working mixtures on the level of initial ionization and the quantity of the laser radiation energy.

Keywords: TEA-CO₂ laser, volume discharge, pre-ionization, VUV-radiation, ionization potential, easily ionizable additives, components of the working mixture, electron concentration in the discharge gap.

Импульсные TEA-CO₂ лазеры, возбуждаемые поперечным разрядом при атмосферном давлении, позволяют формировать импульсы излучения с мощностями 10^6 - 10^9 Вт.

Малогабаритные TEA-CO₂ лазеры в настоящее время применяются в оптической локации, мониторинге окружающей среды и для тестирования быстродействующих ИК-фотоприемников и систем на их основе, исследование плазмы, спектроскопии и фотохимии.

Одним из приоритетных направлений в разработках малогабаритных TEA-CO₂ лазеров является повышение их выходной мощности.

Образование объемного разряда

На рисунке 1 представлено межэлектродное пространство и сечение электродов, к которым прикладывается высоковольтный импульс напряжения, обеспечивающий зажигание вспомогательного искрового разряда и объемного разряда накачки. Возбуждение активной среды происходит в плазме объемного разряда.

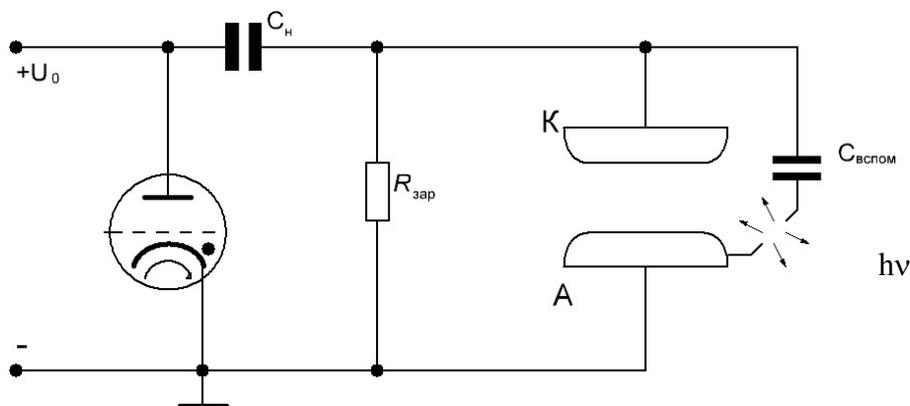


Рис. 1. Электрическая схема

Если сопоставить спектр УФ-излучения вспомогательного искрового разряда с графиком поглощения этого излучения молекулами CO₂ в зависимости от длины волны, изображенные на рисунке 2, то можно выявить необходимость добавления веществ с низким потенциалом ионизации в газовую смесь. УФ-излучение будет ионизировать данные вещества, образуя при этом большее количество электронно-ионных пар. В качестве веществ, подходящих для предыонизации, могут служить некоторые органические соединения, цезий и йод [3]. Органические соединения загрязняют оптическую систему и ухудшают параметры оптического излучения. Йод обладает низким потенциалом ионизации и достаточно высоким давлением насыщенных паров при комнатной температуре.

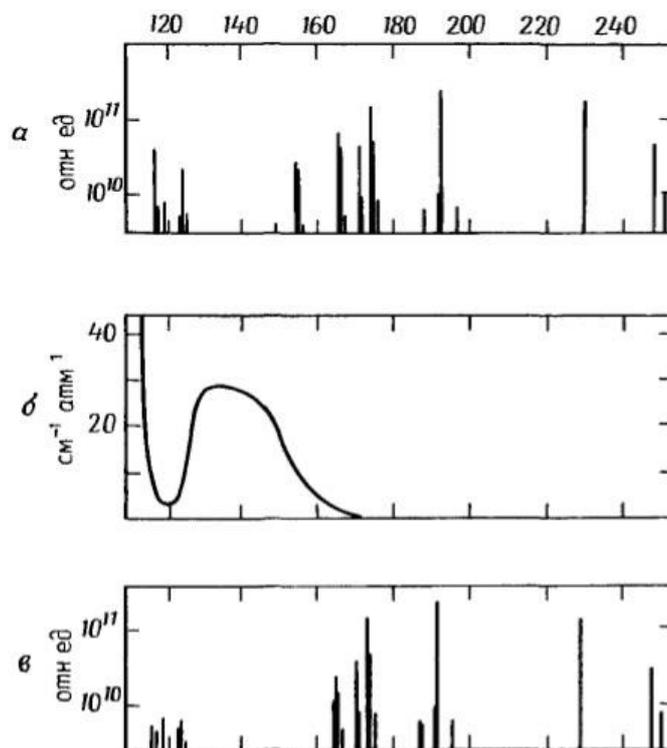


Рис. 2. Физические процессы, протекающие при УФ предыонизации
 а – излучение искры, б – поглощение молекулами CO_2 , в – используемая часть излучения искры

Экспериментальная установка

Рабочая установка, представленная на рисунке 3, состоит из активного элемента, системы откачки и наполнения рабочими газами. Несколько кристаллов йода были введены непосредственно в активный элемент лазера.

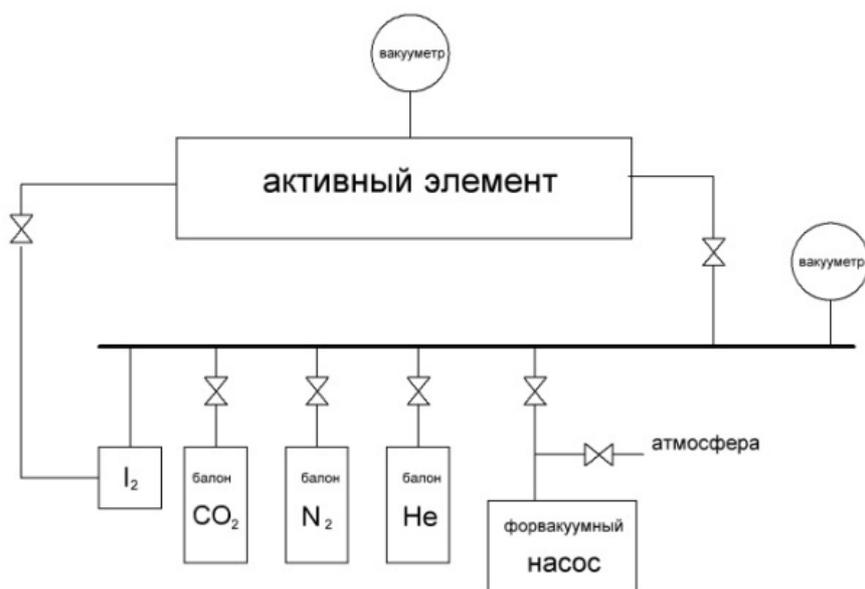


Рис. 3. Схема установки для проведения опытов

Для создания высокого напряжения на разрядных промежутках к активному элементу подсоединяется емкостной накопитель, состоящий из 8 параллельно соединенных блоков, каждый из которых содержит по три последовательно соединенных конденсатора. Общая емкость накопительного конденсатора составляет 8800 пФ. Емкостной накопитель коммутируется на разрядные промежутки с помощью тиратрона.

Результаты проведенных экспериментов

В ходе работы исследовались рабочие смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ с соотношением компонентов 1:1:1; 1:1:2; 1:1:4; 1:1:8 без добавления йода (рисунок 4) и с добавлением (рисунок 5). При изменении напряжения накачки в пределах – от 15 до 30 кВ, в смесях не содержащих присадок, энергия возрастала от 15 до 58 мДж; в смесях, содержащих пары йода – от 15 до 67 мДж.

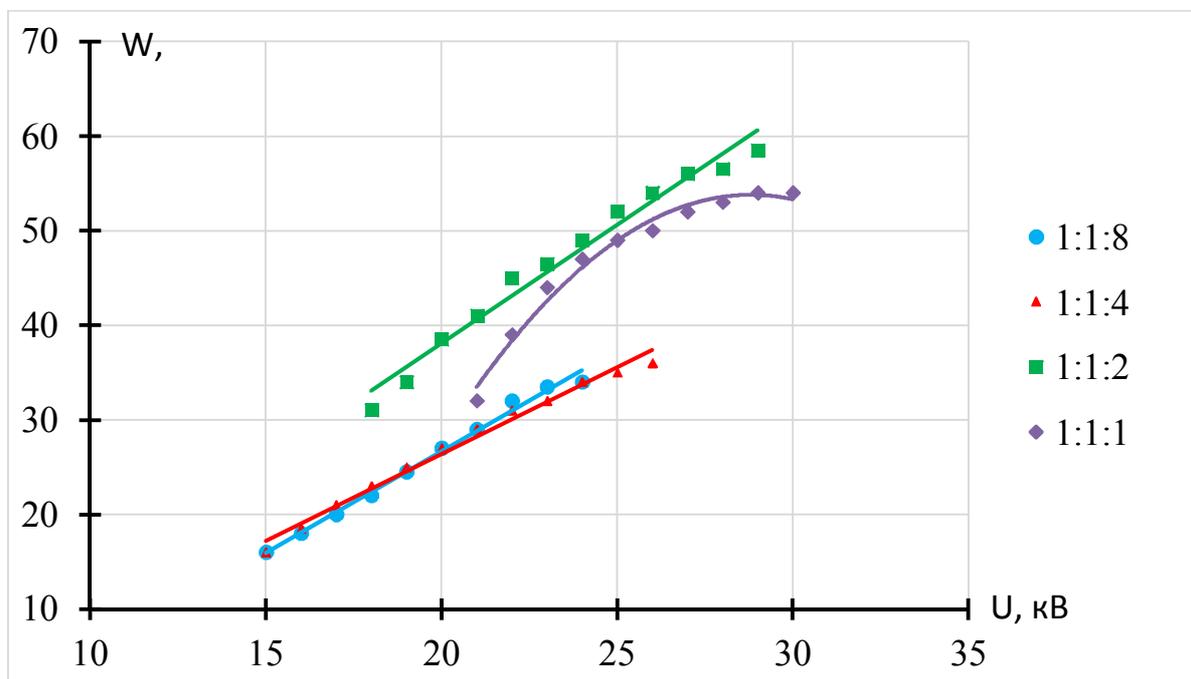


Рис. 4. Зависимости энергии излучения от напряжения накачки для различного соотношения компонентов газовой смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ без добавлением паров йода

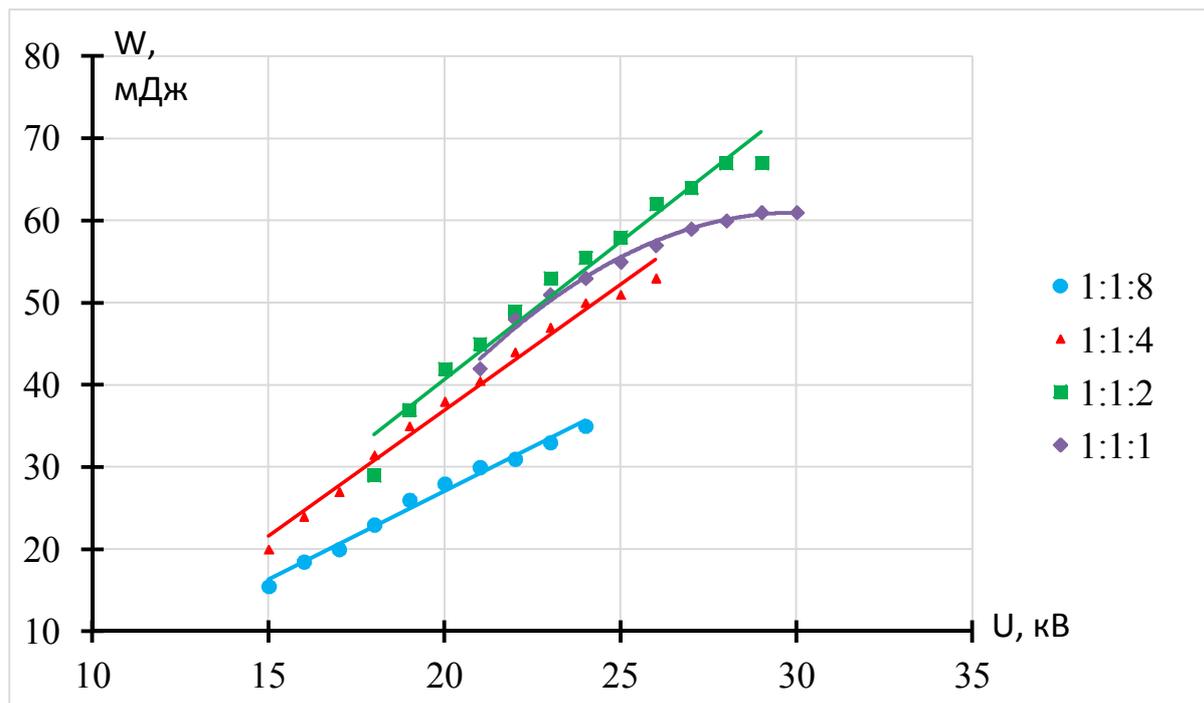


Рис. 5. Зависимости энергии излучения от напряжения накачки для различного соотношения компонентов газовой смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ с добавлением паров йода

Исследовалось изменение энергии излучения в импульсе при добавлении паров йода для разных составов газовой смеси при фиксированном напряжении накачки $=24$ кВ, что наглядно продемонстрировано на гистограмме представленной на рисунке 6, в результате чего было установлено положительное влияние на каждую смесь. Минимальное влияние пары оказывают на смесь с составом 1:1:8, оно составило около 5%. Влияние на смеси 1:1:2 и 1:1:1 примерно одинаково и равняется 13%. Максимальное влияние равное 50% оказано на смесь с соотношением компонентов $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:4$.

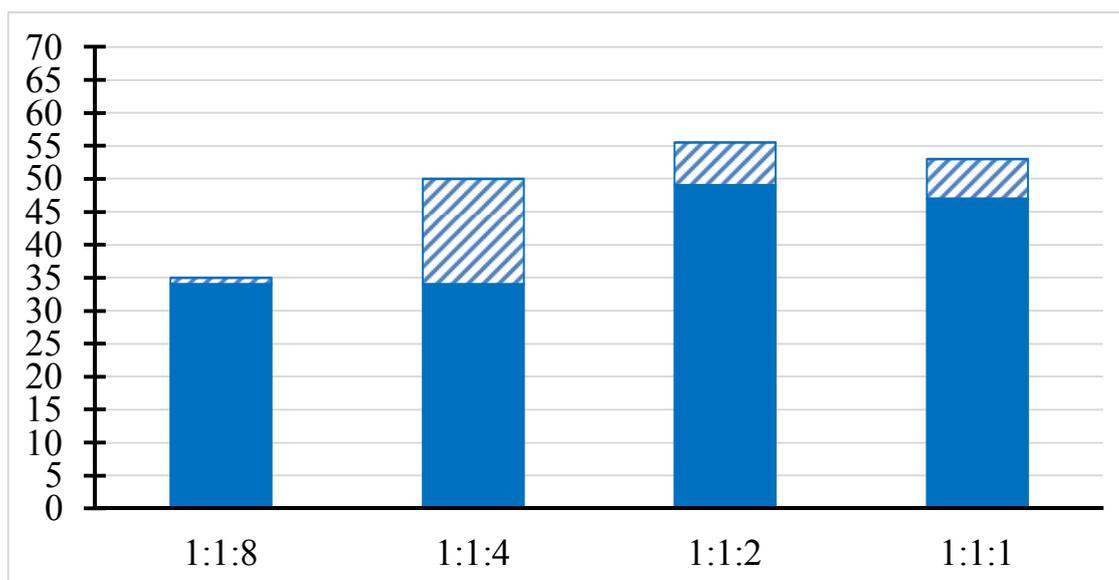


Рис. 6. Гистограмма энергии излучения в импульсе для разных составов смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ при фиксированном напряжении накачки

Выводы

В результате проведенных опытов было установлено положительное влияние добавок в рабочую смесь паров йода. Наиболее заметно это влияние проявляется при использовании рабочей смеси с соотношением компонентов $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:4$. В этом случае увеличение энергии излучения в импульсе достигает 50%.

Библиографический список:

1. Айхлер Ю., Айхлер Г.-И. Лазеры. Исполнение, управление, применение. - М.: Техносфера, 2008. -440с.
2. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника: Учеб. для вузов. – М.: Высш. Шк., 2001. – 573 с.: ил.
3. Газовые лазеры. Под редакцией И. У. Мак-Даниель и У.Л.Нигэна. - М.: Мир, 1986. – 551с. Глава 13.

УДК 681.586.2; ГРНТИ 50.09.97

ИССЛЕДОВАНИЕ ШУМОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СИГНАЛОВ ВОЛНОВОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГИРОСКОПА

Д.А. Бурмистров, В.Ю. Мишин, А.Е. Серебряков, В.В. Климаков

Рязанский государственный радиотехнический университет

Россия, Рязань, burmistrov10@mail.ru

Аннотация. В данной работе приводится алгоритм обработки сигналов волновых твердотельных гироскопов, осуществляется оценка шумовой составляющей.

Ключевые слова: ВТГ, металлический резонатор, обработка сигналов.

RESEARCH OF THE NOISE COMPONENT OF THE SIGNALS OF THE WAVE SOLID-STATE GYRO

D.A. Burmistrov, V.Yu. Mishin, A.E. Serebryakov, V.V. Klimakov

Ryazan State Radioengineering University

Russia, Ryazan, burmistrov10@mail.ru

Annotation. In this paper provides an algorithm for processing signals of wave solid-state gyro and evaluating the noise component.

Keywords: GBEW, metal resonator, processing signals.

1. Введение

В основе принципа действия волнового твердотельного гироскопа (ВТГ) лежит эффект Брайана - использование инерционных свойств стоячей волны в тонкостенном упругом кольце [1]. По материалу изготовления резонаторы ВТГ классифицируют на два вида: кварцевые и металлические. В настоящее время широкое распространение получили ВТГ с металлическим резонатором, которые помимо сходных преимуществ: высокого соотношения точности и цены, малого времени готовности, небольшого веса и габаритов, энергопотребления, способности сохранять навигационную информацию при отключении питания, в сравнении с резонаторами из кварцевого стекла, обходятся дешевле на стадиях производства. Кроме того технологию балансировки металлических резонаторов значительно проще реализовать, нежели кварцевых, что позволяет наладить выпуск высокочастотных резонаторов.

Начало массового производства недорогих металлических резонаторов приходится на середину 1990-х годов. Современная технология производства позволяет свести погрешность таких ВТГ к значению до $1^\circ/\text{ч}$, что позволяет разрабатывать на их основе платформенные инерциальные навигационные системы средней и низкой точности [2].

На рисунке 1 приведена широко распространенная конструкция ВТГ с цилиндрическим резонатором, разработанная ОАО "Пермская научно-производственная приборостроительная компания" [3]. На дне резонатора ВТГ, по окружности расположены восемь пьезоэлементов, используемые для возбуждения колебаний и съема информации (рисунок 1).

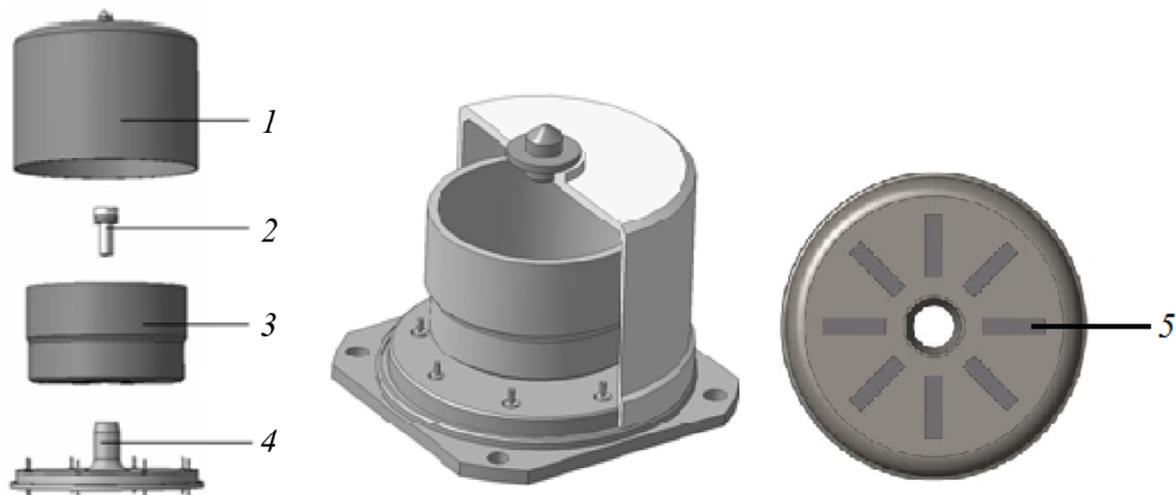


Рис. 1. Конструкция ВТГ с цилиндрическим резонатором [3]:
1 — корпус; 2 — крепежный винт; 3 — резонатор; 4 — основание; 5 — пьезоэлементы

При отсутствии вращения ориентация волнового поля в резонаторе ВТГ постоянна, другими словами, стоячая волна «привязана» к корпусу прибора; при повороте датчика на некоторый угол пучности стоячей волны смещаются от направления возбуждения на определённую величину. Угловое смещение стоячей волны при этом зависит от угла, на который повернулся датчик, а также от конструктивных параметров резонатора.

Целью представленной работы является разработка алгоритма обработки сигналов ВТГ, исследование шумовой составляющей и выведение результатов на экран компьютера.

2. Поворотный стенд. Функциональная схема получения сигналов с гироскопа. Контроль рабочих параметров

На рисунке 2 представлена широко известная схема включения ВТГ в режиме датчика угловой скорости (ДУС) [4]. Данная функциональная схема включает в себя:

- генератор, возбуждающий с помощью пьезоэлементов 1-2 колебания в резонаторе гироскопа;
- блок коррекции, который применяется в схеме для коррекции возбуждающего сигнала по амплитуде и фазе;
- петля обратной связи, образованная пьезоэлементами 5-6, 7-8 и измерительным блоком. Измерительный блок принимает сигналы с пьезоэлементов 5-6, определяет амплитуду сигнала и формирует управляющий сигнал на пьезоэлементы 7-8 для сведения к нулю детектированной амплитуды сигналов. Сигнал с электродов 7 – 8 пропорционален угловой скорости.

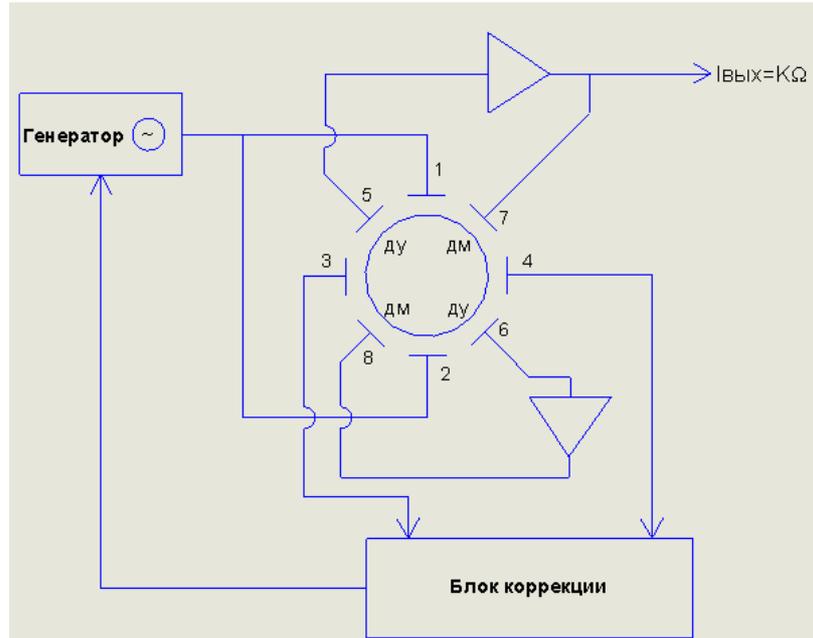


Рис. 2. Схема включения ВТГ в режиме ДУС

Данная схема включения ВТГ требует наличия нескольких систем автоматического регулирования. В данной работе для выделения информации об угловой скорости использован метод [6], позволяющий путем цифровой обработки двух первичных сигналов восстанавливать информацию о фазе сигнала.

Исследования выполнялись с использованием поворотного станда, который позволяет вращать ВТГ на 360° . Конструктивные особенности градуированного поворотного станда позволяют вращать гироскоп с небольшими скоростями до $10^\circ/\text{с}$.

Функциональная схема включения ВТГ в составе станда представлена на рисунке 3.

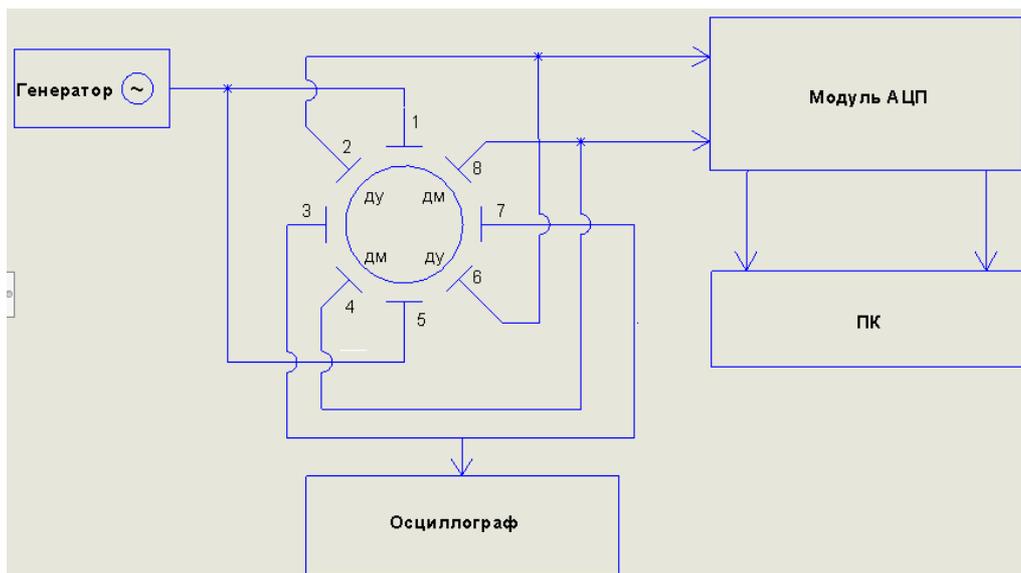


Рис. 3. Схема включения ВТГ с цилиндрическим резонатором

Для возбуждения второй формы колебаний чувствительного элемента гироскопа с помощью генератора формируется гармонический сигнал с частотой около 5859 Гц (резонансная частота), напряжением 2,98 В и подается на пьезоэлементы 1 – 5. Как показали многократные запуски гироскопа, резонансная частота рабочей формы колебаний $n=2$ исследуе-

мого датчика может находиться в пределах 5858÷5862 Гц, в зависимости от температуры внешней среды. С течением времени работы датчика происходит нагрев пьезоэлементов, что также способствует уходу резонансной частоты.

Пьезоэлементы 3 – 7 используются для получения выходного сигнала, который применяется для коррекции входного сигнала по амплитуде и для контроля изменения резонансной частоты с помощью осциллографа.

В виду того, что измерения проводятся в течение интервала времени не превышающего 1 мин с момента холодного запуска, за данный промежуток времени резонансная частота не изменяет своего значения.

Сигналы, снимаемые с пьезоэлементов 2 – 6 и 4 – 8 используются как информационные. Регистрация этих сигналов осуществлялась с помощью двухканальной звуковой карты с высокой чувствительностью, частотой дискретизации 192 кГц. Согласно техническим характеристикам данной звуковой карты, амплитуда входных сигналов не должна превышать значения 1 В. Чтобы не превышать это значение и ликвидировать искажения выходных сигналов, линии каналов 2 – 6 и 4 – 8 подтянуты к земле с помощью резисторов номиналом 7,5 кОм.

Полученные первичные сигналы с датчика отправлялись для дальнейшей обработки в Matlab.

3. Обработка сигналов ВТГ

Обрабатывается сигнал, соответствующий повороту стенда на определенную градусную меру, в эксперименте осуществлялся поворот с нулевого положения на 20° , при этом угловая скорость Ω не превышала $2^\circ/\text{с}$. Первые 10 с, стенд с ВТГ находился в состоянии покоя.

В работе [5] показано, что сигнал, регистрируемый на паре пьезоэлементов 2-6, имеет вид:

$$U_{2-6}(t) = A_c(t)\cos(\psi(t)) + A_s(t)\sin(\psi(t)), \quad (1)$$

где $A_c(t)$ - амплитуда кориолисовой составляющей, пропорциональна угловой скорости вращения (кориолисовая составляющая);

ψ – фаза сигнала.

Слагаемое $A_s(t)\sin(\psi(t))$ - это паразитная квадратурная составляющая, связанная с неидеальностью резонатора. Если имеется две реализации U_{2-6} и фаза сигнала ψ , параметры A_c и A_s можно найти с помощью аппроксимации методом наименьших квадратов.

Обработка сигналов осуществляется в следующей последовательности:

1) Восстановление начальной фазы первичных сигналов ψ .

В связи с тем, что возбуждающий сигнал ВТГ формируется с помощью генератора, начальная фаза сигнала синусоидальной формы ψ не известна. Сигналы с пьезоэлементов 2-6 и 4-8 можно представить в виде:

$$U_{2-6} = U_1 \cos \psi, \quad U_{4-8} = U_2 \sin(\psi + \psi_0). \quad (2)$$

где ψ_0 – дополнительный сдвиг фазы между квадратурными сигналами.

Для восстановления начальной фазы ψ используется алгоритм [6], разработанный для лазерного гироскопа, который также подходит для ВТГ. Данный алгоритм включает следующие стадии:

- дискретизация участка двух квадратурных сигналов с представлением полученных результатов на плоскости переменных U_{2-6} и U_{4-8} ;
- аппроксимация множества точек, соответствующего оцифрованному участку реализации, кривой второго порядка – эллипсом;
- определение параметров сигналов U_1 , U_2 и ψ_0 ;
- восстановление временного ряда ψ , для выбранного участка сигналов U_{2-6} и U_{4-8} .

Количество отсчетов N сигналов U_{2-6} и U_{4-8} должно быть таким, чтобы на плоскости переменных U_{2-6} и U_{4-8} , они образовывали замкнутый эллипс. При частоте дискретизации 192 кГц, $N = 10000$.

2) Вычисление амплитуд квадратурной и кориолисовой составляющих.

При вычислениях искомых значений амплитуд составляющих гармонического сигнала U_{2-6} по отношению к начальной фазе ψ сигнала возбуждения нужно аппроксимировать его как сумму косинусоиды и синусоиды со значениями амплитуд A_s и A_c .

Значениями амплитуд A_s и A_c определяются методом наименьших квадратов [5]:

$$\sum_{i=1}^{N-1} [U_{2-6,i} - (A_s \cdot \sin(\psi_i) + A_c \cdot \cos(\psi_i))]^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

где N – количество цифровых отсчетов $U_{2-6,i}$ сигнала U_{2-6} ;

$U_{2-6,i}$ - оцифрованные отсчеты входного гармонического сигнала;

A_s и A_c – амплитуды синусоиды и косинусоиды составляющей входного гармонического сигнала;

ψ_i – текущая фаза сигнала возбуждения.

Количество цифровых отсчетов N было выбрано таким же, как на стадии 1.

Решая систему уравнений (3), находим значения амплитуд A_s и A_c .

В результате был получен массив амплитуд $A_{c,k}$. Интервал времени τ между соседними отсчетами $A_{c,k}$ равен 0,052 с.

В первом приближении отсчеты угловой скорости Ω и амплитуды $A_{c,k}$ связаны соотношением [5]:

$$\Omega = A_c \cdot K, \quad (4)$$

где K – коэффициент прецессии Брайана, который определяется для каждого датчика эмпирически.

Поскольку известно, что поворот стенда с ВТГ производился на 20° , то используя формулу численного интегрирования, получаем следующее уравнение:

$$\sum_{i=1}^N \Omega \cdot \tau = \sum_{i=1}^N K \cdot A_c \cdot \tau = 20. \quad (5)$$

Решая уравнение (5), находим, что $K=0,0059$ °/с.

Результат умножения сигнала в кодах АЦП на коэффициент прецессии изображен на рисунке 4.

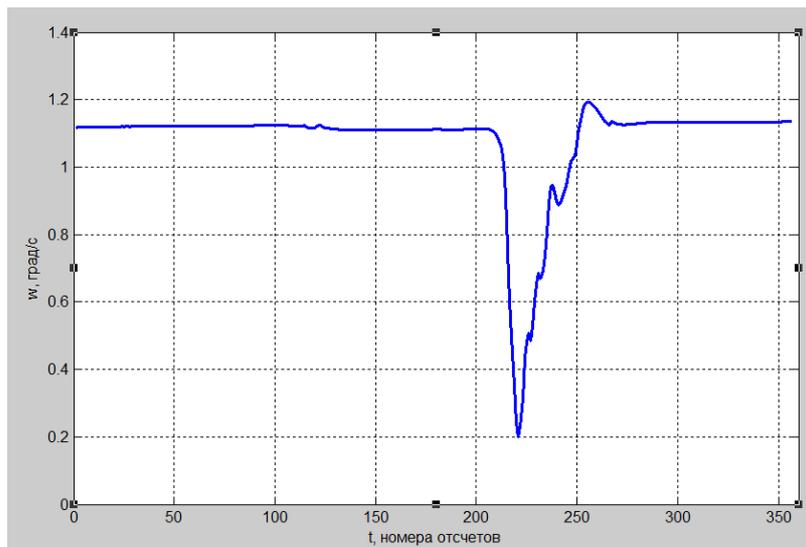


Рис. 4. Зависимость угловой скорости от времени

Отличный от нуля уровень угловой скорости на графике, обусловлен систематической ошибкой. Поскольку вращение происходило механическим воздействием руки лаборанта на поворотный диск, на рисунке 4 видны неравномерности изменения угловой скорости.

4. Исследование шумовой составляющей

Для исследования шумовой составляющей сигналов гироскопа производится запись длительной реализации в начальном неподвижном положении. Поскольку, по истечении 1 мин работы ВТГ наблюдается изменение резонансной частоты и отсутствует система подстройки, была записана 60-ти секундная реализация.

Применяя алгоритм п. 1 – 4 раздела 3, восстанавливается начальная фаза первичных сигналов ψ , далее вычисляется кориолисовая составляющая сигнала.

Для выявления шумовой составляющей необходимо выполнить вычитание из кориолисовой составляющей систематической ошибки. Результат этого действия отображен на рисунке 5.

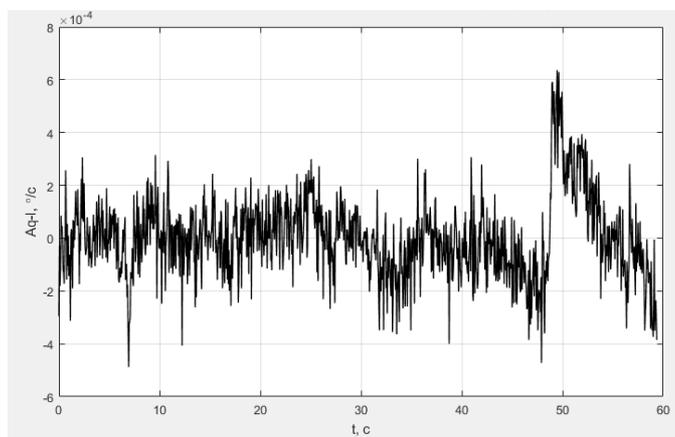


Рис. 5. Вычитание из кориолисовой составляющей аппроксимирующей функции

Таким образом, в данной работе разработан алгоритм восстановления угловой скорости по двум сигналам волнового твердотельного гироскопа. Разработанный метод, позволяет восстанавливать короткие реализации сигналов длительностью до 60 с. Для проведения дли-

тельных измерений (более 1 мин), требуется разработка и использование автоматизированной системы подстройки частоты возбуждающего сигнала.

Библиографический список

1. Bryan, G.H., On the Beats in the Vibrations of a Revolving Cylinder or Bell, Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1892, vol VII.
2. Лунин Б.С., Матвеев В.А., Басараб М.А. Волновой твердотельный гироскоп. Теория и технология / монография. М.: Радиотехника, 2014. – 176 с.
3. Басараб М.А., Лунин Б.С., Матвеев В.А., Фомичев А.В. Миниатюрные волновые твердотельные гироскопы для малых космических аппаратов // Электрон. Журн. 2014. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Приборостроение”. №4
4. Гурьевич А.А., Ермаков В.С., Гузачев И.В., Струк В.К., Серeda Ю.А., Максимов А.Г., Волчихин И.А. Твердотельный волновой гироскоп // Патент RU №2544870, МПК G01C 19/56 заявлено 21.05.2013, Опубликовано 20.03.2015.
5. Распопов В.Я., Волчихин И.А., Волчихин А.И., Ладонкин А.В., Лихошерст В.В. Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором / Под ред. В.Я. Распопова. Тула: Издательство ТулГУ, 2018. – С. 137-139
6. Мишин В.Ю., Молчанов А.В., Чиркин М.В. Проблема цифровой обработки первичных квадратурных сигналов в лазерных гироскопах // Приборы. – 2013. - №2.

УДК 621.385.6; ГРНТИ 47.29.37

ЦИФРОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СВЧ ПРИБОРОВ

В. Пахомов, В. Рыбачек

*Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, rgrtu@rsreu.ru*

Аннотация. В данной работе, с помощью методов компьютерного моделирования, проведено проектирование электронно-оптических систем для СВЧ приборов. Рассмотрены различные варианты фокусировки магнитных полей. Освоены программы синтеза и анализа, методика сквозного расчёта ЭОС. Выполнено согласование магнитной фокусирующей системы с электронной пушкой. В режиме инжекции в коллекторе с рекуперацией так же подобраны формы отражателя, обеспечивающие отклонение пучка на тепловоспринимающую поверхность.

Ключевые слова: катод, электронно-оптическая система, коллектор, первеанс, электрод.

DIGITAL DESIGN OF ELECTRON-OPTICAL SYSTEM OF A LOW NOISE TWT

V. Pahomov, V. Rybachek

*Ryazan State Radio Engineering University,
Russia, Ryazan, rgrtu@rsreu.ru*

Abstract. In this work, using the methods of computer model, provide design of electron-optical systems for microwave devices. Various embodiments Focus Magnit Pole. Programs of synthesis and analysis, methods of squash calculation of EOS are mastered. Made by SOLAS magnet to focus the system's attention with electronic push. In the mode of injection into the collector with the cooperation, the reflector forms are also selected, providing a deviation put on the heat-sensitive surface.

Keywords: Cathode, an electron-optic system, manifold, peruvian, electrode.

1. Введение

В электронных приборах, специально предназначенных для использования в диапазоне СВЧ, устранение влияния реактивностей достигается тем, что сам прибор составляет единое целое с колебательной системой. В связи с этим при рассмотрении принципа действия и характеристик прибора приходится учитывать и свойства колебательной системы, а также

влияние нагрузки, связанной с ней. Конечное время пролета электронов в междуэлектродном пространстве, значительно превышающее период сверхвысокочастотных колебаний, в электронных приборах диапазона СВЧ используется для формирования, модулированного по плотности электронного потока и взаимодействия сформированного потока с высокочастотным полем. [1].

Одной из важнейших составных частей данных приборов является интенсивный электронный поток, который в процессе взаимодействия с электромагнитным полем превращает энергию источников питания в энергию высокочастотных колебаний.

Формирование электронного потока осуществляется в электронно-оптической системе (ЭОС), элементами которой являются электронная пушка, магнитная фокусирующая система для фокусировки электронного потока в каналах электродинамической системы (области дрейфа) и коллектор для сбора электронов отработанного потока.

В настоящее время разработка СВЧ приборов основывается на применении цифровых технологий на базе специализированных компьютерных программ [2]. Цель данной работы заключалась в проведении цифрового моделирования ЭОС.

2. Методика расчета ЭОС

Проектирование ЭОС базируется на использовании методов синтеза и анализа.

В методе синтеза по заданным параметрам пучка определяется теоретическая форма фокусирующих электродов. Метод синтеза включает в себя решение двух задач: внутренней и внешней [3]. Внутренняя задача синтеза заключается в нахождении распределения потенциала внутри пучка по заданным траекториям и магнитному полю. Внешняя задача заключается в нахождении формы электродов и их потенциалов, при котором внутри пучка распределение потенциала будет соответствовать найденному при решении внутренней задачи.

Для решения внутренней и внешней задач используется криволинейная система координат, в которой записываются параксиальные уравнения пучка применительно к ортогональной сетке q_1, q_2 .

Если в качестве базовой линии $R(z)$ взята граница пучка, то параксиальное уравнение, описывающее его движение, с использованием нормированных переменных имеет вид [3]:

$$\bar{R}^2 \frac{d^2 u}{d q_1^2} + 2\bar{R} \frac{d\bar{R}}{d q_1} \frac{du}{d q_1} + 4u\bar{R} \frac{d^2 \bar{R}}{d q_1^2} + \gamma_n^2 \frac{\bar{R}^4 \bar{B}^2 - \bar{R}_k^4 \bar{B}_k^2}{\bar{R}^2} = \frac{i}{\sqrt{u}}, \quad (1)$$

где $\bar{R} = R/R_n$, $u = U/U_0$, $\bar{q}_1 = q_1/l_n$, $\bar{B} = B/B_n$ - нормированные переменные;

R_n, U_n, l_n, B_n - нормирующие множители;

U - потенциал на оси пучка ($q_2=0$);

B - магнитное поле на оси пучка;

B_k - магнитное поле на катоде;

$R_k=R(0)=l$ - значение функции на катоде;

$\gamma_n = 0,297 \bar{B} q_1 / \sqrt{u}$.

Осевое распределение потенциала $u(z)$ в (1) можно задать с помощью аппроксимирующего выражения. В результате решения внутренней задачи находится функция $R(z)$, описывающая форму электронного пучка при заданном распределении потенциала. Распределение магнитного поля сопровождения для частично экранированной пушки рассчитывается из условия получения равновесного не пульсирующего пучка с известной огибающей.

Решение внешней задачи также производится в криволинейной системе координат. Потенциал вне пучка рассчитывается по приближенной формуле [3]:

$$\bar{U} = u + \mu^2 q_2^2 \left(u \bar{R} \frac{d^2 R}{dq_1^2} + \frac{\gamma^2 \bar{R}^4 \bar{B}^2 - \bar{R}_k^4 \bar{B}_k^2}{4 \bar{R}^2} \right) + \frac{\mu^2 i}{4\sqrt{u}} (1 - q_2^2 + \ln q_2^2). \quad (2)$$

Полагая в (2) $\bar{U} = const$, можно определить форму соответствующей эквипотенциальной линии в криволинейных координатах. Для фокусирующего электрода $\bar{U} = 0$, для анода $\bar{U} = 1$.

Сложные формы электродов, полученные методом синтеза, заменяются более простыми технологичными для использования в программе анализа.

В основу математической модели программ анализа положена система уравнений, описывающая стационарный многоскоростной неламинарный электронный поток в совместно действующих электрическом и магнитном полях [3]:

$$\Delta^2 \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad \text{- уравнение Пуассона;} \quad (3)$$

$$\vec{v} = \frac{d\vec{S}}{dt}, \quad \frac{d\vec{v}}{dt} = -\eta(\vec{E} + [\vec{v} \times \vec{B}]) \quad \text{- уравнение движения электрона;} \quad (4)$$

$$\vec{E} = -grad\varphi \quad \text{- уравнение для напряженности электрического поля;} \quad (5)$$

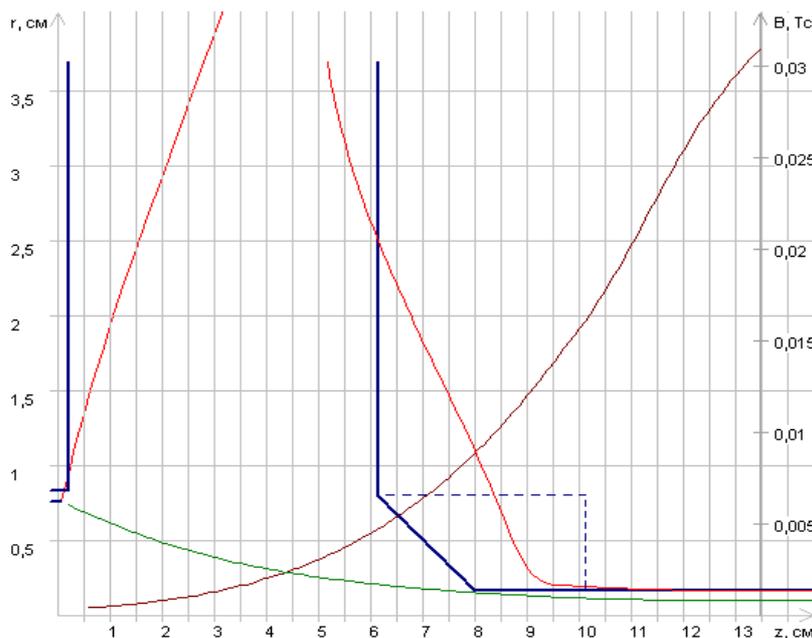
$$div\vec{j} = 0 \quad \text{- уравнение непрерывности плотности тока.} \quad (6)$$

Здесь \vec{E} - вектор напряженности электрического поля, φ - скалярный электрический потенциал, \vec{S} и \vec{v} - векторы, определяющие положение и скорость частицы, \vec{B} - вектор магнитной индукции, \vec{j} - вектор плотности тока, ρ - плотность пространственного заряда.

Решение уравнений (3) - (6) ищется в замкнутой области, ограниченной системой электродов и поверхностями, на которых задаются значения потенциала или определенные граничные условия. Для решения системы (3-6) строится итерационный процесс, при котором поочередно повторяются решение уравнения Пуассона и уравнений движения и вычисление пространственного заряда, пока процесс не сойдется с требуемой точностью.

3. Моделирование ЭОС

На первом этапе был проведен расчет электронной пушки методом синтеза на заданные параметры: первеанс пучка $-0,04 \cdot 10^{-6}$ А/В^{3/2}, диаметр пучка $-0,2$ мм и ускоряющее напряжение $17,5$ кВ. Этих данных достаточно для проведения синтеза электронной пушки [4]. Результаты приведены на рисунке 1. Там же показана более технологичная форма электродов пушки, которая в дальнейшем оптимизировалась по программе анализа с целью получения заданных параметров пучка. Для предотвращения оседания электронов на аноде отверстие было сделано двухступенчатым. Начальный радиус отверстия равен $0,6$ мм, а конечный на входе в канал $-0,2$ мм.



$$P_m=0,042 \cdot 10^{-6} \text{ A/B}^{3/2} \quad U_0=17,5 \text{ кВ} \quad R_0=0,1 \quad k_{\text{э}}=0,6 \quad A_K=-2 \quad N_F=1,5$$

Рис. 1. Геометрия электронной пушки по программе «Синтез»

Проведенные исследования показали, что в слаботочных ЭОС собственное кулоновское поле пучка играет менее заметную роль, а влияние внешнего электрического поля на параметры и условия формирования электронного потока становится преобладающим. Ограничение поперечного размера расчетной области с обрезкой электродов для экономии узлов разностной сетки является недопустимым. Далее по программе анализа [5] подобрано оптимальное расположение и потенциал фокусирующего электрода, положение анода, обеспечивающих формирование ламинарного электронного потока с требуемым первеансом $0,042 \cdot 10^{-6}$ и коэффициентом заполнения пролетного канала – 0,6 (рис. 2, а).

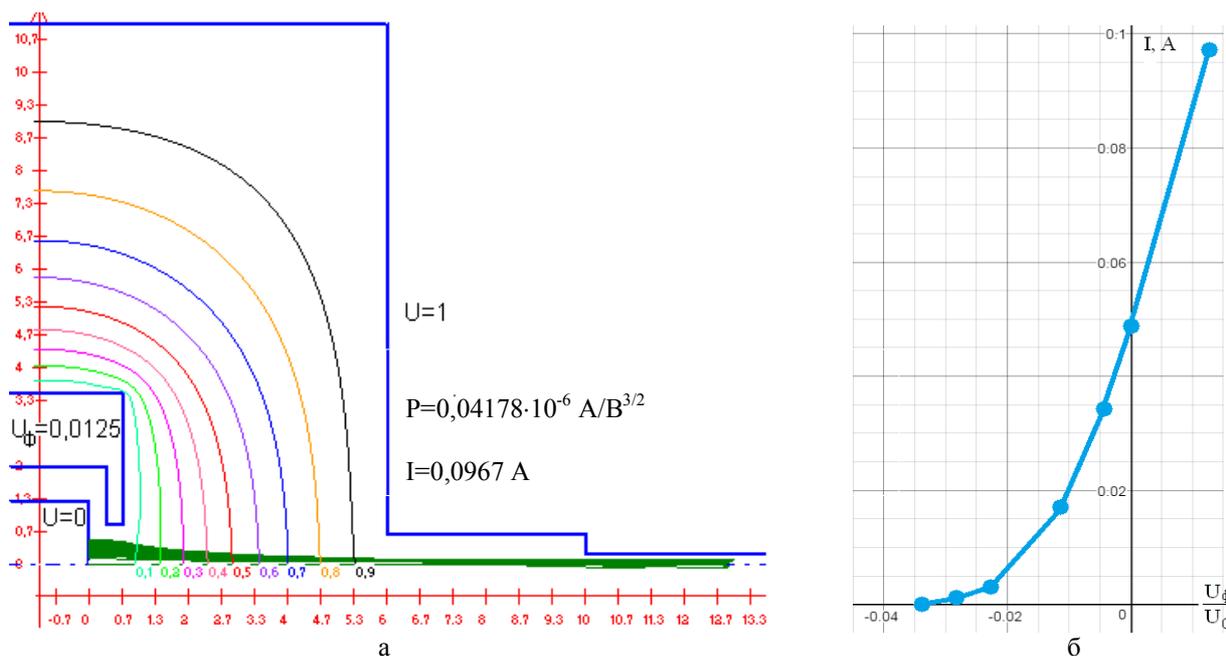


Рис. 2. Расчет пушки по программе «Анализ»: а – результаты траекторного анализа; б – запирающая характеристика пушки

Для определения величины запирающего напряжения постепенно уменьшался потенциал на фокусирующем электроде. На рисунке 2,б приведена зависимость тока пучка от напряжения на фокусирующем электроде. Величина запирающего напряжения, при котором ток пучка практически равен 0, составила 620 В.

Следующий этап заключался в согласовании магнитной фокусирующей системы (МФС) с пушкой с целью подбора оптимальных условий входа электронного пучка в пролетный канал с коэффициентом заполнения 0,5 (рис. 3). Для этого кривая распределения магнитной индукции B_z последовательно сдвигалась вдоль оси Z . МФС на основе постоянных магнитов создавала периодическое магнитное поле, которое нарастает в области анодного отверстия. На катоде величина магнитной индукции составляла 1 Гс.

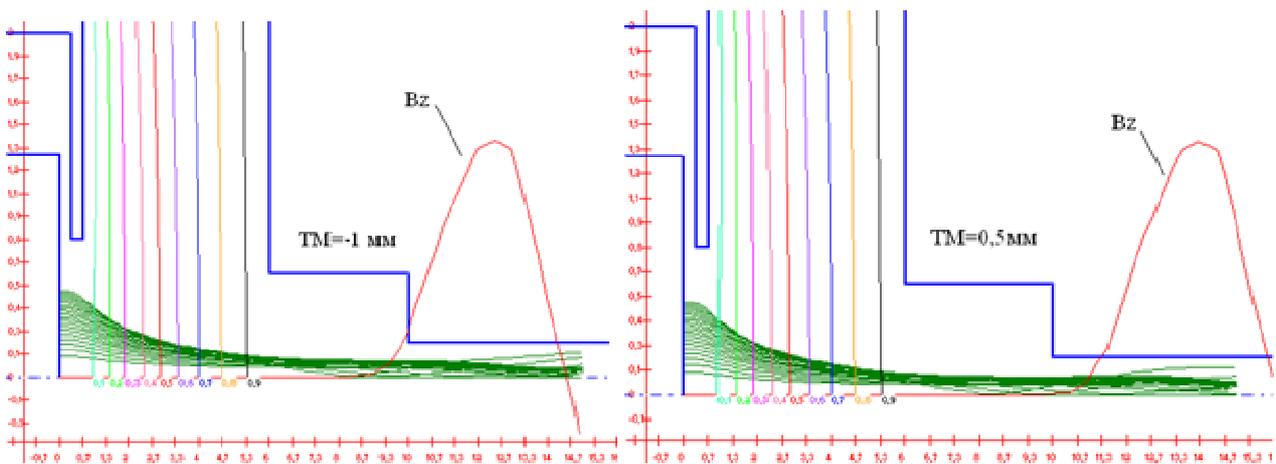


Рис. 3. Определение оптимального распределения магнитного поля

Сквозной расчет пучка в длинном пролетном канале проводился в режиме инъекции с плоскости кроссовера ($z=13$ мм). Пучок вступал в канал с автоматическим заданием начальной закрутки электронов по азимуту магнитным полем величиной $B_z=1300$ Гс. В соответствии с законом сохранения продольная составляющая скорости уменьшалась с учетом азимутальной составляющей. В результате были подобраны амплитуда и период магнитного поля, при которых обеспечивалось 100% токопрохождение пучка с минимальной амплитудой пульсаций (рис. 4).

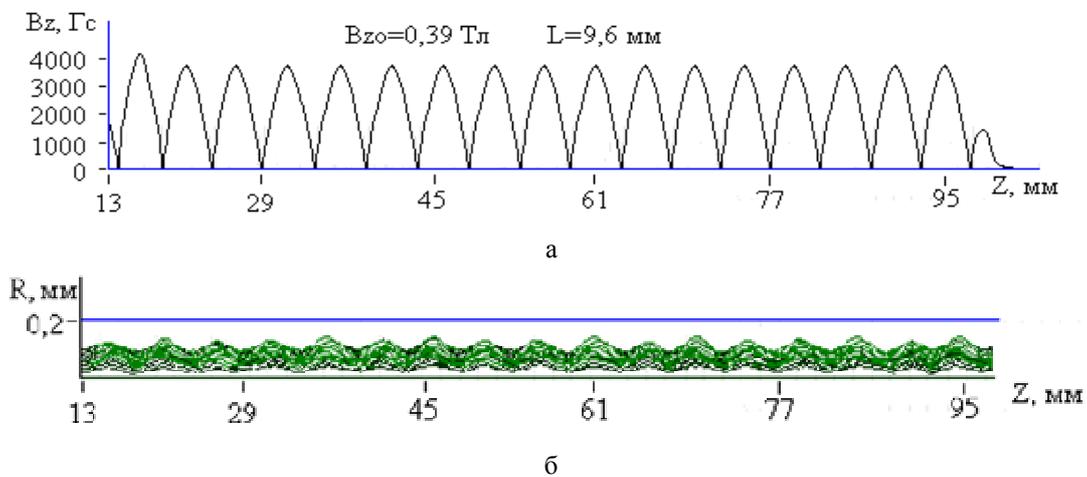


Рис. 4. Расчет пучка в пролетном канале:
а – распределение магнитного поля; б – траектории электронов

Для повышения к.п.д. в коллекторе прибора использовался режим рекуперации. Коллектор имел двухсекционную конструкцию (рис. 5). Первая секция находилась под потенциалом анода ($U/U_0=1$). На вторую секцию в виде рассеивателя конусной формы подавался пониженный потенциал, обеспечивающий торможение и отклонение электронов на большую по площади боковую тепловоспринимающую поверхность.

Траекторный анализ проводился в режиме инжекции пучка в область коллектора с параллельным вступом. При экранировке коллектора амплитуда остаточного магнитного поля в его начальной части составляла 780 Гс. Далее магнитное поле резко спадало до 0.

На рисунке 5 приведены результаты расчета траекторий электронного потока при потенциале на рассеивателе равном $U/U_0=0,5$. Глубина рекуперации составляла 50%. Видно, что значительная часть потока отклоняется и оседает на боковой поверхности коллектора уменьшая тем самым тепловую нагрузку.

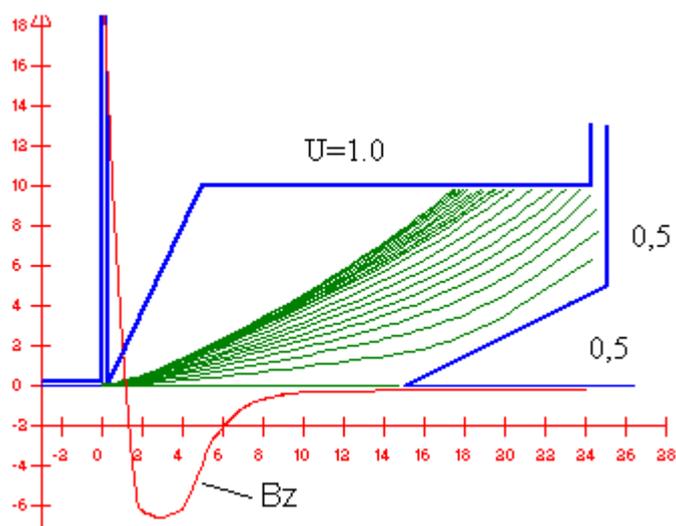


Рис. 5. Расчет траекторий пучка в коллекторе

Выводы

Методами компьютерного моделирования по программам синтеза и анализа подобрана конфигурация и потенциалы электродов электронной пушки, формирующей низковольтный электронный поток с низким модулирующим напряжением.

Выполнено согласование периодической МФС с электронной пушкой, обеспечивающее оптимальное вхождение пучка в анодное отверстие пролетного канала с требуемым коэффициентом заполнения. Величина амплитуды магнитного поля и период обеспечивают 100% токопрохождение пучка через пролетный канал с коэффициентом заполнения 0,5.

Подобрана конструкция коллектора с глубиной рекуперации 50%, с рассеиванием остаточной энергии электронного потока на боковую поверхность и подавлением вторичной эмиссии.

Библиографический список

1. Ребров С.И., Сазонов В.П. Оценка перспектив развития различных направлений сверхвысокочастотной электроники. - Электронная техника. Электроника СВЧ, 1982, вып.12 (348), с.5-17.
2. Развитие теории и проектирования СВЧ электровакуумных приборов / В. Г. Бороденко, И. М. Блейвас, А. В. Галдецкий, И. И. Голеницкий и др.// Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника. 1995. Вып.1 (465). С.45-77.
3. Молоковский С.И., Сушков А.Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 360 с.

4. Рыбачек В.П. Проектирование электронных пушек методом синтеза // Материалы VII МНТК «Наука и образование XXI века»: Т. 2, Рязань: СТИ, 2012. С. 32-39.

5. Федяев В.К., Рыбачек В.П. Методика расчета многолучевых пушек // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ, вып. 2, 1982. С. 61-62.

УДК 007.51; ГРНТИ 50.41.25

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

М.А. Титов, О.А. Горлин

*Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, m.titov1996@mail.ru, gorlinoo@yandex.ru*

Аннотация. В статье рассматривается процесс разработки и исследования источника питания на основе солнечных элементов из монокристаллического кремния для модуля системы контроля зданий и сооружений. Произведен выбор электронной-компонентной базы. Проведены исследования электрических характеристик, которые показали пригодность данных солнечных элементов для создания модуля питания микроконтроллера ESP8266.

Ключевые слова: солнечные элементы, зарядное устройство, экспериментальная установка.

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A POWER SOURCE FOR MEASURING MODULE OF THE SYSTEM OF CONTROL FOR BUILDINGS AND STRUCTURES

M.A. Titov, O.A. Gorlin

*Ryazan State Radioengineering University,
Russia, Ryazan, m.titov1996@mail.ru, gorlinoo@yandex.ru*

Abstract. The article deals with a process of developing and researching a power source based on monocrystalline silicon solar cells for measuring module of the system of control for buildings and structures. Produced selection of electronic component base. Studies of the electrical characteristics that have so far proved the suitability of these solar cells for the creation of a microcontroller power module ESP8266.

Keywords: solar cells, charger, experimental setup.

В настоящее время солнечные элементы получают всё более широкое развитие в странах с продолжительным световым днём, в странах в которых остро встаёт вопрос экологии и экономии электроэнергии, а также на космических спутниках, требующих независимость от традиционных источников питания. Главным преимуществом солнечных элементов является их низкая стоимость, и использование там, где нет возможности в создании альтернативных источников.

Целью данной работы является исследование электрических параметров солнечных элементов и разработка на их основе альтернативного источника питания для измерительного модуля системы контроля зданий.

Для оценки целостности структуры зданий и сооружений, раннего обнаружения повреждений, а также периодической или постоянной передачи информации об их состоянии, разработан измерительный модуль системы контроля зданий и сооружений на основе микроконтроллера ESP8266, [1]. Модуль обладает следующими параметрами: напряжение питания 3.3 В, ток передатчика 27-60 мА, ток микроконтроллера ESP8266 50 мА и ток датчиков 150 мА. Также для хранения энергии используется NiMH аккумуляторная батарея T729. Параметры аккумулятора: напряжение 3.6 В, минимальный ток заряда 60-100 мА, емкость 600 мА/ч.

Выбранная разработчиками модуля аккумуляторная батарея способна обеспечить до двух часов непрерывной работы модуля системы контроля зданий и сооружений или около 8 часов в режиме ожидания, при выключенных акселерометрических датчиков.

Применение большого массива датчиков, устанавливаемых на строениях, исключает возможность применения проводных средств передачи информации и питания. Для обеспечения измерительных модулей максимальной автономностью был выбран источник питания, представляющий собой комбинацию из аккумулятора и солнечных элементов (СЭ) на основе поликристаллического кремния.

Изначально в качестве объектов исследования были выбраны солнечные элементы на основе монокристаллического кремния GM 55×55 GM 69×110 (рис. 1.), так как они удовлетворяют нашим параметрам и имеет низкую стоимость. Кроме того, их производительность в пасмурную и неясную погоду значительно выше, чем производительность поликристаллических солнечных панелей при аналогичных условиях. Этот факт является огромным преимуществом, делающим использование таких элементов на территории России приоритетным направлением, [2], [3].



Рис. 1. Солнечный элемент на основе монокристаллического кремния: а) GM 69×110 б) GM 55×55

Так как площадь двух элементов GM 55×55 соединённых параллельно соизмерима с площадью одной панели GM 69×110, было произведено сравнение выходных параметров двух конфигураций. Исследование электрических параметров были проведены на лабораторном стенде, описанном в работе, [4]. Все параметры были измерены при освещённости 10^5 лк на расстоянии 10 см от искусственного источника света.

Таблица 1. Сравнение характеристик солнечных элементов

Параметры	2шт. GM 55×55		GM 69×110	
	Измерено	Указано производителем	Измерено	Указано производителем
U, В	3.4	3.7	5.7	5
I, мА	80	120 (для 1 шт.)	157	240
P, мВт	272	360 (для 1 шт.)	895	1250

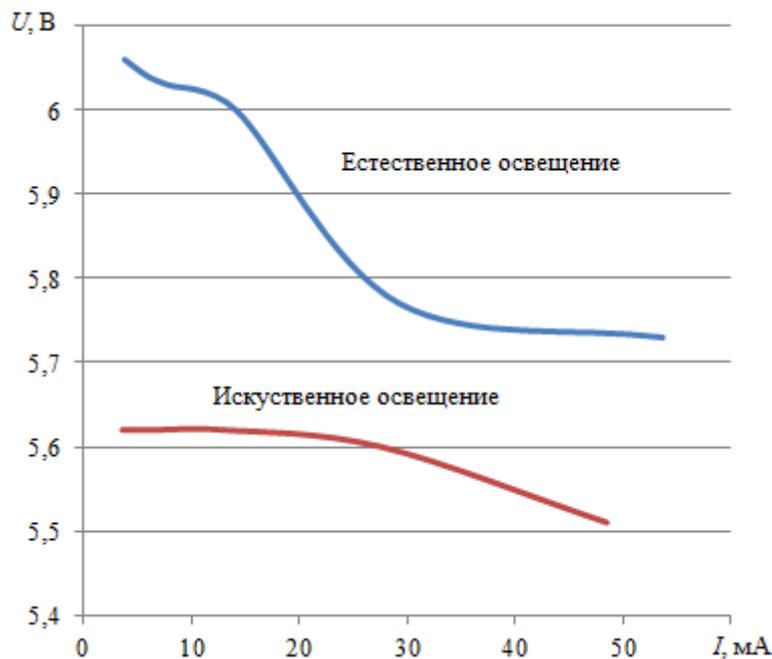


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика двух параллельно соединенных СЭ GM 69×100

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- не достижимость заявленного производителем тока для обеих конфигураций;
- при соизмеримых площадях конфигурация из двух GM 55×55 не может обеспечить напряжения требуемого для заряда аккумулятора;
- при длительном воздействии большого светового потока происходит разогрев солнечного элемента, в результате чего в четверть раза уменьшается напряжение от начальных значений.

Таким образом, в качестве оптимального варианта была выбрана конфигурация, состоящая из двух солнечных элементов GM 69×110. В ходе исследований были получены вольт-амперные характеристики солнечных элементов одного и двух параллельно соединенных, при искусственном и естественном освещении. Все измерения проводились согласно методикам, описанным в статье, [4]. Результаты, полученные при естественном и искусственном освещении, оказались сравнительно близки. Значения, приведенные на рисунке 2, показали достаточно хорошую стабильность напряжения от внешней нагрузки, поэтому полученные результаты показывают, что выбранный солнечный элемент, возможно, использовать для создания источника питания модуля системы контроля зданий, [4].

Из чего можно сделать вывод, что при минимальной и средней длительности светового для Москвы в 6 и 12 часов соответственно, конфигурации из двух солнечных элементов GM 69×110 будет достаточно для полной зарядки аккумулятора даже в пасмурный день.

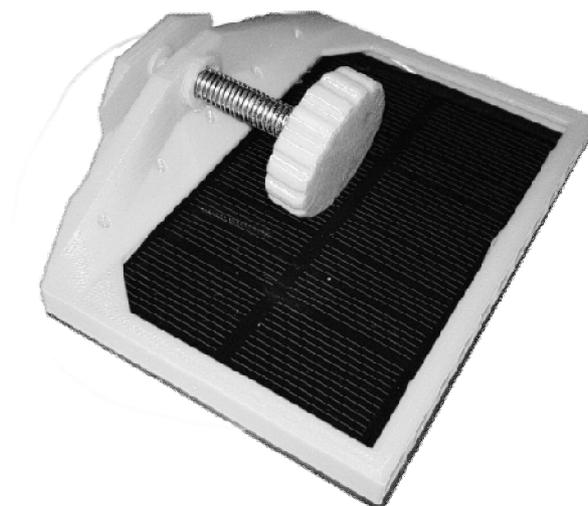


Рис. 3. Экспериментальная установка

Также была разработана экспериментальная установка для исследования влияния обледенения на выходные характеристики солнечных панелей. Установка представляет собой подвес, фиксируемый зажимным винтом. Внутри подвеса устанавливается СЭ. Подвес может быть вывешен на улице и закреплен за карниз. Фотография установки представлена на рисунке 3.

После ряда экспериментов было установлено следующее. Пассивная борьба с налипшим снегом возможна только при установке солнечных элементов в вертикальное положение. При горизонтальном и вертикальном положении количество налипшего снега, и образовавшегося впоследствии льда, лишает доступа света к панелям.

Дальнейшей задачей будет являться разработка системы управления зарядом-разрядом для выбранной батареи. Поскольку NiMH аккумуляторы очень чувствительны к перезаряду, необходимо обеспечить отключение зарядного устройства от батареи в момент достижения последней максимальной емкости. Также необходимо обеспечить стабильные 3.6 В заряда для продления её срока службы.

Библиографический список

1. Daniele Zonta, Huayong Wu, Matteo Pozzi, Paolo Zanon, Matteo Ceriotti, Luca Mottola, Gian Pietro Picco, Amy L. Murphy, Stefan Guna, Michele Corrà, Wireless sensor networks for permanent health monitoring of historic buildings, Smart Structures and Systems, Vol. 6, No. 5-6, 2010, 595-618p.
2. Юрченко А.В. Влияние суточной и годовой динамики освещенности на эффективности работы светотехнических устройств с питанием от солнечных элементов. Тезисы докладов IV Международной светотехнической конференции. Вологда. 2000 г. С.110.
3. Юрченко А.В., Минов А.Л. Юрченко В.И. Автономная малогабаритная станция приготовления питьевой воды с солнечной батареей. Труды международной научно-технической конференции «Техника и технология очистки и контроля качества воды». Томск. Политехнический университет. 1999. С.164.
4. Титов М.А. Разработка альтернативных источников питания для измерительного модуля системы контроля зданий и сооружений на основе солнечных элементов. Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2018 Сборник трудов том 2 – РГРТУ – г. Рязань. – 2018. – с.41-44;

УДК 621.314.58; ГРНТИ 50.41.25

МНОГОСТУПЕНЧАТЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА В СВЕТОДИОДНОЙ СВЕТОТЕХНИКЕ: ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И СВЕТОТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ СТАНДАРТОВ

Н.А. Титов

Рязанский государственный радиотехнический университет

Россия, Рязань, titov.nikolai2011@yandex.ru

Аннотация. В данной работе рассмотрен принцип работы многоступенчатого преобразователя, приведены методы снижения пульсации тока светодиодов

Ключевые слова: светодиод, многоступенчатый преобразователь пульсации светового потока.

MULTISTAGE LINEAR CURRENT SOURCES IN LED LIGHTING ENGINEERING: PROBLEMS OF PROVIDING ELECTRICAL AND LIGHTING REQUIREMENTS OF STANDARDS

N.A. Titov

Ryazan State Radioengineering University

Russia, Ryazan, titov.nikolai2011@yandex.ru

Annotation. This paper describes the principle of operation of a multistage converter, methods for reducing the ripple current of LEDs.

Keywords: LED, multistage converter, ripple of light flux.

1. Введение

Благодаря простоте и надежности линейные безтрансформаторные источники питания (ЛИП) широко применялись в течении десятилетий для устройств малой и средней мощности (рис. 1). В их состав входят всего лишь несколько элементов: выпрямитель, сглаживающий фильтр на основе конденсатора и полупроводниковый стабилизатор (стабилитрон с мощным транзистором или аналогичный по функции одиночный силовой полупроводниковый элемент) [1].

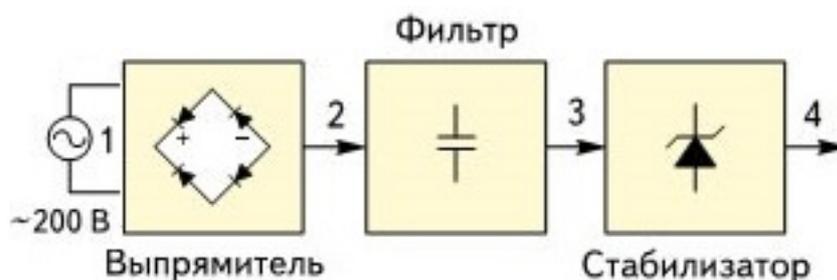


Рис. 1. Структура линейных источников питания

В настоящее время подобные ИП не могут использоваться в осветительных приборах ввиду низких значений коэффициента мощности (менее 0,6).

В 60-х годах XX века были разработаны первые импульсные источники питания (ИИП), которые интенсивно развивались в течение последних десятков лет и сегодня почти полностью вытеснили линейные источники питания практически во всех областях техники. Если ЛИП были весьма простыми и даже примитивными устройствами, то, в отличие от них, ИИП являются значительно более сложными устройствами, работающими на высокой частоте и состоящими из сотен активных и пассивных элементов (рис. 2) [1]. Данный класс источников питания позволяет получить высокие показатели по коэффициенту мощности и гармоническому составу потребляемого тока, а также обеспечить достаточно высокую эффективность

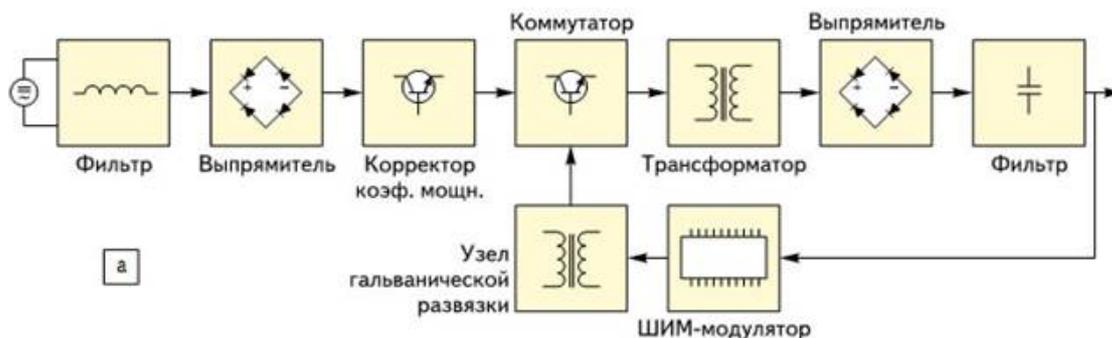


Рис. 2. Структура импульсных источников питания

Применение импульсных ИП в маломощных схемах осветительных устройств, в ряде случаев является нерентабельным ввиду высокой стоимости компонентов фильтров для обеспечения требований по электромагнитной совместимости (ЭМС). Кроме того, на небольших мощностях ИИП обладают невысокой эффективностью.

Массовое развитие светодиодной светотехники требует от разработчиков искать пути снижения стоимости компонентов систем электропитания светодиодов при необходимости удовлетворения растущим требованиям соответствующих стандартов, особенно в части обеспечения ЭМС и пульсаций светового потока.

При построении источников света мощностью до нескольких десятков ватт перспективным направлением является использование так называемых секвентальных преобразователей сетевого напряжения в стабилизированный ток. В отличие от импульсных преобразователей, данный класс источников питания не создает электромагнитных и радиопомех, отпадает необходимость в применении дорогостоящих и громоздких входных фильтров. Применение многоступенчатой схемотехники (2 и более ступеней) позволяет решить проблему с коэффициентом мощности и гармоническим составом потребляемого тока. Оптимизация напряжения нагрузки относительно входного напряжения обеспечивает КПД свыше 90%, что превосходит показатели маломощных импульсных источников питания.

Основной проблемой многоступенчатых секвентальных преобразователей является 100% пульсация тока через светодиоды, соответственно и светового потока. Существующее законодательное ограничение пульсаций светового потока ниже 10% делают невозможным их использование в классическом виде [3].

2. Принцип работы секвентального преобразователя

Рассмотрим подробнее принцип работы схемы секвентального преобразователя с тремя ступенями (рис. 3).

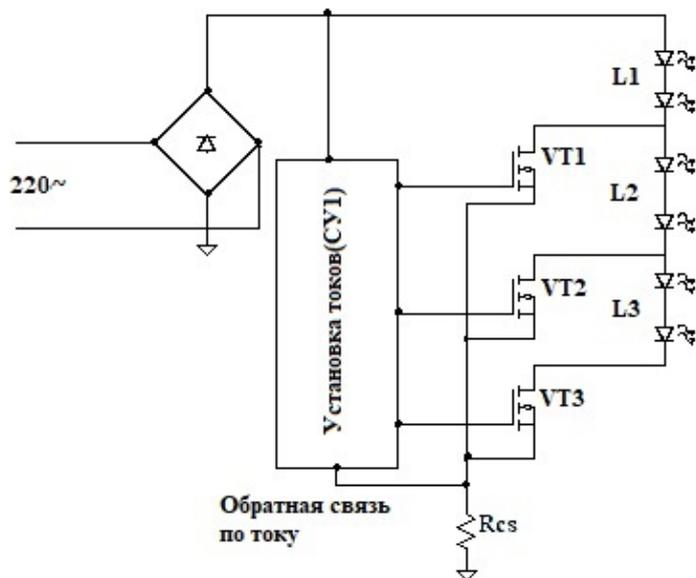


Рис. 3. Принципиальная схема трехступенчатого секвентального преобразователя

Когда выпрямленное напряжение нарастает и достигает величины прямого падения напряжения светодиодов цепи L1, система управления (СУ) подает сигнал открытия транзистора VT1, ток, протекающий через цепочку L1, задается напряжением на затворе транзистора и резистором обратной связи Rcs, таким образом поддерживая постоянный ток по мере увеличения напряжения. Когда напряжение достигло суммы напряжений цепочек L1 и L2, открывается транзистор VT2, при этом VT1 закрывается, ток протекает через первую и вторую ступень, его величина устанавливается через резистор Rcs. Аналогично при достижении напряжением суммы напряжений трех цепочек, открывается VT3, VT2 и VT1 закрываются, ток течет через L3 до тех пор, пока выпрямленное напряжение не уменьшится ниже суммы напряжений на L1-L3. Далее VT3 закрывается, ток течет через L1, L2 и процесс продолжается в обратном порядке. С учетом выбора суммы падений напряжений на ступенях, КПД такого преобразователя может достигать величины более 90%. На рисунке 4 представлена форма тока, потребляемого от первичной сети сети.

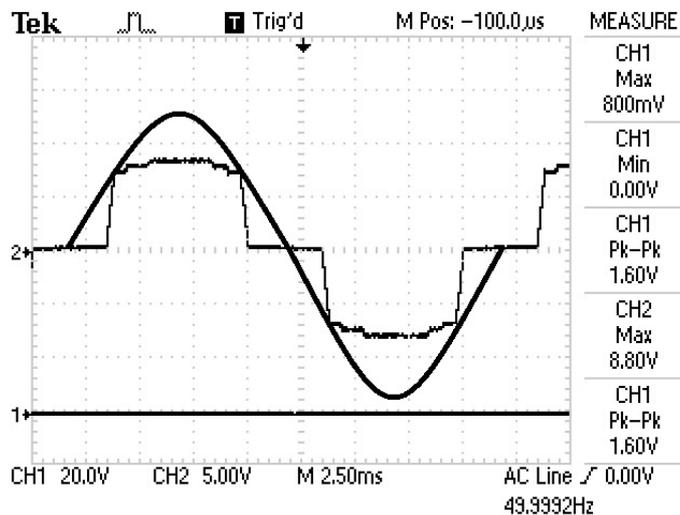


Рис. 4. Ток потребления от первичной сети

Форма тока через светодиоды приведена на рисунке 5.

Как видно из рисунка 4, форма тока близка к форме сетевого напряжения, угол отсечки не превышает 30°, что обеспечивает коэффициент гармоник ниже 20%, а коэффициент мощности более 0,9.

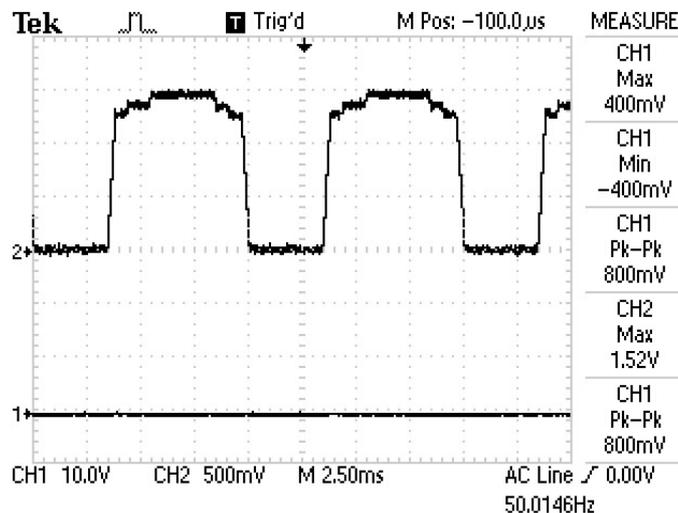


Рис. 5. Ток через светодиоды

Коэффициент пульсации светового потока светодиод рассчитывается по следующей формуле:

$$Кпф = (\Phi_{\max} - \Phi_{\min}) / (2 * \Phi_{\text{ср}}) * 100\%.$$

Световой поток линейно зависит от тока (рис. 6.):

$$\Phi = \epsilon * I,$$

где $\epsilon = \Phi / I$ – коэффициент зависимости светового потока от прямого тока.

Следовательно, коэффициент пульсации тока:

$$Кпт = \epsilon * (I_{\max} - I_{\min}) / (2 * I_{\text{ср}}) * 100\%. \tag{1}$$

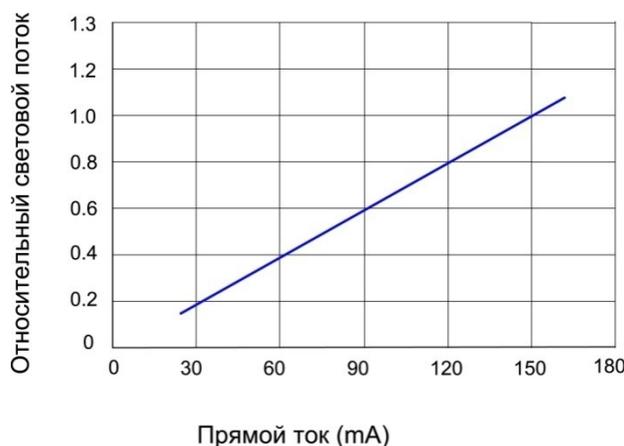


Рис. 6. Зависимость светового потока от прямого тока

Исходя из формулы (1) и формы тока на рисунке 5 получаем значение коэффициента пульсации 100%, что не удовлетворяет требованиям стандартов.

3. Методы снижения пульсации тока светодиодов

Из анализа схемы (рис. 3), простейшим методом снижения пульсации тока через светодиоды является подключение параллельно каждой из цепочек конденсаторов соответствующей емкости, при этом для предотвращения токов разряда через внутреннее сопротивление источников тока необходимо развязать цепочки друг от друга. Это можно сделать с помощью обычных выпрямительных диодов.

Схема, реализующая данный принцип приведена на рисунке 7.

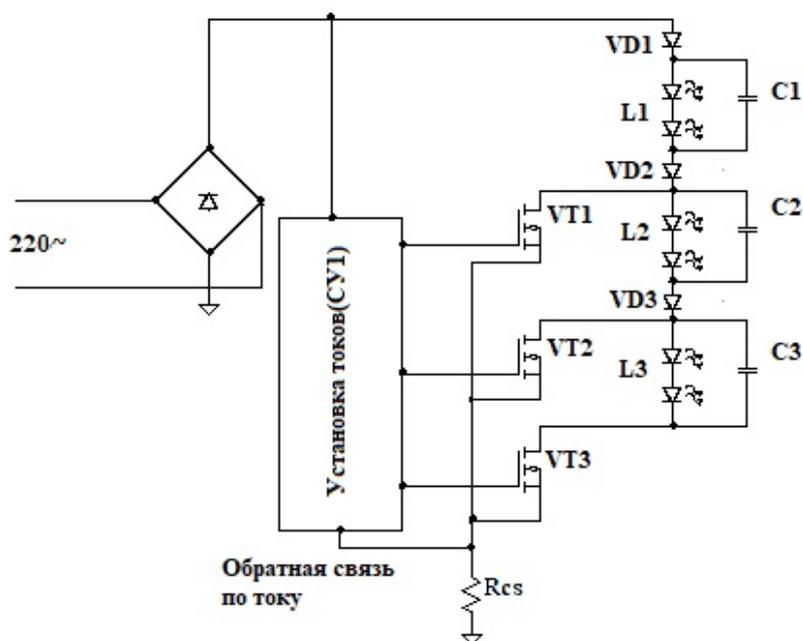


Рис. 7. Принципиальная схема секвентального преобразователя с тремя конденсаторами

При достижении прямого падения напряжения светодиодов цепи $L1$, на систему управления (СУ) подается сигнал открытия транзистора $VT1$, ток протекает через $VD1$, $L1$, $VD2$, а также через конденсатор $C1$, тем самым заряжая его до напряжения цепи $L1$. Аналогично заряжаются $C2$ и $C3$. После того как выпрямленное напряжение начинает уменьшаться, закрывается источник тока $VT3$, при этом ток в цепи $L3$ продолжает протекать, поскольку конденсатор $C3$ начинает разряжаться через светодиоды. Далее в обратном порядке отключаются $VT2$, $VT1$, а $C2$, $C1$ обеспечивают протекание тока через $L2$, $L1$.

Таким образом схема обеспечивает постоянное протекание тока через светодиоды в течении всего периода сетевого напряжения при соответствующем выборе номиналов конденсаторов.

Для достижения высокого КПД и снижения стоимости конденсаторов, количество светодиодов в цепочках $L1-L3$, можно выбрать различным, а также сделать различными токи каждой из ступеней преобразования. Например, если выбрать соотношении напряжений на светодиодах ступеней 3:1:1 и токов в соотношении 1:1:1, то напряжения на $C2-C3$ не будет превышать 50 В и можно использовать конденсаторы достаточно большой емкости, чтобы обеспечить относительно небольшой уровень пульсации.

Недостатком данной схемы является то, что конденсаторы заряжаются до пиковых значений напряжений на диодах. Следовательно, разряд конденсаторов начинается от номи-

нального тока вниз, что принципиально требует увеличение емкостей конденсаторов для обеспечения низкого уровня пульсации. Также недостатком является необходимость установки трех конденсаторов, что удорожает схему.

Другой метод снижения пульсации с использованием всего лишь одного конденсатора приведен на рисунке 8.

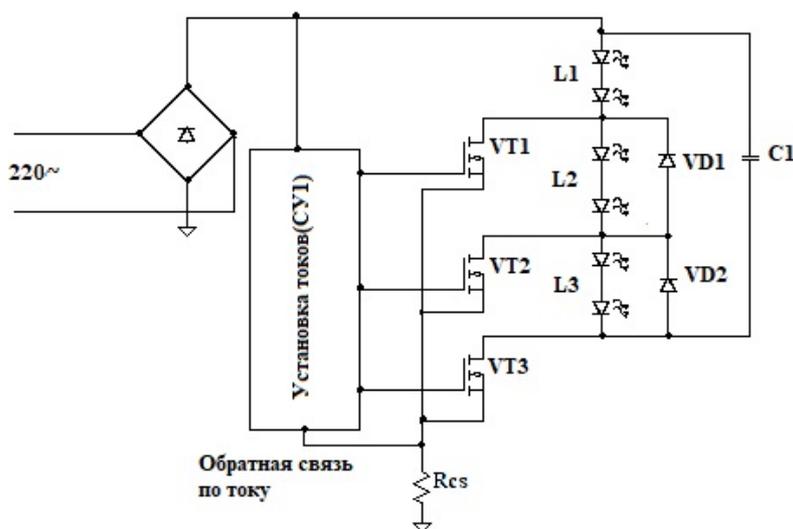


Рис. 8. Принципиальная схема секвентального преобразователя с одним конденсатором

На первом цикле ток течет через L1, VT1, также через C1 и прямо смещённые диоды VD1, VD2, таким образом обеспечивается протекание тока через светодиоды и зарядка конденсатора до напряжения первой ступени. На следующем цикле ток течет через две цепочки (L1 и L2), C1, VD2 и источник тока VT2, обеспечивая заряд конденсатора до суммы падений напряжений на L1 и L2. Далее ток протекает через три цепочки (L1, L2, L3), C1 и VT3. На Рис.9 приведены осциллограммы выпрямленного напряжения сети и падения напряжения на источнике тока VT3. При этом можно наблюдать интервал заряда конденсатора C1 до момента пикового значения напряжения сети (U^*). К моменту, когда выпрямленное напряжение начинает уменьшаться, конденсатор начинает разряжаться через цепочки светодиодов, поскольку он заряжен до суммы падений напряжений L1-L3. Таким образом обеспечивая непрерывность тока при спаде выпрямленного напряжения. Напряжение на конденсаторе и ток через светодиоды показаны на рисунке 10.

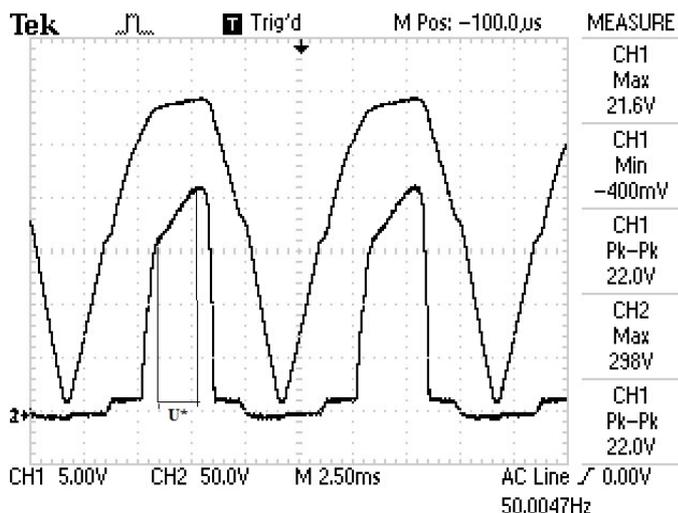


Рис. 9. Выпрямленное напряжение сети и падение напряжения на VT3

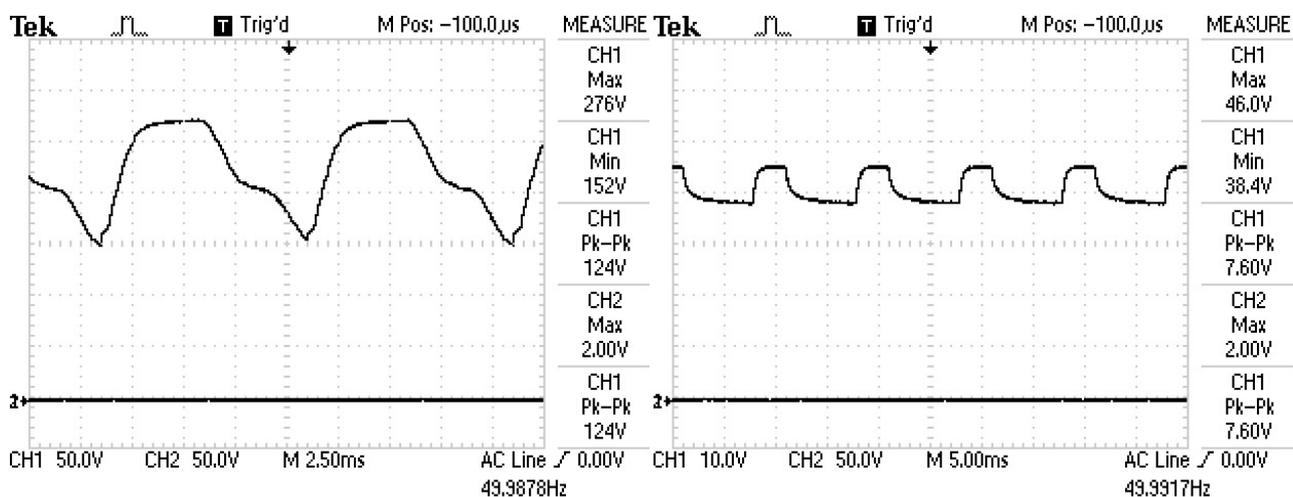


Рис. 10. Форма напряжения на конденсаторе и тока через светодиоды

Достоинством данной схемы является наличие всего лишь одного конденсатора, соответственно более низкая стоимость решения. Однако схема обладает одним существенным недостатком. Поскольку конденсатор заряжается до пикового напряжения на светодиодах, при его разряде ток через светодиоды цепочки L3 быстро спадает, вплоть до нуля. Таким образом обеспечить коэффициент пульсации тока менее 30% практически невозможно.

4. Модель преобразователя с частичным разрядом накопительного конденсатора

Анализ работы схемы (Рис.8) показывает, что основная ее проблема заключается в недостатке запасенной энергии конденсатором в цикле его заряда. Кардинально решить эту задачу за счет увеличения емкости не представляется возможным ввиду ограничения тока заряда конденсатора.

Предложено решение этой проблемы за счет введения дополнительного источника тока заряда накопительного конденсатора до напряжения, превышающего напряжение на светодиодах с последующим его частичным разрядом через источник тока, равного среднему току третьей ступени (рис. 11) [2].

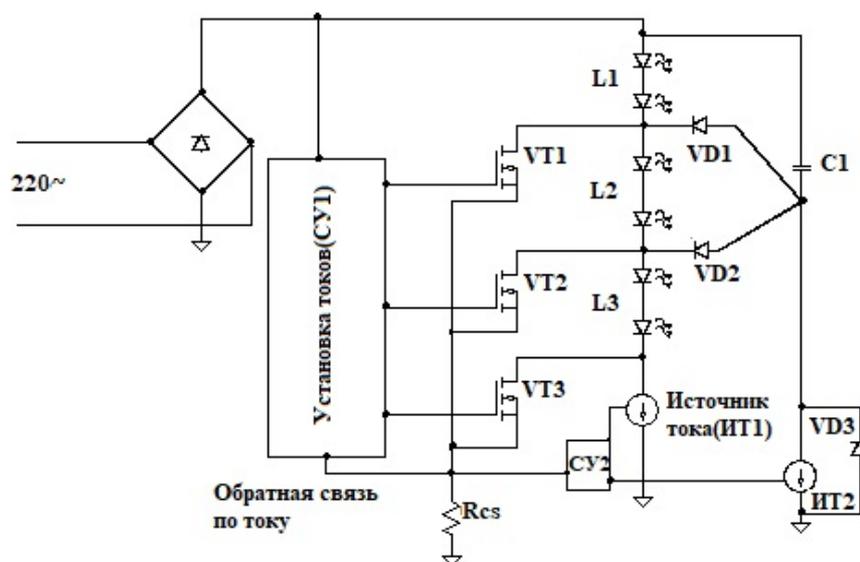


Рис. 11. Принципиальная схема секвентального преобразователя с дополнительными источниками тока

Первые два цикла происходят по принципу предыдущей схемы (рис. 8.), ИТ1, ИТ2 закрыты. Когда отрывается ключ третьей ступени (VT3) и через него начинает течь ток, одновременно СУ2 детектирует начало протекания тока через VT3 и включает источник тока заряда (ИТ2). Тем самым конденсатор С1 заряжается до напряжения, которое может быть больше, чем сумма напряжений на трех цепочках светодиодов. К моменту, когда выпрямленное напряжение достигло пика, ИТ2 выключается, одновременно с ним включается источник тока разряда (ИТ1). Конденсатор начинает разряжаться, ток протекает через L1-L3, ИТ1 и VD3, таким образом обеспечивается непрерывное протекание тока через светодиоды. Процесс разряда конденсатора продолжается до момента, пока выпрямленное напряжение сети не достигнет суммы напряжений всех трех ступеней. После этого ИТ1 выключается, ИТ2 включается, происходит подзарядка конденсатора. Поскольку конденсатор заряжен до напряжения большего чем на светодиодах, его энергия больше энергии, требуемой для поддержания постоянного тока через светодиоды. Исходя из элементарного энергетического соотношения $W = C \cdot U^2 / 2$, увеличивая разницу напряжений конденсатора и диодов, мы можем значительно снизить величину емкости конденсатора, а, следовательно, его размер и стоимость. На рисунке 12 приведена осциллограмма потребляемого от сети тока. В отличие от рисунка 4 кривая тока содержит дополнительную компоненту зарядного тока конденсатора I_z на интервале работы 3-й ступени преобразователя.

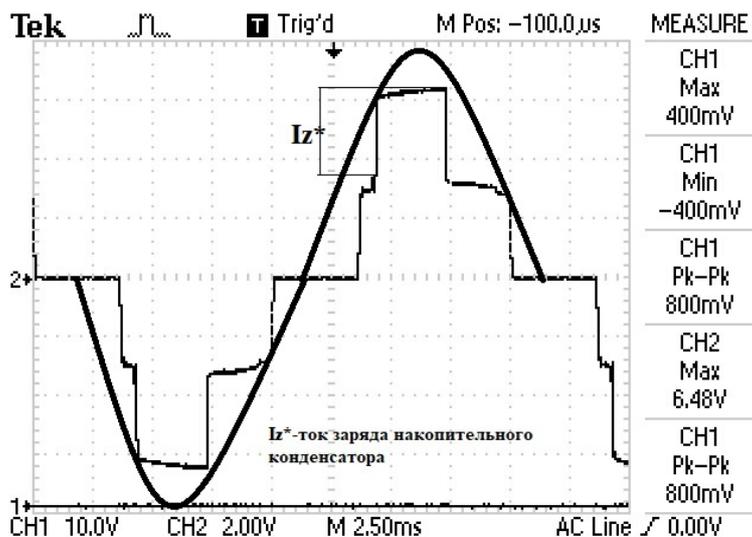


Рис. 12. Форма потребляемого от сети тока

5. Заключение

Предложенная схема потенциально позволяет решить проблему получения качественных световых характеристик светодиодных источников света малой и средней мощности при обеспечении хороших показателей ЭМС, используя простую и недорогую схемотехнику линейных источников тока с гальванической связью с сетью.

Библиографический список

1. Гуревич В.И. Цена прогресса. Развитие технологий микропроцессоров // Компоненты и технологии. №8. 2009. С. 46-52.
2. Соколов Ю.Б., Стрельников М.В. Секвентальный драйвер светодиодов [Электронный ресурс]: Федеральный институт промышленной собственности, отделение ВПТБ – Электрон. дан. – URL: https://нэб.рф/catalog/000224_000128_0000170312_20170421_U1_RU/ (дата обращения: 03.02. 2019).
3. Об утверждении требований к осветительным устройствам и электрическим лампам, используемым в цепях переменного тока в целях освещения: постановление Правительства от 10 ноября 2017 № 1356 // Собрание законодательства РФ. – 2017. - № 47. - Ст. 6992.

СЕКЦИЯ «ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА»

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

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ ИРИДИЯ НА СТРУКТУРУ АМОРФНЫХ АЛМАЗОПОДОБНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК

Ф. Бекмурат, Р. Немкаева, Н. Гусейнов, А.П. Рягузов

*Национальная нанотехнологическая лаборатория открытого типа
КазНУ им аль-Фараби, Алматы, Казахстан, zh.fariza1@mail.ru*

Аннотация: Тонкие аморфные алмазоподобные углеродные (DLC) пленки, модифицированные наночастицами иридия, были синтезированы методом ионно-плазменного со-распыления в атмосфере аргона. Локальная структура DLC a-C<Ir> пленок изучалась методом рамановской спектроскопии (RS). Методом RS показано что, с изменением концентрации иридия в углеродной пленке положение G пика не меняется. Проведенное нормальное разложение рамановских спектров выявило существенное влияние наночастиц иридия на структуру a-C пленок.

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

EFFECT OF IRIIDIUM NANOPARTICLES ON THE STRUCTURE OF AMOR- PHOUS DIAMOND-LIKE CARBON FILMS.

F. Bekmurat, R. Nemkaeva, N. Guseinov, A. P. Ryaguzov

*"National Nanotechnological Laboratory Open Type"
KazNU al-Farabi, Republic of Kazakhstan, Almaty, zh.fariza1@mail.ru*

Abstract: Thin amorphous diamond-like carbon (DLC) films modified with iridium nanoparticles were synthesized by ion-plasma co-sputtering in an argon atmosphere. The local structure of the DLC a-C <Ir> films was studied by Raman spectroscopy (RS). The RS method revealed that, with a change in the concentration of iridium in the carbon film, the position of G does not change the peak. The performed normal decomposition of the Raman spectra showed a significant effect on the structure of a-C films of iridium nanoparticles.

Keywords. Iridium nanoparticles, diamond-like carbon film, Raman spectroscopy, energy dispersion analysis, DLC structure, magnetron co-sputtering.

1. Введение

В последнее десятилетие наблюдается интенсивный рост исследований в области аморфных алмазоподобных углеродных пленок. Особый интерес вызывают металлические наночастицы в диэлектрической углеродной матрице. Подобные материалы обладают уникальными физико-химическими свойствами, а изменение размеров наночастиц, их формы и распределение в матрице позволяет задавать и контролировать механические и физические свойства [1-7]. Алмазоподобные углеродные пленки получили широкое применение в качестве твердых покрытий обладающих высокими антифрикционными свойствами и химически стойкими в агрессивных средах [8, 9].

Одним из перспективных методов получения углеродных пленок является метод магнетронного со-распыления. Магнетронный метод синтеза, в отличие от многих других используемых методов, является мощным инструментом создания наноструктурированных многокомпонентных покрытий различного назначения. Кроме того, этот метод позволяет проводить структурную и примесную модификацию аморфных углеродных (a-C) пленок.

Иридий – металл платиновой группы, относится к инертным веществам и вступает в химическую реакцию с некоторыми химическими элементами только при температурах выше 600-1000-1200°C, с углеродом связей не образует. Иридий выступает в углеродной

матрице как самостоятельный элемент структуры. При организации модифицированной углеродной пленки атомы иридия формируют наночастицы, равномерно распределенные по объему пленки. Наночастицы иридия в аморфной углеродной пленке могут обладать свойствами, которые не проявляются в макро состоянии. Кроме этого, наночастицы иридия определенным образом могут влиять на структуру и свойства углеродной матрицы. Поэтому исследование таких композитных материалов вызывает определенный научный и практический интерес.

2. Методика эксперимента

Синтез тонких алмазоподобных пленок с наночастицами Ir проводился методом ионно-плазменного магнетронного со-распыления комбинированной углеродной мишени (99,999 ат.%) на кварцевых и кремниевых подложках в атмосфере инертного газа Ar (99,999 ат.%). При синтезе пленок температура подложки не превышала 50°C и давление смеси газов Ar составляло 0,7 Па. В качестве иридия (99,9 ат.%) использовалась иридиевая проволока диаметром 0,125 мм. Размер и количество наночастиц иридия в единице объема изменялись в зависимости от количества отрезков проволоки Ir в зоне распыления углеродной мишени.

Концентрация иридия изучалась энергодисперсионным микроанализом (EDS) на приборе EDAX. На рисунке 1 показаны примеры определения концентрации иридия в а-С пленках на кремниевой подложке без примеси (рис.1а) и с концентрацией иридия $X_{Ir} \sim 1,58$ ат.% (рис. 1б). Концентрация иридия менялась $X_{Ir} \sim 0,00$ ат% до 1,6 ат%.

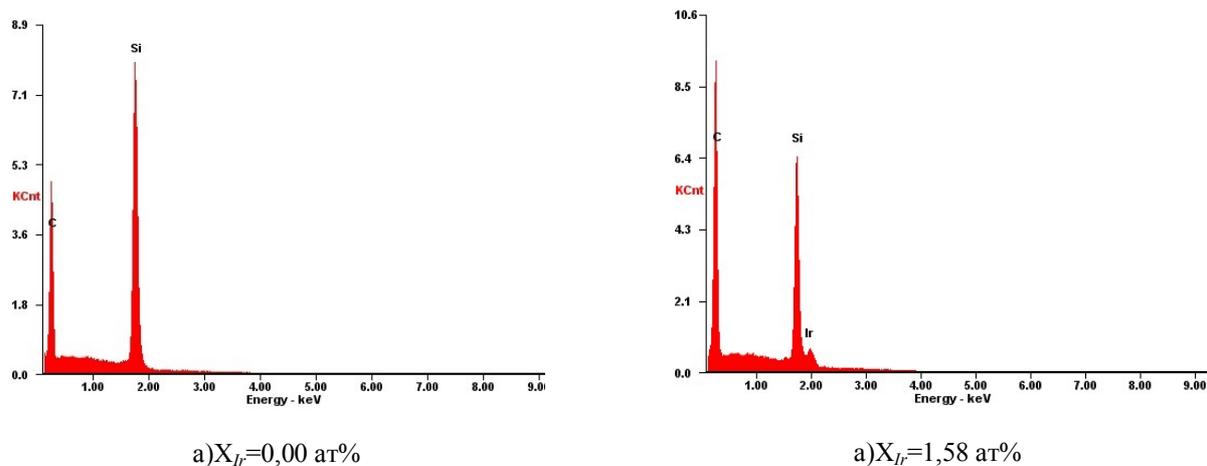
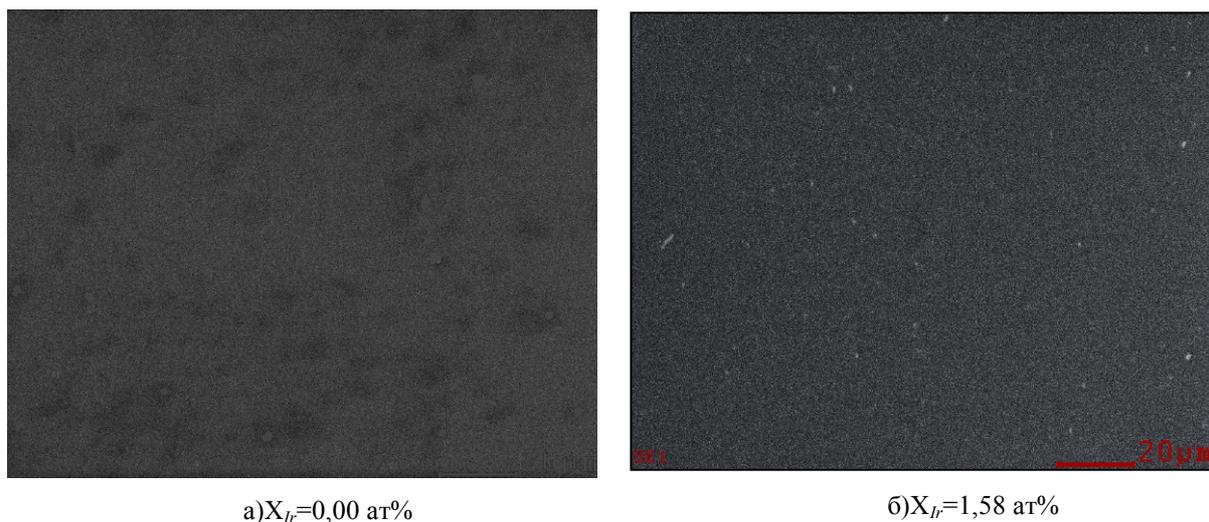


Рис. 1. Энергодисперсионный анализ DLC а-С<Ir_x> пленок

Морфология поверхности DLC пленок изучалась на сканирующем электронном микроскопе Quanta 200i 3D (FEI Company, USA). На рисунке 2 показаны снимки поверхности а-С пленок без (рис.2а) и с наночастицами иридия (рис.2б). Выявлено, что наночастицы иридия на кремниевой подложке формируют сферическую форму.

а) $X_{Ir}=0,00$ ат%б) $X_{Ir}=1,58$ ат%Рис. 2. Электронная микроскопия поверхности пленок а-C<Ir_x>

Все пленки получались при одинаковых условиях и времени синтеза.

3. Результаты и обсуждение

Локальная структура DLC а-C<Ir> пленок исследовалась рамановской спектроскопией на установке NTegraSpectra (NT-MDT, Russia). Спектры RS получали с использованием лазеров на длине волны 473 нм и 633 нм. Зависимость интенсивности излучения RS от концентрации иридия при возбуждении на длине волны 473 нм приведена на рис. 3.

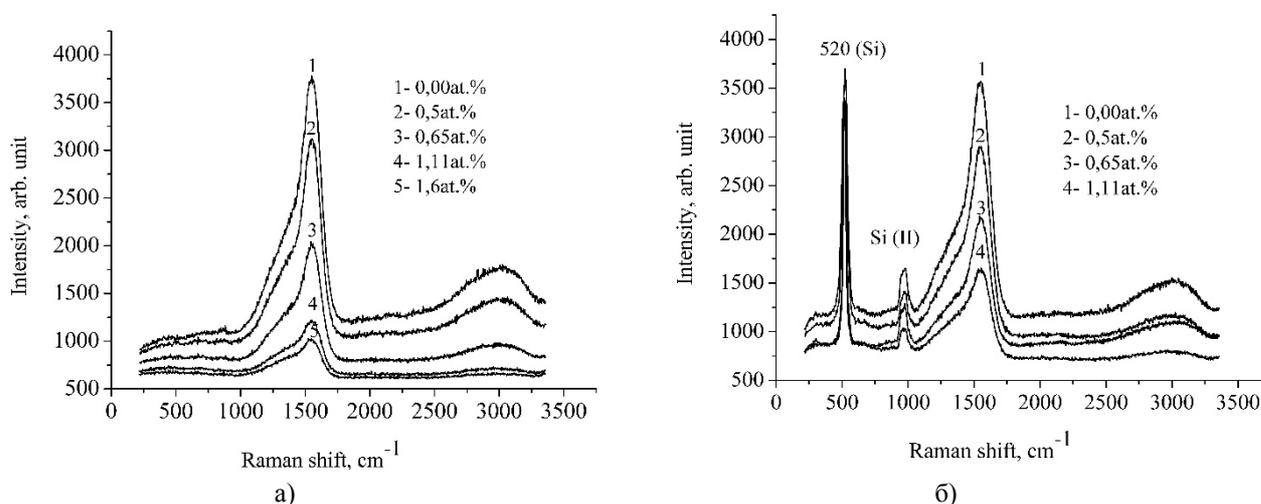


Рис. 3. RS а-C<Ir> пленок синтезированных на кварцевой (а) и кремниевой (б) подложках

Как известно [10, 11], Рамановские спектры углеродных структур характеризуются двумя основными полосами излучения, которые относятся к интервалам частот 1500–1600 cm^{-1} и 1340-1420 cm^{-1} , и обозначаются G и D пиками соответственно. Спектры RS а-C пленок характеризуются основным G пиком и плечом в низкочастотной области. Кроме этого наблюдается широкий пик в высокочастотной области 3000 cm^{-1} , который относят ко второму порядку излучения. Из спектров хорошо видно, что с увеличением концентрации иридия положение пика G не меняется и находится на частоте 1550 cm^{-1} (рис.3). Такое положение G пика приписывают алмазоподобной структуре [10] и процентное содержание sp^3 гибриди-

рованных связей может составлять 55-70 %. Изменение по интенсивности RS можно объяснить изменением соотношения sp^2/sp^3 связей C-C.

Для более детального выяснения влияния наночастиц иридия на структуру a-C пленок провели нормальное распределение основного пика на гауссовы составляющие с максимальной достоверностью их аппроксимации на экспериментальную кривую 0,999%. На рис.4 представлен пример разложения RS a-C пленок. Откуда видно, что разложение происходит на три гауссовы кривые, которые можно отнести к G пику (положение 3 пика), к D пику (положение 2 пика) и положение 1 пика – к фоновой плотности sp^3 связей согласно [10]. Появление 1 пика возможно благодаря существованию в аморфной углеродной матрице структур с sp^3 связями, размеры которых $\sim 10\text{\AA}$ [11].

Кроме этого, из рис.4 видно, что интенсивность пика 2 (пик D) с увеличением концентрации Ir увеличивается. Такое изменение пика 2 характеризует появление гексагональных молекул C_6 , т.е. количество атомов с sp^2 связями в углеродной матрице становится больше. Подобная картина разложения на гауссовы составляющие наблюдается и в a-C<Ir> пленках на кремниевой подложке. Кроме этого, видно, что пик 3 (пик G) по интенсивности уменьшается, но это уменьшение скорее связано не с уменьшением sp^2 связей, а изменением соотношения sp^2/sp^3 связей C-C.

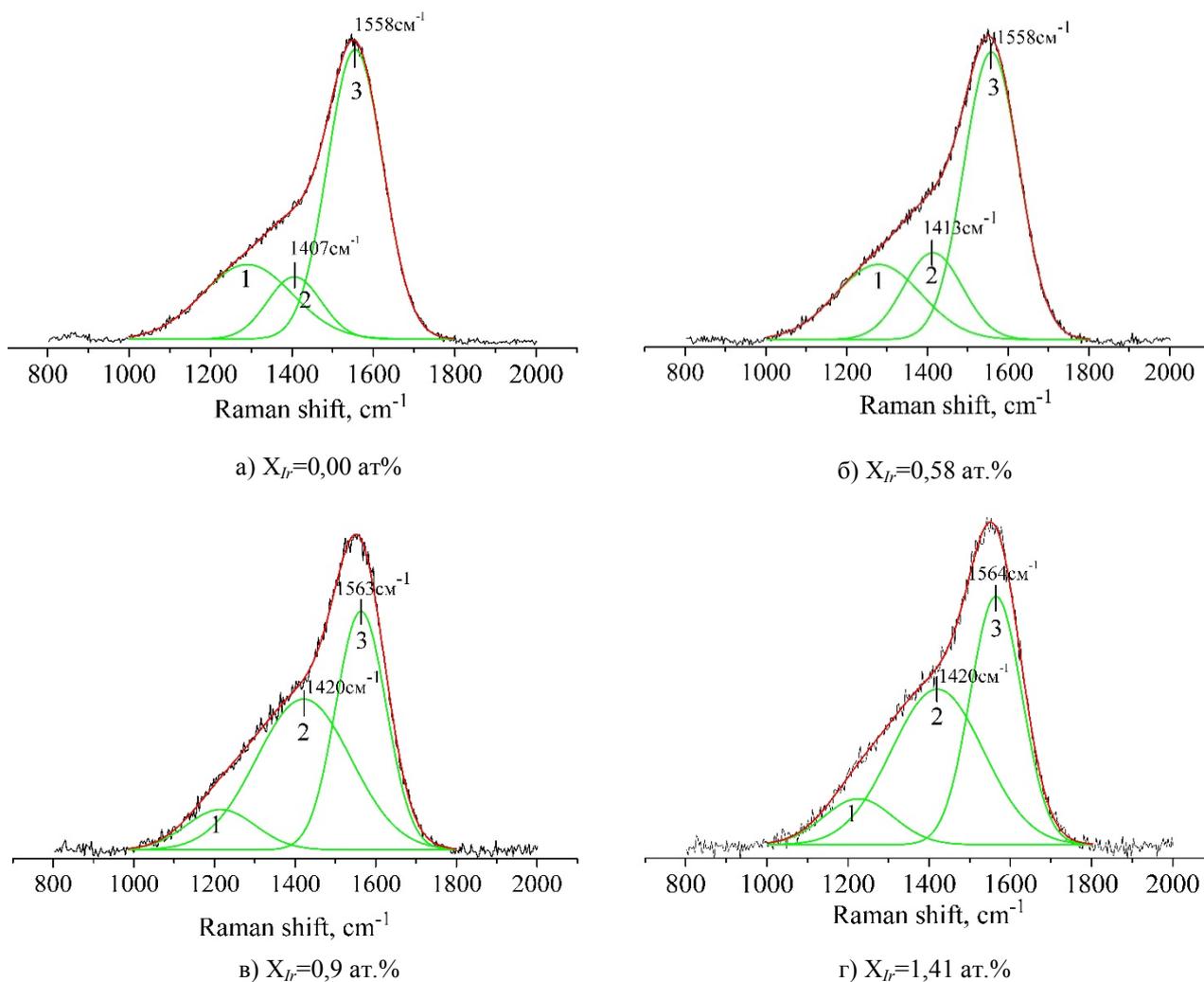


Рис. 4. Нормальное распределение в рамановской спектроскопии a-C<Ir> пленок

Для выяснения, насколько сильно меняется структура а-С пленки с концентрацией Ir, провели расчет дисперсии G пика [12] по основным частотам возбуждения 473 нм и 633 нм.

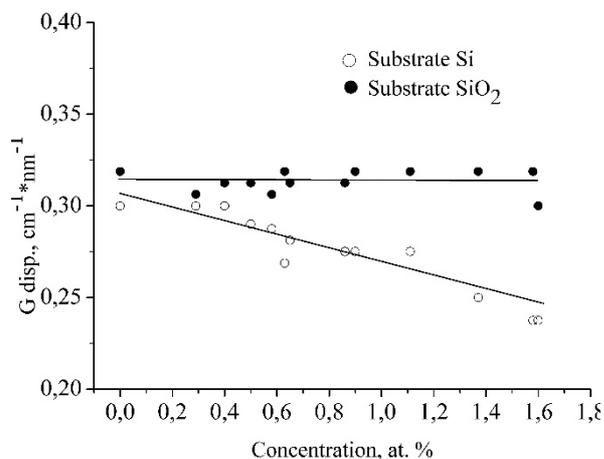


Рис.5. Дисперсия G пика от концентрации Ir в а-С пленка синтезированных на кварцевой и кремниевой подложках

ми иридия.

Заключение

В работе впервые показана возможность синтеза DLC пленок с наночастицами иридия. Методом рамановской спектроскопии изучено влияние концентрации наночастиц иридия на формирование структуры пленки. Показано, что с увеличением концентрации иридия возрастает sp^2 гибридизация связей, более существенно это происходит в пленках, выращенных на кремниевых подложках. Таким образом, можно заключить, что введение наночастиц иридия может влиять на электронные свойства DLC пленок.

Библиографический список

1. Garcí'a M. A., Ruiz-Gonza'lez M. L., de la Fuente G. F., Crespo P., Gonza'lez J. M., Llopis J., Gonza'lez-Calbet J. M., Vallet-Regi' M., Hernando A. Ferromagnetism in twinned pt nanoparticles obtained by laser ablation // *Chem. Mater.* 2007, V. 19, N. 4, P 889-893.
2. Paul R., Hussain S., Pal A.K. Characterization of nanocrystalline gold/DLC composite films synthesized by plasma CVD technique // *Applied Surface Science* 255 (2009) P. 8076–8083.
3. Jurkeviciute A., Lazauskas A., Tamulevicius T., Vasiliauskas A., Peckus D., Meskinis S., Tamuleviciu S. Structure and density profile of diamond-like carbon films containing copper: Study by X-ray reflectivity, transmission electron microscopy, and spectroscopic ellipsometr // *V.* 630, 30 may 2017, P.48-58.
4. Ramirez E., Eradès L., Philippot K., Lecante P., Chaudret B. Shape Control of Platinum Nanoparticles // *Adv. Funct. Mater.* 2007, V. 17, P. 2219–2228.
5. Prikhodko O., Manabaev N., Guseynov N., Maksimova S., Mikhailova S., Assanov G. Optical Properties of Diamond-Like Carbon Films Modified by Platinum // *Advanced Materials Research* Vol. 660 (2013), P. 47-50.
6. Garcia-Zarco O., Rodil S.E., Camacho-López M.A. Deposition of amorphous carbon–silver composites // *Thin Solid Films* 518 (2009), P. 1493–1497.
7. Звонарева Т.К., Ситникова А.А., Фролова Г.С., Иванов-Омский В.И. Нанокластеры платины, инкапсулированные в аморфный углерод // *Физика и техника полупроводников*, 2008, том 42, вып. 3, 331-335 стр.
8. Erdemir A., Donnet Ch. Tribology of diamond-like carbon films: recent progress and future prospects *Journal of Physics D: Applied Physics*, Volume 39, Number 18 (2006).
9. Suzuki M., Ohana T., Tanaka A. *Diamond and Related Materials*, **13** (11–12), 2216 (2004).
10. Ferrari A.C., Robertson J. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon // *Physical Review B*. -2000 -V.61, Issues 20. -P.14095-14107.

11. Ferrari A.C., Robertson J. Origin of the 1150-cm-1 Raman mode in nanocrystalline diamond // Physical Review B. -2001 -V.63, -P. 121405-1-4.

12. Ferrari A.C., Robertson J. Raman spectroscopy of amorphous, nanostructured, diamond-like carbon, and nanodiamond // Phil. Trans. R. Soc. Lond. A (2004) V. 362, P. 2477–2512
УДК 538.91; ГРНТИ 29.19.31

УДК 538.91; ГРНТИ 29.19.31

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗИСТИВНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ ОКСИДА ЦИНКА

М.В. Голованова, Т.А. Холомина, В.Г. Литвинов, А.В. Ермачихин, Н.Б. Рыбин

*Рязанский радиотехнический университет,
Россия, Рязань, golovanova_m_v@rambler.ru*

Аннотация. Проведен анализ экспериментальных данных по исследованию влияния режимов высокотемпературного отжига на электрофизические характеристики гетероструктур вида In/ZnO/n-Si, а также исследование механизмов токопереноса в тонких пленках ZnO.

Ключевые слова: гетероструктура, ZnO, вольт-амперная характеристика, механизмы токопереноса, растровая электронная микроскопия.

RESEARCH OF ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF RESISTIVE HETEROSTRUCTURES BASED ON ZINC OXIDE

M.V. Golovanova, T.A. Kholomina, V.G. Litvinov, A.V. Ermachikhin, N.B. Rybin

*Ryazan State Radio Engineering University,
Russia, Ryazan, golovanova_m_v@rambler.ru*

Abstract. The analysis of the experimental research data of influence of the modes of high-temperature annealing on electrophysical characteristics of heterostructures of a type of In/ZnO/n-Si, as well as the study of current transfer mechanism in ZnO thin films was carried out.

Keyword: heterostructure, ZnO, current-voltage characteristic, current transfer mechanism, scanning electron microscopy.

Введение

Оксид цинка ZnO является широкозонным полупроводниковым соединением типа A^{II}B^{VI}. Ширина запрещенной зоны при комнатной температуре составляет 3,37 эВ. Оксид цинка ZnO кристаллизуется в трёх фазах: гексагональная типа вюрцита, кубическая типа сфалерита, и редко встречаемая кубическая модификация поваренной соли NaCl. Наличие в кристаллической решетке кислородных вакансий, а также несвязанных атомов цинка, являющихся донорной примесью, объясняют тот факт, что в естественном состоянии оксид цинка является полупроводником n-типа.

Свойства ZnO в значительной степени зависят от методов и режимов получения. Удельная электропроводность пленок ZnO даже для одного метода получения может изменяться в достаточно широких пределах. Это связано с нестехиометричностью соединения и вариацией содержания примесей [1].

Благодаря своим уникальным электрофизическим и пьезоэлектрическим свойствам тонкие пленки оксида цинка ZnO являются перспективным материалом для создания таких устройств микроэлектроники, как тонкопленочные солнечные модули; тонкопленочные полевые транзисторы; газовые сенсоры, как резистивного типа, так и сенсоры, работа которых основана на использовании ПАВ (поверхностных акустических волн).

В настоящей работе представлены результаты исследования образцов, представляющих собой гетероструктуры вида Me/ZnO/n-Si/Me. Тонкие пленки ZnO получены методом спрей-пиролиза на кремниевых подложках, на поверхности ZnO сформированы индиевые контакты. Высокотемпературный отжиг образцов (T=600°C) проводился в атмосфере кислорода и инертного газа аргона.

Целью настоящей работы явилось исследование влияния режимов отжига на электрофизические характеристики гетероструктур на основе пленок нелегированного ZnO, а также механизмов токопереноса в тонких пленках ZnO.

Экспериментальная часть

Исследования проведены при помощи автоматизированной установки для изучения электрофизических свойств полупроводниковых барьерных структур [2]. Исследование электрофизических характеристик включало в себя измерение и последующий анализ вольт-амперных характеристик. Изображения структуры поверхности тонких пленок ZnO получены при помощи растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6610LV.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 приведены изображения поверхности и торца исследуемого образца гетероструктуры на основе ZnO, полученные при помощи РЭМ.

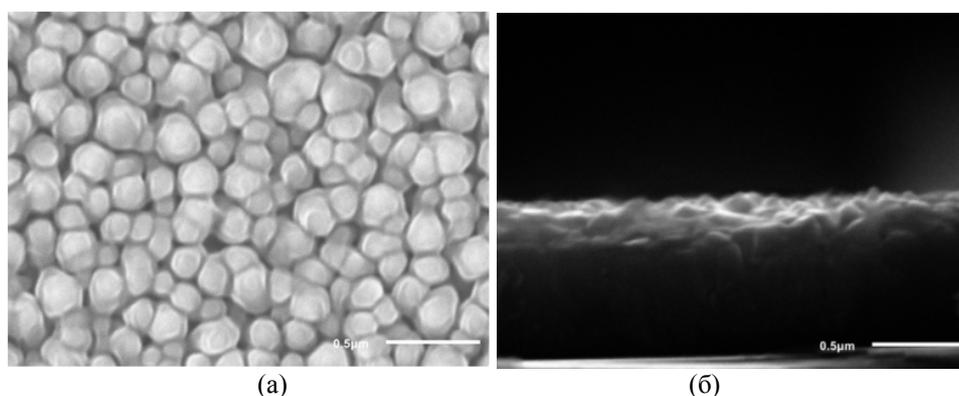


Рис. 1. Образец группы «1»: а) морфология поверхности пленки ZnO; б) торец пленки ZnO

Из рисунка 1 видно, что исследуемые образцы тонких пленок ZnO, полученные методом спрей-пиролиза, имеют волокнистое строение. Волокна ZnO имеют ярко выраженную гексагональную структуру. Средняя ширина сечения волокон образца группы «1», представленного на рисунке 1а, составляет $\approx 0,22$ мкм. Средняя толщина слоя ZnO образца группы «1» составляет $\approx 0,84$ мкм.

На рисунке 2 представлены вольт - амперные характеристики (ВАХ) исследуемых образцов, полученные на контактах In-подложка.

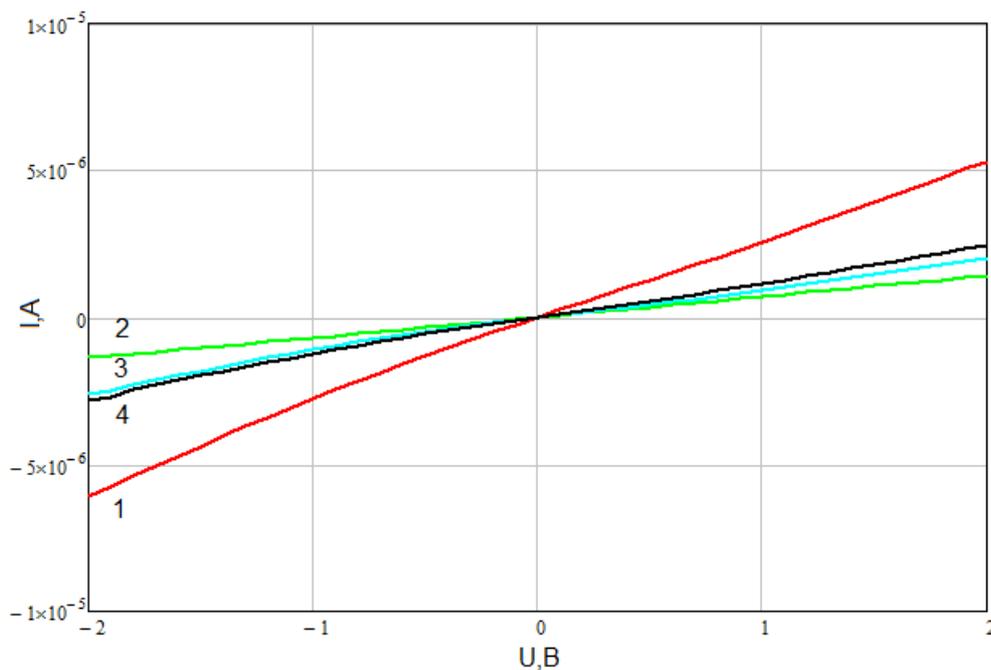


Рис. 2. ВАХ групп образцов, отожженных в атмосфере кислорода (1,2,3) и аргона (4)

При прямом смещении положительное напряжение подавалось на In контакт, при обратном – на высоколегированную кремниевую подложку n-типа.

При анализе экспериментальных данных приняты следующие допущения:

- высоколегированная кремниевая подложка образует невыпрямляющий контакт с оксидом цинка;
- контакт In/ZnO является невыпрямляющим;
- все напряжение, подаваемое на контакты In- подложка, падает только на тонкой пленке ZnO.

В результате анализа ВАХ исследуемых гетероструктур выявлена нелинейная зависимость тока через образец от напряжения на контактах. Для диапазона напряжений от -0,1 В до 0,1 В принято допущение, что ВАХ аппроксимируются кусочно-линейными функциями. Расчеты электрофизических параметров проведены для нулевого смещения напряжения на исследуемой гетероструктуре.

При учете перечисленных выше допущений сопротивления тонких слоев ZnO вычислены и приняты приблизительно равными 0,395 МОм для образца группы «1», 1,428 МОм для образца группы «2», 1,19 МОм для образца группы «3» и 0,966 МОм для образца группы «4».

Отжиг образцов в атмосфере инертного газа не приводил к изменению содержания кислорода в ZnO. Исходя из результатов анализа ВАХ, можно сделать предположение, что большое значение сопротивления образца группы «2» обусловлено тем, что отжиг проводился в атмосфере кислорода, не содержащего примеси. Примесями являются остаточные газы и водород, атомы которых играют роль доноров [3]. При отжиге происходит адсорбция атомов кислорода и «залечивание» кислородных дефектов (встраивание атомов кислорода в кристаллическую решетку ZnO и связывание их с атомами цинка Zn^+) [4]. Атомы цинка Zn^+ находятся в междоузлиях либо в узлах кристаллической решетки, но не связаны с атомами кислорода. Сопротивление образца группы «3» выше сопротивления образца группы «4», что позволяет сделать вывод о том, что отжиг проводился во влажной кислородной среде. В кислороде в некотором количестве могли содержаться остаточные газы, атомы которых явля-

ются донорами. Образец группы «1» обладал наименьшим сопротивлением, что свидетельствует о большом количестве примесных донорных атомов остаточных газов и водорода.

В результате анализа экспериментальных данных получены следующие значения величин, приведенные в таблице 1. Математические соотношения, в соответствии с которыми проведен расчет значений физических величин, приведены в [5].

Таблица 1. Параметры исследуемых гетероструктур

Параметры образцов	Номер группы образцов			
	1	2	3	4
Толщина пленки ZnO d , мкм	0,84	0,62	1,2	0,71
Сопротивление образца R , МОм	0,4	1,43	1,19	0,97
Удельное сопротивление образца ρ , МОм·см	34	165,8	71,9	98,7
Удельная проводимость образца $\sigma \times 10^3$, (МОм·см) ⁻¹	29,4	6	13,9	10,1
Концентрация свободных носителей заряда (электронов) $n_0 \times 10^8$, см ⁻³	9,18	1,88	4,34	3,16
Эффективная плотность состояний в зоне проводимости N_c , см ⁻³	3,5×10 ¹⁸			
Положение уровня Ферми относительно дна зоны проводимости $E_f - E_c$, эВ	-0,57	-0,61	-0,59	-0,6

Основными физическими механизмами переноса носителей заряда в твердых телах являются: токи, ограниченные пространственным зарядом (ТОПЗ); токи, определяемые надбарьерной эмиссией (эффект Ричардсона - Шоттки); объемный механизм, обусловленный эффектом Пула-Френкеля; туннельный эффект (в очень тонких диэлектриках); прыжковая проводимость по примесям в полупроводниках. Одновременно могут действовать два и более механизма токопереноса [1]. Так как измерения ВАХ образцов гетероструктур проведены при комнатной температуре ($T=300$ К), а минимальная толщина слоя ZnO среди всех групп образцов составляет $\approx 0,62$ мкм, такие механизмы токопереноса, как прыжковая проводимость и туннелирование являются маловероятными.

При прямом смещении ВАХ измерена в диапазоне напряжений от $U=0$ В до $U=2$ В с шагом 0,1 В. Для оценки величины напряжения перехода от омического участка ВАХ к участку, характеризующему начало ТОПЗ, использовано выражение для случая безловушечного изолятора с равновесными свободными носителями [1]:

$$U_x = \frac{4 \cdot q \cdot n_0 \cdot d^2}{3 \cdot \epsilon_s} \quad (1)$$

где q – элементарный заряд;

n_0 – концентрация свободных носителей заряда (электронов) в ZnO;

d – толщина слоя ZnO;

ϵ_s – абсолютная диэлектрическая проницаемость ZnO.

В соответствии с выражением (1) получены значения U_x , равные 1,73 мкВ, 0,19 мкВ, 1,66 мкВ и 0,42 мкВ для образцов групп «1», «2», «3», «4» соответственно. Однако при такой оценке не учитываются ловушечные уровни.

На рисунке 3 приведены прямые ветви ВАХ исследуемых образцов в координатах $\ln I - \ln U$.

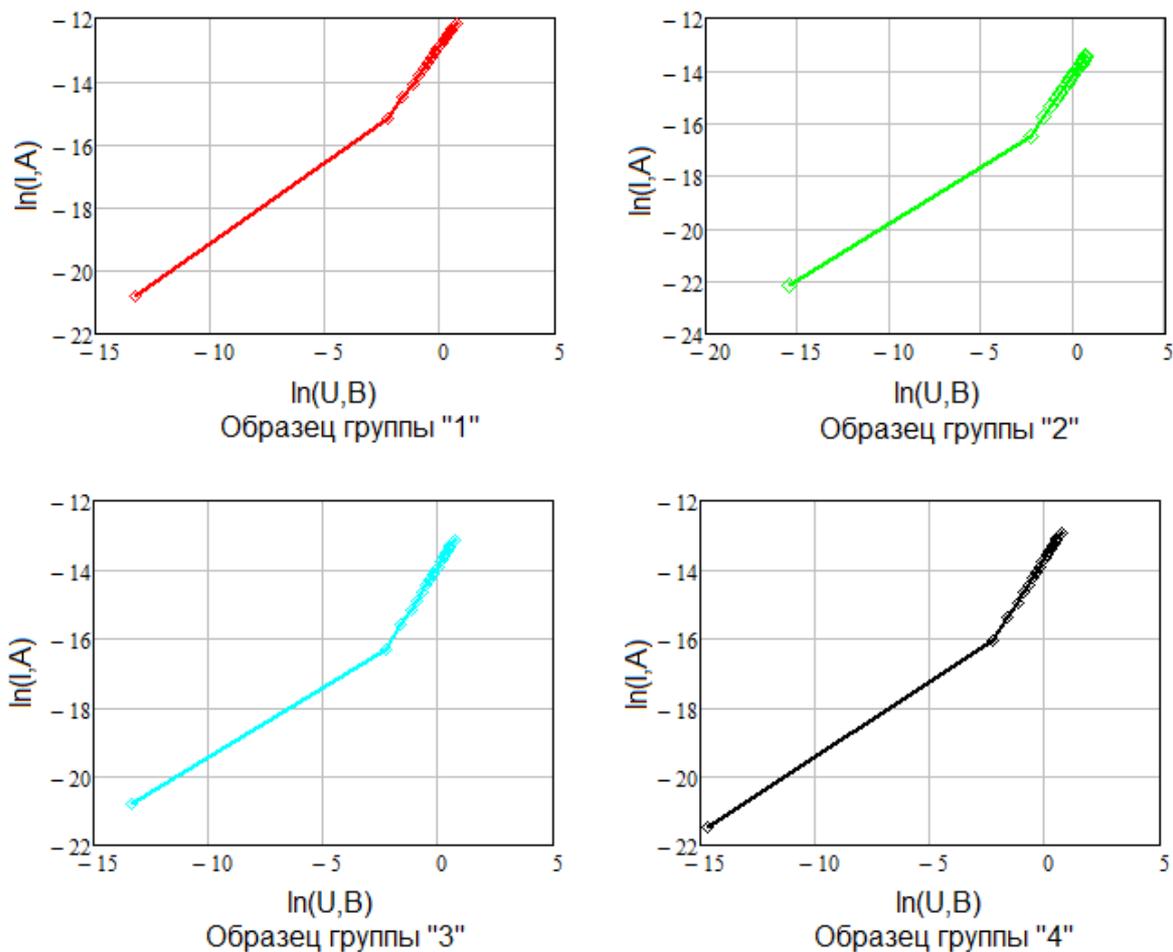


Рис. 3. Прямые ветви ВАХ в координатах $\ln I - \ln U$

В координатах $\ln I - \ln U$ на каждой ВАХ можно выделить два линейных участка.

При обратном смещении ВАХ измерена в диапазоне напряжений от $U=0$ В до $U=-2$ В с шагом 0,1 В. На рисунке 4 приведены обратные ветви ВАХ исследуемых образцов в координатах $\ln I - U^{0.5}$.

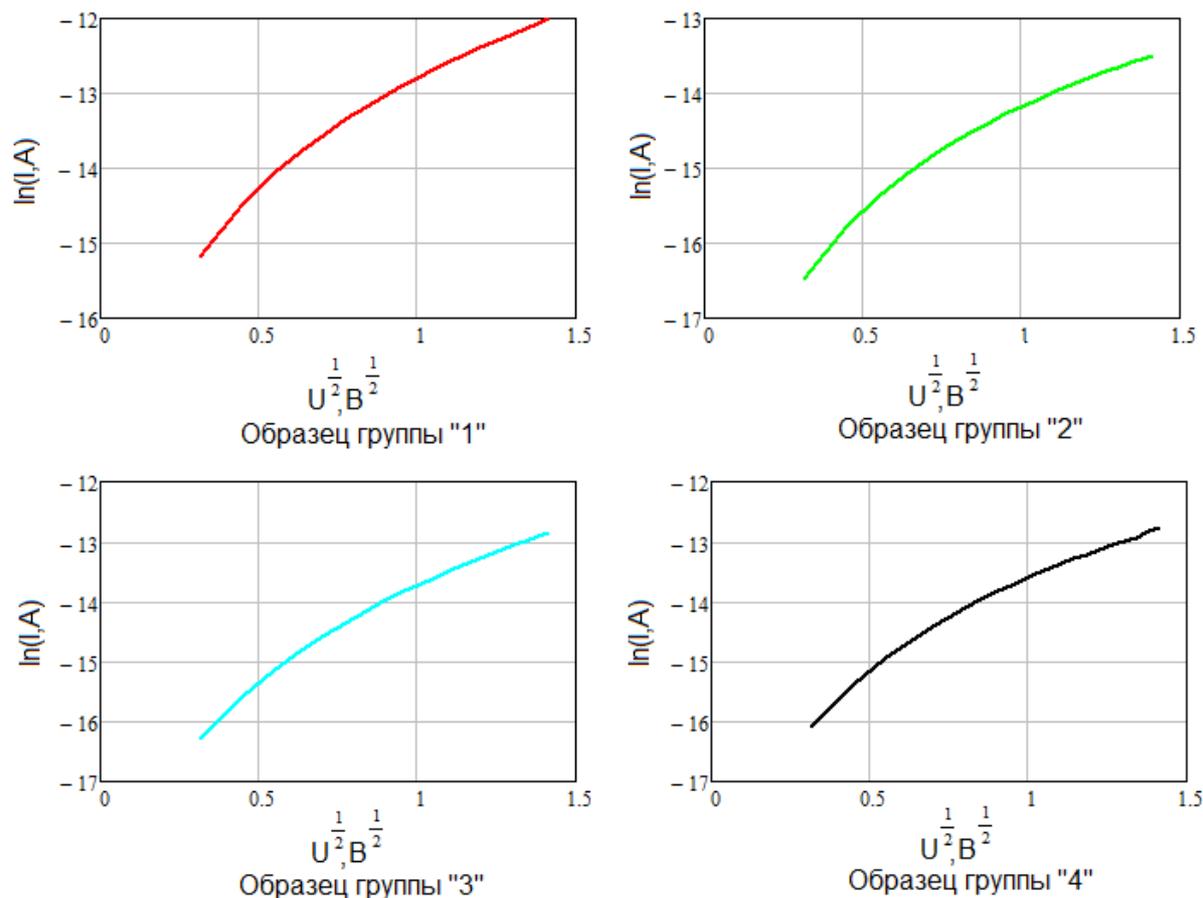


Рис. 4. Обратные ветви ВАХ в координатах $\ln I-U^{0,5}$

Вид обратных ветвей ВАХ в координатах $\ln I-U^{0,5}$ хорошо соотносится с видом ВАХ при наблюдении эффекта Пула-Френкеля, представленных в [6].

Выводы

Проведен анализ влияния режимов отжига на электрофизические характеристики структур In/ZnO/n-Si/Me на основании экспериментальных данных.

Режимы отжига образцов влияют на электрофизические характеристики тонких пленок ZnO следующим образом: образец группы «1», подвергавшийся отжигу в атмосфере кислорода, загрязненного большим количеством примесных донорных атомов остаточных газов и водорода, обладает наименьшим сопротивлением, уровень Ферми в ZnO для образцов этой группы расположен на 0,57 эВ ниже дна зоны проводимости. Образцы группы «2», отжиг которых проводился в атмосфере кислорода, не содержащего примеси, обладают наибольшим сопротивлением, уровень Ферми в ZnO для образцов этой группы расположен глубже, чем для образцов других групп. Значения сопротивления и глубины расположения уровня Ферми в ZnO для образцов групп «3» и «4» близки по величине, однако образцы группы «3» обладают большим сопротивлением и меньшей глубиной локализации уровня Ферми в ZnO, так как были подвергнуты отжигу во влажной кислородной среде.

Ход прямой ветви ВАХ образцов в координатах $\ln I-\ln U$ позволяет сделать вывод о том, что возможным механизмом токопереноса в гетероструктуре вида In/ZnO/n-Si при прямом смещении является ТОПЗ. Ход обратной ветви ВАХ образцов в координатах $\ln I-U^{0,5}$

позволяет сделать вывод о том, что возможным механизмом токопереноса в гетероструктуре вида In/ZnO/n-Si при обратном смещении является эффект Пула-Френкеля.

Для выяснения физической природы указанного необходимы дальнейшие экспериментальные исследования.

Библиографический список:

1. Тутов, Е.А. Механизмы токопереноса в структуре Al/ZnO/Si / Е.А. Тутов, Ф.А. Тума, В.И. Кукуев // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2006. – № 4 (8). – С. 334-340.
2. Кострюков С.А., Ермачихин А.В., Литвинов В.Г., Холомина Т.А., Рыбин Н.Б., Измерительный комплекс спектроскопии низкочастотных шумов полупроводниковых диодных структур // Измерительная техника. – 2013. – № 9. – С. 61-64.
3. Pearton S.J., Norton D.P., Ip K., Heo Y.W., Steiner T., Recent progress in processing and properties of ZnO// Progress in Materials Science. – 2005. – Vol. 50. – Pp. 293–340.
4. Громов Д.Г., Козьмин А.М., Шулятьев А.С., Поломошнов С.А., Боголюбова Д.Н., Шаманаев С.В., Влияние условий формирования на свойства тонких пленок ZnO:Ga, осажденных методом магнетронного распыления на холодную подложку//Известия вузов. Электроника. – 2012. – №6 (98). – С.10-16
5. Голованова М.В. Исследование электрофизических свойств и моделирование зонных диаграмм гетероструктур на основе ZnO/ М.В. Голованова, Т.А. Холомина, В.Г. Литвинов//Труды X Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению “Диагностика наноматериалов и наноструктур”: сборник. – Рязань:РГРТУ, 2018. – Т.2. – С.69-77
6. Майссел Л., Глэнг Р. Технология тонких пленок (справочник): в 2-х т.,Т.2. Пер. с англ. под ред. М.И.Елинсона, Г.Г. Смолхо.- М.: Сов. радио,1977.-768 с.

УДК 537.226; ГРНТИ 45.03.03, 45.03.07, 47.59

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛ–АКТИВНЫЙ ДИЭЛЕКТРИК–МЕТАЛЛ

В.С. Литвинова, В.Г. Литвинов

*Рязанский государственный радиотехнический университет,
Российская Федерация, Рязань, vglit@yandex.ru*

Аннотация. В работе рассматриваются особенности идентификации параметров схемы замещения конденсаторной структуры на основе активного диэлектрика. В качестве исходных данных выбираются результаты измерения на разных частотах, температурах, напряжениях смещения модуля и фазы комплексного сопротивления двухполюсника при схеме замещения в виде параллельно или последовательно соединенных электрической емкости и активного сопротивления. Приводится методика пересчета параметров двухэлементного двухполюсника в параметры эквивалентной схемы конденсатора с активным диэлектриком.
Ключевые слова: эквивалентная схема, структура металл – диэлектрик – металл, активный диэлектрик.

IDENTIFICATION OF THE EQUIVALENT ELECTRICAL CIRCUIT PARAMETERS OF THE METAL – ACTIVE DIELECTRIC – METAL STRUCTURE

V.S. Litvinova, V.G. Litvinov

*Ryazan State Radio Engineering University,
Russia, Ryazan, vglit@yandex.ru*

The summary. The paper discusses the features of identification of the equivalent circuit parameters of a capacitor structure based on an active dielectric. As the source data, the measurement results are selected modulus and phase of complex impedance at different frequencies, bias voltages and temperatures of the two-pole device with the equivalent circuit in the form of parallel or series-connected electrical capacitance and active resistance. A technique for recalculating the parameters of a two-element two-port device into the parameters of the conventional equivalent circuit of a capacitor with an active dielectric is given.

Keywords: equivalent circuit, metal – dielectric – metal structure, active dielectric.

Структуры металл – диэлектрик – металл (МДМ) до сих пор являются предметом интенсивных исследований, поскольку продолжается поиск перспективных материалов и синтез новых структур для получения новой элементной базы электроники. К таковым следует отнести тонкопленочные датчики различного назначения, мемристорные структуры на основе сегнетоэлектриков, TiO_2 , пьезоэлектрические преобразователи, выполненные в виде конденсаторных структур с различной конфигурацией электродов. МДМ-структура с активным диэлектриком может использоваться для преобразования электрических колебаний в механические и обратно. В такой структуре наблюдается резонансная зависимость модуля комплексного сопротивления от частоты возбуждающего напряжения. Общепринятой [1, 2] является электрическая эквивалентная схема, состоящая из статической геометрической электрической емкости C_0 , динамической индуктивности L , динамической электрической емкости C и активного сопротивления потерь R , сопротивления утечки $R_{ИЗ}$ (рис. 1).

Последовательно-параллельный резонансный контур на рис. 1 имеет две резонансные частоты, которые необходимо контролировать: частоту последовательного резонанса $f_{\text{посл}}$ и параллельного резонанса $f_{\text{пар}}$. Эти частоты и добротность контура определяются четырьмя элементами эквивалентной схемы. Однако измерения этих частот и добротности на практике может представлять определенные трудности. В настоящее время серийно выпускаются прецизионные измерители RLC (например, E4980A компании Keysight Technologies), позволяющие автоматизировать процесс измерения иммитанса на разных частотах. В данных измерителях используется по выбору пользователя двухэлементная схема замещения: 1) в виде параллельно соединенных резистора и конденсатора, 2) в виде последовательно соединенных резистора и конденсатора, 3) в виде параллельно соединенных резистора и индуктивности, 4) в виде последовательно соединенных резистора и индуктивности. Выходными параметрами выбирается модуль $|z|$ и фаза φ комплексного сопротивления двухполюсника.

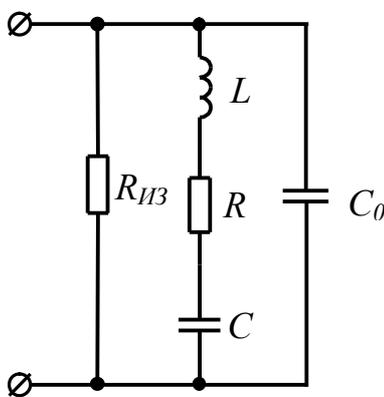


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема МДМ-структуры с активным диэлектриком – пьезоэлектриком [1, 2]

Комплексное сопротивление двухполюсника на рис. 1 при высоких значениях $R_{ИЗ}$ определяется следующим образом:

$$\dot{z} = \frac{\sqrt{(\omega^2 LC - 1)^2 + (R\omega C)^2}}{\sqrt{(R\omega^2 CC_0)^2 + (\omega^3 LCC_0 - \omega C - \omega C_0)^2}} \cdot \exp\left(j\left(\arctg \frac{R\omega C}{1 - \omega^2 LC} - \arctg \frac{\omega^3 LCC_0 - \omega C - \omega C_0}{R\omega^2 CC_0}\right)\right), \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота;
 f – частота тестового сигнала.

На частотной зависимости модуля комплексного сопротивления $|z|$ минимум сопротивления $|z|_{min}$ соответствует частоте:

$$f_{nocl} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (2)$$

а величина сопротивления в минимуме равна

$$\left| \frac{\bullet}{z} \right|_{min} = \sqrt{\frac{R^2 LC}{R^2 C_0 + LC}} \approx R. \quad (3)$$

Максимум сопротивления $|z|_{max}$ будет соответствовать частоте

$$f_{nap} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{\frac{C}{C_0} + 1}, \quad (4)$$

а величина сопротивления в максимуме равна

$$\left| \frac{\bullet}{z} \right|_{max} = \frac{\sqrt{LC \left(LC + R^2 C_0^2 \left(\frac{C}{C_0} + 1 \right) \right)}}{RC_0^2 \left(\frac{C}{C_0} + 1 \right)}. \quad (5)$$

Величины $|z|_{min}$ и $|z|_{max}$ могут отличаться на несколько порядков величины. Решение системы уравнений (2) – (5) позволяет вычислить параметры эквивалентной схемы на рисунке 1. Имеем $\left| \frac{\bullet}{z} \right|_{min} \approx R$. Поделим выражение (4) на (2), получим:

$$\frac{f_{nap}}{f_{noc}} = \sqrt{\frac{C}{C_0} + 1}; \quad \frac{C}{C_0} = \left(\frac{f_{nap}}{f_{noc}} \right)^2 - 1; \quad \gamma = \left(\frac{f_{nap}}{f_{noc}} \right)^2; \quad C = C_0(\gamma - 1). \quad (6)$$

Подставим последнее из выражений (6) в (2), получим:

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_{noc}^2 C_0 (\gamma - 1)}. \quad (7)$$

Подставим последнее из выражений (6), выражения (3) и (7) в (5) и получим уравнение

$$(2\pi f_{noc})^2 \left| \frac{\bullet}{z} \right|_{min}^2 \left| \frac{\bullet}{z} \right|_{max}^2 (\gamma - 1)^2 C_0^4 - \left| \frac{\bullet}{z} \right|_{min}^2 \gamma C_0^2 - (2\pi f_{noc})^{-2} = 0,$$

из которого легко определим геометрическую емкость C_0 :

$$C_0 = \frac{\sqrt{1 + \gamma^2 + 4(\gamma - 1)^2 \frac{|z|_{max}^2}{|z|_{min}^2}}}{2\sqrt{2}\pi f_{noc} |z|_{max}},$$

а затем определим параметры L и C . Таким образом, по экспериментальным значениям резонансных частот и модулям полного комплексного сопротивления можно определить параметры эквивалентной схемы. Для повышения надежности методики определения эквивалентных параметров необходимо в качестве проверки использовать экспериментальные величины фазы комплексного сопротивления и сравнивать их с расчетными величинами, полученными при подстановке всех определенных параметров в показатель экспоненты в теоретическом выражении (1).

Активные диэлектрики по сравнению с неполярными диэлектриками характеризуются более выраженной частотной, температурной и дополнительно полевой зависимостью диэлектрической проницаемости [3], поэтому величины резонансных частот не являются постоянными. В связи с этим представляет практический интерес не только определения параметров эквивалентной схемы структуры металл–активный диэлектрик–металл на рис. 1, но и их температурных и полевых зависимостей.

Экспериментальные измерения организуются таким образом, что с помощью измерителя RLC получается набор значений $|z|$ и φ при разных частотах в диапазоне, захватывающем частоты последовательного и параллельного резонанса, при фиксированном постоянном напряжении смещения и температуре образца. Полученные данные подставляются в уравнение (1), получается система уравнений для набора частот, решая которую получают параметры эквивалентной схемы для заданной температуры и величины напряженности электрического поля в активном диэлектрике. Далее можно последовательно изменять температуру и(или) напряжение смещения, повторить перечисленные действия и в итоге получить параметры эквивалентной схемы при разной температуре и величине напряженности электрического поля. Полученные данные позволят повысить уровень проектирования радиоэлектронной аппаратуры, поскольку становятся понятными ограничения рабочего диапазона температур и электрических полей

Библиографический список

1. Магнитные и диэлектрические приборы / Под ред. Г.В. Катца. Ч. 1. М.: Энергия, 1964. 416 с.
2. Трофимов А.И. Пьезоэлектрические преобразователи статических нагрузок. М.: Машиностроение, 1979. 95 с.
3. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. М.: Высш. шк., 1986. 367 с.

УДК 53.084.6, 53.084.872-876; ГРНТИ 29.19.31

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЧ ШУМА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ

Д.С. Логинов, О.Н. Крютченко, В.Г. Литвинов, Т.А. Холомина,
А.В. Ермачихин, Н.Б. Рыбин, А.Р. Семенов

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

Аннотация. Проведены измерения НЧ шума в металлических контактах герконов при различных параметрах и предложен новый метод диагностики металлических контактов по величине СПМ и β , зависимости $S=1/f\beta$ на конкретной частоте.

Ключевые слова: НЧ шум, шумовая спектроскопия, автоматизация, измерительная установка, LabVIEW.

DEVELOPING THE PART OF LF NOISE SPECTROSCOPY SYSTEM TO INVESTIGATE LOW-RESISTANCE STRUCTURES

D.S. Loginov, O.N. Kryutchenko, V.G. Litvinov, T.A. Kholomina,
A.V. Ermachihin, N.B. Rybin, A.R. Semenov

*Ryazan State Radioengineering University,
Russia, Ryazan, skoobel@gmail.com*

Abstract. Measurement of the low-frequency noise in the metal contacts of reed switches for various parameters and the proposal of a new method for diagnosing electrical contacts by the magnitude of PSD and β , the dependence $S = 1 / f\beta$ at the frequency.

Keywords: LF noise, noise spectroscopy, automation, measurement system, LabVIEW.

1. Введение

Большинство элементов современной электроники имеют выводные контакты, рабочие коммутационные контакты, прижимные и другие контакты. Поэтому одной из наиболее важных прикладных проблем физики является повышение воспроизводимости и стабильности параметров получаемых приборов. Воспроизводимость и стабильность могут быть достигнуты принятием целого комплекса мер, реализованных как в разработке теоретических основ работы приборов, так и в технологии их изготовления путём применения научно обоснованных конструктивно-технологических решений и достоверных методов контроля параметров материалов и приборов.

Любые механические контакты подвержены износу. Чтобы уменьшить влияние этого деструктивного фактора в первой половине прошлого века были разработаны магнитоуправляемые коммутационные устройства, контактная группа которых помещалась в вакуумную колбу. Такие элементы получили название «Геркон», по сокращению от «герметизированный контакт», в англоязычной технической документации принято название «reed switch» [1].

2. Параметры измеряемых образцов и методика измерения

Для изучения параметров контактных явлений, был поставлен эксперимент по изучению спектральной плотности мощности (СПМ) НЧ шума партии герконов МКА-14103, которые были предоставлены для исследования предприятием АО «РЗМКП». В таблице 1 приведены основные параметры опытных образцов.

Таблица 1. Параметры герконов МКА-14103

Герконы МКА-14103 для измерения шума					
№	F_{cp} , А	R_r , Ом	$F_{от}$, А	$U_{пр}$, В	Примечание
1	12	0,08	7	275	К/д (подложка)-Ni (52 вес.%) -Fe; с покрытием Au-Ru.
2	13	0,08	7	265	К/д (подложка)-Ni (52 вес.%) -Fe; с покрытием Au-Ru.
3	14	0,08	8	285	К/д (подложка)-Ni (52 вес.%) -Fe; с покрытием Au-Ru.
4	12	0,08	7	275	К/д (подложка)-Ni (52 вес.%) -Fe; с покрытием Au-Ru.
5	12	0,08	7	260	К/д (подложка)-Ni (52 вес.%) -Fe; с покрытием Au-Ru.
6	14	0,11	7	300	К/д (подложка)- Ni (52 вес.%) -Fe.
7	13	0,11	7	290	К/д (подложка)- Ni (52 вес.%) -Fe.
8	15	0,16	6	305	К/д (подложка)- Ni (52 вес.%) -Fe.
9	13	0,12	5	285	К/д (подложка)- Ni (52 вес.%) -Fe.
10	14	0,15	6	300	К/д (подложка)- Ni (52 вес.%) -Fe.

№ – номер образца;

F_{cp} – сила срабатывания;

R_r – сопротивление контактов;

$F_{от}$ – сила отталкивания;

$U_{пр}$ – напряжение пробоя.

Сила срабатывания – нижнее предельно допустимое значение магнитодвижущей силы управляющего магнитного поля, вызывающей срабатывание магнитоуправляемого контакта. Сила отпускания — значение, при котором происходит размыкание контактов геркона [2].

Исследования проводились на образцах № 2,4,6,8,9. Исследованные образцы изготовлены с применением покрытий из никеля, железа, золота и рутения. Нанесение различных металлов для покрытия контактов значительно меняет параметры герконов, в том числе шумовые.

Исследования проводились при помощи автоматизированного комплекса для исследования спектров НЧ шума и коммутационно-усилительного блока, задающего необходимый предел коэффициента усиления, схема которого представлена на рисунке 1.

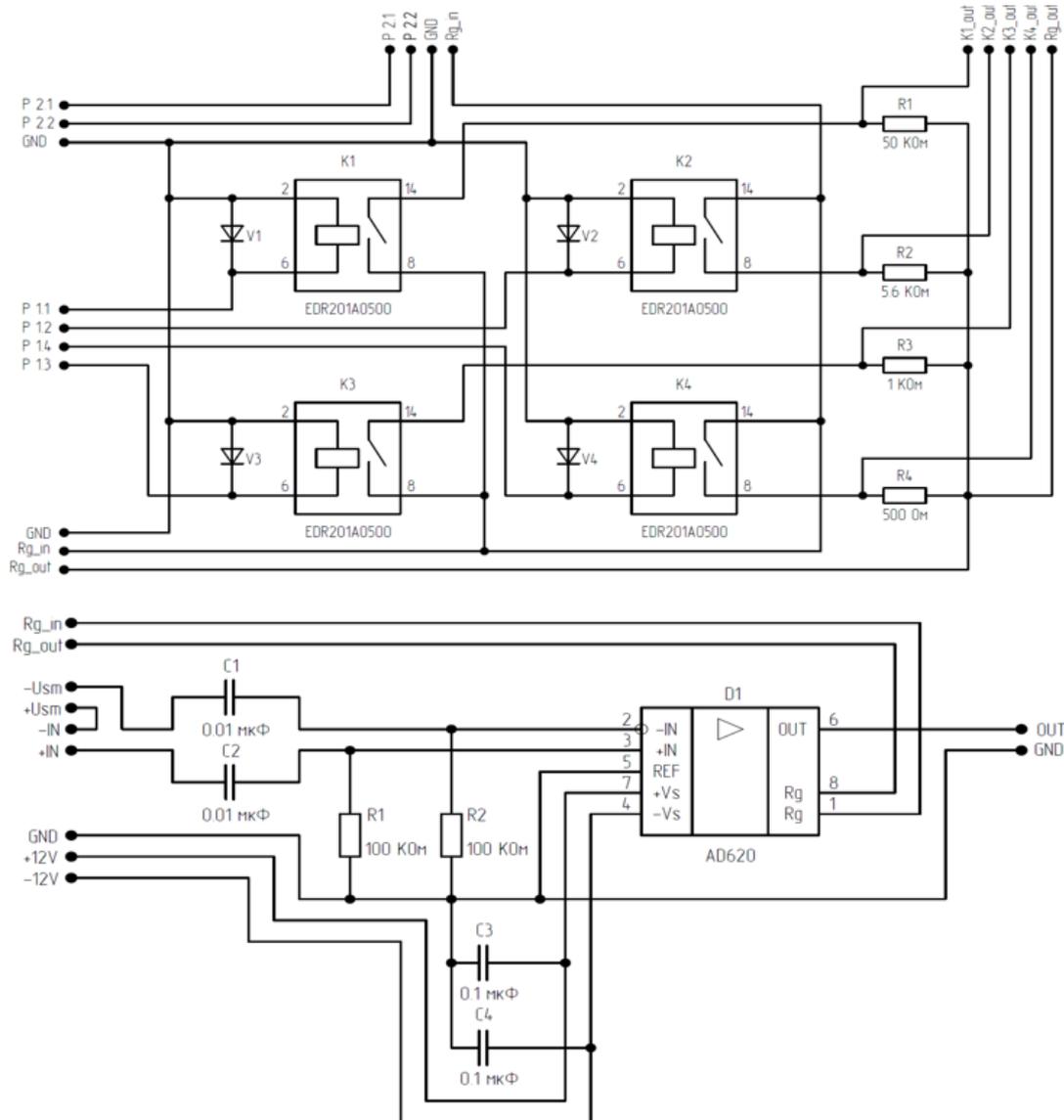


Рис. 1. Принципиальная схема коммутационно-усилительного блока

3. Результаты измерения и обработка полученных данных

Измерения проводились при помощи автоматизированного комплекса для исследования спектров низкочастотного шума с использованием малошумящего предварительного усилителя, адаптированного для исследования низкоомных образцов при коэффициенте усиления в диапазоне 10 – 1000 и с напряжением смещения, равным 1,5 В. Этот режим работы обеспечивает необходимую чувствительность установки, что позволяет получить качественные данные распределения СПМ шума. Режим работы подбирался экспериментально по виду зависимости СПМ шума [3].

Параметры исследованных герконов и их шумовые свойства и представлены в таблице 2, а типичные СПМ-зависимости представлены на рисунке 2.

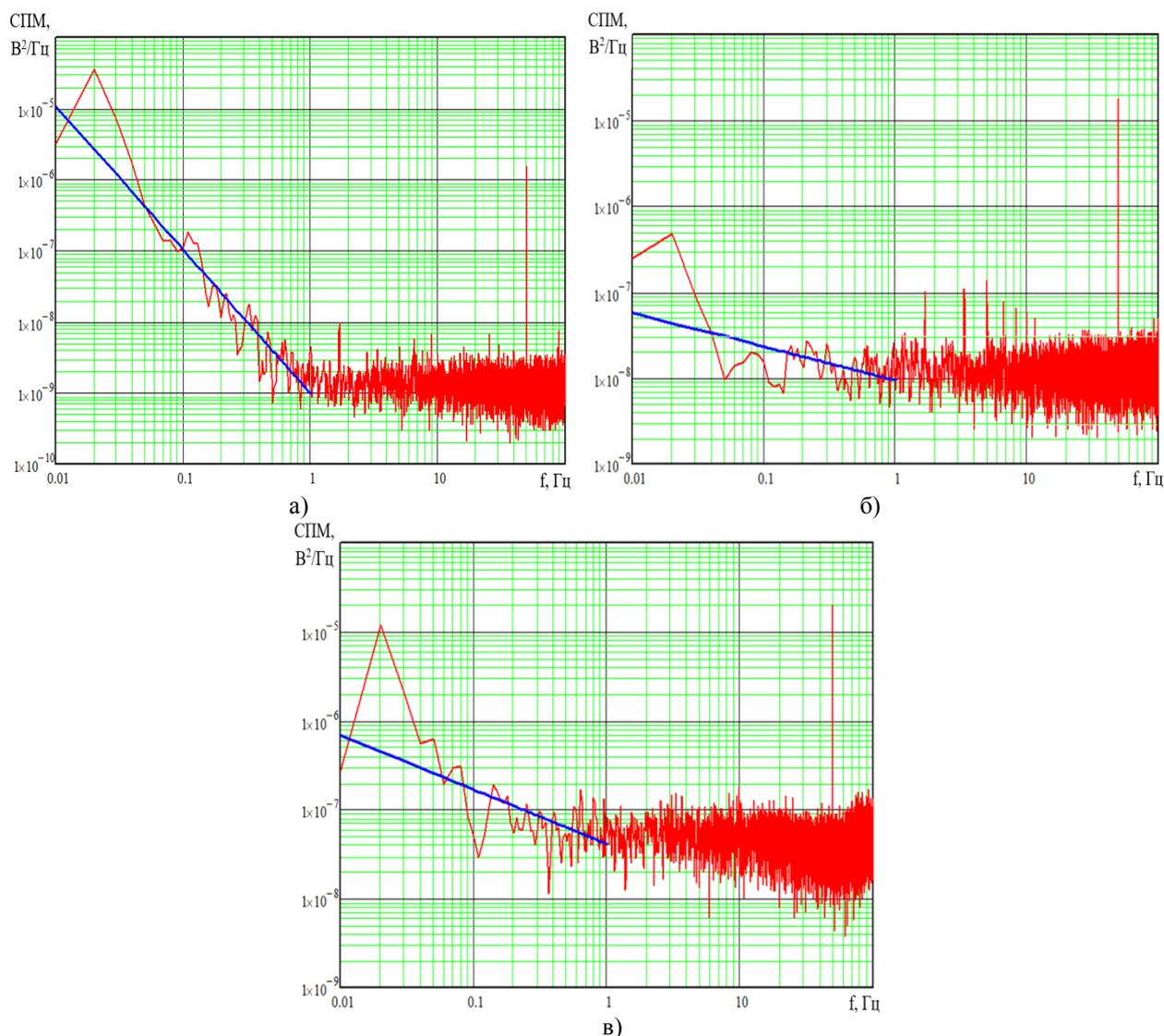


Рис. 2. Аппроксимация спектров образцов №2 (а), 4 (б), 6 (в) с помощью линейной регрессии

Таблица 2. Характеристики герконов и параметры НЧ шума на частоте 1 Гц

№	$F_{ср}$, А	R_r , Ом	$F_{от}$, А	$U_{пр}$, В	Покрытие	СПМ, $B^2/Гц$
2	13	0,08	7	265	Au-Ru	$2.05 \cdot 10^{-9}$
4	12	0,08	7	275	Au-Ru	$7.34 \cdot 10^{-9}$
6	14	0,11	7	300	Fe	$2.43 \cdot 10^{-8}$
8	15	0,16	6	305	Fe	$5.22 \cdot 10^{-8}$
9	13	0,12	5	285	Fe	$8.91 \cdot 10^{-8}$

Особый интерес представляет участок спектра в диапазоне 0.01 – 1 Гц, на котором проявляется шум типа $1/f^\beta$. Степень β по данным разных авторов находится в диапазоне от 0,6 до 2,5 и по ней можно судить о природе НЧ шума. Для определения β полученные экспериментальные данные аппроксимировались с помощью метода линейной регрессии. Значения β изменялись для разных образцов от 0,4 до 1,6.

По величине СПМ, представленной в таблице 2, на частоте, например, 1 Гц, можно сделать вывод, что герконы с покрытием из благородных металлов (образцы 2 и 4) «шумят» менее интенсивно, чем образцы с покрытием из железа. СПМ указанных образцов отличает-

ся более, чем на порядок величины. Значение плотности мощности НЧ шума коррелирует с особенностями структуры поверхности образцов в соответствии с островковой моделью Г.П.Жигальского [4]. Таким образом, можно предложить новый метод диагностики металлических контактов по величине СПМ и β , зависимости $S=1/f^\beta$ на конкретной частоте [5].

Библиографический список

1. Куликов Е.И. Методы измерения случайных процессов. М.: Радио и связь. – 1986. – 272 с.
2. Соколик С.А., Гуляев А.М., Мирошникова И.Н. Совершенствование установки для исследования низкочастотного шума полупроводниковых приборов и структур // Измерительная техника. – 1997. – № 1. – С. 57-61.
3. Холомина Т.А., Кострюков С.А., Литвинов В.Г., Ермачихин А.В. Спектроскопия низкочастотных шумов полупроводниковых приборов // Датчики и системы. – 2013. – №5. – С. 15-20.
4. Zhigal'skii G.P., Kholomina T.A. Excess noise and deep levels in GaAs detectors of nuclear particles and ionizing radiation // Journal of Communications Technology and Electronics. 2015. V. 60. № 6. С. 517-542.
5. Кострюков С.А., Холомина Т.А. Особенности анализа сигналов низкочастотного шума методом дискретного преобразования Фурье // Измерительная техника. – 2005. – №12. – С.47-50.

УДК 538.91; ГРНТИ 29.19.31

РАЗРАБОТКА МАКЕТА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КВАНТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В.О. Сазонов, Н.В. Вишняков, Ю.В. Воробьев, А.В. Ермачихин

Рязанский государственный радиотехнический университет,

Российская Федерация, Рязань, sazonoff.vadick@yandex.ru

Аннотация. В работе получены основные выражения для определения квантового выхода, а также представлен макет измерительного комплекса для исследования спектральной зависимости квантовой эффективности.

Ключевые слова: солнечный элемент (СЭ), квантовая эффективность (КЭ), фотоэлектрический преобразователь (ФЭП).

DESIGN OF THE MEASURING COMPLEX FOR THE STUDY OF SPECTRAL DEPENDENCE OF SOLAR CELLS QUANTUM EFFICIENCY

V.O. Sazonov, N.V. Vishnykov, Y.V. Vorobyov, A.V. Ermachikhin

Ryazan State Radio Engineering University,

Russia, Ryazan, sazonoff.vadick@yandex.ru

The summary. The basic expressions for determining the quantum yield are given, and the model of the measuring complex for the study of the spectral dependence of the quantum efficiency is described.

Keywords: solar cell (SE), quantum efficiency (QE), photoelectric converter (FEP).

В настоящее время, когда запасы топлива постепенно иссякают, использование солнечной энергии становится все более актуальным. Нефти и газа становится меньше, соответственно, цена на них растет. Да и электричество дорожает с каждым днем. Всего за 9 минут Земля получает больше энергии от Солнца, чем человечество производит за весь год. Эта энергия поставляется бесплатно и не оказывает влияния на окружающую среду. В этом отношении солнечные модули позволяют получить необходимую энергию из постоянного и, что главное, абсолютно бесплатного источника — света солнца.

Основной проблемой использования солнечных модулей является их низкая экономическая конкурентоспособность по отношению к централизованной системе электроснабжения. Перспективной областью применения солнечной энергетики в России являются изолированные и удаленные энергорайоны, а также резервирование системы электроснабжения особо ответственных потребителей (повышенной категории надежности).

С учетом изложенного задачами развития солнечной энергетики являются:

1. Ввод в эксплуатацию новых генерирующих мощностей, функционирующих на основе солнечных модулей, при условии их экономической эффективности.
2. Развитие отечественной научно-технической базы и освоение передовых технологий в области использования солнечных модулей, наращивание производства на территории Российской Федерации основного генерирующего и вспомогательного оборудования для преобразования солнечной энергии.

С учетом выше сказанного можно заключить, что тематика исследований, проведенных в данной работе, является актуальной.

Не каждый падающий фотон приводит к возникновению пары носителей заряда, создающих вырабатываемый солнечным элементом (СЭ) ток. Частично излучение отражается от поверхности СЭ, часть поглощается без генерации электронно-дырочной пары. Также, не все возникшие носители заряда смогут добраться до электродов СЭ вследствие рекомбинации. Все эти процессы приводят к снижению эффективности использования светового излучения для выработки электрической энергии. Характеристикой эффективности с этой точки зрения является отношение числа носителей заряда, составляющих ток СЭ, к количеству квантов света, падение которых на поверхность СЭ привело к их возникновению. Эта характеристика получила название квантового выхода СЭ. Немаловажной особенностью данной величины является возможность измерения ее спектральной дисперсии, показывающей эффективность преобразования излучения отдельных областей спектра и полноту использования солнечной энергии.

Введенное понятие квантового выхода удобно тем, что описывает отклик СЭ на монохроматическое излучение. Поэтому простым интегрированием может быть получена реакция СЭ на принципиально любой спектр излучения.

Наиболее полезный в этом отношении случай – солнечное излучение. Существует стандартизированный спектр солнечного излучения AM1.5, который используется при характеристике СЭ в подавляющем большинстве случаев [1].

Величину квантового выхода можно определить из следующего выражения:

$$Q = \frac{hcj}{e\lambda\Phi}, \quad (1)$$

где h – постоянная Планка;

c – скорость света;

j – плотность тока;

e – заряд электрона;

λ – длина волны;

Φ – интенсивность света.

Из (1) следует, что для экспериментального измерения Q нужно измерять ток, вырабатываемый СЭ в ответ на освещение его поверхности монохроматическим источником, а также мощность источника. Если с первой величиной все ясно, то измерение второй может происходить несколькими способами.

В первом, в распоряжении экспериментатора может находиться прибор, непосредственно предназначенный для измерения мощности излучения. При этом возможно использовать (1) напрямую.

Во втором, для измерения мощности может применяться фотодиод, имеющий известную характеристику своей спектральной чувствительности. Если она задана как зависимость мощности излучения от длины волны и выходного сигнала датчика, то эта зависимость используется для расчета P в формуле (1). Также эта зависимость может задаваться как спек-

тральная дисперсия квантового выхода фотодиода Q_{pd} . В этом случае можно использовать (1) для получения значения мощности светового луча на поверхности фотодатчика.

$$P = \frac{hcI_{pd}}{e\lambda Q_{pd}}. \quad (2)$$

После чего использовать полученное значение для вычисления квантового выхода СЭ:

$$Q_{sc} = Q_{pd} \frac{I_{sc}}{I_{pd}}. \quad (3)$$

В данной работе используется второй способ, то есть для измерения мощности применяется фотодиод с измеренной характеристикой спектральной чувствительности.

В процессе разработки было выяснено, что для измерения спектральной зависимости квантовой эффективности требуется следующее оборудование:

- стабильный источник белого света, перекрывающий интересующий участок спектра (солнечное излучение);
- сканирующий монохроматор, обеспечивающий работу в этом диапазоне;
- измеритель мощности светового излучения, например, эталонный фотодиод, рассчитанный на интересующие длины волн и уровни мощности;
- элемент, обеспечивающий локализацию светового пятна на поверхности исследуемого образца и измерителя мощности;
- светонепроницаемая камера с системой крепления образца;
- чувствительный амперметр.

При условии возможности компьютеризированного управления отдельными элементами, на их основе может быть собран единый измерительный комплекс. Необходимо отметить, что фоточувствительная площадь эталонного фотодиода должна быть не меньше размеров светового пятна, используемого для измерения квантового выхода ФЭП.

Функциональная схема макета измерительного комплекса представлена на рисунке 1.

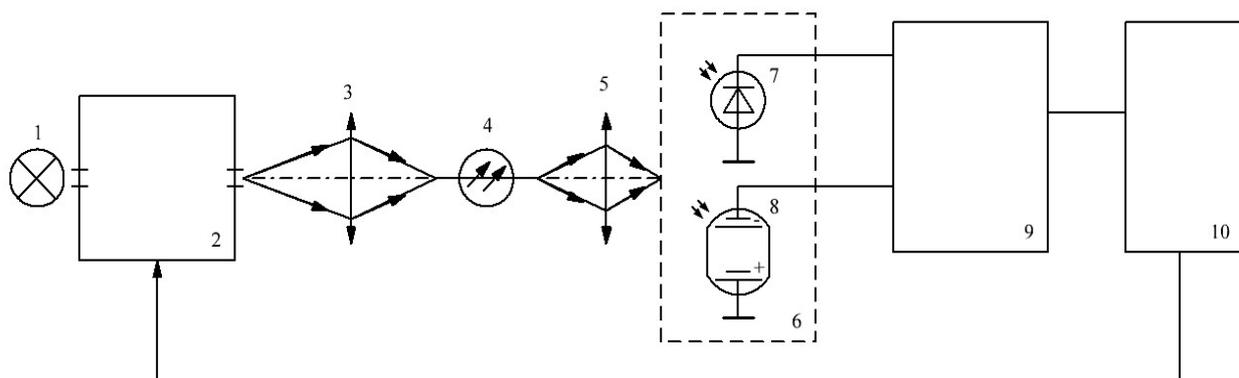


Рис. 1. Функциональная схема измерительного макета для исследования спектральной квантовой эффективности:

- 1 – стабильный источник белого света; 2 – сканирующий монохроматор; 3 – собирающая линза; 4 – оптическое волокно; 5 – объектив; 6 – светонепроницаемая камера с системой крепления образца; 7 – эталонный фотодиод; 8 – образец; 9 – чувствительный амперметр; 10 – ПК с программным обеспечением

Излучение от стабильного источника белого света 1 попадает на входную щель сканирующего монохроматора 2. Длина волны на монохроматоре задается автоматизировано с использованием персонального компьютера с программным обеспечением. На выходной щели получаем монохроматическое излучение, которое собирается линзой 3. Собранное излучение заводится в оптическое волокно, с помощью которого излучение переносится посредством полного внутреннего отражения на объектив 5, где происходит собирание излучения в точку, диаметром 4 мм. Далее излучение попадает в светонепроницаемую камеру 6, которая имеет два отсека. В первом расположен эталонный фотодиод 7, а во втором располагается образец 8. Токи с фотодиода и образца измеряются с помощью чувствительного амперметра 9. Далее осуществляется расчет квантового выхода с использованием персонального компьютера по формуле (3).

В работе используется монохроматор МДР-206, который выделять монохроматическое излучение в спектральном диапазоне от 190 до 5000 нм. В качестве эталонного фотодиода был выбран ФДУК-100УТ, рабочий диапазон спектральной чувствительности лежит в пределах от 190 до 1180 нм. Максимум спектральной чувствительности составляет 0,6 А/Вт, что соответствует длине волны 1000 нм. В качестве амперметра используется пикоамперметр Keithley 6487. Для управления установкой используется разработанное программное обеспечение в среде LabVIEW 10.

Таким образом, в результате проведенной работы создан макет измерительного комплекса, позволяющий определять спектральную зависимость квантовой эффективности солнечных элементов в видимом диапазоне длин волн.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Рязанской области в рамках научного проекта № 18-42-623004.

Библиографический список

1. Solar Spectra [электронный ресурс]. URL: <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra.html> (дата обращения 20.02.2019).

УДК 538.91; ГРНТИ 29.19.31

НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ШУМОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИОДА ШОТТКИ С ГЛУБОКИМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УРОВНЯМИ

А.Р. Семенов

*Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, sem-a-sem@mail.ru,*

Аннотация. Представлены результаты исследования зависимостей спектральной плотности мощности НЧ-шума от приложенного электрического поля

Ключевые слова: НЧ-шум, барьерные структуры, контакт Шоттки, вольт-шумовые характеристики.

LOW FREQUENCY NOISE CHARACTERISTICS OF SCHOTTKY DIODE WITH DEEP ENERGY LEVEL

A.R. Semenov

*Ryazan State Radio Engineering University,
Russia, Ryazan, sem-a-sem@mail.ru*

The summary. Investigation results of electric field dependencies of low-frequency noise (LFN) power spectral density (PSD) were presented.

Keywords: low-frequency noise, barrier structure, Schottky contact, voltage-noise characteristic.

Анализ проблемы

До сих пор существует интерес к изучению влияния дефектов с глубокими энергетическими уровнями на характеристики полупроводниковых приборов. Низкочастотная шумовая спектроскопия является методом, позволяющим исследовать полупроводниковые барьерные структуры и выявлять параметры глубоких уровней.

Результаты измерений

В настоящей работе проведены измерения ВАХ, C-V-характеристик, а также спектров НЧ шума кремниевых диодов Шоттки при напряжениях обратного смещения в диапазоне 1-20 В при температуре 77 – 300 К. Измерения проводились с помощью RLC-метра Agilent E4980A. В рамках модели генерации НЧ шума определена энергия ионизации ГУ [1]. Для расчёта параметров глубоких центров по измеренным вольт-амперным и вольт-фарадным характеристикам была получена площадь контакта и концентрация носителей заряда в образце. Концентрация носителей заряда определялась по формуле:

$$n_0 = \frac{2}{e\epsilon\epsilon_0 p} \left(-\frac{1}{d(1/C^2)/dU} \right), \quad (1)$$

где e – элементарный заряд;

ϵ – диэлектрическая проницаемость кремния;

ϵ_0 – диэлектрическая постоянная;

p – площадь контакта металл-полупроводник.

Для нахождения производной в знаменателе правой части выражения была построена зависимость в координатах Мотта-Шоттки $1/C^2$ (V) на основе измеренных C-V-характеристик и вычислен её тангенс угла наклона (Рис. 1). Площадь контакта была найдена из выражения для плотности тока через контакт металл-полупроводник [2]:

$$p = \frac{I_0}{AT} \exp\left(\frac{e\phi_B}{kT}\right), \quad (2)$$

где I_0 – ток насыщения;

A – постоянная Ричардсона;

T – абсолютная температура;

$e\phi_B$ – высота барьера;

k – постоянная Больцмана.

Значение I_0 определяется как точка пересечения касательной к прямой ветви ВАХ диода, построенной в полулогарифмическом масштабе, и оси ординат графика (Рис. 2). Рассчитанное таким образом значение концентрации составило $\sim 3 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

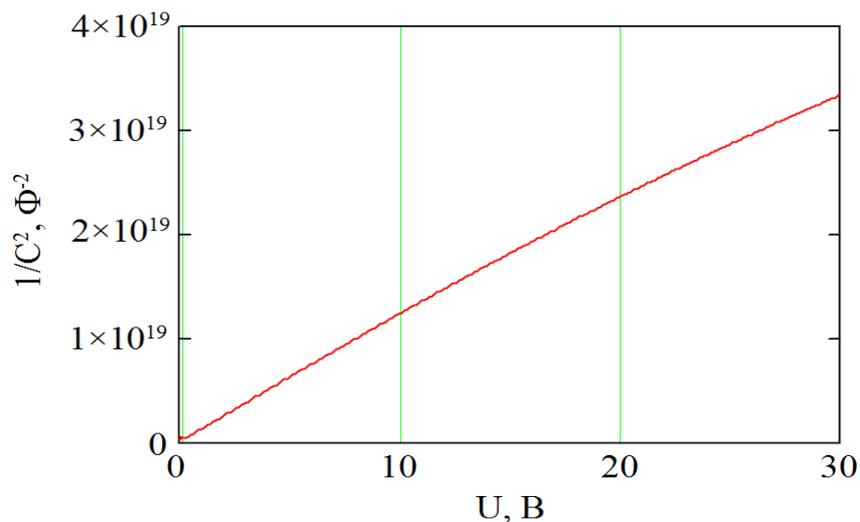


Рис. 1. Зависимость ёмкости структуры от напряжения, построенная в координатах Мотта-Шоттки

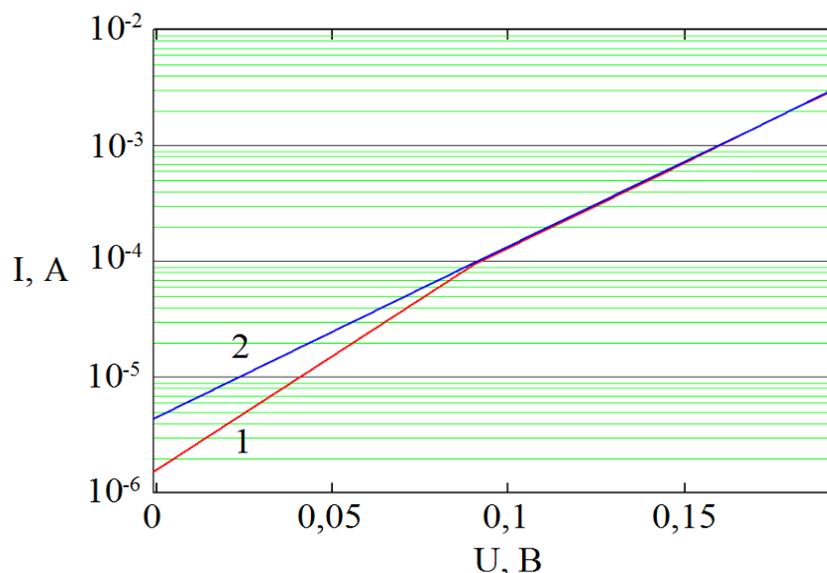


Рис. 2. Прямая ветвь ВАХ диодной структуры, построенная в полулогарифмическом масштабе – 1, аппроксимация ВАХ – 2

Каждому конкретному типу дефекта соответствует своё время релаксации, что выражается равенством $\omega\tau=1$. Согласно закону Больцмана

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{\Delta W_t}{kT}\right),$$

где τ_0 – среднее время прохождения носителей заряда через ОПЗ;
 ΔW_t – энергия глубокого уровня.

При достаточно высоком обратном смещении происходит перенос всех активированных носителей заряда через ОПЗ и $\tau_0 = 2\tau_m$, где $\tau_m = r\epsilon\epsilon_0$ – максвелловское время релаксации в базе диода с объёмным удельным сопротивлением r . Измерения СПМ шума образцов показали характер зависимости, типичный для избыточного шума или шума вида $1/f^\gamma$ (рис. 3). Анализ

полученных зависимостей проводился в соответствии с моделью Пула-Френкеля, согласно которой под влиянием сильного электрического поля в запрещенной зоне полупроводника происходит понижение потенциального барьера в окрестностях дефекта, образующего глубокий энергетический уровень (Рис. 4). В соответствии с представлениями работы [3], в которой получила развитие модель Пула-Френкеля, энергия глубокого уровня рассчитывается как:

$$\Delta W_t = kT \ln \left(\frac{1}{4\pi f_p \cdot \tau_m} \right) + \sqrt{\frac{e}{\pi \epsilon \epsilon_0} \sqrt{\frac{en_0}{2\epsilon \epsilon_0} (U_k - U)}}, \quad (3)$$

где f_p – частота перегиба на графике СПМШ;

$U_k - U$ – совокупность контактной разности потенциалов и напряжения обратного смещения.

Энергия локализации глубокого энергетического уровня составила 0,55 эВ.

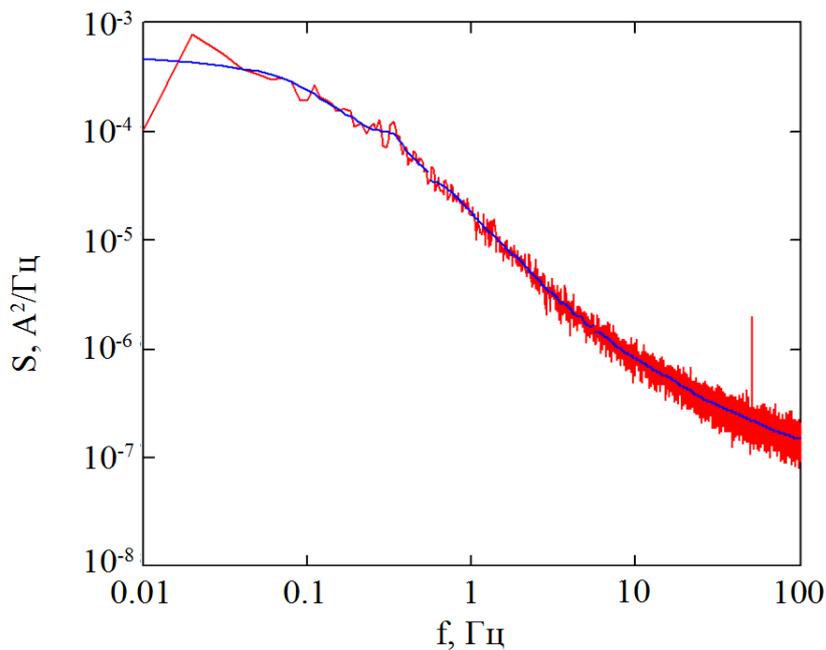


Рис. 3. Спектр НЧ шума образца при напряжении -4,3 В, T = 295 К

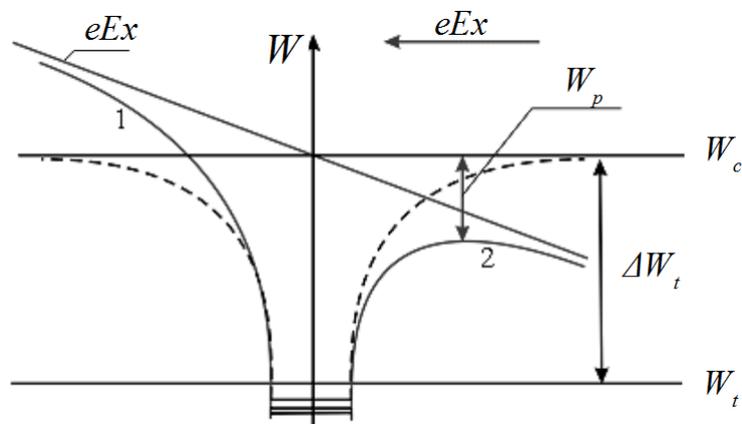


Рис. 4. Потенциальный барьер для электронов атома-донора.

Кривые 1 и 2 соответствуют изменению начальной формы потенциального барьера (пунктирная линия) после приложения электрического поля.

По найденным спектрам шума при разных напряжениях смещения построены вольт-шумовые характеристики на разных частотах. Затем было проведено математическое моделирование полученных характеристик с целью нахождения описывающей их функциональной зависимости и выявления характеристических коэффициентов (рис. 5). Полученная автором функциональная зависимость СПМШ от приложенного напряжения смещения имеет вид:

$$S = A \cdot \exp(V^{-\gamma}) \quad (4)$$

где A , γ – коэффициенты.

Найденные при аппроксимации экспериментальных данных значения параметра γ лежали в диапазоне 0,48-0,52 во всей области частот, что соответствует модели Пула-Френкеля [2]. Предложенная функциональная зависимость удовлетворительно описывает вид экспериментальных вольт-шумовых характеристик при разных значениях напряжения.

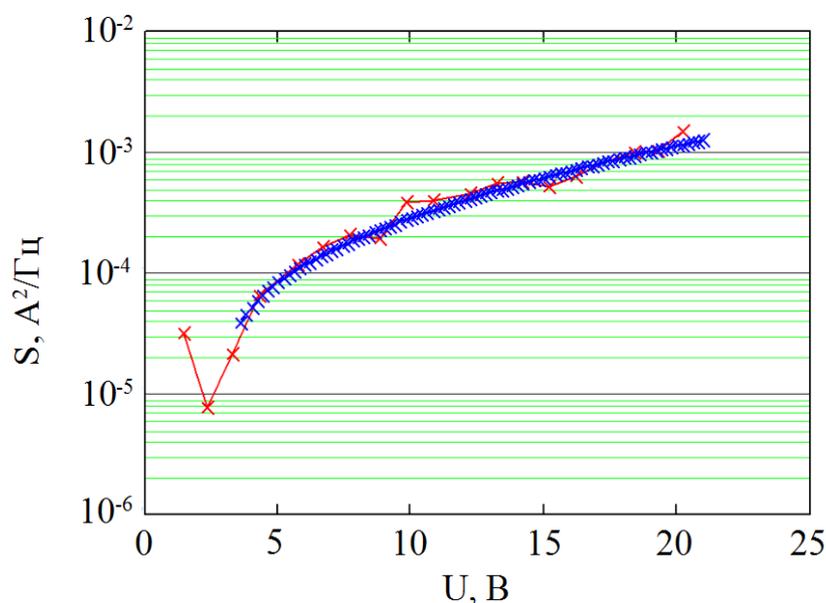


Рис 5. Вольт-шумовая характеристика диода Шоттки на частоте 0,4 Гц

Заключение

Разработанная физическая модель генерации НЧ шума с учетом влияния ГУ подтверждена экспериментальными результатами. Результаты экспериментов подтверждают справедливость модифицированной модели Пула-Френкеля понижения потенциального барьера в окрестностях дефекта, образующего глубокий энергетический уровень в запрещенной зоне полупроводника под влиянием сильного электрического поля. Модель, учитывающая эффект Пула-Френкеля, разработанная для случая мелких энергетических уровней при низких температурах [3и], модифицирована нами применением экранирующего кулоновского потенциала и применена к случаю глубоких энергетических уровней при относительно высоких температурах.

Автор выражает благодарность В.Г. Литвинову за помощь в обсуждении плана исследований и экспериментальных результатов, а также А.В. Ермачихину за помощь в проведении экспериментов.

Библиографический список

1. Kholomina T.A., Litvinov V.G., Semenov A.R., Ermachikhin A.V., and Maslov A.D., Investigation and simulation of voltage-noise characteristics of semiconductor barrier structures – 2017 International Conference on Noise and Fluctuations (ICNF), 2017, pp. 1–4.
2. Sze S.M., Physics of Semiconductor Devices. New York: Wiley-Interscience, 1981.
3. Kholomina T.A., Litvinov V.G., Ermachikhin A.V., Semenov A.R., Excess noise and deep level defects diagnostics in semiconductor barrier structures – 28th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA), 2018, pp. 1–5.

УДК 535.371+621.315.592; ГРНТИ 23.31.23+29.19.31

ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРОВ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР С САМООРГАНИЗОВАННЫМИ КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ ZNSE/CDSE

Е.П. Трусов, В.Г. Литвинов

*Рязанский государственный радиотехнический университет
Россия, Рязань, eptrusov@yandex.ru, vglit@yandex.ru*

Аннотация. В данной работе описана установка для измерения и анализа спектров фотолюминесценции. Исследованы спектры люминесценции гетероструктур с самоорганизованными квантовыми точками ZnCdSe, CdSe.

Ключевые слова: фотолюминесценция, гетероструктуры, квантовые точки, ZnCdSe/CdSe, NI LabVIEW.

PHOTOLUMINESCENCE STUDY OF SELF ORGANIZED ZNSE/CDSE QD STRUCTURES

E.P. Trusov, V.G. Litvinov

*Ryazan State Radio Engineering University
Russia, Ryazan, eptrusov@yandex.ru, vglit@yandex.ru*

The abstract. This article describes an installation for measuring and analyzing the photoluminescence spectra. The luminescence spectra of heterostructures with self-organized ZnSe / CdSe quantum dots are studied.

Keywords: photoluminescence, heterostructures, quantum dots, ZnCdSe, CdSe, NI LabVIEW.

Введение

Фотолюминесценция – мощный инструмент в изучении различных физических процессов и свойств полупроводниковых наносистем. Целью данной работы было проведение экспериментальных исследований фотолюминесценции квантовых точек CdSe в матрице ZnSe при фотовозбуждении, выяснение особенностей на спектральной зависимости люминесценции.

Описание разработанной измерительной установки по анализу спектров люминесценции

В состав разработанной измерительной установки входит автоматизированный с помощью среды LabVIEW монохроматор МДР-2 Ломо, персональный компьютер, плата сбора данных NI PCI-6251 (АЦП и ЦАП), терминальный блок BNC-2120, блок управления монохроматором, детектор оптического излучения [1], оптопара, измерительная ячейка с образцом, конденсор, источник первичного излучения. Все элементы и порядок их взаимодействия представлены на функциональной схеме – рис. 1. Для управления проведением исследования было разработано программное обеспечение в графической среде программирования NI LabVIEW. Также с помощью данной измерительной установки и разработанного программного обеспечения имеется возможность исследовать цветовую температуру [2].

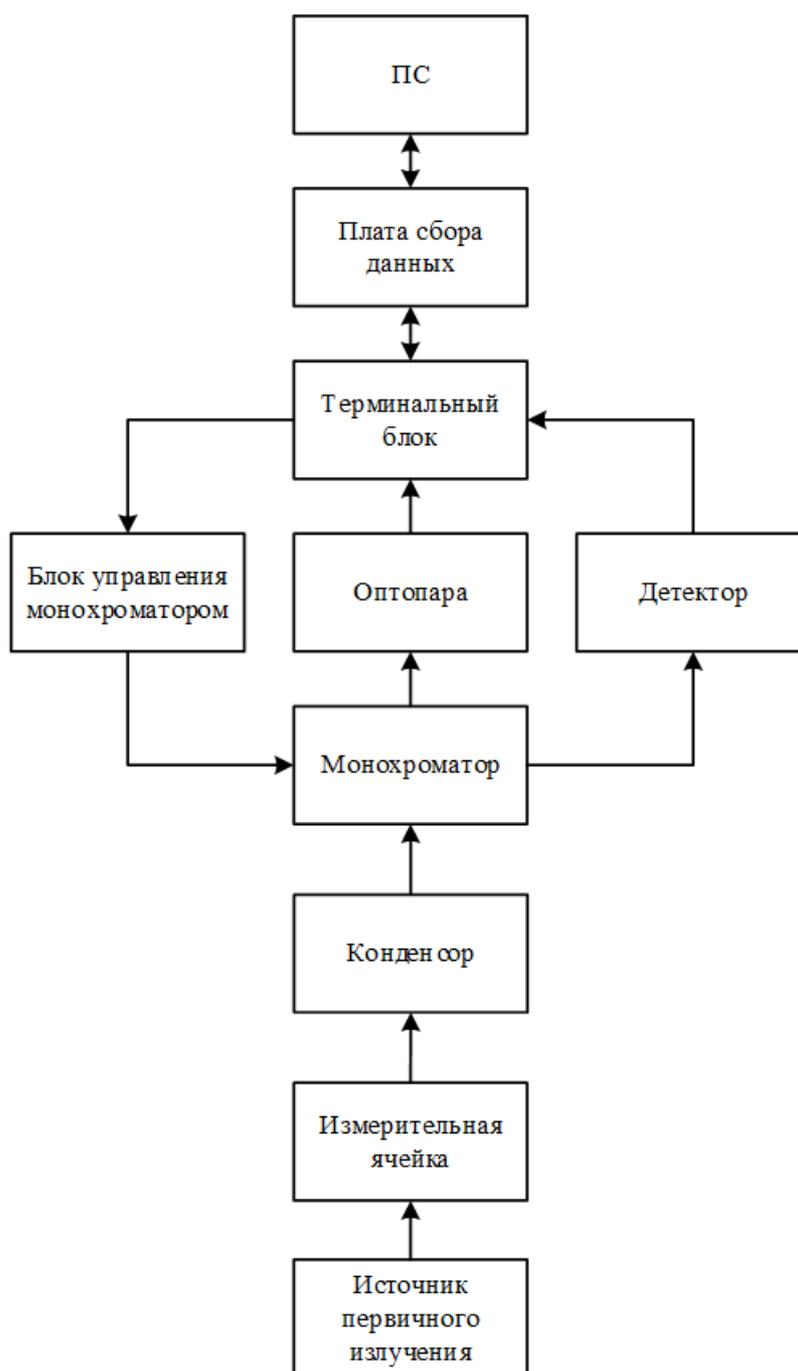


Рис. 1. Функциональная схема установки автоматизированного измерения и анализа спектров люминесценции полупроводниковых структур

В качестве детектора оптического излучения используется фотоэлектронный умножитель (ФЭУ). Выбор ФЭУ связан со спектральным диапазоном люминесценции. В видимом диапазоне длин волн используется ФЭУ 27. В ближнем ИК диапазоне длин волн используется ФЭУ 62. При изменении области, в которой происходит исследование люминесценции, конструкция разработанной установки позволяет быстро выполнить переход на необходимый диапазон. Блок управления монохроматором отвечает за работу двигателя постоянного тока ДПР-42-Ф1-02. С помощью данного двигателя осуществляется вращение дифракционной решетки барабана монохроматора МДР-2, которая формирует развертку по длине волны на

выходе монохроматора от минимального значения до максимального, которые определяются типом дифракционной решетки.

Данные узлы измерительной установки связаны с ПК при помощи терминального блока BNC-2120, который в свою очередь соединен с платой ввода-вывода NI PCI-6251.

Ячейка с образцом интегрирована в гелиевый криостат замкнутого цикла Janis CCS400/204N с сенсором температуры DT-670B-CU-NT-4H.

Таким образом, имеется возможность выполнять длительные измерения при постоянной температуре с точностью до сотых долей кельвина и низкотемпературные (до 4 K) измерения фотолюминесценции.

Эксперимент

В работе исследовалась гетероструктура с самоорганизованными квантовыми точками, выращенная методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Структура образца представлена на рис. 2.

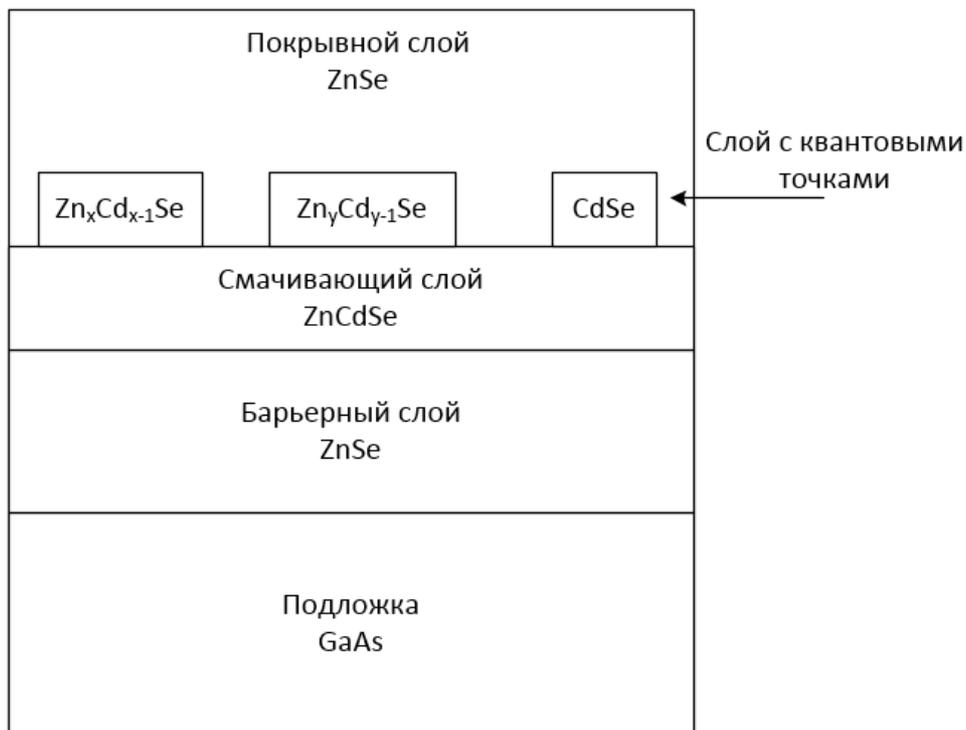


Рис. 2. Структура образца с квантовыми точками

На подложке (100) GaAs выращивался буферный слой ZnSe, затем из смачивающего слоя ZnCdSe формировался слой квантовых точек ZnCdSe с разным содержанием Cd. Затем осаждался покровный слой ZnSe. Подробности роста структуры описаны в [3]. Для уточнения особенностей формирования КТ исследовалась фотолюминесценция структуры.

Измерение фотолюминесценции происходило при постоянной температуре 295 K. Возбуждение осуществлялось с помощью синего полупроводникового лазера с длиной волны 455 нм. В качестве оптического детектора использовался ФЭУ-27.

При сканировании использовались следующие параметры:

- скорость сканирования: 50 нм/мин;
- шаг сканирования: 0.05 нм;
- ширина щели монохроматора: 4 мм.

Спектр фотолюминесценции гетероструктуры представлен на рисунке 3.

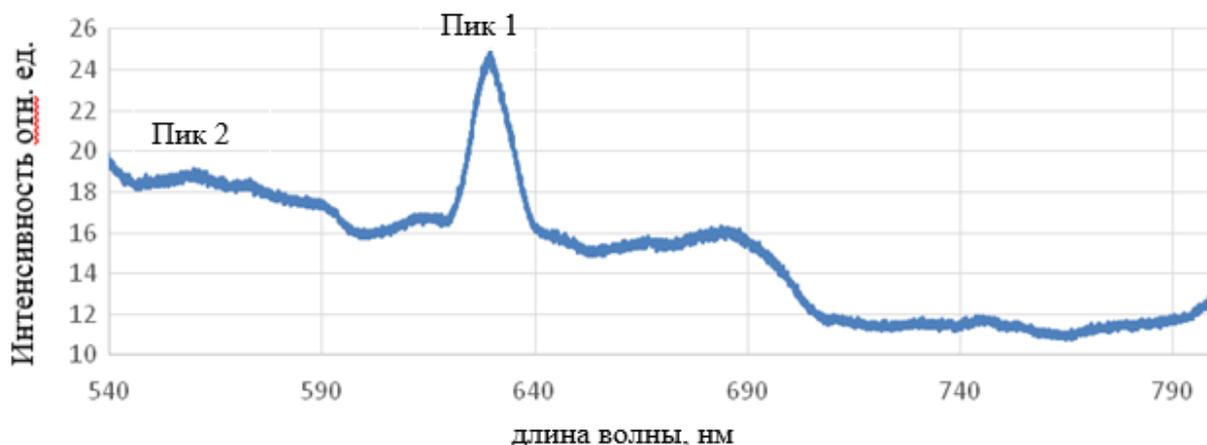


Рис. 3. Спектр фотолюминесценции гетероструктуры типа A2B6 с самоорганизованными квантовыми точками

На данном спектре фотолюминесценции имеются несколько пиков с разной интенсивностью. Пик 1, с наибольшей интенсивностью, лежит в диапазоне длин волн $620 \div 640$ нм с пиком на 630 нм. Данное излучение связано с излучательной рекомбинацией зона-зона в смачивающем слое, образующим квантовую яму ZnCdSe.

Пик 2 лежит в диапазоне длин волн $550 \div 600$ нм. Данное излучение желто – зеленого цвета связано с излучением квантовых точек.

Выводы

Были получены спектры фотолюминесценции гетероструктуры ZnSe/Cdse. Произведено апробирование установки по измерениям спектров люминесценции.

Благодарности

Работа выполнена с использованием оборудования РЦЗМкп при ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» (срп.rsreu.ru).

Библиографический список

1. Е.П. Трусов, В.Г. Литвинов/ Фотоприемное устройство для исследования спектров люминесценции полупроводниковых материалов и структур// Современные технологии в науке и образовании –СТНО-2018: сб. тр. междунар. Науч.-техн. Форума в 10 т. Т2/под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. Гос. Радиотехн. ун-т, 2018; Рязань.- с. 90-93.
2. Е.П. Трусов, В.Г. Литвинов/ Автоматизированный измерительный комплекс люминесценции на основе LabVIEW//Труды X всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур Том II С. 13-17.
3. Kozlovsky V.I., Sadofyev Yu.G., Litvinov V.G. E-beam irradiation effect on CdSe/ZnSe QD formation by MBE: deep level transient spectroscopy and cathodoluminescence studies //J. Phys.: Condens. Matter V.16. 2004. P.133-140.

УДК 621.315.592; ГРНТИ 29.19.04

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ SCALE-SPACE К ИССЛЕДОВАНИЮ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВОЙСТВ РЕАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

А.В. Алпатов*, Ю.В. Воробьев*, Е.В. Мараева**, Н.В. Рыбина*, Д.Ю. Трынов*, К. Халугарова**

*Рязанский государственный радиотехнический университет,

Россия, Рязань, trynovdmitrii@mail.ru

**Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

им. В.И. Ульянова (Ленина), Россия, Санкт-Петербург, kamilya_kh@mail.ru

Аннотация. В данной работе описано применение метода Scale-Space для исследования корреляционных свойств реальных поверхностей материалов. Проведено изучения рельефа поверхности материала, полученного после разных этапов обработки, методом Scale-Space.

Ключевые слова: корреляционные свойства, Scale-Space, рельеф поверхности, степень сглаживания.

SCALE-SPACE THEORY APPLICATION TO INVESTIGATE REAL SURFACE CORRELATION PROPERTIES

A.V. Alpatov*, Yu.V. Vorob'yev*, E.V. Maraeva**, N.V. Rybina*, D.Yu. Trynov*, K. Khalugarova**

*Ryazan State Radioengineering University,

Russia, Ryazan, trynovdmitrii@mail.ru

**Saint Petersburg Electrotechnical University 'LETI',

Russia, Saint Petersburg, kamilya_kh@mail.ru

Abstract. The scale-space theory to investigate complex surfaces correlation properties materials is described. The study of the surface relief of the material obtained after various processing steps, by the method Scale-Space.

Keywords: Correlation properties, scale-space theory, surface relief, scale parameter.

1. Введение

Поверхность материала играет большую роль в различных областях науки и техники. Рельеф поверхности отражает внутреннюю структуру материала. Изучая поверхность можно оценить ее гладкость, определить из каких частей она состоит, определить периодические составляющие, а также узнать, как изменяется материал после различных стадий обработки. Рельеф можно получить с помощью методов атомно-силовой, сканирующей туннельной, просвечивающей электронной, растровой электронной микроскопии.

Для получения информации о материалах по их изображениям поверхностей необходимы аналитические методы исследования корреляционных свойств. В ряде работ [1-5] продемонстрированы возможности использования для этих целей методов двухмерного флуктуационного анализа с исключительным трендом (2D Detrended Fluctuation Analysis – 2D DFA) и средней взаимной информации (СВИ).

Развитием данных методов является метод Scale-Space DFA [6-8]. Scale-Space позволяет оценить корреляционные свойства структуры материала со сложной поверхностью.

2. Методика Scale-Space DFA

Методика исследования поверхностей материалов с помощью Scale-Space DFA заключается в следующем:

- 1) получение изображения рельефа поверхности с помощью методов зондовой микроскопии;
- 2) обработка изображения поверхности методом Scale-Space;
- 3) построение флуктуационных функций.

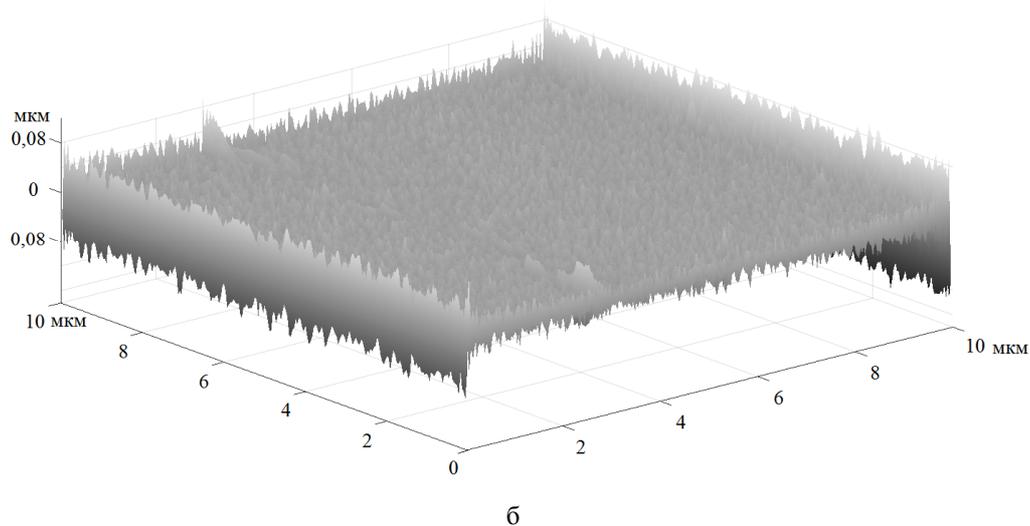
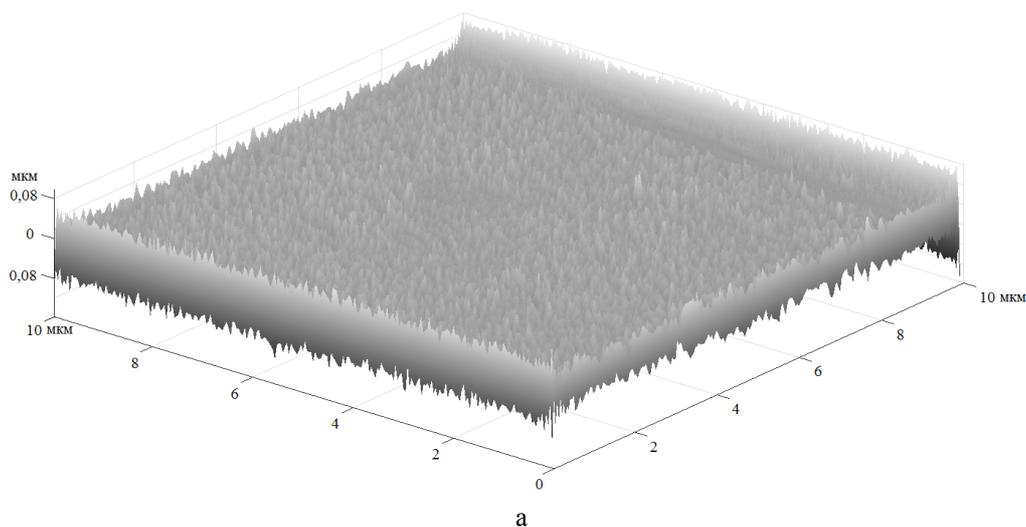
Обработка изображения поверхности заключается в его разложении по масштабам в базисе функции Лапласиана, т.е. при различной степени сглаживания. Это позволяет рассматривать особенности поверхности (корреляционные векторы) в низкочастотных и высокочастотных областях.

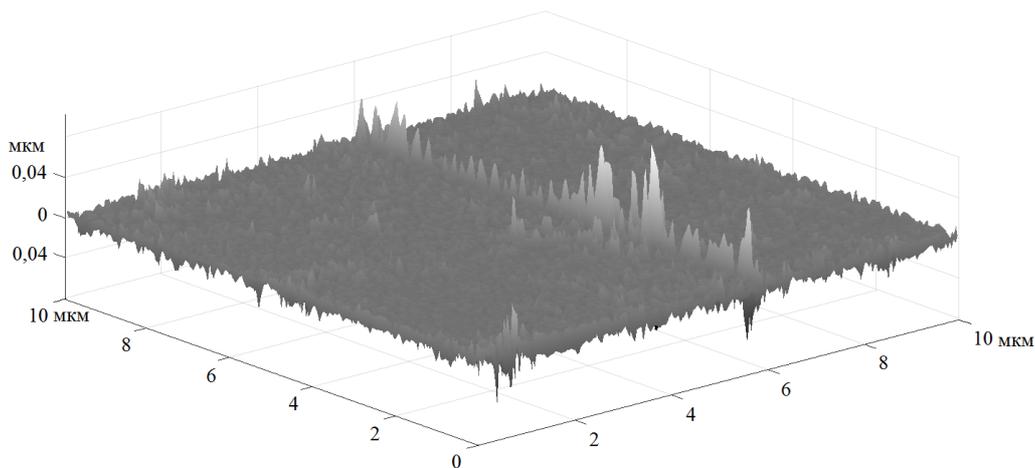
Построение флуктуационных функций при различных масштабах позволяет определить значения скейлингового показателя и корреляционного вектора, на основании которых можно получить необходимую информацию о сложной структуре поверхности.

3. Исследование реальных поверхностей

В качестве экспериментальных поверхностей были взяты образцы гидроксиапатита кальция (ГАП). Порошок гидроксиапатита синтезировался методом гидрохимического осаждения. Далее полученный порошок подвергся термической обработке в муфельной печи при температурах 300 и 600 °С.

Изображение поверхности было получено с помощью сканирующего туннельного микроскопа (рис. 1). Размер поверхности образца составляет 10*10 мкм.





в

Рис. 1. 3D-изображение поверхностей образцов: а – без термообработки; б – с температурой обработки $T=300^{\circ}\text{C}$; в – с температурой обработки $T=600^{\circ}\text{C}$

Графики флуктуационных функций для данных структур представлены на рисунках 2, 3 и 4. Кривые на графиках флуктуационной функции соответствуют различным степеням сглаживания. Это позволяет рассматривать сложные структуры, образованные множеством периодических составляющих, т.е. чем ниже сглаживание, тем ярче выражаются высокочастотные составляющие. Таким образом, можно производить фильтрацию поверхности.

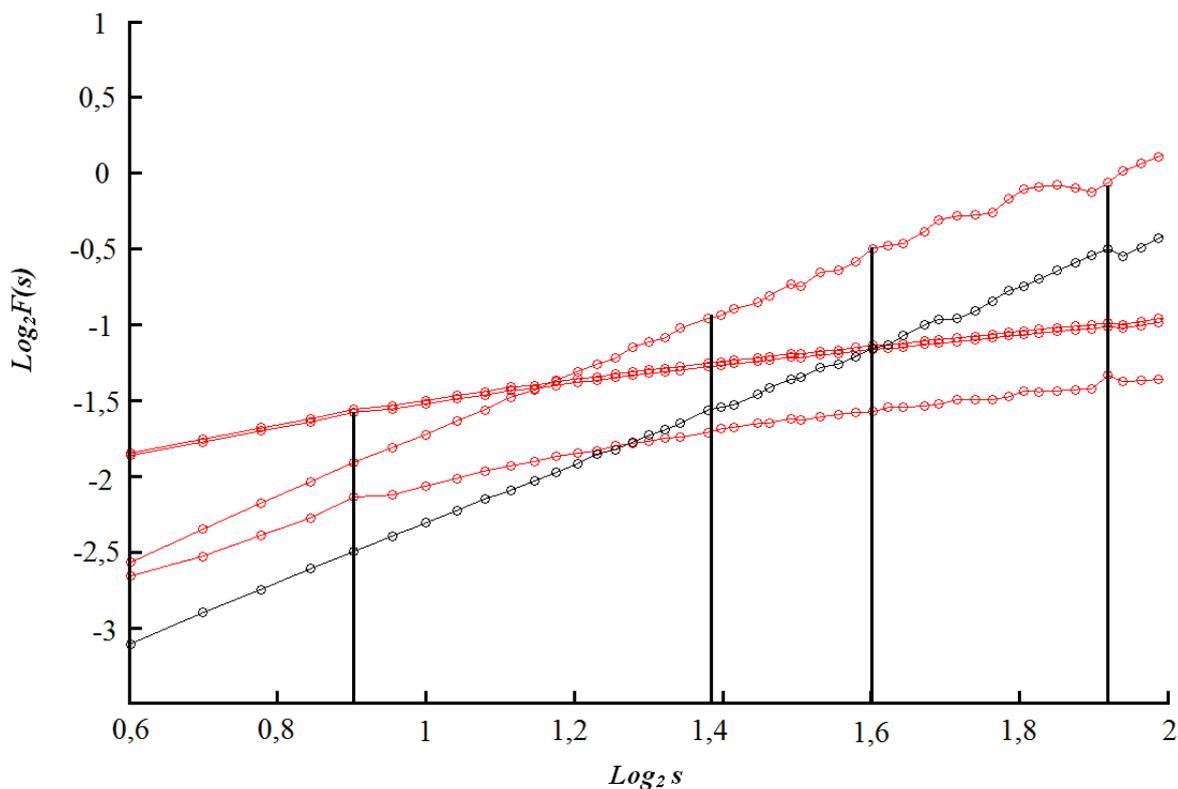


Рис. 2. Зависимость флуктуационной функции от масштаба для образца без термообработки

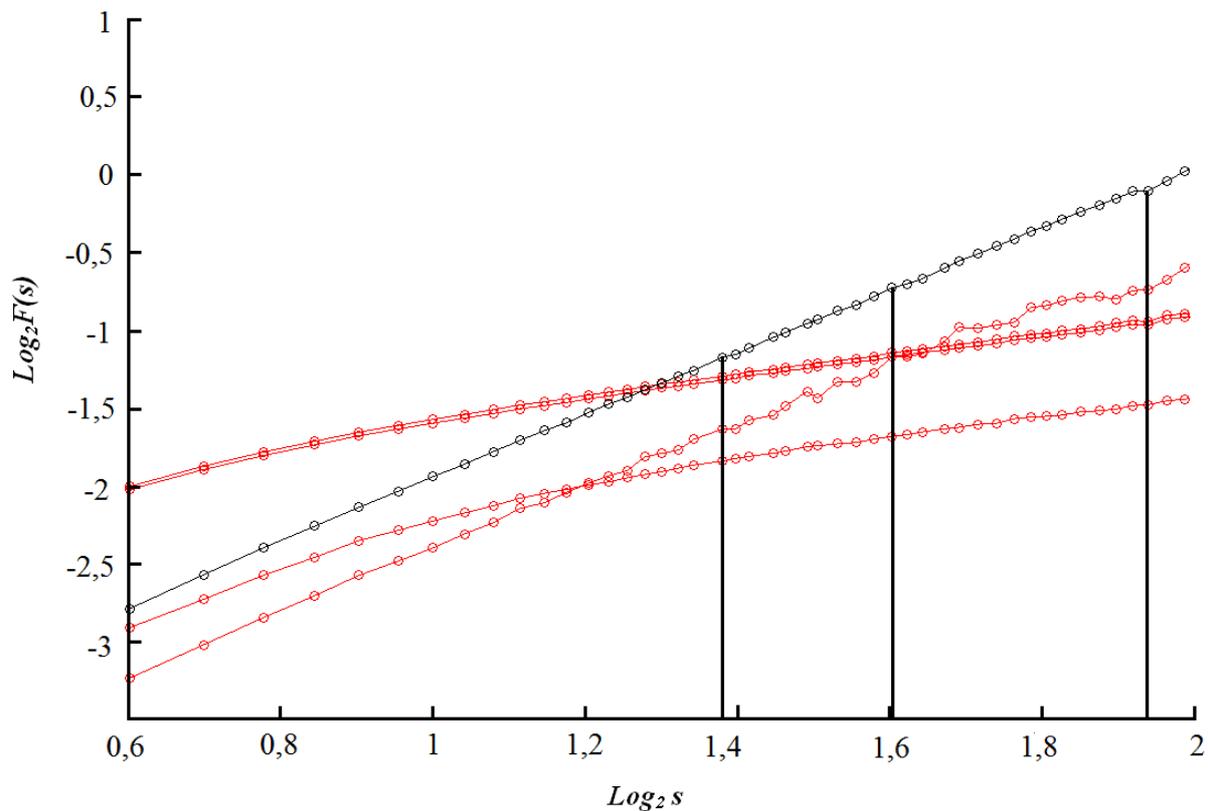


Рис. 3. Зависимость флуктационной функции от масштаба для образца с температурой обработки $T=300^\circ\text{C}$

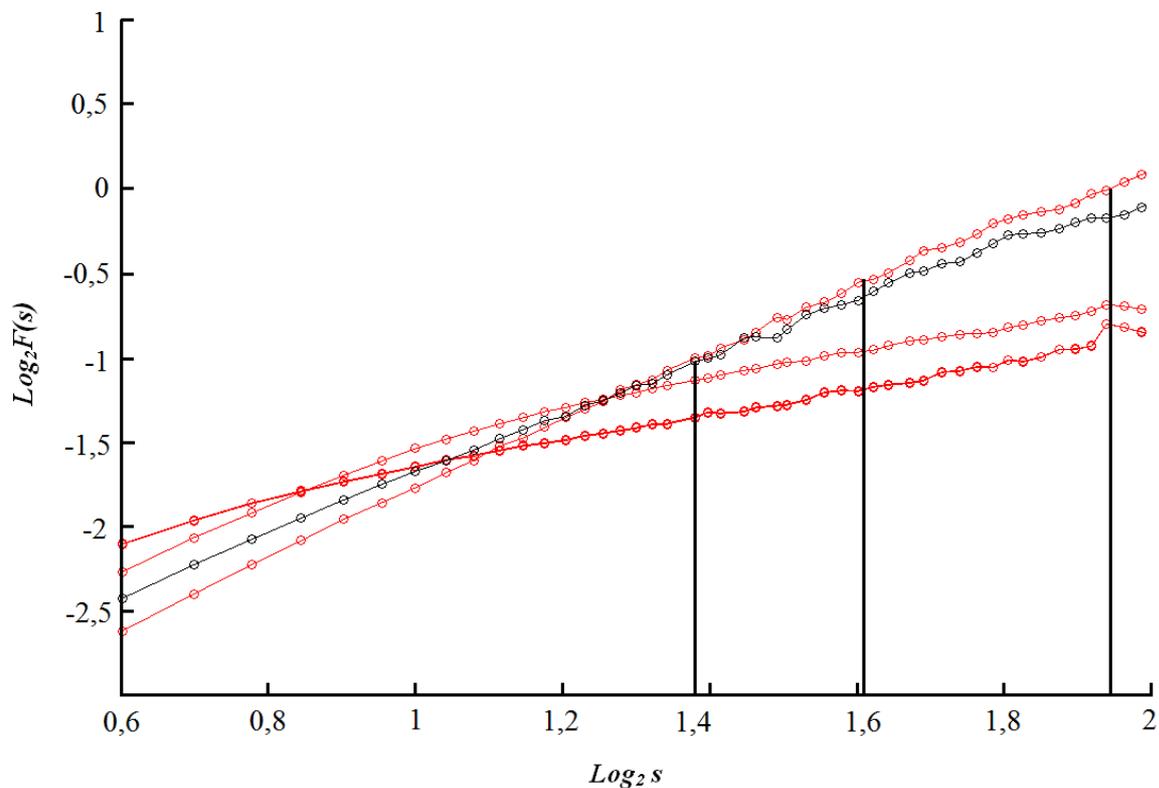


Рис. 4. Зависимость флуктационной функции от масштаба для образца с температурой обработки $T=600^\circ\text{C}$

На графиках флуктационной функции наблюдаются перегибы на разных участках кривых. Наличие нескольких перегибов на графике соответствует наличию нескольких гармонических составляющих (корреляционных векторов) в структуре образцов. С помощью метода Scale-Space DFA при различных степенях сглаживания удалось выявить корреляционные векторы на различных масштабах.

На первом графике для образца без термообработки наблюдается четыре перегиба. Значения корреляционных векторов составляет $0,318 \pm 0,039$; $0,918 \pm 0,039$; $1,592 \pm 0,039$ и $3,227 \pm 0,039$ мкм соответственно. По сравнению с исследуемой областью образца (10×10 мкм) данные корреляционные векторы соответствуют как высокочастотным, так и низкочастотным составляющим.

На последующих двух зависимостях отсутствует первый корреляционный вектор ($0,318$ мкм). Это позволяет сказать, что после обработки данного материала изменяется структура поверхности – исчезают структуры, имеющие малые размеры и высокую периодичность.

Оставшиеся три корреляционных вектора присутствуют на всех зависимостях флуктационной функции. Таким образом, метод Scale-Space DFA выделяет одинаковые корреляционные вектора в структуре материала, исследуемые по разным изображениям и разным частям поверхности. Это подтверждает работоспособность метода.

Заключение

Представлены результаты исследования реальных поверхностей методом Scale-Space DFA. В качестве реальных образцов исследовался гидроксипатит кальция. Показано, что методика Scale-Space позволяет оценивать структуру реальных поверхностей путем расчета корреляционных векторов. Было выявлено, что структура исследуемых образцов менялась в зависимости от режимов обработки.

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

Библиографический список

1. S.P. Vikhrov, T.G. Avacheva, N.V. Bodyagin, N.V. Grishankina, and A.P. Avachev Determination of the degree of ordering of materials' structure by calculating the information–correlation characteristics // Semiconductors, vol. 46, No. 4, 2012.
2. A.V. Alpatov, S.P. Vikhrov, N.V. Grishankina Revealing the surface interface correlations in *a*-Si:H films by 2D detrended fluctuation analysis // Semiconductors, vol. 47, No. 3, 2013.
3. A.V. Alpatov, S.P. Vikhrov, N.V. Rybina Study of the correlation parameters of the surface structure of disordered semiconductors by the two-dimensional DFA and average mutual information methods // Semiconductors, vol. 49, No. 4, 2015.
4. A.V. Alpatov, S.P. Vikhrov, N.V. Vishnyakov, S.M. Mursalov, N.B. Rybin, N.V. Rybina On a combined approach to studying the correlation parameters of self-organizing structures // Semiconductors, vol. 50, No. 1, 2016.
5. A.V. Alpatov, S.P. Vikhrov, A.G. Kazanskii, V.L. Lyaskovskii, N.B. Rybin, N.V. Rybina, P.A. Forsh Study of the correlation properties of the surface structure of nc-Si/*a*-Si:H films with different fractions of the crystalline phase // Semiconductors, vol. 50, No. 5, 2016.
6. Witkin A. P. Scale-space filtering // Proc. 8th Int. Joint Conf. Art. Intell., 1983.
7. Koenderink J.J. The structure of images // Biol. Cyb. 1984.
8. Lindeberg T. Discrete derivative approximations with scale-space properties: A basis for low-level feature extraction // J. of Mathematical Imaging and Vision. 1993.

УДК 621.315.592; ГРНТИ 29.19.04

ВЫДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ПРИЗНАКОВ ТЕКСТУР ПОВЕРХНОСТЕЙ**В.С. Филяревич, А.В. Алпатов***Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, filyarevicv95@mail.ru*

Аннотация. В данной работе описаны различные признаки текстуры. Дано описание методов с помощью которых можно выделить те или иные признаки и показан классификатор текстур.

Ключевые слова: текстура, изображение, признак, анализ, SVD, LBP

ISOLATION OF LOCAL SIGNS OF SURFACE TEXTURES**V.S. Filyarevich, A.V. Alpatov***Ryazan State Radio Engineering University,
Russia, Ryazan, filyarevicv95@mail.ru*

Abstract. This paper describes various features of the text. A description is given of the methods with the help of which it is possible to select certain signs and a texture classifier is shown.

Keywords: texture, Image, Feature, Analysis, SVD, LBP.

1. Необходимость выделения локальных признаков текстуры

Текстура является важной характеристикой визуальной информации, которая используется зрительной системой человека и современными системами машинного зрения.

Невзирая на повсеместное наличие текстур в изображениях и их важность, формального метода к описанию текстуры и строгого её определения на данный момент не существует, и методики различения текстур, в основном, разрабатываются отдельно для каждого конкретного случая.

Текстура, в широком смысле – это какой-то участок изображения, но не любой, а только тот, который имеет однородные статистические характеристики. Поэтому текстуру можно и необходимо описывать несколькими признаками. Под признаками текстуры имеются в виду характерные свойства, общие для всех текстур данного класса. Эти признаки играют решающую роль для их классификации и разделение изображения на отдельные области.

Текстура является характеристикой пространственной организации изменения интенсивности поверхности объекта и количественно определяет такие свойства, как грубость, гладкость, регулярность зернистость и т.д. К описанию текстуры основными подходами являются статистические, спектральные и структурные методы. Для более подробного рассмотрения необходимо составить систему признаков. Таких признаков существует очень много [1].

2. Система текстурных признаков**Признаки текстуры, основанные на измерении пространственных частот**

Автокорреляционная функция

$$A(\xi, \eta; j, k) = \frac{\sum_{m=j-w}^{j+w} \sum_{n=k-w}^{k+w} f(m, n) f(m - \xi, n - \eta)}{\sum_{m=j-w}^{j+w} \sum_{n=k-w}^{k+w} [f(m, n)]^2}. \quad (1)$$

Она вычисляется в окне размером $(2W+1) \cdot (2W+1)$ для каждой точки изображения (j, k) и при смещении $(\xi, \eta) = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$ Здесь $f(m, n)$ – яркость одного пикселя в определённой точке (m, n) .

При конкретном сдвиге (ξ, η) большие значения $A(\xi, \eta, j, k)$ будут соответствовать области крупнозернистой текстуры, получается, что размер зерна текстуры пропорционален ширине автокорреляционной функции, которая по определению является вторым моментом:

$$T(j, k) = \sum_{\xi=-T}^T \sum_{\eta=-T}^T \xi^2 \eta^2 A(\xi, \eta, j, k). \quad (2)$$

Исходя из этого соотношение (2) может служить признаком, который характеризует зернистость текстуры. Также можно использовать систему признаков, основанную на анализе спектра Фурье изображения $f(x, y)$:

$$F(u, v) = \iint_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) e^{-2\pi i(ux - vy)} dx dy. \quad (3)$$

Признаки, основанные на статистических характеристиках

В качестве этих признаков можно использовать статистические моменты пространственных распределений, которые вычисляются как меры однородности по одномерной гистограмме значений сигналов (характеристики 1-го порядка) и по двумерным гистограммам значений сигналов (характеристики 2-го порядка). Таким образом, для численных оценок текстуры поверхности по одноимённой гистограмме можно использовать такие характеристики:

k -й начальный элемент

$$T_1^k = n^{-2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [f(i, j)]^k, \quad (4)$$

энтропию

$$T_2 = - \sum_{g=1}^n F(g) \log_{10} F(g), \quad (5)$$

энергию

$$T_3 = \sum_{g=0}^{N-1} [F(g)]^2, \quad (6)$$

вариацию

$$T_4 = \sum_{g=0}^{N-1} (g - \mu)^2 F(g), \quad (7)$$

где n – размер скользящего окна ($n=2W+1$) в пикселях;

$f(i, j)$ – яркость пикселя в точке (i, j) скользящего окна;

N – количество градаций яркости изображения;

$F(g)$ – количество пикселей с яркостью g ;

μ – среднее в окне ($T_{\text{мом1}}^1$).

Оценки текстуры по формулам 4-7, которые вычисляются по одноимённой гистограмме частот, не учитывают взаимного расположения пикселей расположенных по соседству в скользящем окне и могут оценивать только групповые свойства пикселей. То есть эти оценки актуальны только для описания текстур с невыраженной пространственной регулярностью.

Признаки, основанные на описании структурных элементов

В настоящее время всё большее развитие получает структурный подход к описанию текстур, он основан на анализе формы и размеров элементов, которые составляют текстуру, вычислении локальных признаков и анализе распределения элементов текстуры по полю изображения.

Можно взять признаки, базирующиеся на длинах серий. Длина серии текстуры – это число элементов строки раstra, имеющих постоянную яркость. Пусть $C_\rho(i, j)$ это количество линий, длина которых равна j и они ориентированы в направлении ρ . Эти линии состоят из точек изображения, уровни интенсивности которых лежат в i -м интервале. Тогда можно выделить следующие признаки.

Вес линий, имеющих постоянную оптическую плотность:

$$T_5 = \frac{\sum_{i,j} j^2 C_\rho(i, j)}{\sum_{i,j} C_\rho(i, j)}. \quad (8)$$

Этот признак характеризуется тем, что для любого уровня серого вес каждой линии увеличивается по мере увеличения длины.

Распределение уровня серого:

$$T_6 = \frac{\sum_i (\sum_j C_\rho(i, j))^2}{\sum_{i,j} C_\rho(i, j)}. \quad (9)$$

Этот признак имеет минимум в тех случаях, когда число линий постоянной оптической плотности равномерно распределено по уровням серого.

Относительное число линий постоянной оптической плотности:

$$T_7 = \frac{\sum_i C_\rho(i, j)}{N_x N_y}. \quad (10)$$

Значение признака максимально, когда все линии имеют малые длины [2].

3. Методики анализа изображений

Иерархический кластерный анализ

Также известный как иерархическая кластеризация, является популярным методом кластерного анализа в исследованиях больших данных и интеллектуального анализа данных с целью установления иерархии кластеров. Таким образом, это метод пытается сгруппировать субъектов с похожими характеристиками в кластеры. Существует два типа используемых подходов: агломерационный и разделительный.

Агломеративная кластеризация или агломеративное вложение. Работает снизу вверх. То есть каждый объект изначально рассматривается как одноэлементный кластер (лист). На каждом этапе алгоритма два наиболее похожих кластера объединяются в новый более крупный кластер (узлы). Эта процедура повторяется до тех пор, пока все точки не станут членами

только одного большого кластера (корня). Результатом является дерево, которое можно построить в виде дендрограммы.

Разделительная иерархическая кластеризация или анализ разделения, которая работает сверху вниз. Она начинается с корня, в котором все объекты включены в один кластер. На каждом шаге итерации наиболее разнородный кластер делится на два. Процесс повторяется до тех пор, пока все объекты не окажутся в своем собственном кластере [3].

Сингулярное разложение (SVD)

Если R - матрица большого размера $N \cdot M$, но малого ранга f (в частности, разреженные матрицы часто бывают малого ранга), её можно разложить в произведение матрицы $N \cdot f$ и матрицы $f \cdot M$, тем самым резко сократив число параметров, с $N \cdot M$ до $(N + M)f$.

SVD очень широко употребляется в машинном обучении. Классический пример применения SVD – шумоподавление, например, в изображениях. Рассматривается чёрно-белое изображение как матрица X размера $N \cdot M$, элементы которой это интенсивности каждого пикселя. Далее выбирается f столбцов пикселей из изображения, которые считаются репрезентативными и каждый из оставшихся столбцов представляется в виде линейной комбинации этих. В результате, после нахождения оптимального представления каждого столбца, исходная матрица будет представляться в виде произведения $X = A \cdot Y$ матриц размера $N \cdot f$ и $f \cdot M$. То есть приближение матрицу X матрицей малого ранга f .

Локальные бинарные шаблоны (LBP).

В этом методе вычисляется локальное представление текстуры. Это локальное представление строится путем сравнения каждого пикселя с окружающей его окрестностью пикселей.

Первым шагом в создании дескриптора текстуры LBP является преобразование изображения в оттенки серого. Для каждого пикселя в изображении в градациях серого выбирается окрестность размера r , окружающую центральный пиксель. Затем для этого центрального пикселя вычисляется значение LBP и сохраняется в выходном двумерном массиве с той же шириной и высотой, что и входное изображение.

Базовый вариант LBP представляет собой 8-битное кодовое слово, бинарное представление которого основано на анализе круговой окрестности единичного радиуса кодируемого пикселя изображения. LBP - признак вычисляется в соответствии с выражением:

$$LBP = \sum_{i=0}^7 g(I_p, I_c) 2^i, \quad (11)$$

где I_c – значение интенсивности центрального пикселя в окрестности, для которого рассчитывается значение признака;

I_p – значение интенсивности p -го элемента локальной круговой окрестности, $p=0,1,..7$.

4. Классификация текстур

Разнообразие текстурных признаков позволяет создать классификатор текстур, схема которого представлена на рисунке 1.

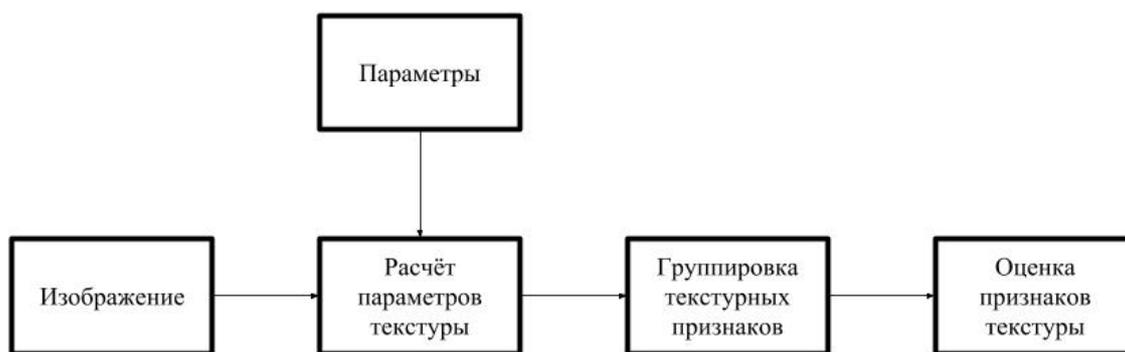


Рис. 1. Классификатор текстур

В данном классификаторе имеется база определённых параметров, через которую пропускается исходное изображение текстуры. Проводится расчёт изображения по всем необходимым параметрам, из которых уже выделяются необходимые текстурные признаки и происходит оценка наиболее явного из них.

На этапах производства и обработки у материалов формируются определённых текстурные свойства. Такие изменения вызывают анизотропию свойств, что отрицательно сказывается на исходном продукте, т.к. сильное изменение свойств увеличивает процент брака.

Данная схема позволит контролировать текстуры на всех этапах производства, поскольку она имеет большую базу параметров и за счёт этого может давать качественную оценку признаков.

Заключение

В настоящее время научных работ, связанных с анализом текстур изображений, становится всё больше. Появляются новые методы, в описании изображений вводятся дополнительные признаки. Такое разнообразие связано как с очень широким диапазоном рассматриваемых текстур, так и с различными характерами выполняемых задач. Из-за этого очень многие методы узко направлены и подходят только для определённых групп изображений.

Однако если классифицировать текстуры по различным признакам, которые основаны на разных методах, то это даст количественную оценку изображению текстуры и позволит отнести её к тому или иному классу. Чем больше разнообразие признаков, тем качественнее можно разбить оценку изображения на множество составляющие и дать её точное описание.

Библиографический список

1. Studylib/Метод быстрого вычисления LBP-признаков области интереса [Электронный ресурс] <https://studylib.ru/doc/2287099/metod-bystrogo-vychisleniya-lbp-priznakov-oblasti-interesa> (10.03.2019).
2. Колодникова, Н.В. Обзор текстурных признаков для задач распознавания образов / Н.В. Колодникова // Доклады ТУСУРа. – 2004. – №1. - С. 113-124.
3. NCBI/Visual perception of procedural textures: identifying perceptual dimensions and predicting generation models [Электронный ресурс] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4481328/> (10.03.2019).

УДК 538.915; ГРНТИ 29.19.31

МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ МЕХАНИЗМОВ ПЕРЕНОСА НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В СТРУКТУРЕ МЕ-А-SI:H

М.Ю. Шувалов, В.В. Гудзев, Н.В. Вишняков

Рязанский государственный радиотехнический университет,

Российская Федерация, Рязань, mshuvalove2@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается алгоритм идентификации механизмов токопереноса в структуре Ме-а-Si:H. Приведены результаты аппроксимации экспериментальной вольт-амперной характеристики структуры Au-а-Si:H-Nb.

Ключевые слова: идентификация, механизмы токопереноса, аппроксимация.

IDENTIFICATION METHODOLOGY OF MIGRATION MECHANISMS OF CHARGE CARRIERS IN STRUCTURE ME-A-SI:H.

M.Yu. Shuvalov, V.V. Gudzev, N.V. Vishnyakov

Ryazan State Radio Engineering University,

Russia, Ryazan, mshuvalove2@mail.ru

The summary. The article discusses the identification algorithm of current transfer mechanisms in structure Me-a-Si:H. The results of the approximation of the experimental current-voltage characteristic of the Au-a-Si:H-Nb structure are presented.

Keywords: identification, current transfer mechanisms, approximate.

Электрические свойства структур на основе a -Si:H зачастую невозможно описать одним механизмом проводимости, и в зависимости от условий могут доминировать разные механизмы.

В структуре Ме- a -Si:H можно выделить следующие основные механизмы переноса носителей заряда: туннельная эмиссия; токи, ограниченные пространственным зарядом (ТОПЗ); генерационно-рекомбинационная эмиссия; надбарьерная эмиссия; омическая проводимость [1].

Механизмы переноса носителей заряда можно распознать по виду вольт-амперной зависимости и температурной зависимости тока насыщения. Предложенный алгоритм идентификации включает в себя четыре основных этапа.

На первом этапе вводятся данные вольт-амперной характеристики (ВАХ) и температурной зависимости тока насыщения [2].

На следующем этапе осуществляется проверка вводимых значений. Из анализа данных значений выбирается оптимальный статистический метод для последующей аппроксимации функции $J = F(U)$ (ВАХ).

Среди классических статистических методов можно выделить: регрессионный метод; метод решения задач неполного ранга; робастный метод; регуляризирующий метод наименьших квадратов. Данные подходы позволяют алгоритму идентификации механизма переноса заряженных частиц работать корректно для любого набора экспериментальных данных.

На третьем этапе по виду аппроксимирующей функции (линейная, квадратичная, экспоненциальная), которая наиболее точно описывает экспериментальные данные, определяется вид экспериментальной ВАХ. Исходя из этого, можно определить доминирующие механизмы переноса заряженных частиц через контакт Ме- a -Si:H. При линейной зависимости доминирует омический механизм, при квадратичной – ТОПЗ, при экспоненциальной – надбарьерная эмиссия, туннельный ток, генерационно-рекомбинационная эмиссия.

На четвертом этапе происходит проверка исследуемой структуры на наличие в ней одного из трех механизмов токопереноса, имеющих экспоненциальную зависимость ВАХ: надбарьерная эмиссия, генерация – рекомбинация, туннельная эмиссия. Для того чтобы выделить один из типов переноса носителей заряда необходимо ввести в базу данных и проанализировать дополнительную информацию в виде температурной зависимости $J = F(1/T)$. Данная зависимость строится в логарифмическом масштабе и по тангенсу угла наклона по-

лученной функции ($\text{tg}(\gamma)$) определяется один из трех механизмов переноса заряженных частиц в данной структуре.

Алгоритм идентификации схематично представлен на рисунке 1.

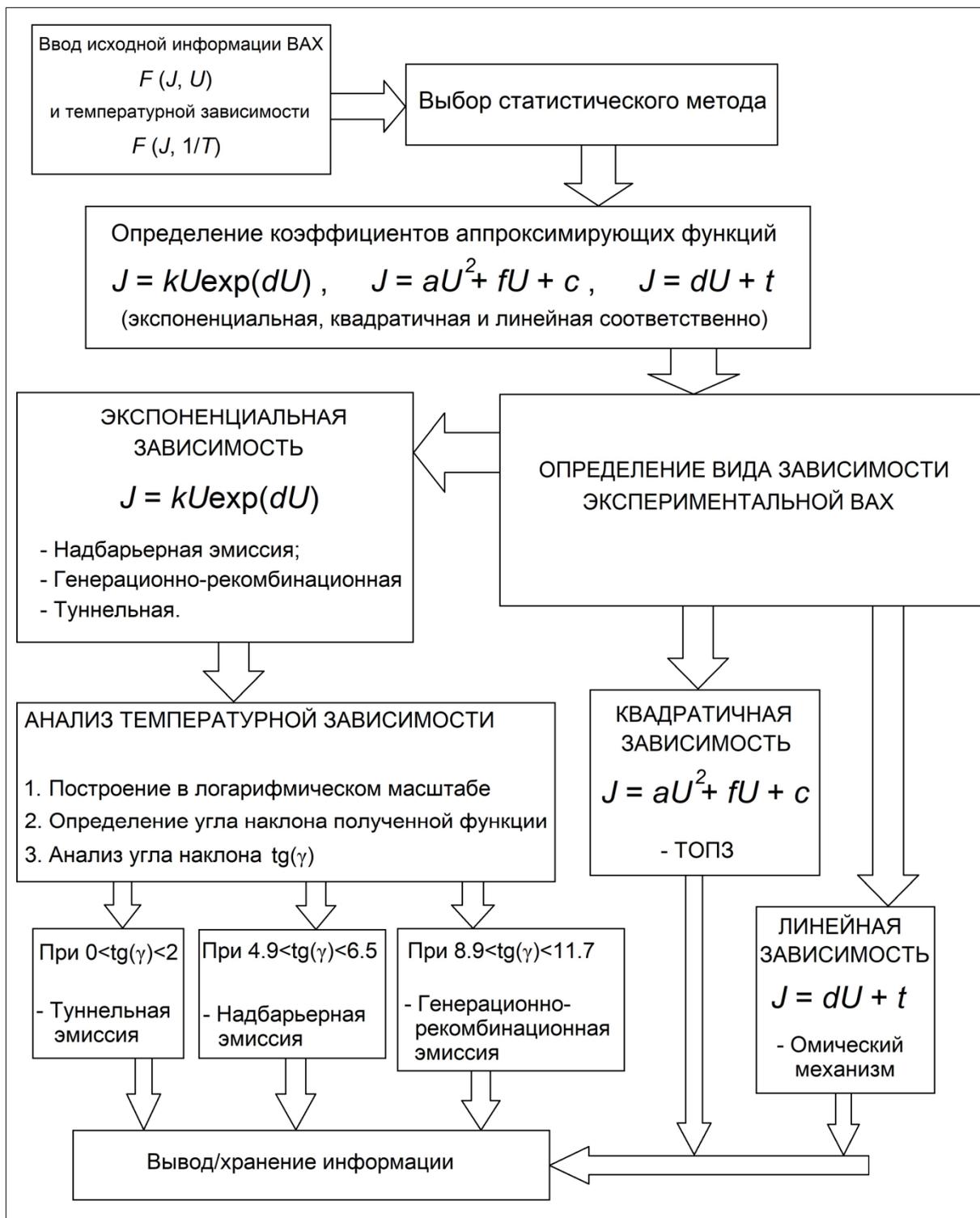


Рис. 4. Алгоритм идентификации механизмов переноса носителей заряда

В качестве апробации работы алгоритма была проведена аппроксимация экспериментальных данных ВАХ для барьерной структуры Au-a-Si:H-Nb, полученной методом высокочастотного ионоплазменного распыления кремниевой мишени.

Результаты линейной, квадратичной и экспоненциальной аппроксимаций приведены на рисунках 2, 3 и 4 соответственно.

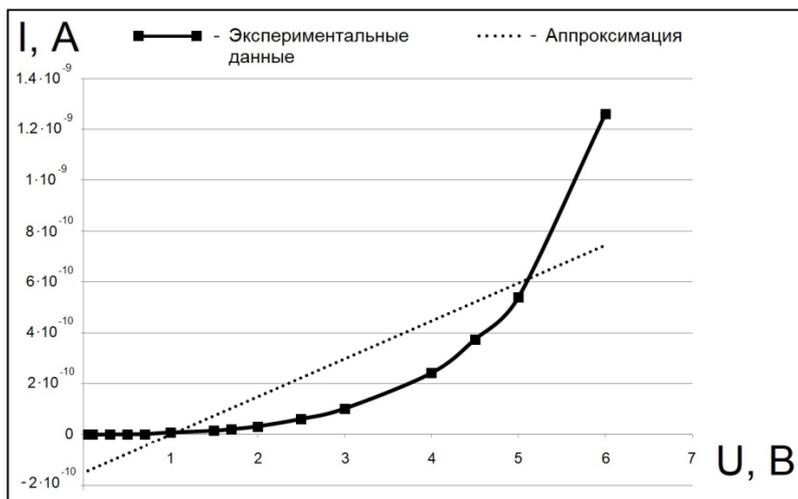


Рис. 5. Линейная аппроксимация экспериментальной ВАХ структуры Au-a-Si:H-Nb

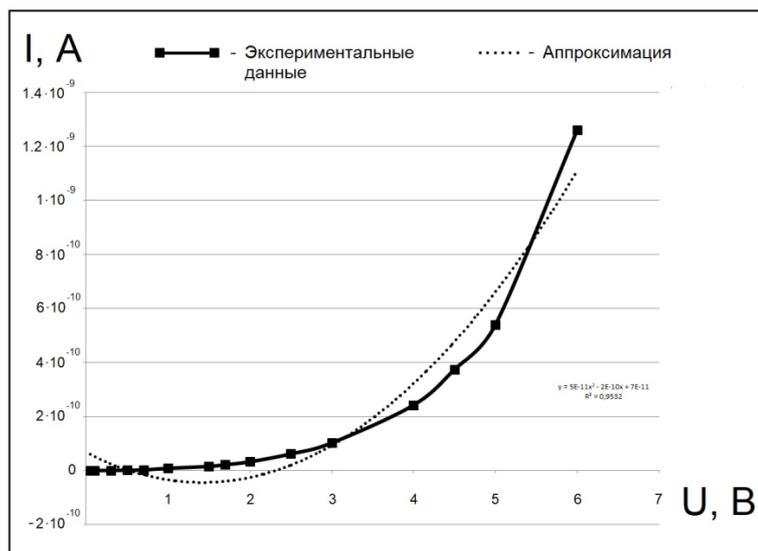


Рис. 6. Квадратичная аппроксимация экспериментальной ВАХ структуры Au-a-Si:H-Nb

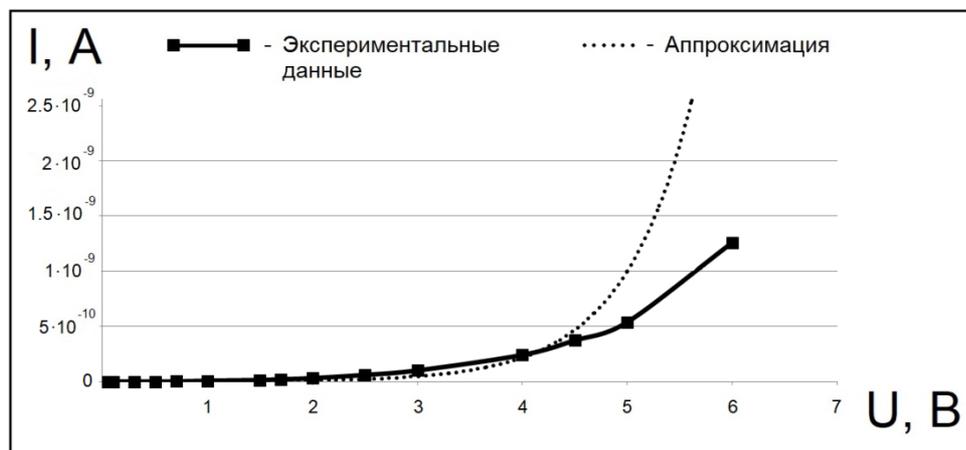


Рис. 7. Экспоненциальная аппроксимация экспериментальной ВАХ структуры Au- α -Si:H-Nb

Согласно полученным результатам, при линейной аппроксимации коэффициент достоверности R^2 составил 0,7052; при квадратичной аппроксимации – 0,9532; при экспоненциальной аппроксимации – 0,8754. Исходя из этого, можно сделать вывод, что в данной структуре доминирующим механизмом токопереноса является механизм ТОПЗ.

Выводы

Таким образом, с помощью предложенного алгоритма можно определить доминирующие механизмы токопереноса в барьерных структурах на основе α -Si:H, что позволит более детально понять и объяснить физику процессов, происходящих в них.

Библиографический список

1. Вихров С.П., Вишняков Н.В., Мишустин В.Г., Аношкин К.О. Токоперенос через барьер на контакте металл - некристаллический полупроводник: особенности расчета прямых и обратных ВАХ. // Вестник РГРТУ. Вып. 22. Рязань, 2007, С. 86-88.
2. Шувалов М.Ю., Гудзев В.В. Идентификация механизмов переноса носителей заряда в наноструктурированных материалах// Труды X Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению “Диагностика наноматериалов и наноструктур”: сборник. Рязань: РГРТУ, 2018. Т. III. С. 58-60.

УДК 538.915; ГРНТИ 29.19.31

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЛУБОКИХ УРОВНЕЙ НА ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

А.С. Тюшин, В.В. Гудзев, В.Г. Литвинов

Рязанский государственный радиотехнический университет
Российская Федерация, Рязань, atushin95@gmail.com

Аннотация. Проведен анализ параметров глубоких уровней в транзисторных кремниевых структурах, сформированных в составе тестовой ячейки, установлена взаимосвязь между наличием в структурах глубоких уровней и основными параметрами биполярных транзисторов, а также их усилительными свойствами.

Ключевые слова: дефекты, глубокие уровни, глубокие центры, РСГУ, биполярные транзисторы.

ANALYSIS OF THE IMPACT OF DEEP LEVELS ON BASIC PARAMETERS OF BIPOLAR TRANSISTORS

A.S.Tyushin, V.V.Gudzev, V.G.Litvinov

Ryazan State Radioengineering University

Russian Federation, Ryazan, atushin95@gmail.com

Annotation. The analysis of the parameters of deep levels in transistor silicon structures formed in the composition of the test cell is carried out; the relationship between the presence of deep levels in the structures and the main parameters of bipolar transistors, as well as their amplifying properties, is established.

Keywords: defects, deep levels, deep centers, DLTS, bipolar transistors.

Выполнение различных технологических операций при формировании барьерных структур на основе кристаллических полупроводников неизбежно приводит к появлению в структурах дефектных состояний. Такие состояния зачастую обладают электрической активностью, которая позволяет оказывать влияние на движение носителей заряда, проходящих через такие структуры. Подобные состояния, оказывающие существенное влияние на генерационно-рекомбинационные процессы в области пространственного заряда барьерных структур, называют глубокими центрами (ГЦ). С точки зрения зонной теории ГЦ создают в запрещенной зоне полупроводника локализованные энергетические состояния – глубокие уровни (ГУ) [1]. ГУ могут проявлять как донорные, так и акцепторные свойства.

Как было отмечено ранее, появлению ГЦ в большинстве случаев способствуют различные технологические операции. Так, в [2] показано, что при создании диодов Шоттки операция плазмо-химического травления провоцировала появление в структуре большого числа ГЦ; с другой стороны, структуры, созданные с проведением операции жидкостного химического травления совместно с отжигом, обладали наименьшей концентрацией глубоких уровней.

Природа появления ГУ в транзисторных структурах является схожей с природой появления ГУ в диодах Шоттки, однако их влияние на работу полупроводниковых приборов отличается. В отличие от диодных структур, в биполярных транзисторах ГУ проявляют свойства центров рекомбинации. Коэффициент передачи тока эмиттера α , который является одним из основных параметров биполярного транзистора, определяют по формуле[3]:

$$\alpha = 1 - \frac{x_d^2}{2 \cdot D_n \cdot \tau}, \quad (1)$$

где x_d – толщина области пространственного заряда;

D_n – коэффициент диффузии электронов в кремнии;

τ – время жизни носителей заряда в базе.

В свою очередь, τ определяется как:

$$\tau = (N_t \cdot V_{th} \cdot \sigma_n)^{-1}, \quad (2)$$

где N_t – концентрация ГЦ;

V_{th} – тепловая скорость электронов;

σ_n – сечение захвата ГЦ.

Коэффициент передачи тока базы β , определяющий усилительные свойства биполярных транзисторов, связан с коэффициентом α следующим соотношением:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}. \quad (3)$$

Таким образом, исходя из формул (1) – (3) сделан вывод, что увеличение концентрации ГЦ приводит к уменьшению времени жизни носителей заряда, что, в свою очередь, ведет к уменьшению коэффициента передачи тока эмиттера α и коэффициента передачи тока базы β , что негативно сказывается на усилительных свойствах биполярного транзистора. По этой причине задача контроля наличия ГУ в транзисторных структурах, а также анализ параметров таких ГУ и исследования их влияния на транзисторные структуры является актуальной задачей.

В настоящей работе представлены результаты исследования транзисторных структур, разработанных в составе тестовой ячейки ТЯ-52. Исследованные структуры имеют отличия по степени стравливания слоя окисла: у первого образца был удален слой боро-силикатного стекла (БСС); у второго образца, помимо слоя БСС, был стравлен слой SiO₂ до толщины 0,07 мкм; в третьем образце БСС и слой окисла отсутствовали полностью. Спектры ГУ для каждой структуры представлены на рисунке 1. В таблице 1 представлены основные параметры ГУ для исследованных структур [1]. Исследование транзисторных структур проводилось методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ).

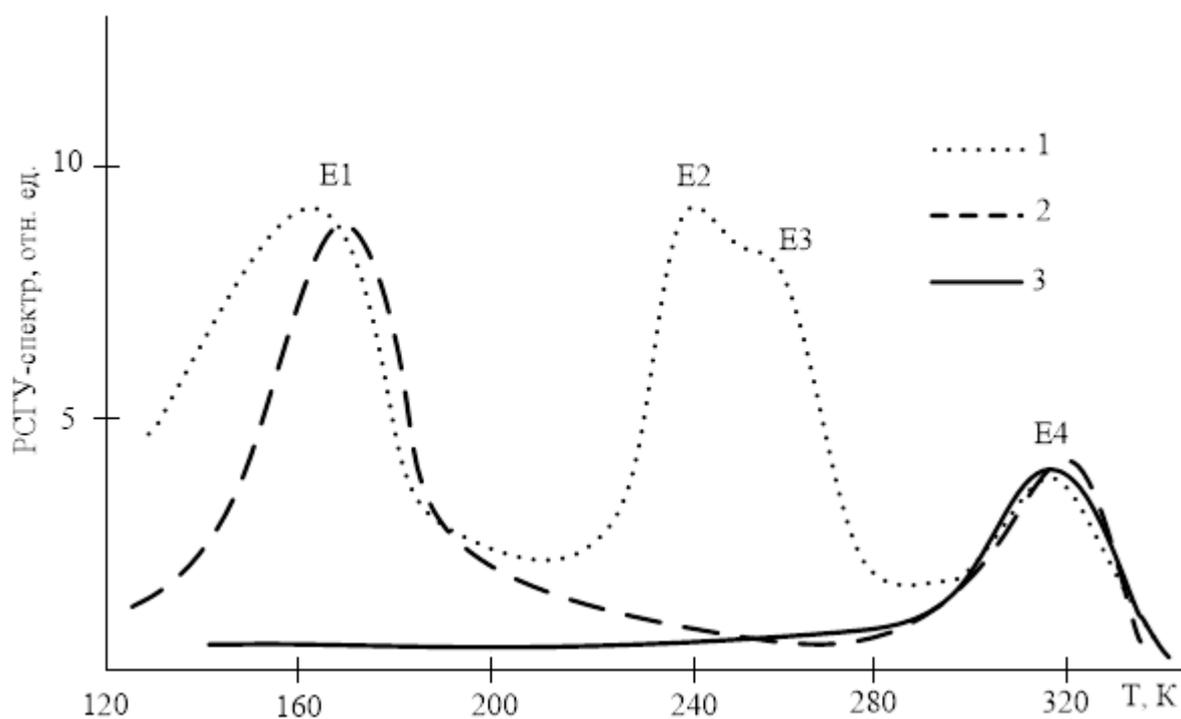


Рис. 1. РСГУ-спектры исследованных образцов: пунктирная линия соответствует 1-му образцу, штриховая – 2-му и сплошная – 3-му

Таблица 1. Основные параметры ГУ исследованных транзисторных структур

Нобр	Техн. базы	Концентрация глубоких центров Nt ,см-3				Сумм. Nt
		E1	E2	E3	E4	
1	БСС	1,2·10 ¹²	1,8·10 ¹²	2,9·10 ¹²	5·10 ¹¹	6,4·10 ¹²
2	0,07 мкм SiO ₂	1,1·10 ¹²	-	-	5,3·10 ¹¹	1,6·10 ¹²
3	SiO ₂	-	-	-	5,1·10 ¹¹	5,1·10 ¹¹
Et, эВ		0,3	0,41	0,44	0,55	

Анализ рисунка 1, а также анализ содержания таблицы 1 показал, что уменьшение толщины слоя окисла напрямую влияет на содержание ГЦ в исследованных структурах. Для ГУ E4 наблюдается изменение концентрации ГЦ, образующих ГУ в структуре.

В таблице 2 представлены результаты расчета основных параметров биполярных транзисторов с учетом влияния ГУ.

Таблица 2. Результаты расчета основных параметров биполярных транзисторов исследованных структур

Номер группы образцов	Время жизни носителей заряда, с	Коэффициент передачи тока эмиттера	Коэффициент передачи тока базы
1	$5,8 \cdot 10^{-4}$	0,975	40
2	$2,35 \cdot 10^{-3}$	0,983	57
3	$2,6 \cdot 10^{-3}$	0,981	52

Анализ результатов расчетов (таблица 2) показывает, что при снижении концентрации ГЦ от первой группы образцов ко второй наблюдается увеличение времени жизни носителей заряда, что, в свою очередь, приводит к увеличению коэффициента передачи тока эмиттера и коэффициента передачи тока базы. Для группы образцов №3 характерно ухудшение рассчитанных параметров. Рассчитанные значения коэффициента передачи тока базы β достаточно верно коррелируют с полученными ранее фактическими значениями этого параметра.

Заключение

В настоящей работе показана взаимосвязь между присутствием в транзисторных структурах ГЦ и создаваемыми ими ГУ и изменением усилительных свойств биполярных транзисторов. Доказано, что увеличение концентрации ГЦ приводит к уменьшению времени жизни носителей зарядов в базе, что, в свою очередь, приводит к уменьшению коэффициента передачи тока базы β , что является негативным в структуру ГУ. Достоверность расчетов основана на теории Шокли-Холла-Рида, а также на аппарате физики полупроводников, применяемом для расчета основных параметров биполярных транзисторов.

Библиографический список

1. Гудзев В. В. Исследование глубоких энергетических уровней в барьерных структурах на основе кристаллического и аморфного гидрогенизированного кремния / Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, Рязань, 2015. 168 с.
2. Тюшин А.С., Гудзев В.В. Исследование энергетического спектра глубоких уровней в барьерных структурах Al/n-Si / Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2017 [текст]: сб. тр. междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.2./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – РГРТУ, Рязань, 2017, с 163 – 166.
3. Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем: пер. с англ. М.: Мир, 1989. 630 с.

СЕКЦИЯ «ПРОМЫШЛЕННАЯ СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ»

УДК 621.387.132.22; ГРНТИ 47.14.05

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ АНОДА И УПРАВЛЕНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫМ ГАЗОРАЗРЯДНЫМ ПРЕРЫВАТЕЛЕМ ТОКА

Г.Е. Абрамова, А.А. Сerezhin, С.А. Круглов, К.Д. Агальцов

*Рязанский государственный радиотехнический университет,
Российская Федерация, Рязань, gal60874150@yandex.ru*

Аннотация. В работе описана разработка системы питания для газоразрядного прерывателя тока тиратронной конструкции, в частности для накала анода и системы управления, регулирующей подачу управляющих импульсов на сетку. Приводятся ее основные характеристики и особенности, а также достоинства и недостатки некоторых прерывателей тока.

Ключевые слова: газоразрядный прерыватель тока, индуктивный накопитель энергии, источник питания, предварительный накопитель энергии, схема управления.

DEVELOPMENT OF ANODA POWER SUPPLY AND CONTROL SYSTEM OF SPECIALIZED GAS-DISCHARGE CURRENT INTERRUPTER

G.E. Abramova, A.A. Serezhin, S.A. Kruglov, K.D. Agaltsov

*Ryazan State Radio Engineering University,
Russia, Ryazan, gal60874150@yandex.ru*

The summary. The paper describes the development of a power supply system for a gas-discharge current interrupter of a thyatron design, namely, for heating an anode and a control system that regulates the supply of control pulses to the grid. Their main characteristics and features, as well as the advantages and disadvantages of some current interrupters are given.

Keywords: gas discharge current interrupter, inductive energy storage, power supply, preliminary energy storage, control circuit.

С развитием научно-технического прогресса появились потребности в сверхмощных приборах и установках. Они применяются в качестве лабораторного оборудования, в источниках питания ускорителей частиц, в лазерном оборудовании для накачки лазеров, в экологии, в радиолокации и георадиолокации [1]. Также их активно используют в медицине, в горнодобывающей отрасли и нефтяной промышленности. Сфера применения данных установок огромна, что обуславливает экономическую целесообразность, востребованность и перспективность развития и изучения данной области.

Основными элементами высоковольтной аппаратуры, являются импульсные генераторы, работающие на высоких и сверхвысоких частотах. Такие генераторы строятся на основе общих принципов медленного накопления, удержания энергии в накопителе и передачи этой энергии в нагрузку за короткий промежуток времени с помощью механизма преобразования спектрального сигнала из области низких в область высоких частот.

Подобное преобразование происходит благодаря физическим свойствам нелинейных элементов, способных скачкообразно изменять свою проводимость от состояния отсечки до состояния полной проводимости и, наоборот, при том или ином воздействии. В качестве нелинейных элементов используются коммутаторы – искровые и вакуумные разрядники, полупроводниковые ключи, насыщающиеся индуктивности и другие.

В настоящее время генераторы высоковольтных импульсов принято разделять по применяемым в них накопителям энергии. Типовым является емкостной накопитель энергии (ЕНЭ), который при помощи сильноточного наносекундного коммутатора передает накопленную в конденсаторных блоках энергию электрического поля в нагрузку. Альтернативой ему может служить индуктивный накопитель энергии (ИНЭ), накапливающий энергию в

магнитном поле индуктивного контура с током. При сравнении вышеуказанных накопителей можно выделить некоторые преимущества ИНЭ [2]:

1) применение ИНЭ приводит к резкому сокращению времени нарастания переднего фронта формируемого импульса, что способствует увеличению скорости ввода энергии в нагрузку;

2) плотность запасаемой энергии в индуктивных накопителях может достигать значения 10^5 Дж/дм³, что говорит об эффективности и целесообразности их применения;

3) генераторы с ИНЭ более компактны, имеют меньший вес по сравнению с генераторами на основе емкостных накопителей энергии;

4) питание генераторов на основе индуктивных накопителей осуществляется от низковольтных источников.

Несмотря на все преимущества, ИНЭ должны иметь размыкатели, которые надежно и быстро обрывают ток и выдерживают большие обратные напряжения, в отличие от емкостных накопителей и формирующих линий, которые при работе используют коммутирующие устройства.

В работе используется газоразрядный прерыватель тока тиратронной конструкции. К основным достоинствам водородного тиратрона следует отнести большую скорость деионизации и высокий критический потенциал водорода. Последнее свойство водорода допускает работу оксидного катода при больших импульсных падениях напряжения в тиратроне без серьезного ущерба для катода.

При прерывании тиратроном тока в цепи на нагрузке формируется высоковольтный импульс напряжения. Для нормальной работы прерывателя в режиме обрыва тока необходим источник питания, регулирующий функционирование его обвязки: накала катода, с поверхности которого эмитируются электроны; генератора водорода, компенсирующего потерю ионов водорода в приборе; накала анода, необходимого для инициирования плазмы в рабочем объеме; и схемы формирования импульсов управления.

Выходными параметрами разрабатываемого источника питания анода и системы управления являются: напряжение на выходе системы заряда предварительного накопителя энергии до 3 кВ, среднее значение выходного тока 1 А, средняя потребляемая мощность 1 кВт; напряжение формирования импульсов управления 1,2 кВ, среднее значение выходного тока 5 А, частота пульсации 50 Гц и длительность импульсов 2 мкс.

Функциональная схема системы заряда предварительного накопителя энергии и формирования импульса управления представлена на рисунке 1. Она должна обеспечивать ступенчатый заряд емкостного накопителя до 3 кВ за время порядка 10-15 мс. После того, как конденсатор зарядился, разрешается импульс управления на сетку прерывателя.

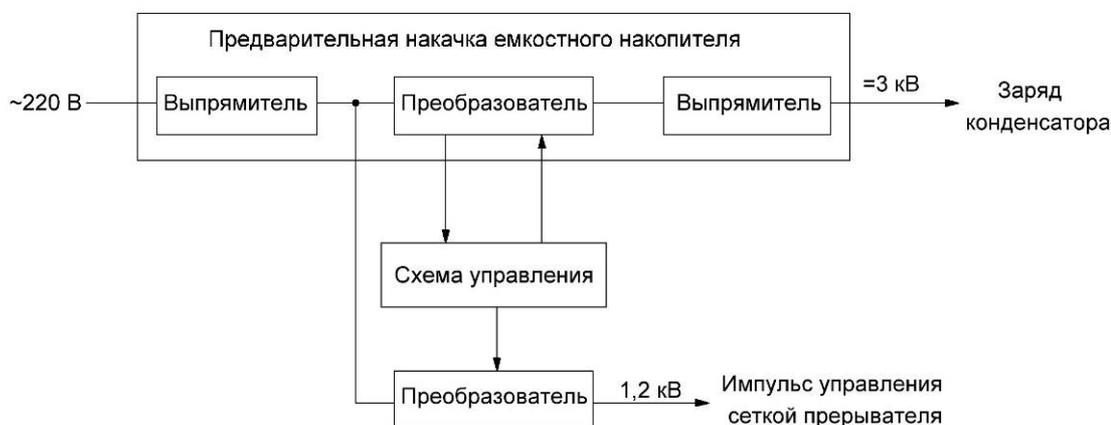


Рис. 1. Функциональная схема системы заряда предварительного накопителя энергии и формирования импульса управления

Сердцем разрабатываемого устройства служит полумостовой преобразователь напряжения. Его преимуществом является низкое обратное напряжение, приложенное к каждому ключевому транзистору в состоянии отсечки, примерно равное постоянному напряжению питания преобразователя. Это позволяет использовать полумостовые преобразователи при высоком питающем напряжении. Несмотря на то, что данные преобразователи могут быть включены без нагрузки, опасного повреждения компонентов происходить не будет. В отличие от мостового преобразователя в схеме используется только два ключевых элемента.

Схема управления силовой частью необходима для подачи управляющих импульсов на силовые ключи преобразователя. Её основным элементом является ШИМ-контроллер. Изменяя скважность управляющих импульсов контроллера, можно влиять на выходные параметры преобразователя.

Задачей схемы формирования импульсов управления является контроль над уровнем напряжения на накопительном конденсаторе и подача управляющих импульсов для формирования импульсного напряжения, которое подаётся на сетку тиратрона.

Режим плавного пуска необходим при включении прибора в сеть, так как при этом в сети происходит просадка сетевого напряжения, которое может привести к сбою и нестабильной работе других устройств, питающихся от той же сети. Особенно сильно пусковые токи заметны при мощности более сотни ватт. В состав схемы помимо конденсаторов, резисторов и реле, входят стабилитроны, играющие не только защитную роль, но также обеспечивающие гистерезис между напряжением включенного и выключенного реле [3].

Режим мягкого старта применяется в мощных блоках питания для плавного выхода на рабочий режим, снижения скорости нарастания напряжения dU/dt , большая величина которой может вывести из строя полупроводниковые приборы, используемые в разрабатываемой схеме. Смысл работы схемы мягкого старта заключается в постепенном увеличении коэффициента заполнения управляющего сигнала ШИМ-контроллера. Достигается это за счет медленного разряда конденсатора, подключенного к одному из входов ШИМ-контроллера стабилизатора.

В статье рассмотрены различные области применения импульсных наносекундных генераторов, а также механизм генерации мощных высоковольтных импульсов. Выделены преимущества и недостатки накопителей энергии, используемых в данных генераторах, представлены основные узлы системы питания газоразрядного прерывателя тока тиратронной конструкции. Учтены основные особенности проектирования схем, применяемых в высоковольтном оборудовании.

Библиографический список

1. Колпаков А.И. «В лабиринте силовой электроники» (сборник статей) – СПб: «Издательство Буковского», 2000. – 96с.: ил.
2. Шатилов С.Г. Исследование газоразрядных прерывателей тока в режиме генерации высоковольтных импульсов: дис. канд. тех. наук. – Рязань. – 2016.
3. Семенов Б.Ю. «Силовая электроника: профессиональные решения.» - М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2011. - 416с.: ил. (Серия «Компоненты и технологии»).

УДК 621.3; ГРНТИ 45.53.99

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РАСЧЕТА НАВЕДЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

А.А. Васин, В.А. Петаева, Т.Н. Васильева

*Рязанский государственный радиотехнический университет,
Российская Федерация, Рязань, alexander.pellegrini@yandex.ru*

Аннотация. В работе акцентируется внимание на неудобстве и громоздкости процесса расчета наведенного напряжения. Предлагается решение этой проблемы путем создания специального приложения для компьютера. Сравниваются результаты ручного расчета и расчета по программе-калькулятору.

Ключевые слова: наведенное напряжение, воздушная линия, коэффициент магнитной связи линий.

AUTOMATION OF THE PROCESS OF CALCULATING THE INDUCED VOLTAGE

A.A. Vasin, V.A. Petaeva, T.N. Vasylieva

*Ryazan State Radio Engineering University,
Russia, Ryazan, alexander.pellegrini@yandex.ru*

The summary. The paper focuses on the inconvenience of the process of calculating the induced voltage. A solution to this problem is proposed by creating a special computer application. The results of the manual calculation and calculation of the calculator program are compared.

Keywords: induced voltage, overhead line, line coupling ratio.

При расчете наведенного напряжения по методике СТН 56947007-29.240.55.018-2009 обыватель сразу обращает внимание на коэффициент магнитной связи линий $F(a)$. Значения этого коэффициента были получены авторами методики экспериментальным способом для воздушных линий напряжением от 10 до 1150 кВ и расстоянии между ними от 10 до 500 м с шагом 10 м. Здесь заключается главное неудобство: поиск нужного значения среди 6 таблиц с более чем 1800 значениями коэффициента и отсутствие промежуточных значений.

Приведем основные теоретические сведения по наведенному напряжению в электрических сетях, рассчитаем значение наведенного напряжения для конкретного случая, а также предложим решение по ускорению процесса расчета.

Наведенное напряжение

Наведенные напряжения на отключенной ВЛ возникают в результате действия электромагнитных полей действующих ВЛ, проходящих вблизи отключенной ВЛ (рис.1).

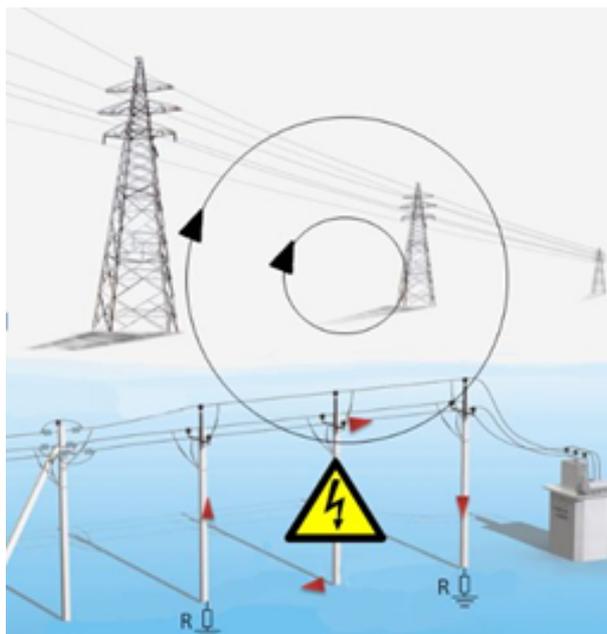


Рис.1. Наведенное напряжение на отключенной линии напряжением 10 кВ

В качестве схемы замещения для отключенной линии используется схема, приведенная на рис. 2.

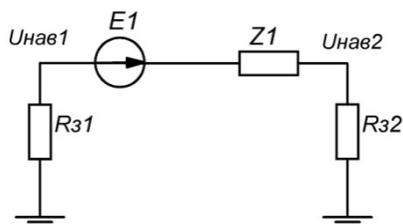


Рис. 2. Схема замещения для расчета и измерения наведенного напряжения

Согласно методике [1], ЭДС, наводимая в отключенной линии, рассчитывается по формуле:

$$E_1 = F(a) \cdot I_1 \cdot l_1, \tag{1}$$

где $F(a)$ – коэффициент индуктивной связи линий [1];

I – ток во влияющей линии, кА;

l – протяженность участка влияющей ВЛ, км.

Наведенные напряжения $U_{нав1}$ и $U_{нав2}$ определяются как:

$$U_{нав1} = \frac{E_1 \cdot R_{з1}}{\sqrt{(R_{з1} + R_{з2})^2 + Z_1^2}}, \tag{2}$$

$$U_{нав2} = \frac{E_1 \cdot R_{з2}}{\sqrt{(R_{з1} + R_{з2})^2 + Z_1^2}}, \tag{3}$$

где Z_1 – сопротивление отключенного участка ВЛ, Ом;

$R_{з1}$ и $R_{з2}$ – сопротивление заземлений по краям отключенного участка ВЛ, Ом.

Ручной расчет наведенного напряжения

Воздушная линия напряжением 220 кВ проходит параллельно отключенной линии 10 кВ на расстоянии $a = 20$ м (рис. 3). Отключенная линия заземлена по краям на ТП 10/0,4 кВ, расстояние между заземлениями $x = 4$ км. Протяженность участка влияющей ВЛ $l = 4$ км. Ток влияющей линии $I = 0,1$ кА. Рассчитаем значение наведенного напряжения.

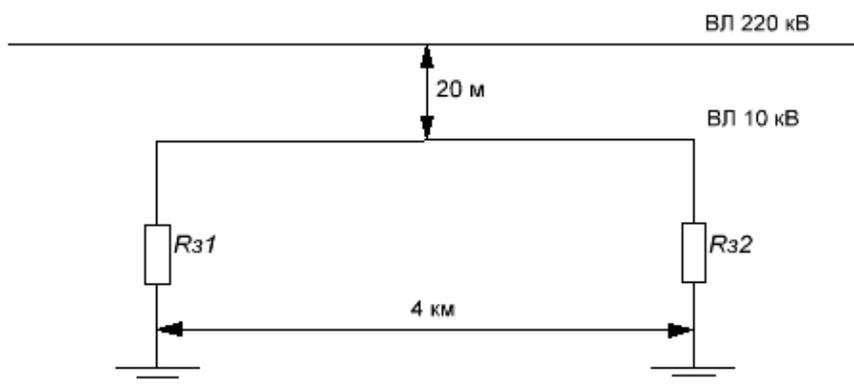


Рис.3. Схема для расчета наведенного напряжения

По формуле 1 рассчитаем ЭДС, наводимую в отключенной линии. Значение $F(a)$ составит 23,9.

$$E_1 = 23,9 \cdot 0,1 \cdot 4 = 9,56 \text{ В}$$

Величина сопротивления заземления на подстанции 10/0,4 кВ составляет 4 Ом. Тогда по формуле 2:

$$U_{\text{нав1}} = \frac{9,56 \cdot 4}{\sqrt{(4 + 4)^2 + 2,252^2}} = 4,6 \text{ В}$$

Величина наведенного напряжения на отключенной линии составило 4,6 В.

Автоматизация процесса расчета

Из-за неудобства поиска коэффициента $F(a)$ было принято решение разработать программу для автоматического расчета наведенного напряжения по заданным параметрам. Интерфейс программы приведен на рисунке 4.

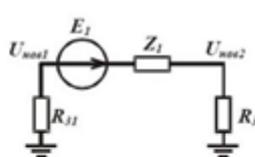
Расчет Таблица результатов

Введите название расчета: ЭТП-1014 Дата расчета: 14.02.2019

Расстояние между линиями а, м: 20 Напряжение отключенной линии: 10-35 кВ Тип заземления R1: Подстанция 10/0,4 кВ (4 Ом)

Расстояние между заземлениями отключенной ВЛ х, км: 4 Напряжение влияющей линии: 220 кВ Тип заземления R2: Подстанция 10/0,4 кВ (4 Ом)

Тип заземления отключенной линии: 2 заземления



Введите ток влияющей линии I, кА: 0.1 Линия не находится под наведенным напряжением

Введите длину совместного следования линий l, км: 4 Наведенное напряжение, В: 4,607

Кнопки: Рассчитать (желтая), Сохранить результат (серая)

Рис.5. Проверка результатов расчета в программе

Таким образом, в результате расчета наведенного напряжения по программе получен результат 4,607 В, а при ручном расчете 4,6 В, что говорит о том, что погрешность автоматического расчета минимальна и программа пригодна для использования.

Библиографический список

1. ПАО «ФСК ЕЭС». Методические указания по определению наведенного напряжения на отключенных воздушных линиях, находящихся вблизи действующих ВЛ. СТО 56947007- 29.240.55.018-2009.

УДК 621.311.42; ГРНТИ 49.29.33

РЕКОНСТРУКЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ ТП-626 УЧЕБНОГО КОРПУСА №1 РГРТУ

И.О. Колесник, А.Н. Кузин, Г.П. Гололобов

Рязанский государственный радиотехнический университет
Россия, Рязань, kolesnik_ilya@list.ru, aleksandrkuzin97@yandex.ru,
gololobov.gennady@yandex.ru

Аннотация. В данной статье представлена общая принципиальная схема подстанции ТП-626 1-го учебного корпуса РГРТУ. Произведён расчет и выбор силового трансформатора, а также предложен вариант по его замене и даны обоснования и преимущества данного выбора.

Ключевые слова: реконструкция трансформаторной подстанции, расчет силового трансформатора

RECONSTRUCTION OF TRANSFORMER SUBSTATIONS TP-626 OF THE 1ST EDUCATIONAL BUILDING OF RSREU

I.O. Kolesnik, A.N. Kuzin, G.P. Gololobov

Ryazan State Radio Engineering University

Russia, Ryazan, kolesnik_ilya@list.ru, aleksandrkuzin97@yandex.ru,

gololobov.gennady@yandex.ru

Annotation. This article presents a general schematic diagram of the Transformer Substation TS-626 of the 1st building of RSREU. The calculation and of the Power Transformer, as well as the proposed option for its replacement and given the rationale and advantages of this choice.

Keywords: reconstruction of transformer substation, calculation of power transformer

Введение

Без электроэнергии невозможно представить жизнь современного человека. Карл Маркс писал, что технологии являются продолжением самого человека. [1] Но для их использования, а соответственно и для спокойной жизни людей, необходима электроэнергия соответствующего качества. Эта задача до сих пор остаётся одной из первостепенных в электроэнергетике. Для её выполнения неприемлемо, чтобы оборудование подвергалось физическому и моральному износу. Реализации этих условий способствует реконструкция объекта. [2]

Качество электроэнергии, конечно же, связано с понятием «надежность», так как нормальным режимом электроснабжения считается режим, когда потребитель бесперебойно обеспечивается электроэнергией в необходимом количестве и надлежащего качества. [3]

Согласно РД 153-34.3-20.409-99 реконструкцией в электрических сетях называется перечень работ на действующих объектах по их реформированию в целях оптимизации технико-экономических показателей.

Обоснование реконструкции трансформаторной подстанции ТП-626

Как уже было отмечено, в целях обеспечения 1-го корпуса РГРТУ качественной электроэнергией необходимо произвести реконструкцию питающей его ТП-626. Трансформаторная подстанция ТП-626 принимает электроэнергию на стороне высокого напряжения 6 кВ и отдаёт её со стороны 0,4 кВ. Схема электроснабжения представлена на рисунке 1.

Как мы видим, нагрузкой второго трансформатора ТМ-2 являются здание учебного военного центра и общежитие №5 РГРТУ. К первому же трансформатору ТМ-1 относятся нагрузки военной кафедры, редакционно-издательский центр, а также три лаборатории.

ТП-626

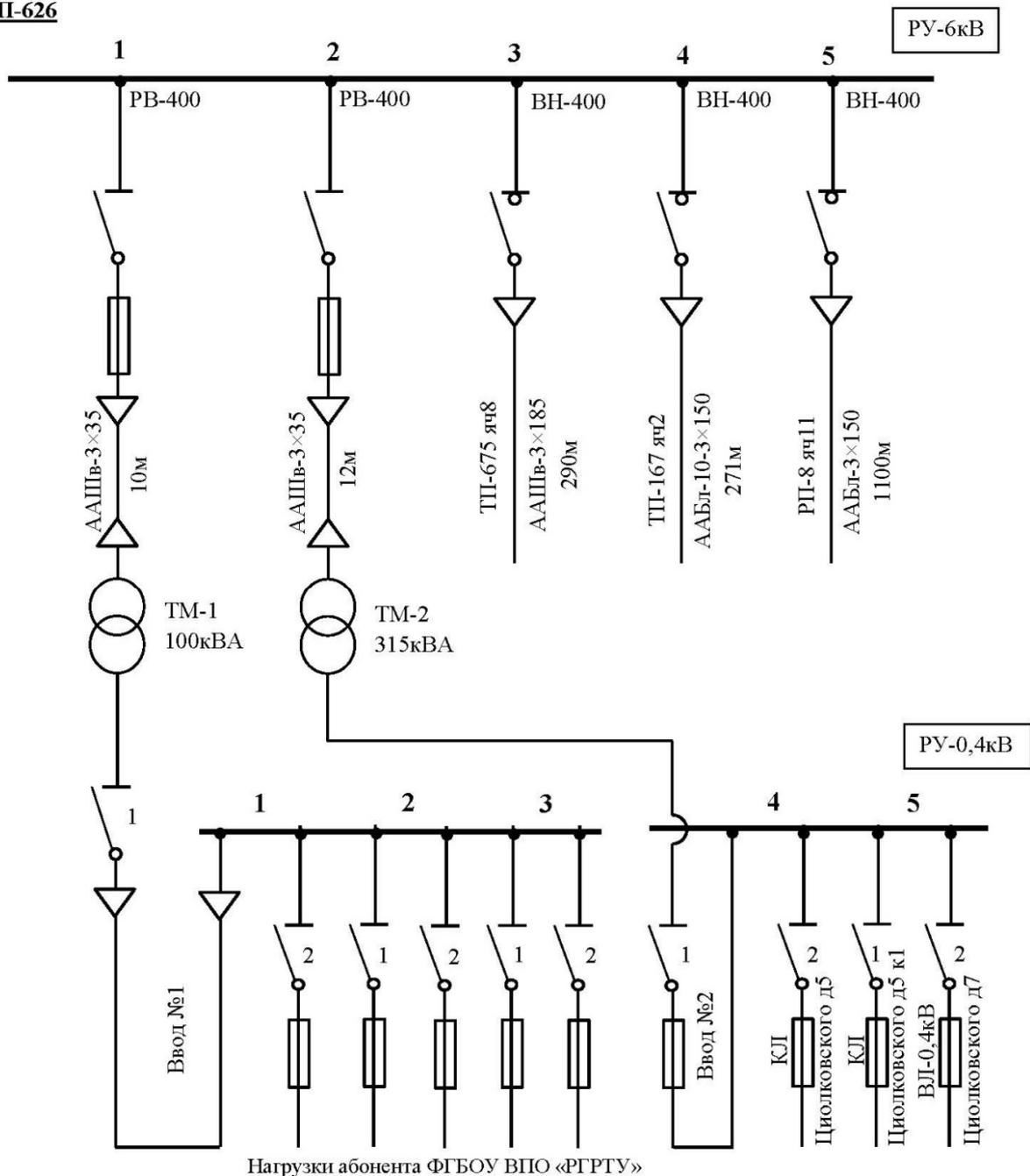


Рис. 1. Схема электроснабжения РГРТУ к1

План реконструкции ТП-626

В таблице 1 приведены данные о суммарных мощностях потребителей, присоединённых к трансформаторной подстанции ТП-626, в период 2015-2019гг.

Таблица 1. Суммарная мощность присоединённых потребителей в период 2015-2019гг.

Год	2015	2016	2017	2018	2019
∑Спотр, кВА	237,1	377,85	393,67	400,75	402,53

Ежегодное возрастание мощности потребителей можно наглядно увидеть на графике (рисунок 2):

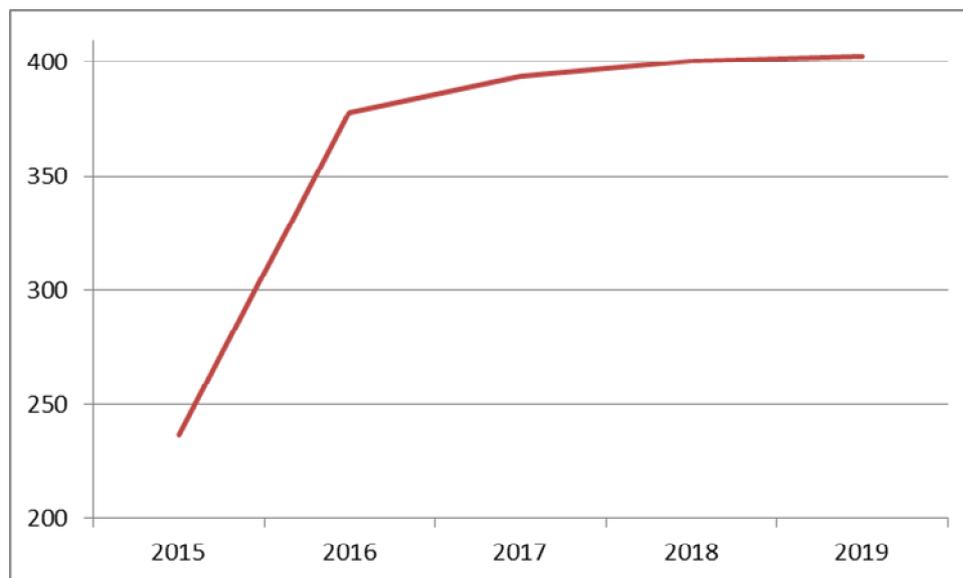


Рис. 2. Тенденция увеличения мощности потребителей ТП-626

Суммарная мощность трансформаторов ТП-626 составляет 415 кВА, а суммарная присоединённая мощность потребителей на данный момент составляет 402,53 кВА и при этом неуклонно растёт. Таким образом, первым шагом в реконструкции будет увеличение мощности силового трансформатора. На ТП-626 расположено два масляных трансформатора, характеристика которых представлены в таблице 2.

Таблица 2. Характеристики трансформаторов ТМ-1 и ТМ-2

Тип трансформатора	$\Delta U_{кз}$, %	Потери, Вт		Масса, кг
		Рк.з.	Рх.х.	
ТМ-100	4,5	1970	330	600
ТТУ-АЛ 315	4,5	5500	1000	2100

Трансформаторы расположены в закрытых помещениях, поэтому предпочтение отдадим трансформаторам сухого типа. Этот выбор также позволит сэкономить на затратах на противопожарную подготовку, обойдясь обычным огнетушителем класса Е вместо стандартного пожарного набора, состоящего из большого огнетушителя, ёмкости с песком, ведра, конуса, багра и лопаты. [4] Не в пользу трансформатора ТТУ-АЛ 315 выступает факт, что трансформаторы такого типа не выпускаются с конца 80-х годов прошлого века.

В здании студенческого общежития находится лифт, значит оно относится к потребителям 1 категории, соответственно на ТМ-2 необходимо осуществить резервирование. Так как на ТМ-1 нагрузкой является нагрузка военной кафедры, то её также необходимо резервировать. Резервирование можно осуществить дублированием каждого из трансформаторов, но в таком случае будут очень большие затраты. Поэтому для бесперебойного электроснабжения будем использовать устройство аварийного ввода резерва (АВР) как на стороне высшего напряжения, так и на стороне низшего напряжения (рисунок 3).

ТП-626

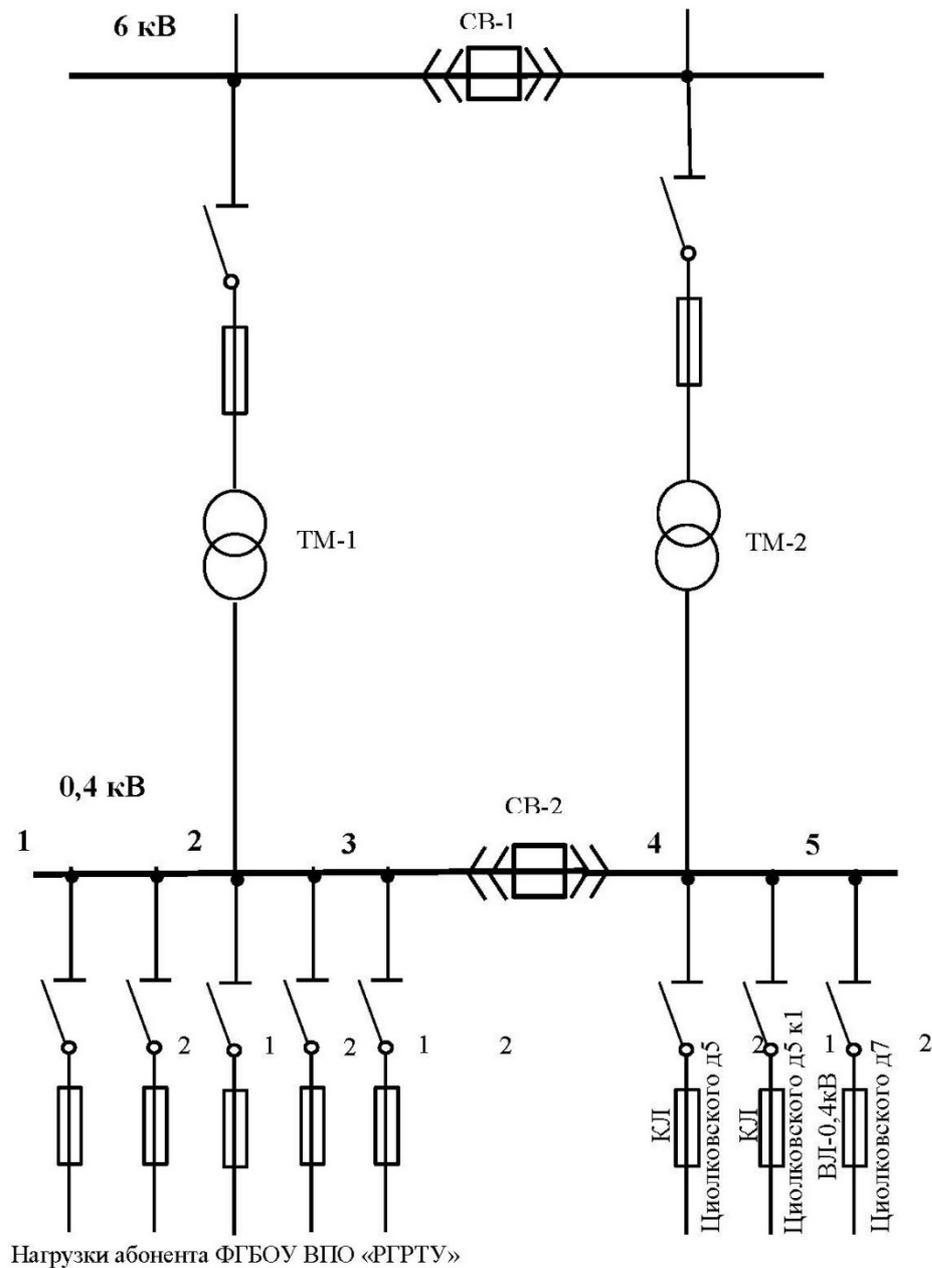


Рис. 3. Принципиальная схема ТП-626 с АВР

Мощность трансформатора рассчитывается по формуле:

$$S_{\text{тр}} = \frac{S_{\text{нагр}}}{N \cdot K_3},$$

где $S_{\text{нагр}}$ – наибольшая расчетная мощность нагрузки;

N – число трансформаторов;

K_3 – коэффициент загрузки трансформатора, равный 0,7...0,8 для подстанций с резервированием.

Также нужно учесть, что в случае аварийного отключения одного из трансформаторов, второй должен обеспечить бесперебойное электроснабжение потребителей. Значения нагрузки приведены в таблице 3.

Таблица 3. Значения полных расчетных мощностей нагрузок

№ ТМ	Наименование объекта	Значение полной мощности, кВА
ТМ-2	Циолковского д.5	101,3
	Циолковского д.5 к1	80,2
	Циолковского д.7	64
ТМ-1	Лаборатория №1	22,5
	Лаборатория №2	15
	Лаборатория №3	16,8
	РИЦ	10
	Нагрузка УВЦ	12,5

Для ТМ-1:

$$S_{\text{ТМ-1}} = \frac{76,8}{1 \cdot 0,8} = 96 \text{ кВА};$$

Для ТМ-2:

$$S_{\text{ТМ-2}} = \frac{245,23}{1 \cdot 0,8} = 306,53 \text{ кВА};$$

Таким образом, следует выбрать два трансформатора ТСЗ-400.

В ходе реконструкции ТП-626 будут также заменены кабельные линии, будут выбраны трансформаторы тока, автоматические выключатели и разъединители, будут проверены кабельные линии по термической стойкости и по допустимой потере напряжения в нормальном и аварийном режимах.

Заключение

В данной работе проведены расчёты для выбора силового трансформатора, по результату которых предложен вариант замены текущих масляных трансформаторов на более мощные трансформаторы сухого типа. Приведены обоснования этого выбора, а также его преимущества. В дальнейшем планируется замена остального оборудования, такого как выключатели, разъединители, трансформаторы тока и линии электропередач.

Библиографический список

1. К. Маркс. Капитал: машины и крупная промышленность. 1861-1863гг.
2. Роголёв Н.Д. Экономика энергетики. – Издательство МЭИ, 2005.
3. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – Энергоатомиздат, 2000.
4. Правила устройства электроустановок ПУЭ. 7-е издание. – Моргнига, 2018.

УДК 621.311.42; ГРНТИ 49.29.33

РАЗРАБОТКА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ПЕРВОГО УЧЕБНОГО КОРПУСА РГРТУ

А.Н. Кузин, Г.П. Гололобов, И.О. Колесник

*Рязанский государственный радиотехнический университет,
Российская Федерация, Рязань, alexandrkuzin97@yandex.ru, gololobov.
gennady@yandex.ru, kolesnik_ilya@list.ru*

Аннотация. В работе рассматриваются схемы электроснабжения первого учебного корпуса РГРТУ. Проведены основные расчеты, необходимые для разработки проекта распределительного устройства.

Ключевые слова: распределительное устройство, выключатель-разъединитель, распределительные панели, нагрузка, максимально допустимый ток.

DEVELOP A SWITCHGEAR OF THE FIRST ACADEMIC BUILDING OF RSREU

A.N.Kuzin, G.P. Gololobov, I.O. Kolesnik

*Ryazan State Radio Engineering University,
Russia, Ryazan, alexandrkuzin97@yandex.ru, gololobov.
gennady@yandex.ru, kolesnik_ilya@list.ru*

The summary. In this paper we consider the power supply schemes of the first educational building of RSREU. The basic calculations necessary for the design of the switchgear are carried out.

Keywords: Low voltage switchgear, switch-disconnector, distribution panels, load, maximum current.

Введение

В работе проведена разработка распределительного устройства низкого напряжения 0,4 кВ, расположенного в ТП-626, расположенного в городе Рязань по адресу улица Циолковского, д.5. Данное распределительное устройство питает первый учебный корпус ФГБОУ ВПО «РГРТУ».

ТП-626 расположено в специальном закрытом отдельно стоящем здании. Его основной целью является получение электрической энергии высокого напряжения 6 кВ, понижение и распределение электрической энергии низкого напряжения 0,4 кВ.

Данная трансформаторная подстанция запитывается тремя кабельными линиями, входящими с ТП-167, ТП-675 и РП-8 на вводы распределительного устройства напряжения 6 кВ. К нему подключаются понижающие трансформаторы (ТМ1 и ТМ2), которые понижают напряжение с 6 кВ до 0,4 кВ. От них в свою очередь запитывается рассматриваемое в данной работе распределительное устройство 0,4 кВ, которое питает нагрузки первого учебного корпуса РГРТУ.

Распределительное устройство должно обеспечивать бесперебойную подачу электрической энергии к потребителям. Количество полюсов и выхода из строя оборудования распределительного устройства должно быть минимизировано. Оборудование распределительного устройства должно соответствовать современным стандартам в области электробезопасности и экологии. [1-3]

От распределительного устройства 0,4 кВ будут питаться следующие потребители:

- первый учебный корпус ($S = 195$ кВА);
- общежитие РГРТУ № 5 ($S = 115$ кВА);
- редакционно-издательский центр ($S = 18,8$ кВА);
- лаборатория сильноточной электроники ($S = 50$ кВА);
- лаборатория с лазерным оборудованием ($S = 25$ кВА);
- лаборатория ($S = 15$ кВА);

Основной задачей данной работы будет являться разработка распределительного устройства низкого напряжения 0,4 кВ.

Выбор оборудования распределительного устройства

В проектируемом распределительном устройстве будут использоваться распределительные панели типа ЩО-70.

Распределительные панели ЩО-70, изображенные на рис.1, предназначены для установки в щиты распределительных устройств. Максимальное напряжение работы этих панелей 400 В частотой 50 Гц. Панели устанавливаются в распределительных устройствах. Главной их задачей является получение и последующее распределение электрической энергии, а также защита потребителей от перегрузок и коротких замыканий [4].



Рис.1 Внешний вид ЩО-70

Распределительные устройства могут комплектоваться из вводных, секционных, линейных панелей. Возможна установка аппаратуры устройств автоматического включения резерва в панели данного типа.

В качестве защитной аппаратуры, устанавливаемой на отходящих ячейках разрабатываемого распределительного устройства для корректной и безотказной работы распределительного устройства, будут использоваться выключатели-разъединители типа ВР-32.

Они применяются для включения, пропускания и отключения переменного тока номинальным напряжением до 660 В и постоянного тока с номинальным напряжением до 440 В. Аппараты снабжены ручным приводом и выпускаются в различных модификациях [5].

Основными узлами аппарата являются подвижные и неподвижные контакты. Набор неподвижных контактов с корпусом представляет собой пакет. Пакеты стянуты шпильками. Число пакетов соответствует числу полюсов.

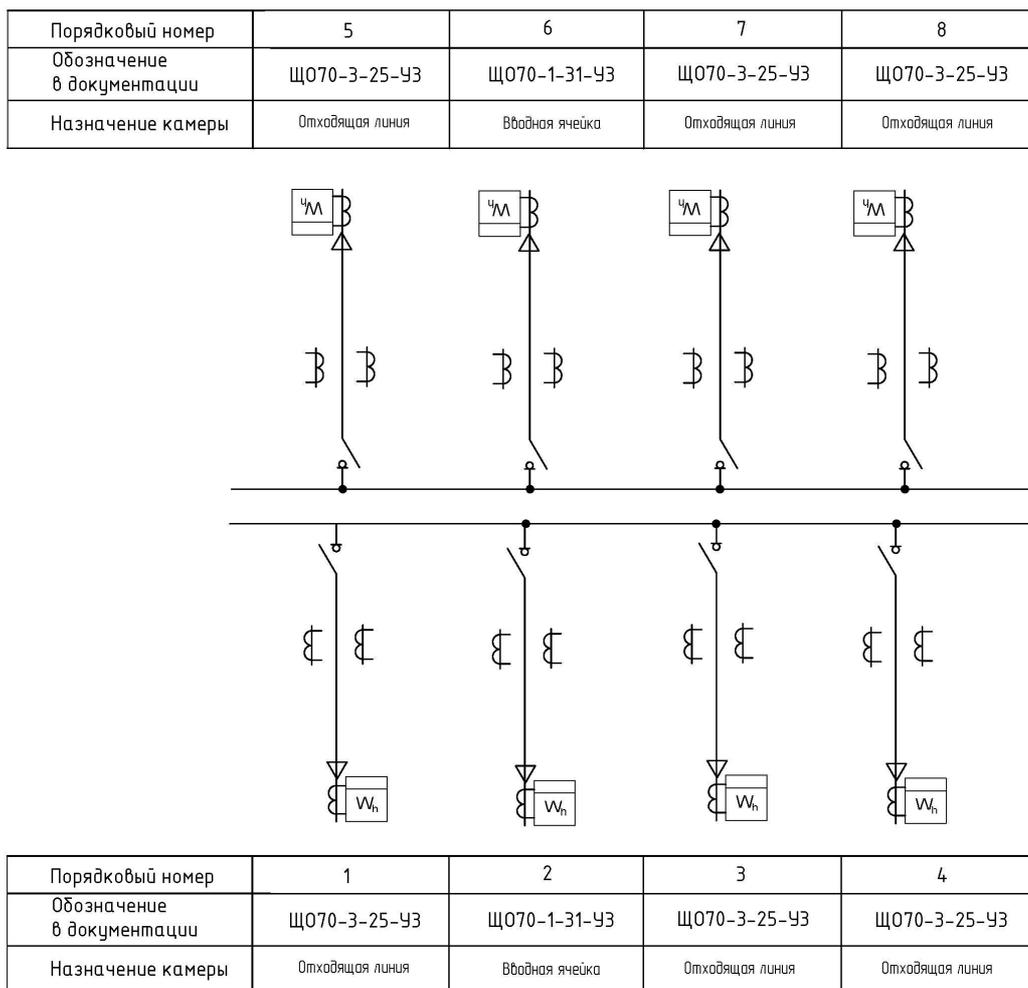


Рис. 2. Однолинейная схема проектируемого распределительного устройства

Для оптимального выбора аппаратуры необходимо рассчитать максимальные токи питаемых нагрузок [2]. Максимальные токи нагрузок ячеек определяются по формуле (1):

$$I_{\text{ном}} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} \quad (1)$$

где S – мощность электроприемника, кВА;

$U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение, кВ.

По вышеуказанной формуле определим максимальный ток нагрузки ячейки №1:

$$I_{\text{яч.1}} = \frac{195}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 278 \text{ А}$$

Аналогично, максимальный ток нагрузки ячейки №3:

$$I_{\text{яч.3}} = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 164 \text{ А.}$$

Максимальный ток нагрузки ячейки №4:

$$I_{\text{яч.4}} = \frac{18,8}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 26,9 \text{ А.}$$

Максимальный ток нагрузки ячейки №5:

$$I_{\text{яч.5}} = \frac{50}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 71,4 \text{ А.}$$

Максимальный ток нагрузки ячейки №7:

$$I_{\text{яч.7}} = \frac{25}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 35,7 \text{ А.}$$

Максимальный ток нагрузки ячейки №8:

$$I_{\text{яч.8}} = \frac{15}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 21,4 \text{ А.}$$

Максимальный ток вводной ячейки №2:

$$I_{\text{яч.2}} = \frac{324,9}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 468,9 \text{ А.}$$

Максимальный ток вводной ячейки №6:

$$I_{\text{яч.6}} = \frac{89}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 128,5 \text{ А.}$$

В соответствии с расчетными характеристиками были выбраны номиналы защитных выключателей-разъединителей (см. табл. 1).

Таблица 1. Выбор защитных аппаратов

Ячейка, №	Максимальный ток, А	Марка защитного аппарата
1	26,9	ВР-32-31
2	71,4	ВР-32-31
3	35,7	ВР-32-31
4	21,4	ВР-32-31
5	278	ВР-32-37
6	164	ВР-32-35
7	155,4	ВР-32-35
8	442	ВР-32-39

Для того чтобы наилучшим образом скомпоновать оборудование распределительного устройства следует расположить распределительные панели как показано на рис.3.

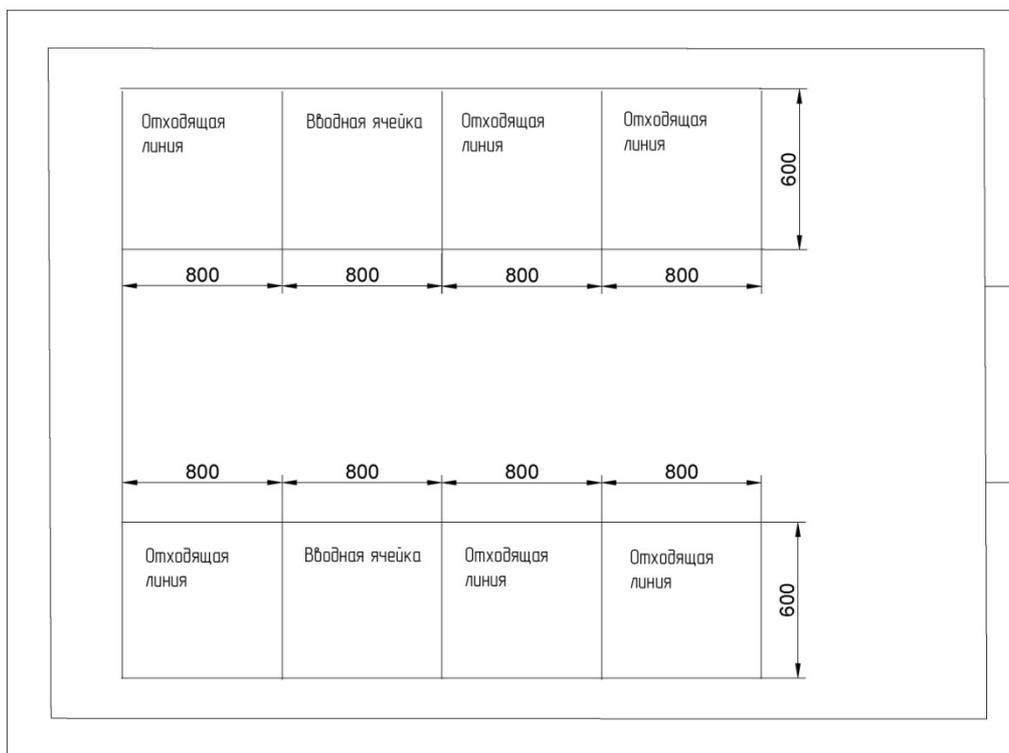


Рис. 3. Схема расположения распределительных панелей

Вывод

Был проведен тщательный анализ документации, выданной на предприятии.

При разработке распределительного устройства к установке были выбраны распределительные панели ЩО-70, обладающие высокой надежностью и технико-экономическими показателями.

В качестве защитного оборудования были выбраны выключатели-разъединители типа ВР-32

Все установленное на распределительное устройство оборудование соответствует современным стандартам в области электробезопасности и экологии.

Библиографический список

1. Правила устройства электроустановок ПУЭ. 7-е изд. – М.: Моркнига, 2018.
2. Дьяков В.И. Типовые расчеты по электрооборудованию. – М.: Высшаяшкола, 1990.
3. Сибикин Ю. Д. Электроснабжение промышленных и гражданских зданий, 2006.
4. ТМТР.ЩО70.2016.09Панели распределительных щитов серии ЩО-70 на напряжение 0,4 кВ. Техническое описание. - М.: Тяжмаштрейд, 2016.
5. Каталог выключателей-разъединителей ВР-32 – М.:ОАО «НВА», 2018.

УДК 621.316.925.1; ГРНТИ 44.29.31

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЗАЩИТ БЛОКА ГЕНЕРАТОР - ТРАНСФОРМАТОР ДЯГИЛЕВСКОЙ ТЭЦ

Н.И.Леваков, Е.В. Сливкин

*Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, frttoe4111@gmail.com*

Аннотация. В работе рассматриваются причины модернизации системы релейной защиты блока генератор-трансформатор Дягилевской ТЭЦ и проводится расчет токов короткого замыкания этого блока.

Ключевые слова: ТЭЦ, генератор, трансформатор, релейная защита, ток короткого замыкания.

MODERNIZATION OF THE RELAY PROTECTION UNIT GENERATOR - TRANSFORMER AT THERMAL POWER PLANT

N.I.Levakov, E.V. Slivkin

*Ryazan state radio engineering University,
Russia, Ryazan, frttoe4111@gmail.com*

Abstract. The paper presents the reasons for upgrading relay protection system of the generator-transformer unit at the Dyagilevskaya TPP and calculates the short-circuit currents of this unit.

Keywords: TPP, generator, transformer, relay protection, short-circuit current.

Введение

Модернизация защит блока проводится на крупном предприятии энергетики - Дягилевской ТЭЦ города Рязани, которая выполняет функции производства и распределения тепло- и электроэнергии.

Блок генератор - трансформатор Дягилевской ТЭЦ состоит из генератора Siemens AMS 1250 LG38,5 МВт и трансформатора ТРДН 63000/110/10 63МВА и относится к возведенному в 2014 году энергоблоку ПГУ-1 ДТЭЦ. На основании проекта строительства ПГУ-1 [1] газовые турбины и турбогенераторы установлены фирмы Siemens, в комплект поставки которой также вошли и защиты блока генератор-трансформатор типа SIPROTEC фирмы Siemens, показанные на рисунке 1.



Рис. 1. Внешний вид терминала защиты фирмы Siemens типа SIPROTEC

Основные причины модернизации связаны с высокой стоимостью обслуживания данных защит, а именно:

- полное отсутствие отечественных комплектующих, а также большие трудности в закупке компонентов блока у зарубежных производителей;
- высокая стоимость подготовки персонала по обслуживанию данных защит;
- высокая стоимость обслуживания блока защит подрядными организациями.

Кроме экономических причин следует отметить важные недостатки терминалов SIPROTEC, такие как:

- при отсутствии оперативного тока, таймеры, запрограммированные способом свободно программируемой логики, перестают функционировать. Данный недостаток приводит к отказу или ложной работе РЗ;
- применение стандартных функций с блокирующими сигналами приводит к ложному срабатыванию терминала на отключение при потере питания;
- наличие входов, имеющих напряжение срабатывания 88В при напряжении питания терминала 220В;
- сложная структура вторичных схем, требующая дополнительной установки внешних реле, т.к. группы соединений выходных реле объединены общей точкой;
- избыточность технической информации, заложенной в терминал.

Оператор вводит около 500 уставок, причем необходимо также корректировать информацию в матрице сигналов объем около 100 страниц англоязычного текста. Учитывая необходимость составления заданий на наладку и протоколов проверки терминалов, где должны указываться все параметры настройки, объем документации заметно увеличивается. Информационная и техническая избыточность повышает вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором и может привести к невыполнению руководящих инструкций [2] и серьезным последствиям.

Принимая во внимание вышеперечисленные факторы, возникает острая необходимость проведения модернизации защит блока генератор-трансформатор с использованием отечественных микропроцессорных терминалов. Для подбора оборудования и согласования характеристик защит блока генератор-трансформатор необходимо провести расчет токов короткого замыкания.

Расчет токов короткого замыкания

Основные параметры турбогенератора Siemens AMS 1250 LG[3] приведены в таблице 1.

Таблица №1 Основные параметры ТГ Siemens AMS 1250 LG.

Наименование основных параметров	Значение параметра
Мощность полная, кВА	48125
Мощность активная, кВт	38500
Коэффициент мощности	0,8
Напряжение статора, кВ	10,5
Ток статора, А	2646
Частота, Гц	50
Частота вращения, об/мин	1500
Коэффициент полезного действия, расчетный, %	98,42
Индуктивное сопротивление X_d , %	183
Индуктивное сопротивление X_d' , % (неуд/уд)	27,5/23,6
Индуктивное сопротивление X_d'' , % (неуд/уд)	17,0/14,5
Индуктивное сопротивление X_0 , %	6,9
Индуктивное сопротивление X_2 , %	17,0
Число фаз обмотки статора	3
Соединение фаз обмотки статора	Звезда
Число выводов статора	6

Турбогенератор подключаются к обмотке низкого напряжения блочного повышающего двухобмоточного трансформатора с расщеплённой обмоткой низкого напряжения, мощностью 63 МВА, напряжением 115/10,5 кВ, со схемой и группой соединения обмоток Ун/Д-Д-11-11, с системой охлаждения Д (ОНАФ), с регулированием напряжения типа РПН $\pm 9 \times 1,78$ %.

Расчет токов короткого замыкания будем проводить на основании проектной документации и рекомендаций фирмы Siemens [3,4,5], расчетная схема замещения с указанием точек короткого замыкания показана на рисунке 2.

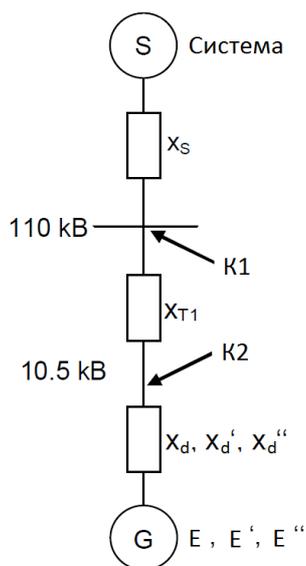


Рис. 2. Расчетная схема замещения

Проведем расчет сопротивлений генератора:

$$x_d = \frac{x_d}{100} \times \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{ПОЛ}}} \times \frac{S_{\text{ОТН}}}{U_{\text{ОТН}}^2} = \frac{183}{100} \times \frac{10,5^2}{48,125} \times \frac{48,125}{10,5^2} = 1,830 \text{ о.е.}$$

$$x'_d = \frac{x'_d}{100} \times \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{ПОЛ}}} \times \frac{S_{\text{ОТН}}}{U_{\text{ОТН}}^2} = \frac{23,6}{100} \times \frac{10,5^2}{48,125} \times \frac{48,125}{10,5^2} = 0,236 \text{ о.е.}$$

$$x''_d = \frac{x''_d}{100} \times \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{ПОЛ}}} \times \frac{S_{\text{ОТН}}}{U_{\text{ОТН}}^2} = \frac{14,5}{100} \times \frac{10,5^2}{48,125} \times \frac{48,125}{10,5^2} = 0,145 \text{ о.е.}$$

$$x_2 = \frac{x_2}{100} \times \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{ПОЛ}}} \times \frac{S_{\text{ОТН}}}{U_{\text{ОТН}}^2} = \frac{183}{100} \times \frac{10,5^2}{48,125} \times \frac{48,125}{10,5^2} = 0,170 \text{ о.е.}$$

$$x_0 = \frac{x_0}{100} \times \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{ПОЛ}}} \times \frac{S_{\text{ОТН}}}{U_{\text{ОТН}}^2} = \frac{183}{100} \times \frac{10,5^2}{48,125} \times \frac{48,125}{10,5^2} = 0,069 \text{ о.е.}$$

Найдем ЭДС генератора [6]:

$$E = \sqrt{\cos^2 \varphi + (x_d + \sin \varphi)^2} = \sqrt{0,8^2 + (1,83 + 0,6^2)} = 2,558 \text{ о.е.}$$

$$E' = \sqrt{\cos^2 \varphi + (x'_d + \sin \varphi)^2} = \sqrt{0,8^2 + (0,236 + 0,6^2)} = 1,157 \text{ о.е.}$$

$$E'' = \sqrt{\cos^2 \varphi + (x''_d + \sin \varphi)^2} = \sqrt{0,8^2 + (0,145 + 0,6^2)} = 1,093 \text{ о.е.}$$

Найдем сопротивление трансформатора ТРДН 63000/110/10:

$$x_T = \frac{u_k}{100} \times \frac{U_T^2}{S_T} \times \frac{S_{\text{ОТН}}}{U_{\text{ОТН}}^2} = \frac{10,5}{100} \times \frac{10,5^2}{63} \times \frac{48,125}{10,5^2} = 0,080 \text{ о.е.}$$

$S''_c = 2881 \text{ МВА}$ - мощность короткого замыкания системы,

$I''_c = 15,1 \text{ кА}$ - ток короткого замыкания системы.

Соответственно сопротивление системы равно:

$$x_c = \frac{S_{\text{ОТН}}}{S''_c} = \frac{48,125}{2881} = 0,0167 \text{ о.е.}$$

Формулы для пересчета токов КЗ

$$I_{\text{КЗ}} = i_\phi \times I_{U_{10,5\text{кВ}}} = i_\phi \times 2646 \text{ [кА]}$$

$$I_{\text{КЗ}} = i_\phi \times I_{U_{110\text{кВ}}} = i_\phi \times 252,6 \text{ [кА]}$$

Воспользуемся исходными значениями, указанными в проекте, проведем пересчет и внесем результаты расчета токов КЗ в таблицу №2.

Таблица №2 Результаты расчета токов КЗ

Максимальный режим точка К1					
Система (сторона 110 кВ)					
$I_{кз}$ для x''_d (ударный)		$I_{кз}$ для x'_d (переходной)		$I_{кз}$ для x_d (стабильный)	
$I_{кз}^{(3)}$ [кА]	$I_{кз}^{(2)}$ [кА]	$I_{кз}^{(3)}$ [кА]	$I_{кз}^{(2)}$ [кА]	$I_{кз}^{(3)}$ [кА]	$I_{кз}^{(2)}$ [кА]
27,30	13,75	27,30	13,65	27,30	14,01
Генератор (сторона 10,5 кВ)					
19,95	16,06	12,97	13,10	3,70	8,69
Суммарно (сторона 10,5 кВ)					
47,25	39,68	40,27	36,74	31,00	32,14
Минимальный режим точка К1					
Система (сторона 110 кВ)					
$I_{кз}^{(3)}$ [кА]	$I_{кз}^{(2)}$ [кА]	$I_{кз}^{(3)}$ [кА]	$I_{кз}^{(2)}$ [кА]	$I_{кз}^{(3)}$ [кА]	$I_{кз}^{(2)}$ [кА]
27,30	13,69	27,30	13,71	27,30	14,42
Генератор (сторона 10,5 кВ)					
18,25	14,61	11,21	11,52	1,45	6,72
Суммарно (сторона 10,5 кВ)					
45,55	38,25	38,51	35,14	28,74	29,80
Максимальный режим точка К2					
Система (сторона 110 кВ)					
$I_{кз}^{(3)}$ [кА]	$I_{кз}^{(2)}$ [кА]	$I_{кз}^{(3)}$ [кА]	$I_{кз}^{(2)}$ [кА]	$I_{кз}^{(3)}$ [кА]	$I_{кз}^{(2)}$ [кА]
15,10	13,08	15,10	13,08	15,10	13,08
Генератор (сторона 10,5 кВ)					
1,23	1,17	0,92	1,03	0,34	0,77
Суммарно (сторона 110 кВ)					
16,33	14,09	16,02	13,97	15,44	13,74
Минимальный режим точка К2					
Система (сторона 110 кВ)					
$I_{кз}^{(3)}$ [кА]	$I_{кз}^{(3)}$ [кА]	$I_{кз}^{(3)}$ [кА]	$I_{кз}^{(3)}$ [кА]	$I_{кз}^{(3)}$ [кА]	$I_{кз}^{(3)}$ [кА]
15,10	13,08	15,10	13,08	15,10	13,08
Генератор (сторона 10,5 кВ)					
1,12	1,07	0,80	0,90	0,13	0,56
Суммарно (сторона 110 кВ)					
16,22	14,00	15,90	13,86	15,23	13,56

Результаты проведенного расчета токов короткого замыкания позволят в дальнейшем подобрать необходимые трансформаторы тока, трансформаторы напряжения, выбрать комплекс защит блока генератор – трансформатор.

Выводы

В данной статье рассматриваются причины модернизации защит блока генератор – трансформатор на объекте энергетики - Дягилевской ТЭЦ, и проводится расчет токов КЗ блока. Основные причины модернизации в большей степени экономические, но помимо них также имеется ряд серьезных недостатков в терминалах SIPROTEC, что приводит к проблемам эксплуатационного характера. В работе проведен полный расчет токов КЗ для двух точек блока с учетом рекомендаций производителя генератора. Результаты проведенного расчета токов короткого замыкания позволят в дальнейшем перейти к следующему этапу рабо-

ты – выбору трансформаторов тока, трансформаторов напряжения, а также к выбору защит с дальнейшим расчетом параметров.

Библиографический список

1. Проектная документация - расширение Дягилевской ТЭЦ строительство ПГУ - 115 МВт, раздел 1 «Пояснительная записка», 2014. - 13 с.
2. ПУЭ 7. Правила устройства электроустановок, официальные тексты по состоянию на 01.03.2007г. – М.: ЭНАС, 2017. – 265 с.
3. Проектная документация - расширение Дягилевской ТЭЦ строительство ПГУ - 115 МВт, подраздел 5.1 «Система электроснабжения», 2014. - 18 с.
4. Техническая спецификация на бесщеточный синхронный генератор. - АВВАВ по заказу Siemens. – 2013.
5. Системное описание SIPROTEC - <http://smart-grid.siemens.ru/products/relay-protection-devices/> [дата обращения 28.01.2019]
6. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования РД153-34.0-20.527-98. – М.: НИЦ ЭНАС, 2002.

УДК 621.316.925.1; ГРНТИ 44.29.31

ПРИМЕНЕНИЕ СИММЕТРИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В ТРАНСФОРМАТОРАХ 6-10/0,4 КВ ДЛЯ КАЧЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

С. Чернов, А. Афонин

Рязанский Государственный Радиотехнический Университет,

Российская Федерация, Рязань, sergei_chernov@indox.ru, panas1999@mail.ru

Аннотация. В данной работе рассматривается принцип работы симметрирующего устройства в силовом трансформаторе со схемой соединения обмоток Y/Yn.

Ключевые слова: симметрирующее устройство, качество электроэнергии, силовой трансформатор, несимметричная нагрузка.

THE USE OF BALANCING DEVICES IN TRANSFORMERS OF 6-10/0.4 KV FOR QUALITY SUPPLY OF CONSUMERS

S. Chernov, A. Afonin

Ryazan State Radio Technical University,,

Russian Federation, Ryazan, sergei_chernov@indox.ru, panas1999@mail.ru

Abstract. In this paper, we consider the principle of operation of the symmetrizing device in a power transformer with a circuit connecting the windings Y/Yn.

Keywords: balanced device, power quality, power transformer, unbalanced load.

Введение

В сетях 0,4 кВ часто наблюдаются перекосы напряжений по фазам: на не загруженных фазах напряжение может возрасти до 240 В и выше, на загруженных падает до 200...208 В. Данные изменения напряжений могут приводить к выходу из строя бытовой техники и другого оборудования потребителей. В нулевом проводе воздушной линии возникает ток - геометрическая сумма токов в фазных проводах. При пропадании нагрузки на одной или двух фазах по нулевому проводу может протекать ток, соизмеримый с фазным током нагрузки, что приводит к увеличению потерь в ВЛ, ТП 10/0,4 кВ [1].

В электрических сетях в большинстве случаев, используются силовые трансформаторы со схемой соединения обмоток «звезда-звезда-ноль» (Y/Yn).

В силовом трансформаторе со схемой соединения обмоток Y/Yn, потери короткого замыкания R_k , зависят от уровня тока в нулевом проводе и с его ростом резко увеличиваются. Это увеличение, следствие появления потоков нулевой последовательности (F0) в маг-

нитных системах трансформаторов Y/Y_n , которые создаются токами небаланса $I_{нб}$, протекающими в нулевом проводе ВЛ. Неравномерная нагрузка фаз, при использовании силовых трансформаторов Y/Y_n – приводит к резкому искажению напряжений по фазам и увеличению потерь в сети. Увеличение установленной мощности силовых трансформаторов Y/Y_n выше чем требуется по расчету, приводит к малому эффекту и вызывает повышение уровня потерь[2].

В соответствии с п. 6.1.7 Положения ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе» (далее Техническая политика) [3], одним из возможных способов решений при несимметричной нагрузке фаз, применение в ТП 6-10/0,4 кВ силовых трансформаторов с симметрирующими устройствами (СУ).

Принцип работы и устройство

Для устранения недостатков силовых трансформаторов Y/Y_n при несимметричной нагрузке фаз разработано симметрирующее устройство (СУ), которое монтируется в силовой трансформатор со схемой Y/Y_n . Схема включения обмоток трансформатора представлена на рисунке 1.

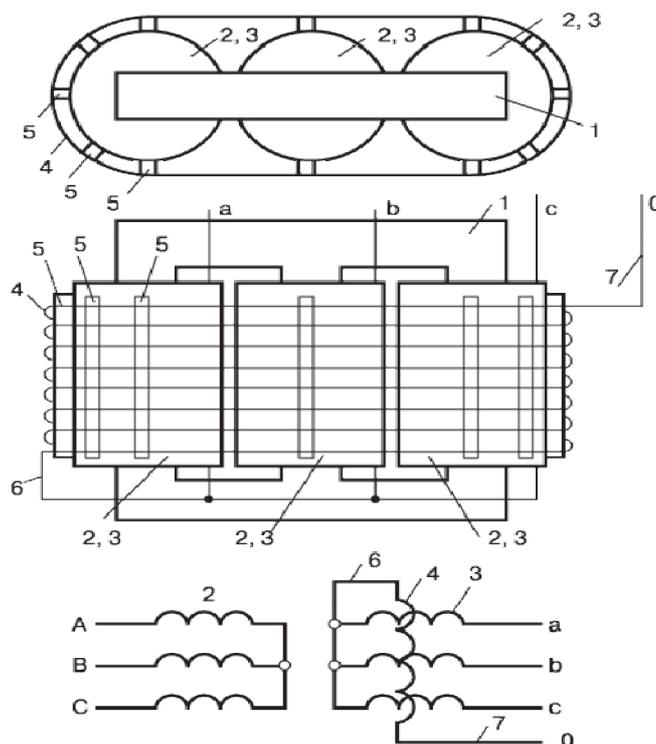


Рис.1. Схемы включения обмоток трансформатора

- 1.Магнитопровод силового трансформатора;
- 2.Обмотки ВН;
- 3.Обмотки НН;
- 4.Компенсационная обмотка (КО);
- 5.Клинья дистанционные;
- 6.Конец КО, подключающийся к нейтрали обмоток НН;
- 7.Конец КО, выводимый наружу.

СУ - отдельная обмотка, смонтированная в виде банджа поверх обмоток высокого напряжения силового трансформатора. Обмотка СУ рассчитана на длительное протекание номинального тока силового трансформатора.

Обмотка СУ подключена в разрыв нулевого провода силового трансформатора Y/Y_n с целью полной компенсации противоположно направленными потоками нулевой последовательности от СУ, появившихся, при несимметричной нагрузке, потоков нулевой последовательности в рабочих обмотках трансформатора. И как следствие- предотвращение перекоса фазных напряжений.

На рисунке 2 изображены зависимости потерь короткого замыкания P_k силового трансформатора ТМ от значения тока в нулевом проводе при $I_b = I_c = I_n$ и I_a от нуля до I_n , при различных схемах соединения обмоток.

1– ТМ (Y/Y_n);

2– ТМ (Y/Z_n);

3 – ТМ (Y/Y_n с СУ).

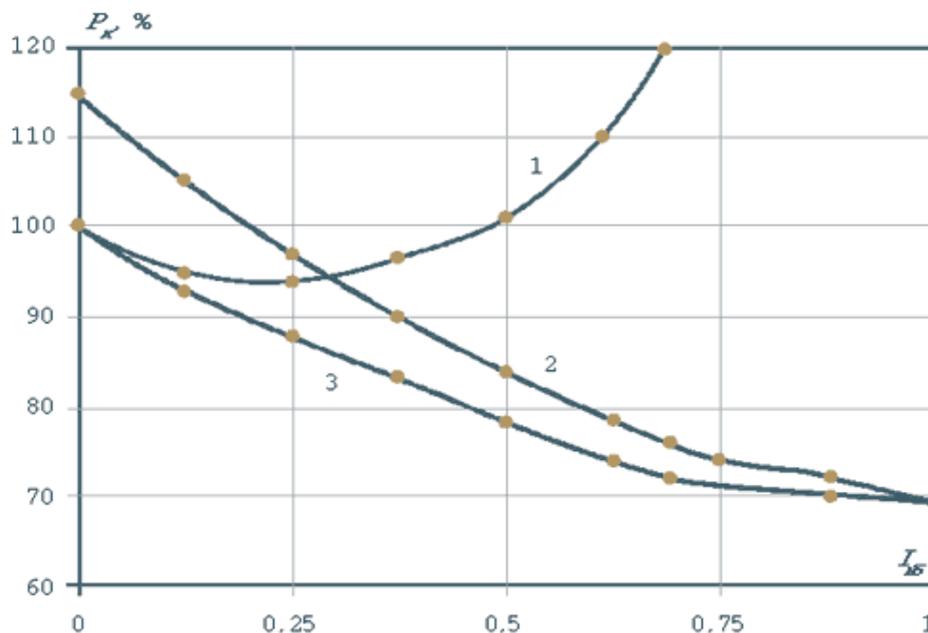


Рис. 2. Зависимость P_k трансформатора ТМ 10/0,4 кВ от схем соединения обмоток и значения тока в нулевом проводе

Фазные напряжения при неравномерной нагрузке симметрируются так же, как и при использовании силовых трансформаторов со схемой соединения обмоток Y/Z_n «звезда-зигзаг–ноль», но данные трансформаторы значительно дороже.

Выводы

Использование СУ в силовых трансформаторах со схемой Y/Y_n:

- значительно уменьшает сопротивление нулевой последовательности трансформатора;
- приводит к увеличению токов однофазного короткого замыкания, упрощает настройку релейной защиты и обеспечивает её надежную работу при коротких замыканиях;
- снижает негативное влияние повышенных токов однофазных коротких замыканий на обмотки трансформатора, так как мощный (несимметричный) и разрушительный поток нулевой последовательности весь компенсируется;
- приводит к исключению явления перегрева потоком нулевой последовательности при неравномерных нагрузках фаз и при мощности, ниже или равной номинальной [4];
- улучшает синусоидальность форм кривых изменений напряжений при нелинейной нагрузке;

- сокращает повышение напряжения до допустимой величины на не поврежденных фазах при однофазных коротких замыканиях в электрических сетях;
- приводит к симметрированию фазных напряжений и обеспечивает потребителей качественным напряжением в соответствии с ГОСТ 32144-2013 [5].

Библиографический список

1. «К вопросу снижения потерь в сетях 0,4 кВ», ОАО «МЭТЗ» Им. В.И. Козлова» [Электронный ресурс] — Режим доступа — URL: http://metz.by/download_files/news/informacionnoe_pismo.pdf (дата обращения 09.12.2018);
2. «Симметрирующее устройство для трансформаторов Средство стабилизации напряжения и снижения потерь в сетях 0,4 кВ», ЗАО "Новости Электротехники", [Электронный ресурс] — Режим доступа — URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/31/14.php>.
3. Положения ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе», г. Москва, 2017 год;
4. «Трансформаторы серии ТМГСУ», ОАО «МЭТЗ» Им. В.И. Козлова» [Электронный ресурс] — Режим доступа — URL: (дата обращения 09.12.2018);
5. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения;

УДК 621.316.925.1; ГРНТИ 44.29.31

ПРИМЕНЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КОНДЕНСАТОРНЫХ УСТАНОВОК 0,4 КВ

С. Чернов

*Рязанский Государственный Радиотехнический Университет,
Российская Федерация, Рязань, sergei_chernov@indox.ru*

Аннотация. В данной работе рассматривается устройство и принцип работы автоматизированной конденсаторной установки 0,4 кВ.

Ключевые слова: реактивная мощность, конденсаторная установка, коэффициент мощности, компенсация.

THE USE OF AUTOMATED CONDENSER INSTALLATIONS OF 0,4 KV

S. Chernov

*Ryazan State Radio Technical University,,
Russian Federation, Ryazan, sergei_chernov@indox.ru*

Abstract. In this paper we consider the device and the principle of operation of an automated capacitor Bank 0.4 kV.

Keywords: reactive power, capacitor Bank, power factor, compensation.

1. Введение

Распределение, потребление электроэнергии связано с решением многих задач и главной из них является - компенсация реактивной мощности. В электросетях 60% реактивной мощности (далее РМ) используют асинхронные двигатели, около 25% всей РМ - трансформаторы, 10% - приемники, которые используют для запуска и работы переменное магнитное поле (выпрямители, индукционные печи и т.д.) [1].

Огромное количество электрических устройств, которые используются в различных областях промышленности, вместе с активной мощностью потребляют и РМ. Присутствие смешанной нагрузки вынуждает к использованию более мощных трансформаторов и кабелей, и приводит к следующим нежелательным последствиям: повышение мощности потребления; повышения снижения напряжения и потерь в КЛ; уменьшения сроков службы оборудования; повышения на 30-60 % платежей за потребленную электроэнергию.

Одним из самых простых, доступных и эффективных способов энергосбережения и уменьшения себестоимости выпускаемой продукции - компенсация реактивной мощности.

Конденсаторные системы становятся очень распространенными в условиях увеличения стоимости электроэнергии [2].

В связи с тем, что наиболее сильный эффект от подключения компенсирующих устройств появляется выше точки включения, то с точки зрения разгрузки питающей сети от перепадов реактивной мощности, рационален их монтаж, как можно ближе к месту потребления реактивной мощности, т.е. как можно ближе к электроприемникам [3].

В целях компенсации реактивной мощности и повышения коэффициента мощности нагрузки в сетях переменного тока с номинальным напряжением 0,4 кВ используются автоматизированные конденсаторные установки (АКУ) мощностью от 50 до 400 квар.

2. Устройство и принцип работы

В состав автоматизированной конденсаторной установки 0,4 кВ (далее АКУ) входит: шкаф одностороннего обслуживания, укомплектованный цилиндрическими металлопленочными конденсаторами; аппаратура для коммутации, сигнализации и управления. Шкаф подключается сверху или снизу. Места, где соединяются медные шины, закрываются от случайных прикосновений защитными, прозрачными экранами. Коммутационная аппаратура (контакты, рубильники-предохранители) размещается на передней стороне конденсаторного модуля, конденсаторы – внутри конденсаторного модуля. Конденсаторный модуль удобный в обслуживании и при необходимости ремонта или замены элементов аппаратуры он выдвигается и переводится в ремонтное положение. Охлаждение конденсаторов - естественное. В состав АКУ входит регулятор реактивной мощности (РРМ), который обеспечивает автоматическое регулирование реактивной мощности. Ступени АКУ отключаются и включаются пускателями - конденсаторными контакторами. Применение гасящих резисторов и опережающих контактов позволяет снизить пусковые токи (до 200 от I ном) до значений не более 70 от I ном, что существенно увеличивает срок службы и надежность пускателей, конденсаторов, и конденсаторной установки в целом.

На рисунке 1 изображен общий вид шкафа автоматизированной конденсаторной установки.

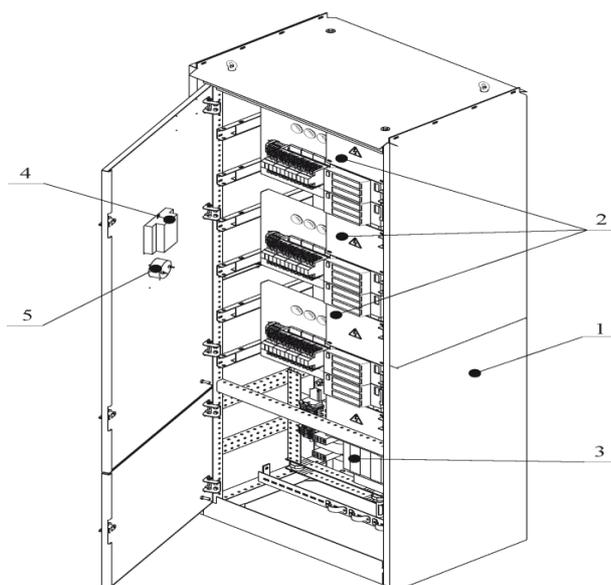


Рис. 1. Общий вид шкафа автоматизированной конденсаторной установки:
1 – шкаф АКУ ; 2 – конденсаторные модули; 3 – модуль ввода; 4 – РРМ; 5 – амперметры.

Общий вид конденсаторного модуля изображен на рисунке 2.

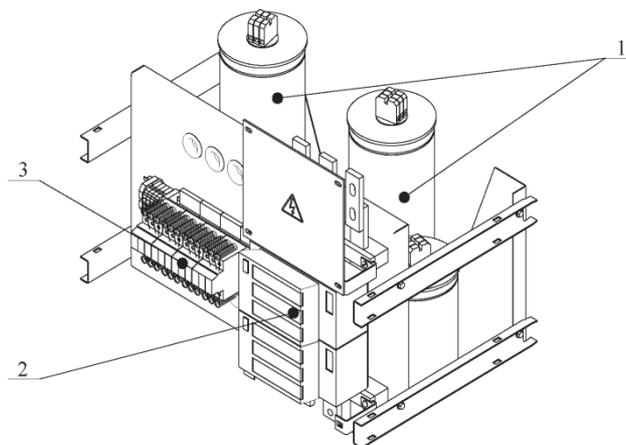


Рис. 2 Общий вид конденсаторного модуля:
1 – конденсаторы; 2 – рубильники-предохранители; 3 – контакторы.

Регулятор реактивной мощности совершает точный, дискретный автоматический выбор РМ автоматизированной конденсаторной установки, который необходим для компенсации РМ электросети в режиме реального времени. Контролирование параметров осуществляют - микропроцессорные РРМ:

- отслеживаются изменения РМ нагрузки в электрической сети и, корректируются значения $\cos\varphi$ (коэффициента мощности) в соответствии с заданным;
- исключена генерация РМ в сеть;
- исключено образование перенапряжения в сети, т. к. перекомпенсация, которая возможна при применении не регулируемых конденсаторных установок отсутствует;
- все параметры в сети, подлежащей компенсации, можно отслеживать визуально;
- контролируются режимы эксплуатации, работа элементов КУ.

Заданные коэффициенты мощности достигаются минимальным числом команд на переключения конденсаторных контакторов. Регулятор реактивной мощности на цифровом жидкокристаллическом индикаторе отражает следующие параметры:

ток, напряжение, частота, реактивная мощность, активная мощность, полная мощность, коэффициент мощности (заданное значение, текущее значения) [4].

В целях защиты от КЗ в автоматизированной конденсаторной установке на вводе установлен автоматический выключатель. В целях защиты конденсаторов в каждом конденсаторном модуле имеется блок рубильник-предохранитель.

Пример обозначения АКУ 0,4 кВ мощностью 200 квар с мин. ступенью регулирования 10 квар: АКУ 0,4-200-10УЗ.

Выводы

Использование косинусных конденсаторов в КУ делает возможным решения ряда задач:

- снижения установленных мощностей силовых трансформаторов, так как при снижении потребления РМ уменьшается потребление полной;
- возможность использования питания нагрузки по кабелям с меньшими поперечными сечениями, что приводит к уменьшению значений тока и как следствие уменьшение потерь в КЛ;

- подключение дополнительных полезных нагрузок.

Преимущества низковольтной КУ:

- незначительные затраты на эксплуатацию;
- простота монтажа и эксплуатации оборудования;
- скорая окупаемость;
- высокоэффективная компенсация РМ [2].

Библиографический список

1. «Компенсация реактивной мощности в сетях напряжением 6.3-10.5/0,4 кВ» Сетевое издание «Elec.ru» [Электронный ресурс] — Режим доступа — URL: <https://www.elec.ru/articles/kompensaciya-reaktivnoj-moshnosti-v-setyah-napryazh/> (дата обращения 01.02.2019);

2. «Применение конденсаторных установок 0,4 кВ», [Электронный ресурс] — Режим доступа — URL: <https://elcom-energo.ru/info/articles/primenenie-kondensatornykh-ustanovok-0-4-kv/> (дата обращения 01.02.2019);

3. «Электроснабжение», Б.И. Кудрин, Б.В. Жилин, М.Г. Ошурков, Ростов-на Дону, Феникс, 2018 год;

4. «Автоматизированные конденсаторные установки для компенсации реактивной мощности. Техническая информация». ОАО «ОАО "Мэтз Им. В. И. Козлова"», [Электронный ресурс] — Режим доступа — URL: http://metz.by/download_files/catalog/ktp/katalog_na_aku.pdf

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИЯ О МЕЖДУНАРОДНОМ ФОРУМЕ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» СТНО-2019»	3
МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ. РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА»	5
Секция «МИКРОВОЛНОВАЯ, ОПТИЧЕСКАЯ И КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»	5
Морев С.П., Дармаев А.Н., Комаров Д.А., Кузьмич К.В., Масленников С.П., Муравьев Э.К., Саблин В.М. Крупноструктурные автоэмиссионные источники тока для вакуумных СВЧ приборов: расчеты и эксперименты	5
Калашников Д.А., Парамонов Ю.Н. Моделирование наведенных токов коллектора многолучевого клистрона.....	9
Калашников Д.А., Парамонов Ю.Н. Моделирование режекторного фильтра магнетрона дециметрового диапазона.....	13
Бодажков Д.С. Использование аддитивной технологии для создания поляризаторов измерительного тракта КВЧ техники	17
Воробьев М.Д., Юдаев Д.Н. Влияние электронного объемного заряда при исследовании эмиссионных материалов методами электрофлукуационной диагностики	21
Гарипов М.М. Исследование вольтамперных характеристик тлеющего разряда	26
Жакупов С.Н. К вопросу о повышении разрешающей способности систем терагерцового имиджинга	30
Парамонов Ю.Н., Яковлев О.В., Сурков С.В. Трехмерное моделирование взаимодействия модулированных электронных пучков с электромагнитным полем в выходном резонаторе многолучевого клистрона	34
Сухорукова Н.В. Влияние паров йода на энергетические параметры ТЕА-СО ₂ лазера.....	39
Бурмистров Д.А., Мишин В.Ю., Серебряков А.Е., Климаков В.В. Исследование шумовой составляющей сигналов волнового твердотельного гироскопа	44
Пахомов В., Рыбачек В. Цифровое проектирование электронно-оптической системы СВЧ приборов	50
Титов М.А., Горлин О.А. Разработка и исследование источника питания для измерительного модуля системы контроля зданий и сооружений на основе солнечных элементов	56

Титов Н.А.

Многоступенчатые линейные источники тока в светодиодной светотехнике:
проблемы обеспечения электрических и светотехнических требований стандартов 60

Секция «ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА».... 69**Бекмурат Ф., Немкаева Р., Гусейнов Н., Рягузов А.П.**

Влияние наночастиц иридия на структуру аморфных алмазоподобных углеродных пленок 69

Голованова М.В., Холомина Т.А., Литвинов В.Г., Ермачихин А.В., Рыбин Н.Б.

Исследование электрофизических характеристик резистивных гетероструктур на основе оксида цинка 74

Литвинова В.С., Литвинов В.Г.

Идентификация параметров эквивалентной электрической схемы структуры металл–активный диэлектрик–металл 80

Логинов Д.С., Крютченко О.Н., Литвинов В.Г., Холомина Т.А., Ермачихин А.В., Рыбин Н.Б., Семенов А.Р.

Исследование параметров НЧ шума металлических контактов 84

Сазонов В.О., Вишняков Н.В., Воробьев Ю.В., Ермачихин А.В.

Разработка макета измерительного комплекса для исследования спектральной зависимости квантовой эффективности солнечных элементов 88

Семенов А.Р.

Низкочастотные шумовые характеристики диода Шоттки с глубокими энергетическими уровнями 91

Трусов Е.П., Литвинов В.Г.

Изучение спектров фотолюминесценции полупроводниковых гетероструктур с самоорганизованными квантовыми точками ZnSe/CdSe 96

Алпатов А.В., Воробьев Ю.В., Мараева Е.В., Рыбина Н.В., Трынов Д.Ю., Халугарова К.

Применение методики SCALE-SPACE к исследованию корреляционных свойств реальных поверхностей..... 100

Филяревич В.С., Алпатов А.В.

Выделение локальных признаков текстур поверхностей 105

Шувалов М.Ю., Гудзев В.В., Вишняков Н.В.

Методика идентификации механизмов переноса носителей заряда в структуре Me-a-Si:H..... 110

Тюшин А.С., Гудзев В.В., Литвинов В.Г.

Анализ влияния глубоких уровней на основные параметры биполярных транзисторов 113

Секция «ПРОМЫШЛЕННАЯ СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ»..... 117**Абрамова Г.Е.**

Разработка системы питания анода и управления специализированным газоразрядным прерывателем тока 117

Васин А.А., Петаева В.А., Васильева Т.Н.

Автоматизация процесса расчета наведенного напряжения 120

Колесник И.О., Кузин А.Н., Гололобов Г.П.

Реконструкция трансформаторной подстанции ТП-626 учебного корпуса №1 РГРТУ 124

Кузин А.Н., Гололобов Г.П., Колесник И.О.

Разработка распределительного устройства первого учебного корпуса РГРТУ 130

Леваков Н.И., Сливкин Е.В.

Модернизация защит блока генератор - трансформатор Дягилевской ТЭЦ 135

Чернов С., Афонин А.

Применение симметрирующих устройств в трансформаторах 6-10/0,4 кВ
для качественного электроснабжения потребителей 140

Чернов С.

Применение автоматизированных конденсаторных установок 0,4 кВ 143

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ

Научное издание

В 10 томах

Том 2

Под общей редакцией О.В. Миловзорова.

Подписано в печать 15.06.19. Формат 60x84 1/8.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л. 18,75.

Тираж 100 экз. Заказ № 1539.

Рязанский государственный радиотехнический университет,
Редакционно-издательский центр РГРТУ,
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.
Отпечатано в типографии Book Jet,
390005, г. Рязань, ул. Пушкина, д. 18