

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ ИНФОРМАТИЗАЦИИ  
СОЮЗ МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ, ИННОВАЦИОННЫХ  
И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РЯЗАНСКОЙ ОБЛАСТИ  
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

# **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ**

## **СТНО-2018**

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ФОРУМ**

**Сборник трудов**

**Том 2**

Рязань  
Book Jet  
2018

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

Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2018 [текст]: сб. тр. междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.2./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2018; Рязань. – 234 с.,: ил.

Сборник включает труды участников Международного научно-технического форума «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2018.

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 978-5-7722-0293-7

© Рязанский государственный  
радиотехнический университет, 2018  
© Издательство «Book Jet»,  
макет, 2018

## **ИНФОРМАЦИЯ О МЕЖДУНАРОДНОМ ФОРУМЕ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» СТНО-2018**

Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2018 состоялся 28.02.2018-02.03.2018 в г. Рязань в Рязанском государственном радиотехническом университете.

В рамках форума «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2018 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:**

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

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

Евдокимова Е.Н., д.э.н., проф., декан Инженерно-экономического факультета;

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Федорова Л.А., д.э.н., профессор кафедры «Государственное, муниципальное и корпоративное управление»;

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

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

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

### СЕКЦИЯ «МИКРОВОЛНОВАЯ И ОПТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»

УДК.004.932; ГРНТИ 89.57.35

#### РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ВЫХОДНОЙ СИСТЕМЫ МОЩНОГО МНОГОЛУЧЕВОГО КЛИСТРОНА

**С.Г. Асташов, В.И. Пугнин, С.А. Мельников, А.С. Арефьев, А.Н. Юнаков**

*АО "Научно-производственное предприятие "Исток" имени А.И. Шокина,*

*Российская Федерация, г. Фрязино, iidl@rambler.ru*

*Аннотация.* В данной работе представлены результаты модернизации конструкции выходной системы мощного широкополосного многолучевого клистрона, позволяющей настраивать выходную систему после откачки прибора.

*Ключевые слова.* Многолучевой клистрон, пассивный резонатор, коллекторная область, емкостная настройка, щель связи, выходная система.

#### DESIGN OF A HIGH POWER MULTIBEAM KLYSTRON OUTPUT CIRCUIT CONSTRUCTION

**S.G. Astashov, V.I. Puginin, S.A. Melnikov, A.S. Arefev, A.N. Yunakov**

*Joint-Stok company "Research and production Corporation "Istok" named after A.I. Shokin",*

*Russian Federation, Fryazino, iidl@rambler.ru*

*Annotation.* This article represents modernization results of a high power wideband multibeam klystron output circuit construction, which can be tune after klystron pumping out.

*Keywords.* Multibeam klystron, passive resonator, collector area, capacitive tuning, impedance matching vane, output circuit

Мощные клистроны в настоящее время являются основными приборами, используемыми в качестве выходных каскадов передатчиков радиолокационных станций (РЛС), работающих в коротковолновой части сантиметрового диапазона длин волн. Клистроны для РЛС должны обладать комплексом параметров [1] - широкой полосой, большим уровнем выходной мощности, большой длительностью импульса, электропрочностью, большим сроком службы, определяемой в основном плотностью тока, отбираемого с катода. Еще одной немаловажной характеристикой является минимальное напряжение луча и модуляции для обеспечения возможности получения удовлетворительных массогабаритных характеристик аппаратуры.

Всем вышеперечисленным требованиям к усилительным СВЧ приборам принципиально могут удовлетворять многолучевые клистроны (МЛК) [2]. Исследование многолучевых клистронов на сегодняшний день является актуальным, в связи с тем, что растут требования к параметрам РЛС, которые существенно зависят от параметров СВЧ приборов. В данной работе предполагается модернизация выпускаемого серийного мощного широкополосного многолучевого клистрона X-диапазона.

Клистрон имеет трехсвязную выходную систему (рис. 1). Существующая конструкция настройки первого пассивного резонатора была сделана в крышке резонаторного блока и выведена в коллекторную область. Настройка была возможна только до заварки прибора. Во время динамических испытаний МЛК иногда происходила расстройка выходной системы при нагреве прибора, а возможность настройки первого пассивного резонатора отсутствовала.

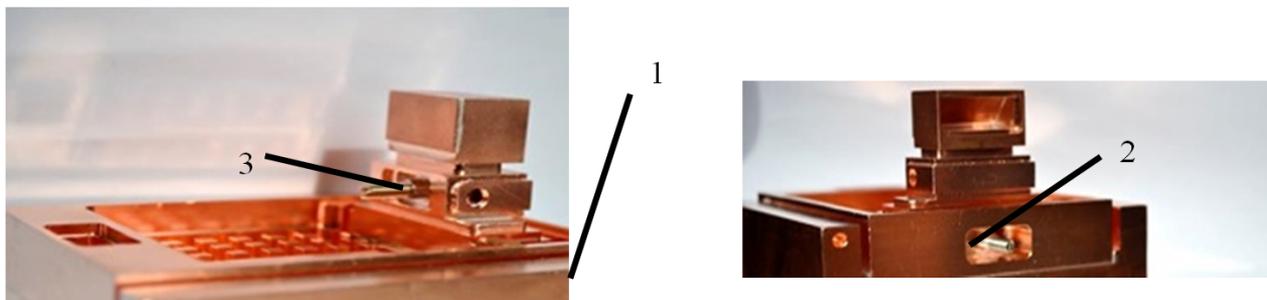


Рис. 1. Трехсвязная выходная система:  
 1 - активный выходной резонатор;  
 2 - первый пассивный резонатор,  
 3 - второй пассивный резонатор

Цель работы – разработка конструкции выходной системы, позволяющей настраивать выходную систему после откачки прибора.

Для решения данной цели была предложена конструкция первого пассивного резонатора, выполненная в виде отрезка волновода, работающего на виде колебания Н201, емкостная настройка которого выполнена на второй полуволне и вынесена из зоны максимального нагрева выходной системы, за коллекторную область (рис. 2).

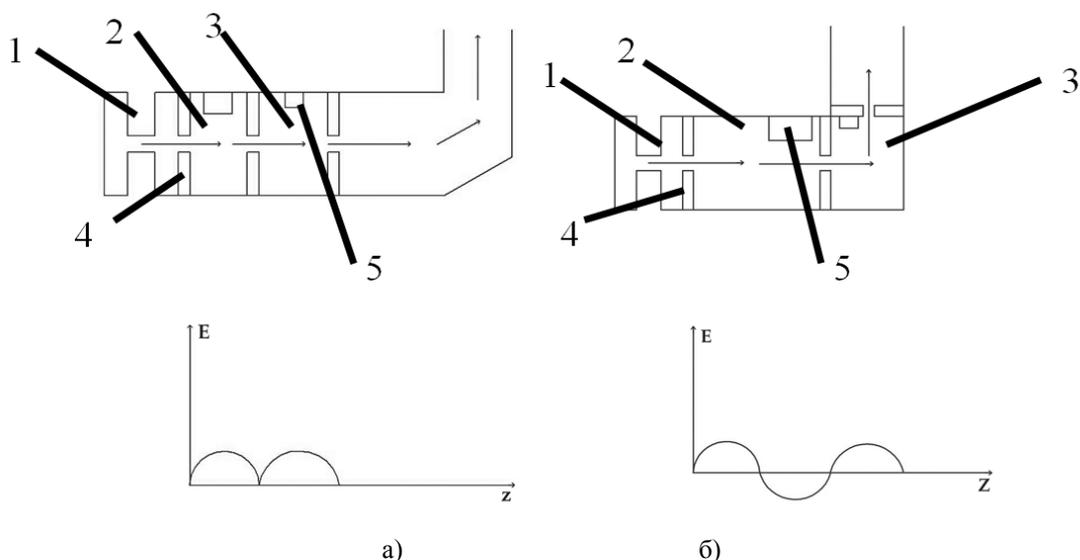


Рис. 2. Конструкция выходной системы: а) - существующая конструкция, б) – предложенная конструкция выходной системы;

- 1 – выходной активный резонатор;
- 2 – первый пассивный резонатор;
- 3 – второй пассивный резонатор;
- 4 – щели связи;
- 5 – емкостные выступы

Выходная система должна иметь строго определенную длину, так как ограничена размерами соленоида. Увеличение размеров первого пассивного резонатора привело к необходимости изменения конструкции второго пассивного резонатора. Новая конструкция второго пассивного резонатора выполненен в виде уголка, в котором выходной волновод смещен на  $90^\circ$  относительно первого пассивного резонатора.

Проектирование выходной системы осуществлялся следующим образом. Сначала была произведена настройка активного резонатора на необходимую частоту [3]. Далее были

подобраны геометрические размеры пассивных резонаторов, удовлетворяющих суммарно необходимой длине выходной системы. После подбора геометрии резонаторов осуществлялся полный расчет выходной системы.

Для этого необходимо было выставить порты излучения СВЧ сигнала и его приема в программе расчета (рис. 3). Порт излучения сигнала был установлен в средний пролетный канал активного резонатора, так как в этом случае искажение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), обусловленное неравномерностью поля в резонаторе, минимально.

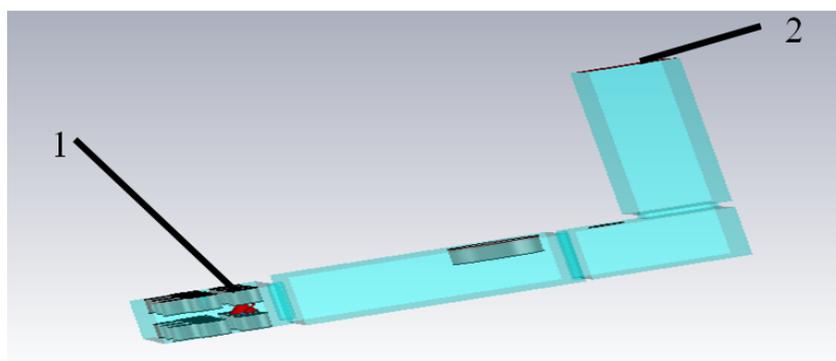


Рис. 3. Расположение портов излучения и приема СВЧ сигнала в расчетной модели:  
1 – Порт излучения СВЧ сигнала, 2 - Порт приема СВЧ сигнала

Путем изменения геометрических размеров щелей связи и емкостных настроек было получено равномерное распределение СВЧ поля выходной системы и ее АЧХ, представленные на рисунке 4.

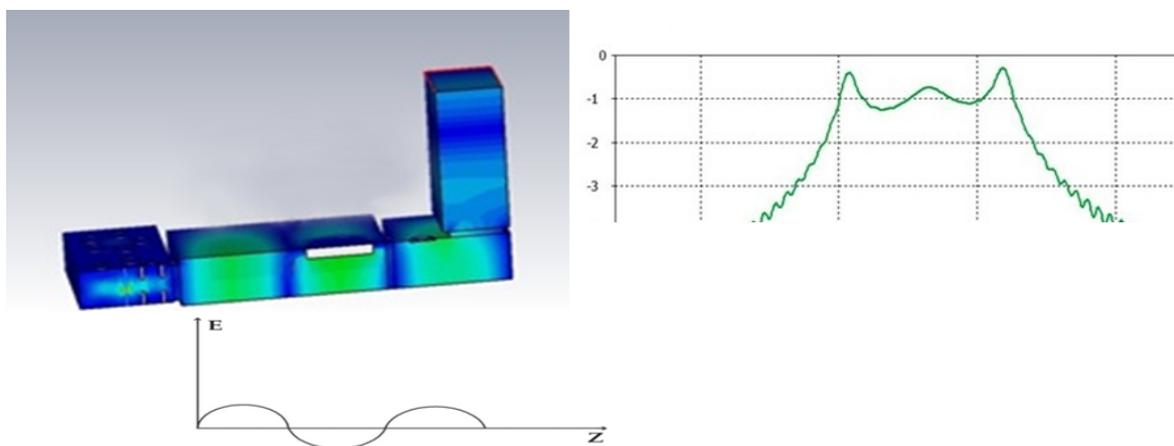


Рис. 4. Распределение СВЧ поля выходной системы, АЧХ

В соответствии с результатами расчетов собраны приборы с модернизированной выходной системой (рис. 5).

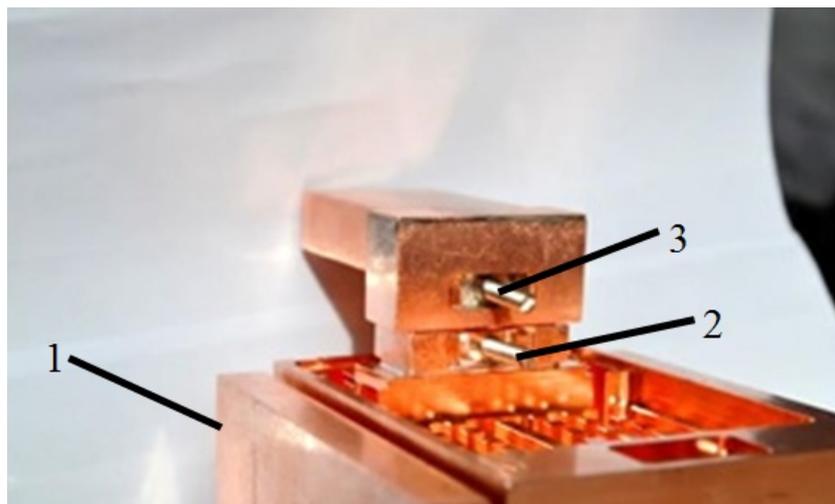


Рис. 5. Модернизированная конструкция выходной системы:

1 – выходной активный резонатор, 2 – первый пассивный резонатор, 3 – второй пассивный резонатор

Во время исследования, экспериментальной корректировки и настройки оптимизированной выходной системы на «холодных измерениях» полученная АЧХ совпала с расчетной. Проведены динамические испытания клистронов с модернизированной выходной системой, в результате которых были получены заданные выходные параметры. Успешно апробирована возможность настройки выходной системы после откачки приборов и проведения динамических испытаний на «холодных измерениях». Выполненная работа позволяет повысить процент выхода годных при изготовлении приборов, а также обеспечить ремонтпригодность в процессе эксплуатации.

### Библиографический список

1. Edward A. Gelvich, Ludvik M. Borisov, Yevgeny V. Zhary, Anatoli D. Zakurdayev, Alexandr S. Pobedonostsev, and Victor I. Poognin. The New Generation of High-Power Multiple-Beam Klystrons, IEEE, Vol.41, No.1, January 1993.
2. Пугнин В.И., Юнаков А.Н. Патент РФ 2507626. Многолучевой прибор О-типа, 2015г.
3. Генераторы и усилители СВЧ / Под ред. Лебедева И.В. – М.: «Радио-техника», 2005. – 352с.

УДК 621.385.7; ГРНТИ 47.29.37

## РАЗРАБОТКА И ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА СТРУКТУРНО-ШУМОВОГО АНАЛИЗА ЭМИТИРУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

М.Д. Воробьев, Д.Н. Юдаев

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

*Аннотация.* Рассмотрены предпосылки и результаты изучения эмитирующей поверхности современных металлопористых катодов (МПК) в экспериментальных приборах с диодной конструкцией с использованием образцов, получаемых на основании измерений фликкерной составляющей шумов эмиссионного тока.

*Ключевые слова.* Эмитирующая поверхность, фликкерная составляющая шума, эмиссионный ток.

## DEVELOPMENT AND PRACTICAL USE OF THE METHOD FOR STRUCTURAL-NOISE ANALYSIS OF SOLIDS EMITTING SURFACES

M.D. Vorobyev, D.N. Yudaev

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

*Abstract.* The preconditions and results of studying the emitting surface for modern metal-porous cathodes in experimental devices with a diode structure are considered. The images obtained on the basis of flicker noise component measurements of emission current are used.

*Keywords.* Emitting surface, flicker noise component, emission current.

### 1. Введение

Многочисленные поверхности активных электронных элементов, в первую очередь твердотельных и вакуумных, в определяющей степени оказывают влияние на результирующие эксплуатационные параметры, включая долговечность и надежность. Именно поэтому роль, которую выполняет поверхность при работе активного элемента, оказывается в фокусе пристального внимания как на этапе его проектирования, так и в процессе разработки технологического цикла, а также использования различных способов контроля ее состояния. Последнее связывают, как правило, с электронной микроскопией, требующей для своего осуществления подготовки специальных образцов и занимающей значительное время. В то же время расшифровка результатов не всегда способна привести к однозначным выводам, способным связать выявленные особенности с эксплуатационными параметрами. Вместе с тем хорошо известен инструмент, принципиальная эффективность которого для выявления степени совершенства поверхностей активных элементов хорошо известна – это измерение флуктуационных шумов [1]. Об уровне и характере шумов активных элементов можно косвенно судить по шумовым характеристикам приборов и устройств, в состав которых они входят, однако наиболее объективная информация, связанная со структурными и технологическими особенностями, содержится непосредственно в шумах протекающего через этот элемент тока. Например, для слоя полупроводника шумы протекающего тока могут содержать выраженную в разной степени информацию о процессах и структуре как в объеме, так и на поверхности, разделить которую не всегда представляется возможным. В то же время для элементов, в которых вклад явлений на поверхности или в приповерхностных областях при протекании тока, по крайней мере, предположительно, становится преобладающим, шумы протекающего тока будут связаны со структурой и процессами на поверхности. Примером таких элементов является двухэлектродная система, один из электродов которой является электронным эмиттером, а второй – коллектором. Электроды разделены вакуумным промежутком. Шумы эмиссионных токов, таким образом, могут служить источником информации для изучения структуры эмитирующих поверхностей, включая задачи создания эффективных электронных эмиттеров с гарантированным сроком службы. При этом необходимо, как минимум, выполнение следующих условий:

- наличие первоначальных исходных представлений о структуре эмитирующей поверхности и механизме возникновения шумов;
- учет особенностей связи между шумами электронной эмиссии и измеряемыми шумами в цепи протекания тока из-за наличия вакуумного промежутка между электродами.

В настоящей работе рассмотрены предпосылки и результаты изучения эмитирующей поверхности современных металлопористых катодов (МПК) в экспериментальных приборах с диодной конструкцией с использованием образцов, получаемых на основании измерений фликкерной составляющей шумов эмиссионного тока.

## 2. Структура эмитирующей поверхности и механизм возникновения шумов

Структура эмитирующей поверхности МПК в режиме эксплуатации неоднородна как по химическому составу, так и по рельефу, включает эмиссионные центры с малой работой выхода  $e\phi$  и участки с повышенной  $e\phi$ . Роль последних в шумовых характеристиках является определяющей благодаря тому, что именно они вносят преимущественный вклад в шумы вследствие того, что из-за малой плотности тока эмиссии не содержат над собой электронного пространственного заряда и поэтому не демпфируются. Токи, создаваемые эмиссионными центрами, вносят преимущественный вклад в отбираемый в целом с катода ток, однако их вклад в шумы незначительный из-за значительного по плотности демпфирующего объемного заряда, ими же создаваемого.

Указанные представления согласуются с результатами изучения дробовой компоненты шума [2], которая оказывается значительно больше теоретической по уровню. Таким образом, при измерении шумов, создаваемых эмитирующей поверхностью МПК, доступными для анализа являются области поверхности с пониженными значениями тока эмиссии, шумы которых полностью передаются в цепь измерений, то есть эмиссионные дефекты.

Спектральные характеристики фликкерной составляющей шума эмиссионного тока, как правило, характеризуются усредненной зависимостью от частоты  $f$  вида  $S_i(f) \sim 1/f$ , которая для МПК нередко оказывается более сложной и состоящей из ряда компонент с частотными зависимостями, подобно фликкерной составляющей шума полупроводников [1]:

$$S_i(f) \sim \frac{\tau}{1 + (2\pi f \tau)^2}, \quad (1)$$

где  $\tau = 1/2\pi f_{\text{пер}}$  – характеристическое время и связанная с ней и переходная частота  $f_{\text{пер}}$ , определяемые взаимодействием электронов с ловушками. Одной из причин появления подобных составляющих для эмитирующей поверхности МПК может быть динамика процессов, связанная с поверхностной миграцией активирующих атомов Ва. В этом случае (1) трансформируется к виду

$$S_i(f) \sim \frac{\tau}{1 + (2\pi f \tau)^{\frac{3}{2}}}, \quad (2)$$

а постоянная  $\tau$  определяется диаметром  $d$  эмиссионных дефектов предположительно круглой формы и коэффициентом поверхностной диффузии  $D$  [3]:

$$\tau = \frac{d^2}{D}. \quad (3)$$

## 3. Метод структурно-шумового анализа эмитирующей поверхности

Метод основан на разделении измеренной спектральной характеристики (СХ) шума тока, отбираемого с эмитирующей поверхности, на отдельные составляющие вида (2). Каждая выделенная составляющая на основании (2) и (3) содержит информацию о количестве дефектов определенного размера, что в целом позволяет количественно оценить степень неоднородности путем создания образа поверхности [4]. Получению образов должны предшествовать выбираемые для каждого типа поверхности такие режимы измерения шумовых характеристик как диапазон измеряемых токов и частот. В [4] рассмотрено выделение составляющих СХ с использованием так называемых базовых СХ, полученных для различных  $d$  при помощи заранее проведенного моделирования. В том случае, однако, если анализ проводится исключительно с целью получения сравнительной количественной характеристики

степени однородности однотипных эмитирующих поверхностей, разложение может быть проведено формально исключительно на основе (2).

Разделение измеренных СХ на составляющие проводится с помощью их синтеза путем суммирования базовых СХ в различных сочетаниях. Процедура разделения считается завершенной после достижения минимальных принятых различий в измеренной и синтезированной СХ. Перед тем, как подвергнуть измеренную СХ обработке, должно быть проведено ее сглаживание для устранения резких перепадов значений, связанных с особенностями метода измерений. В [4] показано, что наилучшие результаты дает сглаживание с использованием медианного фильтра и интерполяции кубическим сплайном.

Получаемые в результате проведения анализа образы носят в значительной степени относительный характер и представляют диаграммы распределения площадей  $S_d$ , занимаемой на поверхности эмиссионными дефектами с различным диаметром  $d$ .

#### 4. Использование метода структурно-шумового анализа для сравнительной оценки МПК

Были проанализированы эмитирующие поверхности МПК в экспериментальных диодных образцах. Плотность отбираемого при измерениях СХ тока  $I$  составляла  $0,35 \dots 0,57$  А/см<sup>2</sup>, температура и  $e\phi$  соответствовали штатному режиму работы и нормальной степени активирования. Диапазон частот при измерениях шума составлял  $10 - 10000$  Гц, что соответствовало минимальному воздействию маскирующих проявление фликкерной компоненты факторов. На рисунках 1 и 2 показаны диаграммы соответствия найденных значений  $S_d$  различных образцов различным значениям  $I$ .

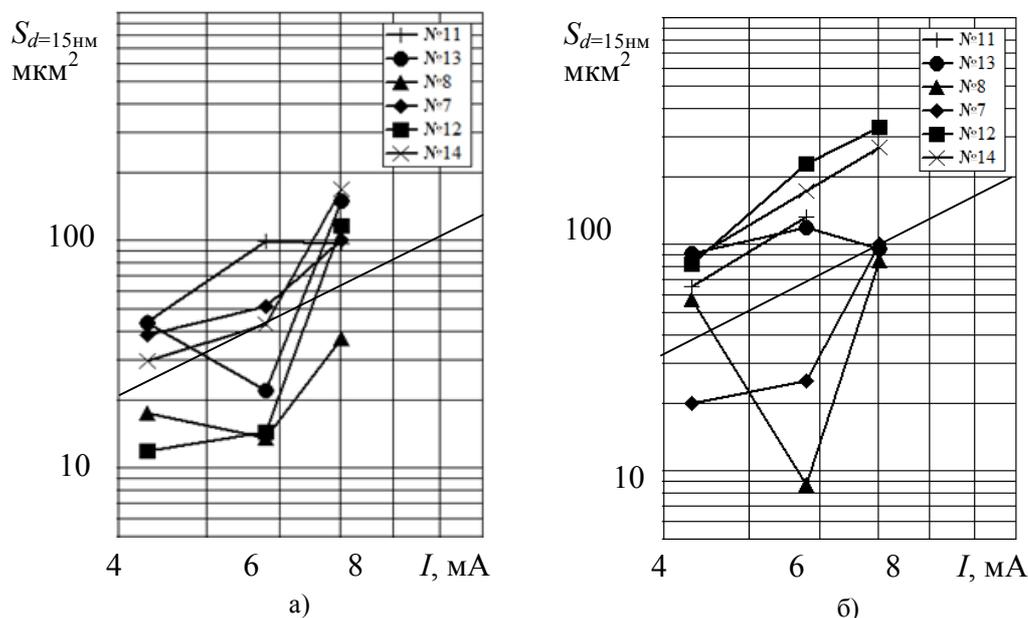


Рис. 1. Диаграммы соответствия площади дефектов и отбираемого тока для  $d=15$  нм.  
а) до наработки, б) после наработки

Как видно, максимальную площадь на эмитирующей поверхности занимают дефекты с минимальным (15 нм) диаметром, в то время как  $S_d$  с максимальным учтенным при анализе  $d=600$  нм оказались минимальными. Несмотря на малый диапазон изменения  $I$ , на рисунках 1а и 2а прослеживаются у некоторых образцов приблизительно квадратичные зависимости  $S_d(I)$ , типичные для шумовых характеристик термокатодов, работающих в  $\rho$ -режиме. В рамках описанной выше модели изменения такого характера могут быть объяснены только рас-

ширением насыщенных участков параллельно с увеличением  $I$ , причем такое расширение захватывает эмиссионные дефекты с различными  $d$ . Наряду с отмеченными особенностями для  $S_d$  при  $d=const$  существует заметный разброс значений у различных образцов, указывая на различия в структуре поверхности МПК и ее влияния на механизм зависимости от  $I$ .

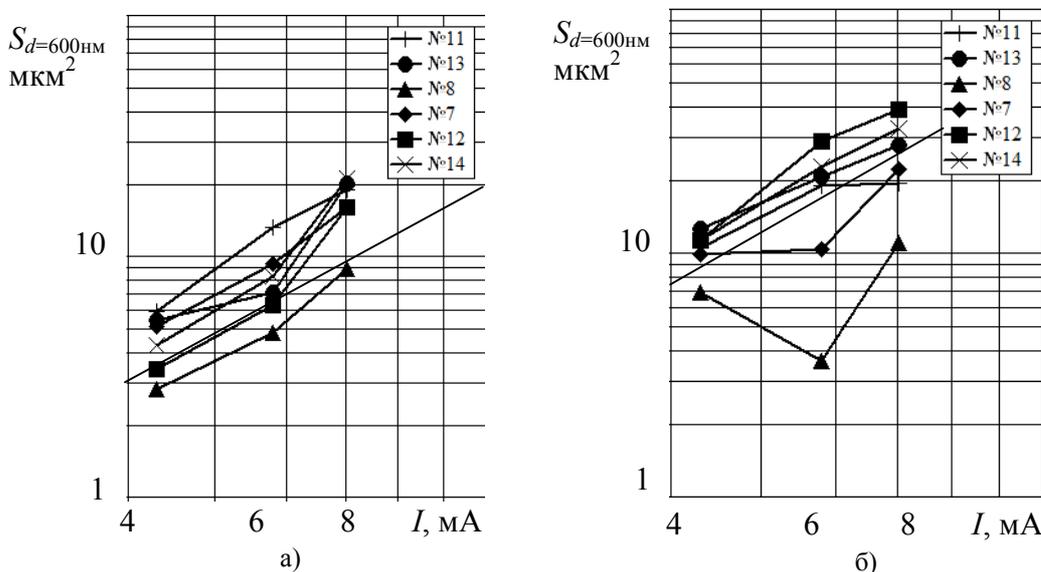


Рис. 2. Диаграммы соответствия площади дефектов и отбираемого тока для  $d=600\text{nm}$   
а) до наработки, б) после наработки

С целью определения влияния длительной работы МПК на структуру поверхности исследуемые образцы были подвергнуты длительной наработке в течение 4000 часов при плотности тока  $0,3\text{ A/cm}^2$  и повышенной на  $\sim 40\text{ K}$  температуре катода. Структурно-шумовой анализ (рис. 1б и 2б) в целом свидетельствует об увеличении площадей дефектов и возрастании разброса их значений.

Полученные результаты были использованы для установления связи структурных особенностей поверхности МПК со степенью их деградации после длительной наработки. Последняя оценивалась как изменение эффективной работы выхода  $e\varphi$ , измеренной в режиме коротких одиночных импульсов. Наиболее отчетливо исследуемая связь проявляется на диаграмме (рис. 3), где для каждого образца отмечены  $e\varphi$  до и после наработки вместе с найденными исходными значениями суммарной площади  $F_\Sigma$  для дефектов всех использованных при анализе диаметрах дефектов. При этом необходимо учесть, что согласно отмеченному ранее, основной вклад в  $F_\Sigma$  вносит площадь дефектов с минимальным  $d=15\text{nm}$ .

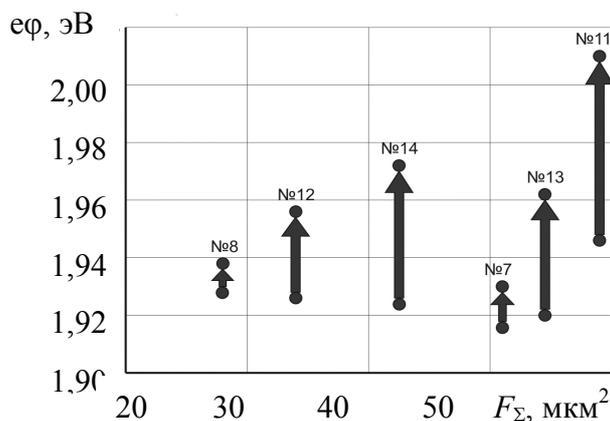


Рис. 3. Диаграмма соответствия работ выхода МПК до и после наработки и суммарной площади дефектов

## Заключение

Рассмотренный метод структурно-шумового анализа эмитирующих поверхностей позволяет перевести их изучение при помощи СХ низкочастотных шумов в количественную форму, предоставляя возможность для сравнительной оценки объектов.

## Библиографический список

1. Маковийчук М.И. Фликкер-шумовая спектроскопия. Структурно-неупорядоченные полупроводники. - Саарбрюккен, Германия, «LAP LAMBERT Academic Publishing», 2013. – 168с.
2. Шитов Е.М. Программно-аппаратный комплекс для шумовой диагностики термоэлектронных катодов электровакуумных приборов: автореферат дис. канд. техн. наук., Рязань, 2014.
3. K.M.Van Vliet, E.R.Chenette Noise spectra resulting from diffusion processes in a cylindrical geometry. Physica Volume 31, Issue 7, July 1965, pp. 985—1001.
4. Воробьев М.Д., Кумов Я.С., Юдаев Д.Н. Создание образа поверхности с эмиссионными дефектами на основе измерения низкочастотных шумов отбираемого тока // Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2017. Сборник трудов, т.1, Рязань, 2017. – С.266—269.

УДК 535.371; ГРНТИ 29.31.26

## ДИСТАНЦИОННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕЗОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА РЕЗОНАНСНОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ В ПАРАХ НАТРИЯ

**С.М. Бобровников\*, В.И. Жарков\*\*, В.О. Метлин\***

\* *Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Россия, Томск, bsm@iao.ru, vometlin@gmail.com*

\*\* *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
Россия, Томск, zharkov@iao.ru*

*Аннотация.* В работе рассматривается проблема разработки лидарной методики и создания аппаратуры для проведения измерений вертикального распределения температуры мезосферы с помощью резонансной флуоресценции в парах натрия. Описывается методика дистанционного определения температуры мезосферы по отношению интенсивностей лидарных сигналов резонансной флуоресценции в парах натрия для двух длин волн возбуждения дублета D<sub>2</sub>.

*Ключевые слова.* Лазер, натрий, резонансная флуоресценция, мезосфера

## REMOTE DETERMINATION OF THE MESOSPHERE TEMPERATURE BASED ON THE EFFECT OF RESONANCE FLUORESCENCE IN SODIUM VAPORS

**S.M. Bobrovnikov\*, V.I. Zharkov\*\*, V.O. Metlin\***

\* *National Research Tomsk State University*

*Russia, Tomsk, bsm@iao.ru, vometlin@gmail.com*

\*\* *Institute of Atmospheric Optics. V.E. Zuev SB RAS  
Russia, Tomsk, zharkov@iao.ru*

*Abstract.* The paper considers the problem of developing the lidar technique and creating equipment for measuring the vertical distribution of the mesospheric temperature by means of resonance fluorescence in sodium vapor. A technique is described for remote determination of the mesospheric temperature from the ratio of the intensities of lidar signals of resonance fluorescence in sodium vapor for two excitation wavelengths of the doublet D<sub>2</sub>.

*Keywords.* Laser, sodium, resonance fluorescence, mesosphere

В настоящее время создание экспериментальных установок гелиогеографического комплекса для развития систем мониторинга геофизической обстановки является весьма актуальной задачей. Несмотря на многолетнюю историю изучения ионосферы сегодня трудно

предсказать возникновение тех или иных явлений в ионосфере, так же как и не вполне ясно может ли состояние ионосферы заметно повлиять на физические параметры окружающей среды у поверхности Земли. Определение концентрации паров натрия и температуры на высотах 80-110 км – мощный инструмент контроля за состоянием ионосферы и верхней атмосферы, который поможет при составлении прогнозов изменения геофизической обстановки. [1].

Способ дистанционного измерения температуры мезосферы с помощью лидара предполагает дистанционное измерение доплеровского уширения спектральных линий компонентов мезосферы при лазерном возбуждении в зависимости от температуры [2]. Задача контроля величины доплеровского уширения спектральных линий является не тривиальной и требует применения методов спектроскопии высокого разрешения. Благодаря известному феномену существования мезосферных слоёв, содержащих пары щелочных металлов (Li, K, Na, Mg), обладающих большим сечением поглощения и резонансной флуоресценции, открываются большие возможности для развития методов дистанционного контроля параметров атмосферы на этих высотах за счёт использования эффектов резонансного взаимодействия лазерного излучения с атомными переходами в атомах щелочных металлов. При этом благодаря большой длине свободного пробега молекул в условиях низкой плотности атмосферы на этих высотах отсутствует эффект уширения давлением спектральных линий, а фактор тушения флуоресценции близок к единице.

Пары натрия имеют наибольшую концентрацию в мезосфере, и это является основанием для проведения исследований спектроскопических особенностей атома натрия с точки зрения использования его спектров для дистанционной диагностики состояния мезосферы [3]. Наибольший интерес с этой точки зрения представляет желтый дублет натрия  $D_2$ , проявляющийся в области длин волн 589 нм. На рисунке 1а представлены расчётные кривые уширенного эффектом Доплера контура линий дублета  $D_2$ , при трёх различных значениях температуры.

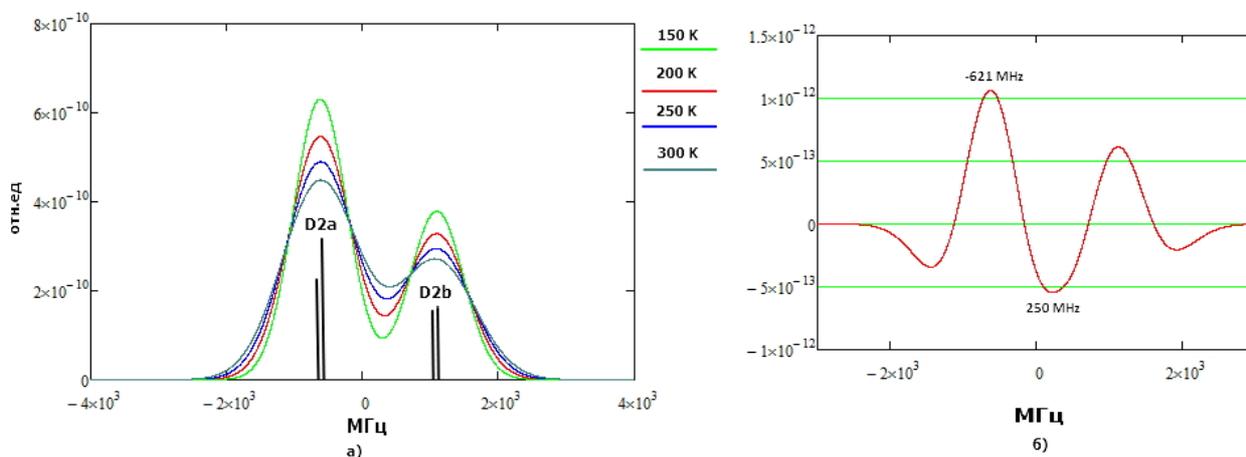


Рис. 1. а) Результирующий контур спектральных линий дублета натрия  $D_2$  при различной температуре; б) относительная температурная чувствительность интенсивности резонансной флуоресценции в зависимости от положения линии возбуждения в пределах контура  $D_2$ , при температуре паров 200 К.

Как видно из рисунка, дублет  $D_2$  содержит две линии, расстояние между центрами которых в шкале частот составляет величину порядка 1,7 ГГц, при полуширине каждой из них около 1 ГГц [4]. Уникальная форма дублета  $D_2$  в виде двух перекрывающихся доплеровских контуров позволяет построить методику измерения температуры паров натрия на основе использования температурной зависимости отношения интенсивностей резонансной флуоресценции при возбуждении на двух разнесённых частотах. При этом основной вопрос построе-

ния методики состоит в выборе двух частот возбуждения, обеспечивающих максимальную крутизну температурной зависимости отношения интенсивностей. С целью поиска оптимальной пары частот возбуждения было проведено математическое моделирование контура линий дублета  $D_2$  в приближении доплеровского уширения и проанализирована температурная зависимость формы контуров и их производных по температуре, определяющих температурную чувствительность метода [5-6].

На рисунке 1б представлена относительная температурная чувствительность интенсивности резонансной флуоресценции в зависимости от положения линии возбуждения в пределах контура перекрывающихся линий дублета  $D_2$ , при температуре паров 200 К. Из рисунка видно, что в зависимости от выбора частоты возбуждения в пределах контура дублета можно выделить две области с положительной зависимостью интенсивности резонансной флуоресценции от температуры, расположенные в окрестности центров линий дублета. Области с отрицательной зависимостью от температуры соответствуют крыльям линий дублета. Особый интерес вызывает точка между линиями дублета, где отрицательные температурные зависимости интенсивностей крыльев линий  $D_{2a}$  и  $D_{2b}$  складываются. Таким образом, анализ температурной чувствительности интенсивности резонансной флуоресценции в зависимости от положения линии возбуждения в пределах контура перекрывающихся линий дублета  $D_2$  позволяет найти оптимальную пару частот возбуждения, обеспечивающую максимальную крутизну температурной зависимости отношения интенсивностей резонансной флуоресценции. Если за начало отсчёта принять частоту, определяющую энергетический центр тяжести дублета  $D_2$ , то, как показывают расчёты, частотный сдвиг, соответствующий максимальной положительной температурной чувствительности будет составлять -625 МГц и совпадёт с положением центра линии  $D_{2a}$ . Максимальная отрицательная температурная чувствительность реализуется при частотном сдвиге 250 МГц, что соответствует провалу в огибающей между линиями  $D_{2a}$  и  $D_{2b}$ . Выбрав положение частот возбуждения внутри контура дублета можно построить температурозависимое отношение интенсивностей резонансной флуоресценции  $R(T)$  и исследовать его свойства.

$$R(T) = \frac{I_+}{I_-},$$

где,  $I_+$  и  $I_-$  – интенсивности сигналов резонансного рассеяния натрия на частотах, соответствующих максимуму чувствительности с положительной и отрицательной температурной зависимостью соответственно. Теоретическая зависимость оптимального отношения интенсивностей резонансной флуоресценции в парах натрия от температуры представлена на рисунке 2.

Отношение  $R(T)$  является ключевой характеристикой метода дистанционного определения температуры мезосферы на основе эффекта резонансной флуоресценции в парах натрия и может быть использовано как для непосредственного измерения температуры, так и для проведения расчётов при планировании экспериментов и разработке аппаратуры. Вопросы калибровки метода выходят за рамки темы настоящего сообщения и будут обсуждены в дальнейшем.

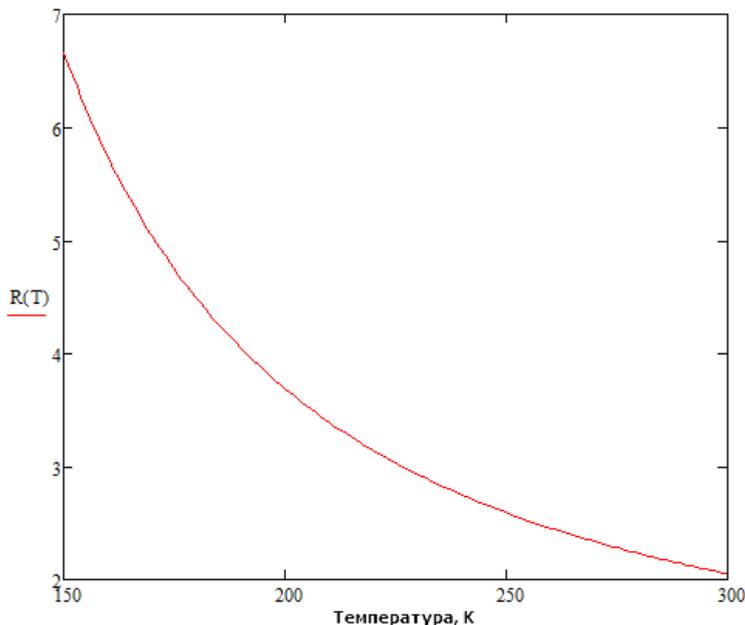


Рис. 2. Зависимость отношения интенсивностей сигналов от температуры

### Библиографический список

1. Weirkamp C. Lidar Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere. Springer Science, 2005 - P. 317-366.
2. Takashi Fujii, Tetsuo Fukuchi. Laser remote sensing. CRC Press, 2005. P. 208-255.
3. Bills R., Gardner C., Narrowband lidar technique for sodium temperature and Doppler wind observations of the upper atmosphere // Optical Engineering. 1991. V. 30. P. 13-21.
4. Зуев В.В., Ельников А.В., Бурлаков В.Д. Лазерное зондирование средней атмосферы. – Томск: РАСКО, 2002. - 352 С.
5. Nesse H., Heinrich D., Williams B.P., et al. A case study of a sporadic sodium layer observed by the ALOMAR Weber Na lidar // Annales Geophysicae., 2008. V. 26. P. 1071-1081.
6. Hu Xiong, Yan ZhaoAi, Guo ShangYong. Sodium fluorescence Doppler lidar to measure atmospheric temperature in the mesopause region // Chinese Science Bulletin. 2011. V. 56. N 4-5. P. 417-423.

УДК 621.387.322; ГРНТИ 47.29.33

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ИСТОЧНИКОВ

**А.Е. Чижиков, В.В. Дуюнов**

*Рязанский государственный радиотехнический университет*

*Россия, Рязань, valentindnv@gmail.com*

*Аннотация.* Исследованы временные характеристики видимого излучения фотолуминофора и ультрафиолетового излучения, возбуждающего фотолуминофор. Получены соотношения длительностей и амплитуд излучений фотолуминофора и ультрафиолетового излучения. Приведены осциллограммы трех стадий режима работы фотолуминофора.

*Ключевые слова.* Фотолуминофор, ультрафиолетовое излучение, временные характеристики, излучение фотолуминофора.

## INVESTIGATION OF TIME CHARACTERISTICS OF GAS-DISCHARGE RADIATION SOURCES

A.E. Chizhikov, V.V. Duyunov

*Ryazan state radio engineering university*

*Russia, Ryazan, valentindnv@gmail.com*

*Abstract.* Investigated the temporal characteristics of the visible radiation of fotoluminofore and ultraviolet radiation of the excitation photoluminophor. The obtained ratios of the durations and amplitudes of radiation of fotoluminofore and ultraviolet radiation. Are the waveforms of the three stages of the mode of operation of fotoluminofore.

*Keywords.* Photoluminophor, ultraviolet radiation, temporal characteristics, radiation fotoluminofore.

### 1. Введение

В промышленности, быту, науке и технике широкое применение находят различные виды люминофоров (кристаллофосфоров) - веществ, способных поглощать энергию естественных или искусственных источников и преобразовывать её в видимое излучение различного спектрального состава. Один из видов люминофоров - фотолюминофоры, которые преобразуют излучение от ультрафиолетового до инфракрасного диапазона длин волн в видимый свет.

Фотолюминофоры (ФЛФ) широко применяются в лампах дневного света, плазменных индикаторах, сверх ярких светодиодах белого цвета, для регистрации пространственного распределения полей излучения ИК – СВЧ -волн и в других устройствах. А в традиционных жидкокристаллических дисплеях подсветка осуществляется с помощью синих светодиодов, покрытых желтым ФЛФ для создания светового потока в относительно широкой полосе со спектральным максимумом в желтой области [1].

При работе люминофоров в импульсном режиме реализуются три стадии: разгорание, насыщение, послесвечение видимого излучения. Длительность и закономерность протекания каждой из стадий зависят от материала люминофора, длительности и интенсивности возбуждающего импульса и других факторов. При этом для более эффективного использования подведенной энергии необходим выбор её интенсивности, формы импульса, частоты следования и других факторов.

Интенсивность излучения ФЛФ зависит от спектрального состава и интенсивности ультрафиолетового излучения (УФИ). В качестве источника возбуждающего излучения часто используется излучение тлеющего или дугового газового разряда.

Известно, что при использовании для возбуждения ФЛФ излучения газового разряда в ксеноне или его смесях возбуждение осуществляется излучением континуума молекулярных ионов Хе в диапазоне длин волн 150- 250 нм (в основном 172 нм).

Континуум генерируется при диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов Хе<sub>2</sub><sup>+</sup> в соответствии с равенством:



Молекулярные ионы образуются при кратковременном разряде в газе в результате реакции конверсии – ассоциации иона с атомом в тройных столкновениях:



При последнем варианте процесса возникающие  $\text{Xe}_2^+$  ионы находятся в возбужденном колебательном состоянии. Пока оно сохраняется, возможна диссоциативная рекомбинация молекулярного иона [2,3].

Концентрация молекулярных ионов достигает максимума после окончания импульса тока и медленно спадает в течение десятков микросекунд [4,5].

Выбор режима возбуждения ФЛФ зависит от задачи преобразования и должен обеспечивать либо максимальную яркость, либо максимальную эффективность. При этом выбор интенсивности и длительности разряда являются основным фактором, определяющим возможности выбранного режима.

Целью данной работы было исследовать временные и количественные характеристики видимого излучения фотолуминофора и ультрафиолетового излучения, возбуждающего фотолуминофор.

## 2. Методика эксперимента

В нашей работе в качестве источника УФИ в ячейках с люминофором используется разряд между проволочными электродами в промышленной газоразрядной индикаторной панели с большим числом ячеек (ИГГ 32x32) с размером ячейки 10x10 мм<sup>2</sup>. Люминофор зеленого цвета свечения (ФГИ 528-1) был нанесен на внутреннюю лицевую поверхность ячейки.

Основными контролируемыми характеристиками являются полная интенсивность излучения ячейки, интенсивность УФИ разряда, частота следования импульсов, средний и импульсный ток. Из-за невозможности контроля в готовой панели выхода УФИ, контроль за относительным изменением выхода УФИ проводился по измерениям интенсивности инфракрасного излучения разряда (ИКИ). Пропорциональность этих двух видов излучения была подтверждена в работе [6]. Наполнение ячейки смесь He, Ne, Xe при давлении 105 торр.

Еще одна особенность, которую необходимо было учитывать – при увеличении частоты следования импульсов уменьшается время запаздывания (задержки) и время формирования разряда, что приводит к росту длительности импульса тока и маскирует влияние частоты. При малой длительности импульсов увеличение частоты приводит также к росту амплитуды импульсов тока, поэтому необходимо поддерживать неизменной амплитуду импульсов тока на разных частотах.

Кроме того, так как система электродов ячейки состоит из ортогональных проволочных анодов и катодов, то для обеспечения одновременного возникновения разряда в каждом пересечении необходимо подавать импульс напряжения достаточной амплитуды через ограничительное сопротивление. Это не позволяет получить импульсы тока малой амплитуды. В работе использовались 8 ограничительных сопротивлений номиналом от 7 до 100 кОм входящих в измерительную установку.

Основной эксперимент проводился в режиме без насыщения ФЛФ и разряда.

Блок-схема измерительной установки приведена на рисунке 1.



Рис. 1. Блок-схема измерительной установки

При проведении эксперимента снимались осциллограммы импульсов видимого и инфракрасного излучения ФЛФ (участков разгорания, послесвечения), частота, длительность и форма импульсов тока и напряжения ячеек, их полное излучение. В качестве источника питания использовался лабораторный стенд (380В), генератор запускающих импульсов Г5-54, осциллограф TDS2024В и преобразователь излучения в электрический сигнал OPT209P фирмы Vugr Brow.

Для выделения амплитуды инфракрасного излучения, в паре с преобразователем излучения OPT209P, использовался светофильтр КС-19, спектр пропускания которого приведен на рисунке 2(б). Светофильтр позволяет выделить излучение от 700 нм, верхний предел фиксирования амплитуды ИКИ ограничивался спектральной характеристикой датчика 1100 нм (рис. 2).

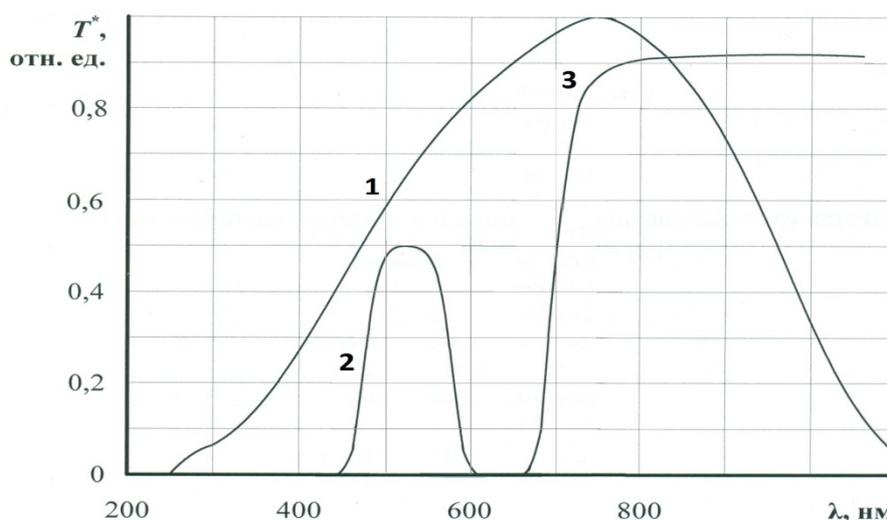
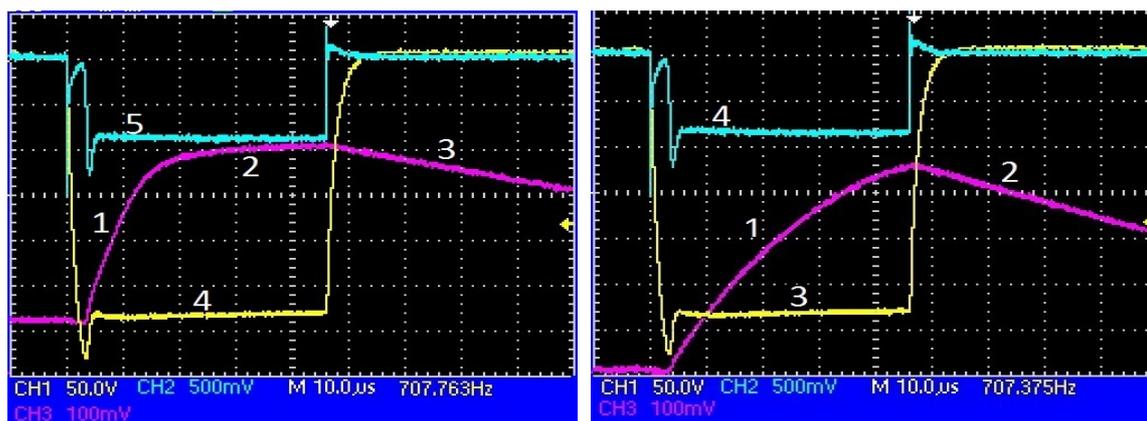


Рис. 2. Спектральные характеристики преобразователя излучения OPT209P(1), люминофора зеленого цвета ФГИ 528-1(2) и светофильтра КС-19(3)

Приведенная на рисунке 3 (а) экспериментальная осциллограмма показывает полное излучение ФЛФ для трех режимов работы ФЛФ. Обе кривых излучения имеют один уровень

нуля. В режиме работы с насыщением кривая полного излучения не успевает опускаться до нуля, обусловлено это тем, что для режима насыщения длительность импульсов тока и напряжения на ячейке велики и время послесвечения значительно больше времени следования импульсов тока и напряжения на ячейке. Кривая излучения ячейки имеет характерную полку (2) для режима работы с насыщением ФЛФ. Далее идет длинный хвост послесвечения (3). На втором рисунке 3 (б) осциллограмма снята с использованием светофильтра КС-19. Излучение ФЛФ не регистрируется. Время разгорания существенно больше, насыщение отсутствует, время послесвечения существенно меньше.



а)

б)

Рис. 3. 1- участок разгорания, 2-насыщения и 3-послесвечения ФЛФ, 4- импульс напряжения на ячейке,5-импульс тока на ячейке (а); 1-участок разгорания, 2- послесвечения разряда, 3- импульс напряжения на ячейке, 4-импульс тока на ячейке (б)

При проведении эксперимента фиксировались амплитуды полного излучения ( $F_{пол}$ ) и инфракрасного излучения ( $F_{ики}$ ) (табл. 1). Амплитуда излучения ФЛФ ( $F_{флф}$ ) рассчитывалась как разность между амплитудой полного излучения и амплитудой ИКИ.

Таблица 1. Соотношения амплитуд излучения ФЛФ и ИКИ (длительность им.тока 10мкс, частота следования 1кГц)

$I_{ср.}$ мкА	13	18	26	36	51	75	90	115
$I_{им.}$ мА	1,20	1,44	2,20	3,20	4,48	6,24	8,48	10,90
$F_{пол.}$ мВ	88	120	160	208	264	328	380	396
$F_{ики.}$ мВ	58	68	84	116	164	178	220	254
$F_{флф.}$ мВ	30	52	76	92	100	150	160	142

Сравнение полученных характеристик, приведенное в таблице, показывает, что амплитуда инфракрасного излучения, пропорционального УФИ, больше амплитуды излучения ФЛФ. Из полученных данных в ходе эксперимента следует также, что полная длительность излучения разряда существенно меньше, длительности видимого излучения ФЛФ. Длительность возбуждающего излучения разряда на уровне 0,1 составляет 250-300 мкс. Длительность послесвечения ФЛФ на уровне 0,1 составляет 1,5 мс.

### Основные выводы

Таким образом, анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- длительность излучения разряда существенно меньше длительности видимого излучения ФЛФ,

- интенсивность излучения разряда достигает максимума либо к концу импульса тока, либо после его окончания.
- максимум интенсивности излучения разряда существенно больше максимума излучения ФЛФ.

### Библиографический список

1. Фок М.В. Вопросы фотолюминесценции. Рекомбинационная люминесценция и лазерная спектроскопия// Труды ФИАН. Наука. 1980. Т.117. С. 80-121.
2. С.В. Автаева Физико-химические процессы в емкостных и барьерных разрядах и их электрические и оптические характеристики. Автореферат дисс. Д.ф.м.н. Спец. 01.04.08 – Физика плазмы. Бишкек, 2012.
3. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Научное издание. Изд. Дом «Интеллект». Долгопрудный, 2009, 734 с.
4. Егоров В.С., Пастор А.А. Влияние реакций с участием молекулярных ионов на характер послесвечения разряда в инертных газах. Сб-к «Спектроскопия газоразрядной плазмы» Вып. 1, с. 80 -105, Изд. ЛЭТИ. Ленинград, 1976.
5. Н.М. Наврузова, В.Ф.З. Папп, Е.В. Сталин. Исследование ксенонсодержащих смесей в условиях цветных ГИП переменного тока. Эл. Техн. Сер. 4. Вып.2 (85),1981, с.41-44.
6. Чижиков А.Е., Лебедь В.Н. Исследование причин ограничения яркости фотолуминофоров в плазменных индикаторах// Вестник РГРТА. 2004. Вып.14. С. 90-93.

УДК 53.087; ГРНТИ 59.71.33

## МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ПОРОГА СИНХРОНИЗАЦИИ ВСТРЕЧНЫХ ВОЛН В КОЛЬЦЕВОМ ЛАЗЕРНОМ ГИРОСКОПЕ

**О. В. Кижаяев, А. Е. Серебряков, В. Ю. Мишин, В. В. Климаков**

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Российская Федерация, Рязань, guess460@gmail.com*

*Аннотация.* В данной работе реализован алгоритм регистрации порога синхронизации встречных волн в кольцевом лазерном гироскопе на базе отладочной платы Stm32f429 discovery.

*Ключевые слова.* Порог синхронизации встречных волн, кольцевой лазерный гироскоп, микропроцессорные системы.

## MICROPROCESSOR SYSTEM OF MEASUREMENT OF THE THRESHOLD OF SYNCHRONIZATION OF COUNTERPROPAGATING WAVES IN A RING LASER GYROSCOPE

**O. V. Kizhaev, A. E. Serebryakov, V. Yu. Mishin, V. V. Klimakov**

*Ryazan State Radioengineering University,  
Russian Federation, Ryazan, guess460@gmail.com*

*Abstract.* In this paper, we implemented an algorithm for registering the threshold of synchronization of counterpropagating waves in a ring laser gyroscope based on the Stm32f429 discovery debug card.

*Keywords.* Threshold of synchronization of counterpropagating waves, ring laser gyroscope, microprocessor systems.

### 1. Введение

Решение современных навигационных задач предполагает использование лазерных гироскопов (ЛГ) в составе бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС). Серийный выпуск данных систем – сложный технологический процесс, требующий постоянной оценки качества изготовления узлов и деталей в составе выпускаемых устройств. Большое значение для данной процедуры имеют аппаратное обеспечение и методика оценки

параметров, определяющих соответствие выпускаемых компонентов требованиям к устройствам данного класса [1].

Основным параметром, характеризующим случайную составляющую ошибки ЛГ, является порог синхронизации встречных волн [2].

Традиционный способ измерения порога синхронизации основан на уменьшении (увеличении) скорости вращения ЛГ вплоть до исчезновения (появления) выходных сигналов. Данная методика требует наличия специализированных и дорогостоящих испытательных стендов, что увеличивает затраты и время на производство.

Альтернативный подход основан на цифровой обработке квадратурных сигналов ЛГ и выделении информации о пороге синхронизации встречных волн [3]. Такой подход снижает требования по стабильности угловых перемещений прецизионного поворотного устройства и отличается более простой технической реализацией и частичной автоматизацией процесса измерения порога синхронизации.

Цель данной работы: реализация алгоритма регистрации порога синхронизации встречных волн в ЛГ на основе цифровой обработки квадратурных сигналов в микропроцессорной системе.

Достижение поставленной цели требует решения следующих задач:

1. Анализ алгоритма цифровой обработки первичных данных ЛГ, реализующего измерение величины порога синхронизации встречных волн;
2. Осуществление выбора микропроцессорной платформы для реализации устройства измерения порога синхронизации встречных волн;
3. Адаптация выбранного алгоритмического решения под конкретную микропроцессорную платформу.

## **2. Анализ алгоритма цифровой обработки квадратурных сигналов лазерного гироскопа**

Алгоритм измерения величины порога синхронизации встречных волн на основе цифровой обработки первичных сигналов ЛГ подробно рассмотрен в работе [4].

Особенностью данного алгоритма является следующая последовательность выполняемых операций:

1. Дискретизация первичных квадратурных сигналов;
2. Аппроксимация эллипсом точек, соответствующих оцифрованным участкам реализации;
3. Определение параметров первичных сигналов;
4. Вычисление фазы Саньяка;
5. Определение порога синхронизации встречных волн.

Выходные сигналы ЛГ можно представить в следующем виде:

$$U_c(t) = U_{c,0} + U_{c,m} \cdot \cos(\psi(t)), \quad U_s(t) = U_{s,0} + U_{s,m} \cdot \sin(\psi(t) + \psi_0) \quad (1)$$

где  $U_{c,0}$  и  $U_{s,0}$  – постоянные составляющие смещений,  $U_{c,m}$  и  $U_{s,m}$  – амплитуды квадратурных сигналов,  $\psi(t)$  – фаза Саньяка,  $\psi_0$  – фазовый сдвиг, обусловленный несовершенством оптической системы.

Для перехода от оцифрованных записанных последовательностей информационных сигналов ЛГ к величине порога синхронизации необходимо иметь информацию о смещениях  $U_{c,0}$ ,  $U_{s,0}$ , амплитудах  $U_{c,m}$ ,  $U_{s,m}$  и фазовом сдвиге  $\psi_0$ .

Искомые величины определяются из аппроксимации эллипсом пар отсчетов  $U_{c,n}$ ,  $U_{s,n}$ ,  $n = 1 \dots N$ , ( $N$  – количество пар отсчетов). По найденным значениям параметров сигналов и их накопленным отсчётам восстанавливается фаза Саньяка  $\psi_n$ . Далее, с использованием процедуры синхронного детектирования полученной последовательности, вычисляется значение порога синхронизации  $WL$ .

### 3. Выбор микропроцессорной платформы и алгоритм работы системы регистрации порога синхронизации

Структурная схема измерительного устройства, реализующего алгоритм измерения порога синхронизации представлена на рисунке 1.

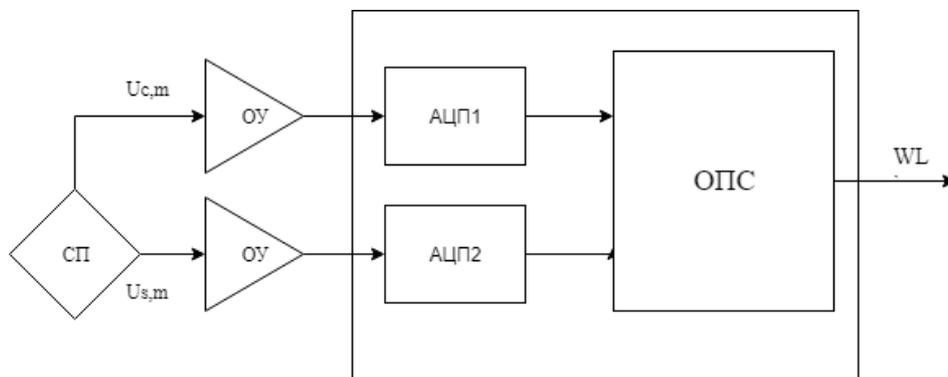


Рис. 1. Структурная схема разрабатываемой системы измерения порога синхронизации встречных волн в лазерном гироскопе:

- СП – смесительная призма секционированного фотоприемника ЛГ;
- ОУ – операционные усилители;
- АЦП – аналогово-цифровые преобразователи;
- ОПС – блок обработки первичных сигналов ЛГ;
- WL – выходной параметр (порог синхронизации встречных волн).

Для создания устройства измерения порога синхронизации встречных волн был проведен сравнительный анализ существующих микропроцессорных систем. Критериями, определяющими выбор платформы для разработки, являлись: быстродействие, надёжность и наличие необходимых периферийных устройств. В результате был выбран микроконтроллер (МК) stm32f429 входящий в состав отладочной платы stm32f429 discovery. Достоинствами данного устройства являются: современная архитектура ARM Cortex M4, поддержка высокоуровневых языков программирования и различных интегрированных сред разработки, встроенный программатор, LCD дисплей и подробная техническая документация от производителя.

Работа алгоритма измерения порога синхронизации на выбранном МК показана на рисунке 2.

В первом блоке производится инициализация и настройка периферийных устройств МК для сбора и записи серий отсчётов первичных сигналов ЛГ. Дискретизации сигналов осуществлялась на частоте  $f_s = 500$  кГц с разрядностью 16 бит. Выбор частоты обусловлен необходимостью регистрации первичных сигналов ЛГ при допустимых угловых скоростях вращения, не подверженной воздействию эффекта элайзинга (aliasing). Для передачи последовательностей оцифрованных значений в оперативную память МК был использован модуль прямого доступа к памяти DMA (Direct memory access).

В последующих блоках выполняются необходимые математические операции для определения порога синхронизации WL, в соответствии с рассмотренным выше алгоритмом.



Рис. 2. Функциональная блок-схема работы системы цифровой обработки данных ЛГ

Для удобства пользователя, вывод информации о значении порога синхронизации осуществляется на LCD дисплей устройства, после чего система начинает повторное выполнение программы.

#### 4. Заключение

Произведен анализ алгоритма цифровой обработки первичных данных ЛГ, реализующих измерение величины порога синхронизации встречных волн. Осуществлён выбор микропроцессорной платформы для реализации устройства измерения порога синхронизации встречных волн. Реализован алгоритм регистрации порога синхронизации встречных волн в ЛГ на основе цифровой обработки квадратурных сигналов на базе отладочной платы Stm32f429 discovery.

#### Библиографический список

Магомедова Г.М Модернизация системы регулировки периметра Зеemanовского лазерного гироскопа // Молодёжный научно-технический вестник. – 2015. – № 10.

УДК 531.717.81, 621.373.8; ГРНТИ 29.19.19

## ФУРЬЕ-ФИЛЬТРАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ, ПОЛУЧЕННОГО С ПОМОЩЬЮ АСМ

П.В. Коротцов, И.В. Логин

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, sea89s@yandex.ru*

*Аннотация.* В данной статье рассматриваются способы устранения артефактов сканирования на изображениях микро – рельефа диэлектрика полученных в процессе сканирования на атомно-силовом микроскопе (АСМ). Рассматриваемые методы основаны на аппроксимации поверхностью и Фурье-фильтрации.

*Ключевые слова.* Атомно-силовой микроскоп, фурье-фильтрация, аппроксимация, артефакты сканирования.

## IMAGE FOURIER-FILTERING OF THE SURFACE RELIEF OBTAINED BY AFM

P.V. Korottsov, I.V. Login

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Russia, Ryazan, sea89s@yandex.ru*

*Abstract.* This article discusses ways to eliminate scanning artifacts on images of the micro - relief of a dielectric obtained during scanning with an atomic force microscope (AFM). The methods considered are based on surface approximation and Fourier filtering.

*Keywords.* Atomic force microscope, Fourier filtering, approximation, scanning artifacts.

### Введение

В настоящее время, в ряде высокоточных приборов, таких как интерферометр Фабри–Перо, кольцевых лазерных гироскопах и некоторых других устройствах встречается проблема формирования поверхности диэлектрика с шероховатостью в несколько нанометров [1]. Данный фактор имеет важное значение, так как если поверхность будет недостаточно отполирована, то это приведет к рассеянию лазерного излучения на зеркалах. Как следствие – ошибки и неточности в работе приборов. Анализ таких поверхностей проводится с помощью АСМ микроскопа.

Как правило, экспериментально зарегистрированный скан участка поверхности наклонен относительно плоскости сканирования (рис. 1) вследствие неточной установки образца относительно зонда, а также из-за температурного дрейфа [2-3]. Кроме наклона АСМ-изображение искривлено, поскольку движение сканера микроскопа нелинейно влияет на положение зонда над поверхностью исследуемого объекта.

Целью данной работы является фильтрация искажений вносимых АСМ на изображение рельефа зарегистрированной поверхности.

### Фильтрация АСМ-изображений

Распространенный способ компенсации таких искажений - поиск с помощью метода наименьших квадратов поверхности порядка  $P$ , аппроксимирующей множество отсчетов высоты, с последующим вычитанием данной поверхности из исходного изображения [2].

Исключение из АСМ-скана поверхности первого порядка ( $P = 1$ ) устраняет только наклон, но не паразитные искривления (рис. 3), а использование для аппроксимации поверхности второго порядка ( $P = 2$ ) сохраняет «волнистость» изображения вдоль обоих направлений сканирования (рис. 4). Повышение порядка аппроксимирующей поверхности, как правило, приводит к искажениям скана [4].

Альтернативной возможностью удаления искажений поверхности является Фурье-фильтрация [4]. Обнуление столбца и строки, которые соответствуют нулевым пространственным частотам в матрице для дискретного Фурье-образа, исключает наклон и искривление поверхности вдоль каждой из координат (рис. 5). Однако на изображении рельефа появляются взаимно перпендикулярные линейно протяженные впадины, пересекающиеся в месте расположения выступа. Ширина впадины совпадает с шириной выступа, а глубина пропорцио-

нальна его высоте. Поэтому в качестве первичной обработки АСМ-сканов целесообразно вычитать аппроксимирующую поверхность с порядком не выше второго.

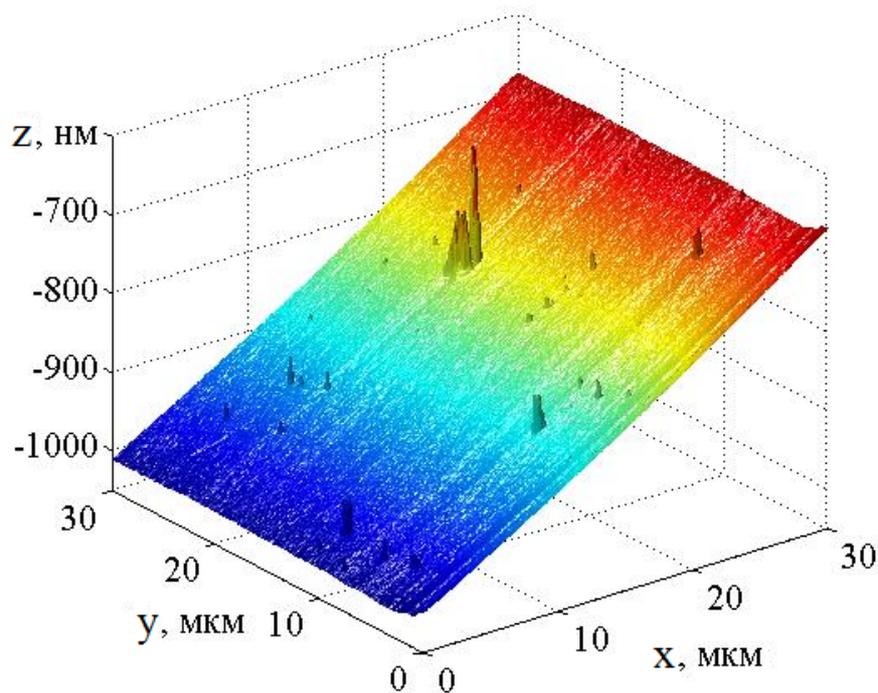


Рис. 1. Зарегистрированный АСМ-скан участка подложки

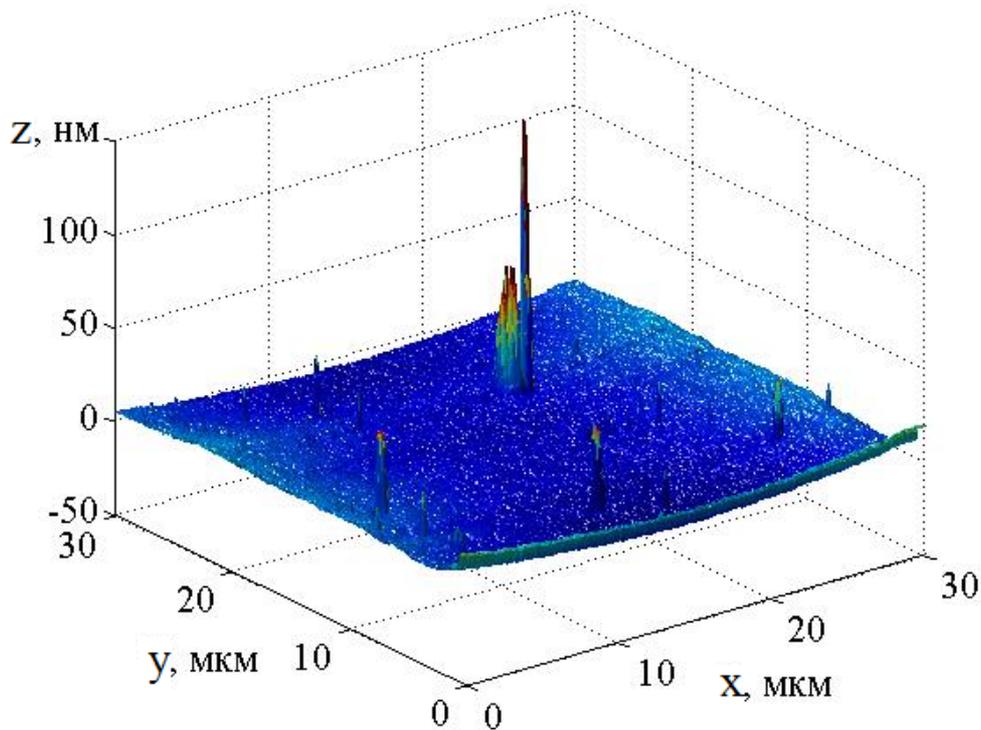


Рис. 2. Изображение подложки после исключения из АСМ-скана поверхности первого порядка (наклонной плоскости)

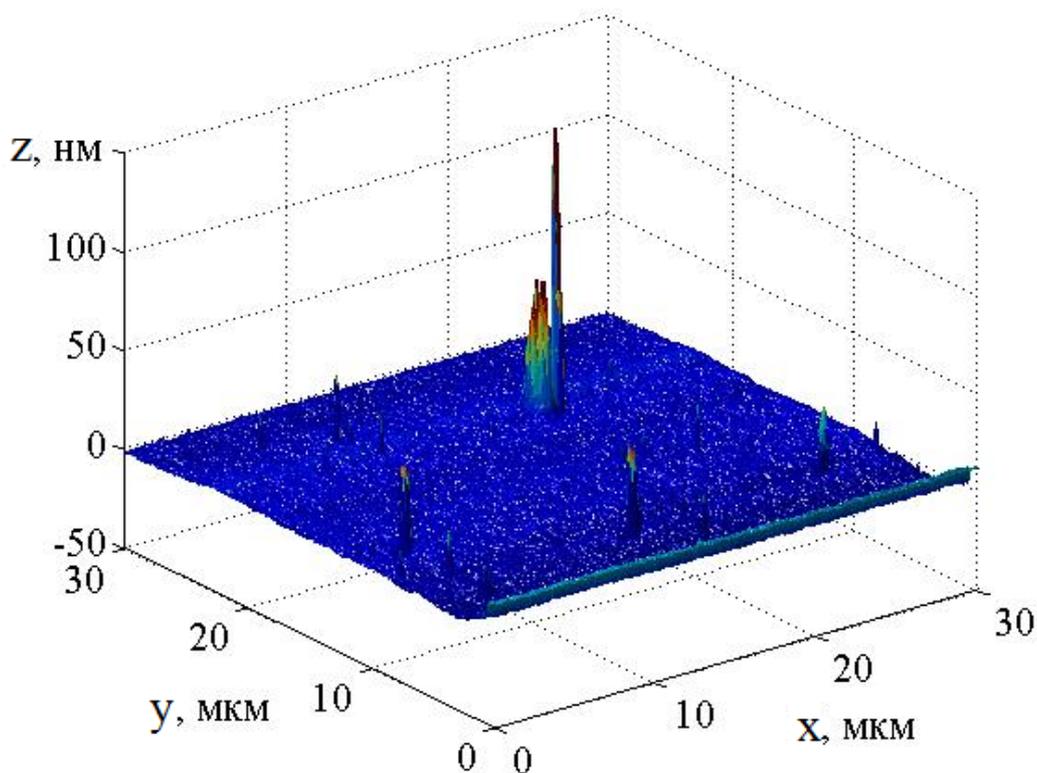


Рис. 3. Изображение подложки после исключения из АСМ-скана поверхности второго порядка

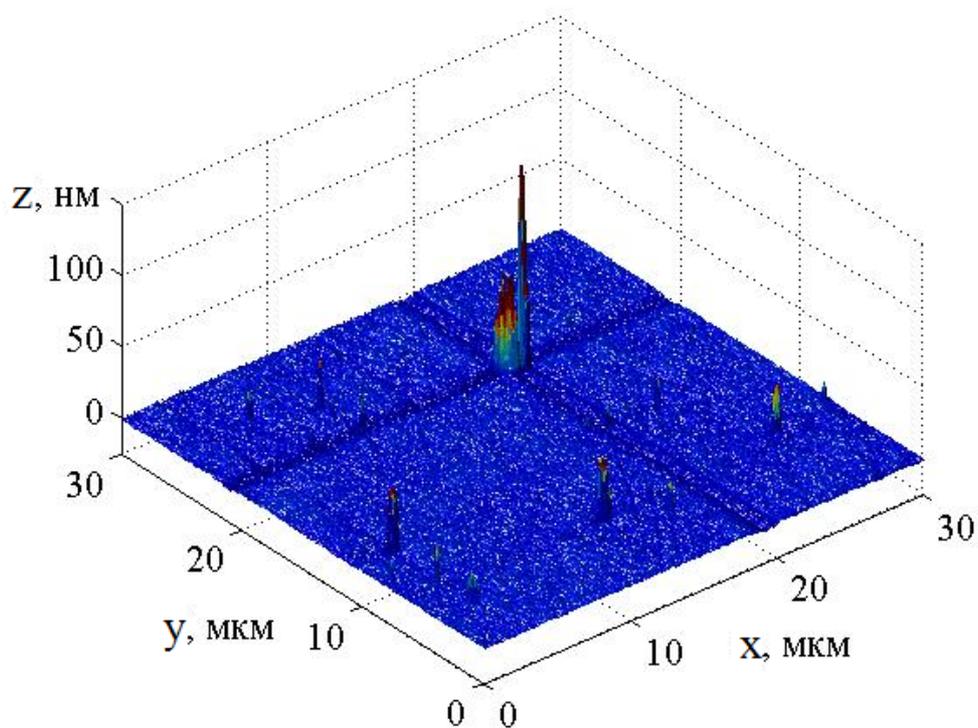


Рис. 4. Изображение подложки после Фурье-фильтрации АСМ-скана

### Выводы

Вычитание аппроксимирующей поверхности первого порядка не устраняет артефактов сканирования. Повышение порядка функции аппроксимирующей поверхности вносит дополнительные искажения в изображение рельефа поверхности. Фурье-фильтрация позво-

ляет устранить артефакты, вносимых атомно-силовым микроскопом в процессе сканирования.

### Библиографический список

1. Молчанов А.В., Серебряков А.Е., Чиркин М.В., [Анизотропия рассеивающих свойств сверхгладких подложек зеркал для прецизионных лазерных гироскопов](#)// [Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета](#). - 2012. - № 42-2. - С. 92-98.
2. Миронов В. Основы сканирующей зондовой микроскопии. - М.: Техносфера, 2005. - 144 с.
3. Binnig G., Quate C. F., Gerber Ch. Atomic force microscope// *Physical Review Letters*. - 1986. - Vol. 56, No. 9. – P. 930 – 933.
4. Stout K.J. Development of methods for the characterization of roughness in three dimensions. - London: Penton Press, 2004. - 258 pp

УДК 629.7.054; ГРНТИ 59.31.31

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ВОЛНОВОГО ГИРОСКОПА НА ЕГО МАСШТАБНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ

Л.А. Рязанова

*Рязанский государственный радиотехнический университет  
Россия, Рязань, [lara.ryazanova17.95@gmail.com](mailto:lara.ryazanova17.95@gmail.com)*

*Аннотация.* В данной работе описывается зависимость масштабного коэффициента гироскопа от изменения геометрических параметров чувствительного элемента под действием температуры.

*Ключевые слова.* Волновой твердотельный гироскоп, ВТГ, масштабный коэффициент, чувствительный элемент.

## INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF GEOMETRIC PARAMETERS OF THE SENSING ELEMENT OF WAVE SOLID-STATE GYROSCOPE ON SCALE FACTOR

L.A. Ryazanova

*Ryazan State Radioengineering University  
Russia, Ryazan, [lara.ryazanova17.95@gmail.com](mailto:lara.ryazanova17.95@gmail.com)*

*Abstract.* This paper describes the dependence of the scale factor of the gyroscope on the change in the geometric parameters of the sensitive element under the effect of temperature.

*Keywords.* Solid-state wave gyroscope, scale factor, sensing element.

### 1. Введение

В связи с высокими требованиями, предъявляемыми к гироскопическим датчикам первичной информации, на базе которых строятся навигационные системы и системы управления летательными аппаратами, одним из перспективных направлений в развитии гироскопии становится волновой твердотельный гироскоп (ВТГ).

ВТГ состоит из трёх основных частей: резонатора, основания и корпуса (рисунок 1).

Резонатор представляет собой чувствительный элемент (ЧЭ), выполненный в виде тонкостенной оболочки имеющей форму полусферы.

Через полюсность резонатора проходит стержень необходимый для установки резонатора в корпусе, они представляют собой единое целое и изготавливаются из одного куска кварца. Также резонатор имеет металлизированное покрытие, являющееся одной из обкладок конденсатора.

Основание выполнено в виде внутренней полусферы с восемью информационными электродами.

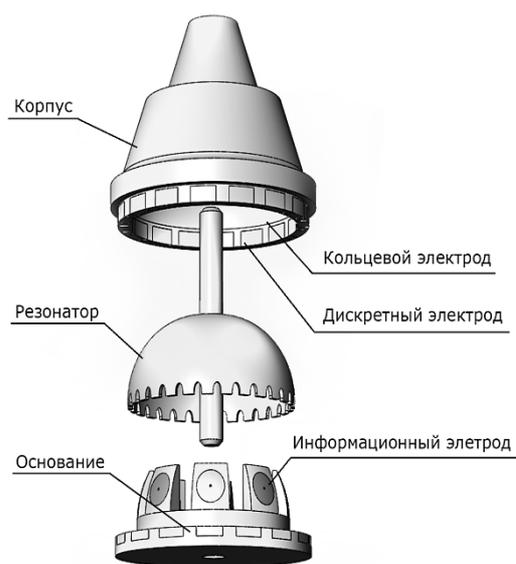


Рис. 1. Конструкция ВТГ

со стороны оси вращения.

В данном кольце возбуждаются знакопеременные колебания, и производится стоячая волна, которая резонирует на определенной частоте. Ободок резонатора будет двигаться в радиальном направлении с точками максимального отклонения (пучностями) и точками отсутствия радиального движения (узлами).

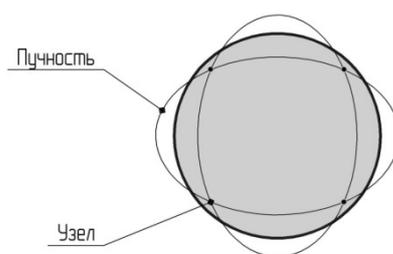


Рис. 2. Изображение стоячей волны, наложенное на оболочку ВТГ

На рисунке 2 представлены стоячие волны, сформированные на ободке полусферической оболочки, и соответствующие пучности и узлы. Для наглядности движение пучностей сильно преувеличено, в реальности смещение имеет порядок нескольких микрон.

Положение пучностей и узлов стабильно относительно оболочки, однако, если оболочка вращается вокруг опорной точки или стержня, стоячая волна отстает от физического вращения оболочки на определенный период. Для полусферической оболочки отставание составляет примерно 0,3 от угла поворота (коэффициент 0,3 – геометрический масштабный коэффициент гироскопа).

Корпус выполнен в виде внешней полусферы с шестнадцатью электродами системы управления и одним кольцевым электродом системы стабилизации колебаний резонатора.

Внутренние и внешние полусферы жестко закреплены относительно друг друга, создавая равномерный воздушный зазор между своими электродами и проводящей поверхностью резонатора. В результате этого образуются емкостные датчики. При изменении зазора, на информационных электродах появляется избыток заряда. Таким образом, сигнал емкостного датчика содержит информацию о перемещении кромки резонатора [1].

## 2. Принцип работы

Принцип работы данного вида гироскопического датчика основан на использовании инерционных свойств стоячей волны в тонкостенном кольце.

В качестве такого кольца используется резонатор в виде полусферы при рассмотрении его

### 3. Влияние геометрических параметров ЧЭ ВТГ на его масштабный коэффициент

Резонатор является основным элементом ВТГ. Его характеристики определяют параметры гироскопа в целом. Для улучшения качества резонатора необходимо учитывать те аспекты, которые вызывают изменения масштабного коэффициента. Рассмотрим деформацию резонатора под действием температуры.

Расчеты на персональном компьютере (ПК) выполнялись в среде программирования COMSOL. Для решения задач COMSOL Multiphysics использует метод конечных элементов (МКЭ).

В системе автоматизированного проектирования (САПР) SolidWorks по чертежу (рисунок 3) была создана упрощённая трехмерная модель ВТГ (рисунок 4), которая затем использовалась для моделирования в программе COMSOL.

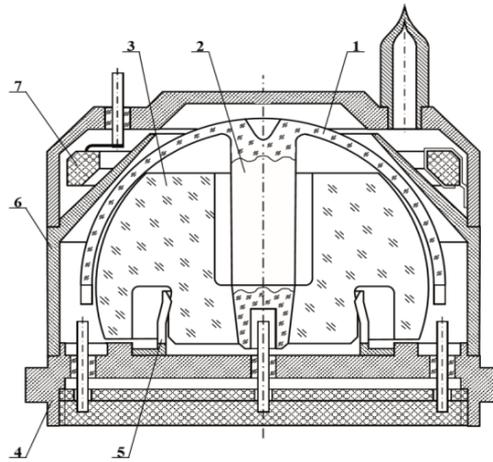


Рис. 3. Конструктивная реализация ВТГ с односторонним креплением резонатора, где: 1 – резонатор; 2 – односторонний стержень; 3 – основание; 4 – металлический фланец; 5 – упругий центрирующий элемент; 6 – кожух; 7 – геттерный насос

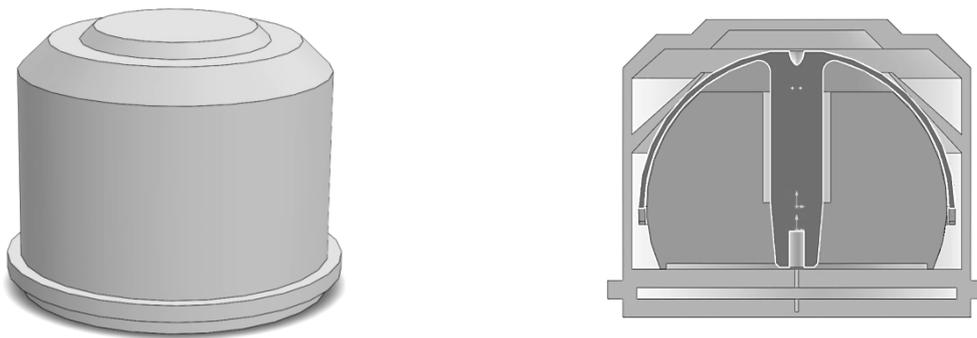
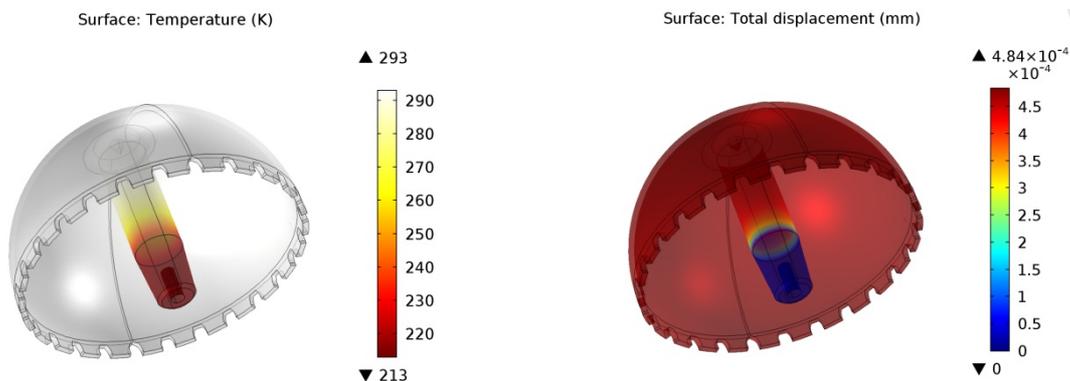


Рис. 4. Трехмерная модель ВТГ смоделированная в SolidWorks: а – 3D модель ВТГ; б – общий вид ВТГ в разрезе

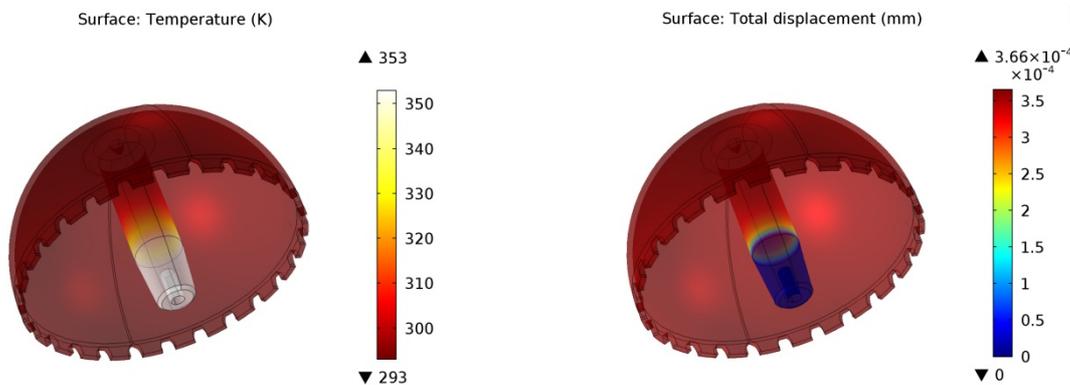
Основные условия моделирования:

- резонатор закреплен за ножку и дно;
- теплообмен с окружающей средой происходит через места крепления резонатора и с помощью излучения;
- материал резонатора кварцевое стекло  $\text{SiO}_2$ .

На рисунках 5 и 6 показано распределение температурного поля в резонаторе и изменение его геометрии под действием внешней температуры в диапазоне от  $-60^0$  до  $+80^0$  C.



а) б)  
Рис. 5. Результаты моделирования при температуре  $-60^0$  C (213 K);  
(а) распределение температуры по резонатору, (б) деформация резонатора



а) б)  
Рис. 6. Результаты моделирования при  $80^0$  C (353 K) температуре;  
(а) распределение температуры по резонатору, (б) деформация резонатора

Исходя из результатов моделирования деформации резонатора в диапазоне температуры от  $-60^0$  до  $+80^0$  C с шагом  $10^0$  C можно составить график зависимости изменения радиуса резонатора, изготовленного из кварцевого стекла, от температуры внешней среды.

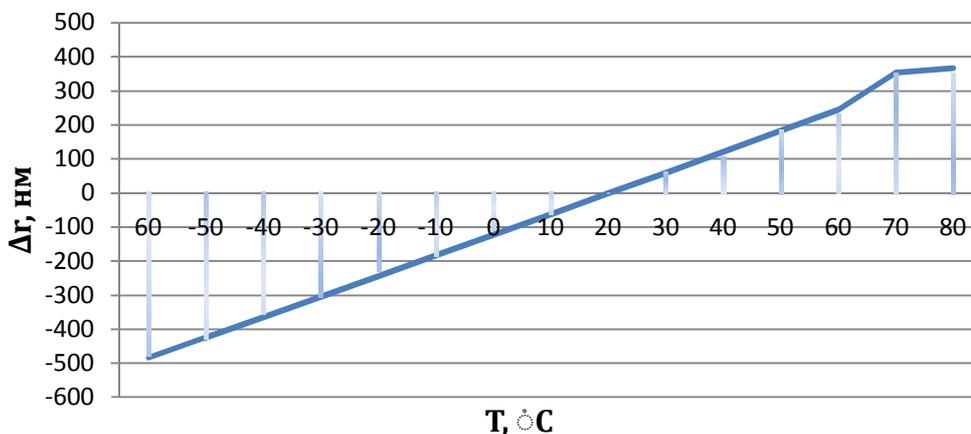


Рис. 7. График зависимости изменения радиуса резонатора от температуры внешней среды

#### 4. Расчет масштабного коэффициента

На основании полученных изменений геометрических параметров радиуса резонатора производится расчёт изменения резонансной частоты. При идеальных условиях в температурном диапазоне от -600 до +800С резонансная частота ЧЭ рассчитывается по следующей формуле [2]:

$$v = \sqrt{\frac{EY}{\rho FR^4} \frac{k^2(k^2 - 1)^2}{k^2 + 1}},$$

где  $E$  – модуль Юнга;  
 $Y$  – момент инерции поперечного сечения резонатора;  
 $k$  – номер гармоники;  
 $\rho$  – плотность материала резонатора;  
 $F$  – площадь поперечного сечения резонатора;  
 $R$  – радиус резонатора.

Масштабный коэффициент рассчитывается по следующей формуле:

$$A = \frac{F}{v^2 \cdot \sqrt{\mu^2 F_k^2}},$$

где  $F$  – расположение пучности;  
 $F_k$  – сила Кориолиса;  
 $\mu$  – коэффициент демпфирования.

В результате получаем зависимость масштабного коэффициента ЧЭ от изменения его геометрических параметров.

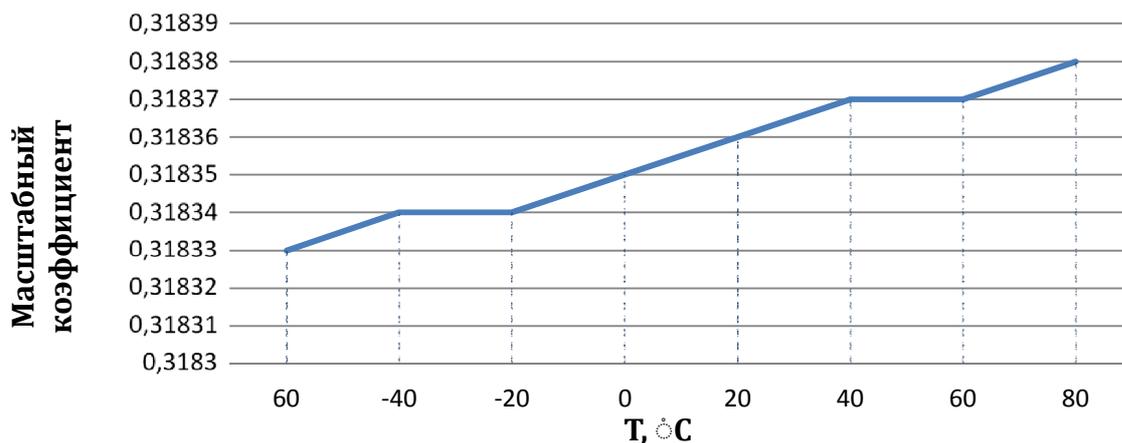


Рис. 8. График зависимости изменения масштабного коэффициента от температуры внешней среды

Для удобства восприятия на графике представлена зависимость масштабного коэффициента не от геометрических параметров, а от температуры.

Из графика видно, что масштабный коэффициент меняется в пределах от 0,31833 до 0,31838. Изменение коэффициента в идеальных условиях при изменении температуры от -600 до 800 С составляет 0,004% .

Результаты проведенного исследования показали, что изменение температуры в диапазоне от -600 до 800С практически не влияет на масштабный коэффициент полусфериче-

ского резонатора, выполненного из кварцевого стекла. Поэтому выбрать данный материал для изготовления резонатора ВТГ будет самым оптимальным решением.

### Библиографический список

1. С.В. Астахов, И.В. Меркурьев, В.В. Подалков. Влияние нелинейных упругих свойств резонатора на динамику волнового твердотельного гироскопа. Московский энергетический институт (технический университет) 2011г.
2. О.С. Нарайкин, Ф.Д. Сорокин, С.А. Козубняк – Расщепление собственных частот кольцевого резонатора твердотельного волнового гироскопа, вызванное возмущением формы
3. Галкин В. Перспективные гироскопы летательных аппаратов. – LAP Lambert Academic Publishing. 2013. – 156 с.

УДК 621.373.826; ГРНТИ 47.35.31

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ В ЛАЗЕРНОМ МОДУЛЕ УСТРОЙСТВА АТМОСФЕРНОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ

**Б.И. Огнев\*, Н.С. Хромченко\*\*, Е.Г. Чуляева\*\*\***

\*АО «Мостком», Россия, Рязань, [develop@mостком.ru](mailto:develop@mостком.ru)

\*\*АО «Плазма», Россия, Рязань, [khromchenko.nikolai@mail.ru](mailto:khromchenko.nikolai@mail.ru)

\*\*\*Рязанский государственный радиотехнический университет, Россия, Рязань, [elenachuljaeva@yandex.ru](mailto:elenachuljaeva@yandex.ru)

*Аннотация.* В данной работе изложен новый подход к экспериментальной оценке конструктивных параметров FSO оборудования, влияющих на флуктуации принимаемого сигнала, вызванные турбулентностью атмосферы. Разработана методика сравнительной оценки эффективности конструктивных решений оборудования высокоскоростной оптической беспроводной связи с учетом воздействия турбулентной атмосферы. Проведен анализ ряда возможных конструктивных решений по снижению воздействия турбулентной атмосферы. Подтверждена высокая эффективность узла ввода-вывода на основе волоконно-оптического дуплексера, применяемого в оборудовании и позволяющего использовать технологии WDM для повышения скорости передачи.

*Ключевые слова.* Атмосферные линии связи, оптическая связь, лазерный модуль, турбулентность, дуплексер.

## ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF DESIGN SOLUTIONS FOR THE LASER MODULE IN THE DEVICE OF ATMOSPHERIC COMMUNICATION LINE

**B. I. Ognev \*, N.S. Khromchenko\*\*, E.G. Chulyaeva\*\*\***

\*JSC«Mostcom», Russia, Ryazan, [develop@mостком.ru](mailto:develop@mостком.ru)

\*\*Joint-stock company «Plasma», Russia, Ryazan, [khromchenko.nikolai@mail.ru](mailto:khromchenko.nikolai@mail.ru)

\*\*\* Ryazan State Radioengineering University, Russia, Ryazan, [elenachuljaeva@yandex.ru](mailto:elenachuljaeva@yandex.ru)

*Abstract.* This work presents a new approach to the experimental evaluation of the FSO equipment design parameters which affect the fluctuation of the received signal caused by atmospheric turbulence. The methods of comparative evaluation of effectiveness of constructive solutions for the high-speed optical wireless communication equipment taking into account the influence of turbulent atmosphere was developed.

The analysis of a number of possible design solutions to reduce the impact of turbulent atmosphere was carried out. The high efficiency of the I/O unit based on the fiber-optic duplexer was confirmed. This I/O unit is used in the equipment and allows to use WDM technology to increase the transmission speed.

*Keywords.* Atmospheric communication line, optical communication, laser module, turbulence, duplexer.

### 1. Введение

Основной проблемой развития высокоскоростных (10 - 100 Гбит/с) линий атмосферной оптической связи ( FSO-технологии (Free Space Optics), является искажение простран-

венной структуры лазерного излучения в приземном слое атмосферы и, как следствие, флуктуации приемного сигнала. В большей степени это обусловлено неустойчивостью процессов развития мелкомасштабной турбулентности. Реальные трассы FSO систем чаще всего проходят в городах и промышленных зонах, над дорогами, водоемами, домами, цехами и другими объектами. Уровень турбулентности, ее динамика и неопределенность накладывают жесткие требования на архитектуру FSO системы. Вместе с тем, ретроспективный анализ результатов исследований по изменению структуры лазерных пучков в турбулентной среде показывает что, несмотря на большое количество работ, (например [1,2,3]), выполненных по данной теме, ряд вопросов в контексте систем связи остается недостаточно изученным.

В данной работе изложен новый подход к экспериментальной оценке конструктивных параметров FSO оборудования, влияющих на флуктуации приемного сигнала вызванные флуктуацией приемного сигнала.

Расчетные соотношения для определения достоверности связи

История экспериментальных исследований и теоретического описания распространения лазерного излучения в турбулентной атмосфере насчитывает более 50 лет и, в основном, опирается на закон двух третей Колмогорова-Обухова [1]. В работах по FSO технологии чаще всего влияние турбулентности атмосферы на параметры канала связи определяется функцией определяющей дисперсию флуктуаций мощности излучения на приемнике  $\sigma_i^2$  [5]:

$$\sigma_i^2 = 1.23 \cdot C_n^2 \cdot k^{7/6} L^{11/6} \quad (1)$$

где  $C_n^2$  – структурная постоянная турбулентности;

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad - \text{ волновое число;}$$

L – длина дистанции.

Величина  $C_n^2$  меняется от ( $10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$ ) для сильной турбулентности и до ( $10^{-17} \text{ м}^{-2/3}$ ) для слабой турбулентности. Типичным средним значением  $C_n^2$  считается  $10^{-15}$ .

При этом дисперсия флуктуаций определяется в относительных единицах

$$\sigma_i^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2}, \quad (2)$$

где I – мощность принимаемого оптического излучения.

Зависимость (1) установлена для флуктуаций интенсивности плоской волны и справедлива в области так называемых слабых флуктуаций, когда значения  $\sigma_i^2 < 1$  при любой комбинации величин k и L.

Исходя из соотношения (1) при известном законе распределения можно определить вероятность снижения мощности излучения до определенной величины, приводящей к появлению ошибок. Так при нормальном распределении вероятность того, что мощность принимаемого излучения отклонится от среднего значения не более чем на a, определяется дополнительной функцией ошибок:

$$P(a) = \operatorname{erfc}\left(\frac{a}{\sigma_i \sqrt{2}}\right) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^a e^{-\left(\frac{l}{\sigma_i \sqrt{2}}\right)^2} dl \quad (3)$$

Данное выражение определяет достоверность канала связи, так, если чувствительность фотоприемника на 20 дБ ниже среднего значения принимаемого сигнала и  $\alpha=0.99$  при данной величине дисперсии флуктуаций, то это соответствует уровню ошибок  $10^{-9}$  BER.

Из соотношения (1) и (3) при  $a=0,99$  и  $C_n^2 = 8 \times 10^{-16} \div 1 \times 10^{-15}$  получается уровень ошибок  $BER = 6 \times 10^{-9} \div 2 \times 10^{-7}$ . Для оценки, это достаточно хорошая точность.

## 2. Экспериментальные условия и методика измерений влияния турбулентности

Исследования проводились с использованием серийно выпускаемого FSO оборудования Artolink, модель M1-10GE (внешний вид оптического блока показан на рисунке 1).

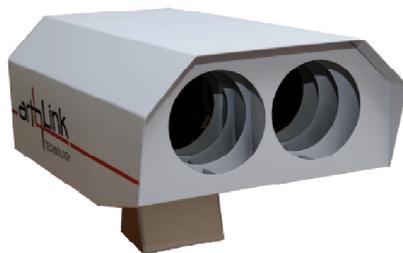


Рис. 1. Внешний вид оптического блока M1-10GE

Главной конструктивной особенностью оптического блока является ввод/вывод излучения информационного канала через торец оптического многомодового волокна градиентного типа с диаметром сердцевины 62.5 мкм и NA 0.275, причем формирование поля излучения происходит с помощью дуплексера, объединяющего одномодовый (ОМ) выход с многомодовым (ММ) входом оптического излучения. Схема ввода/вывода излучения через дуплексер показана на рисунке 2.

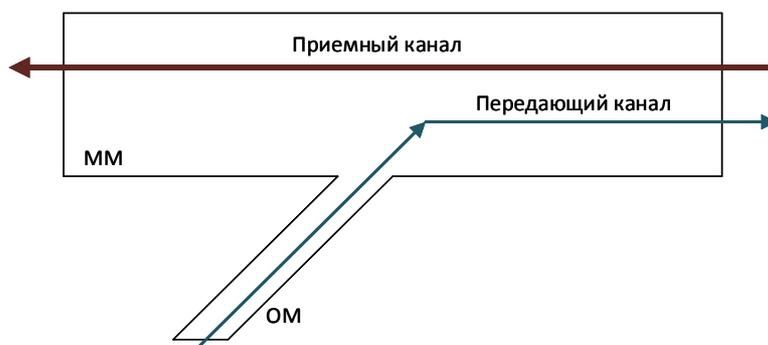


Рис. 2. Дуплексер ММ/ОМ

Характерные варианты модового состава излучения, сформированные данным дуплексером представлены на рисунке 3.

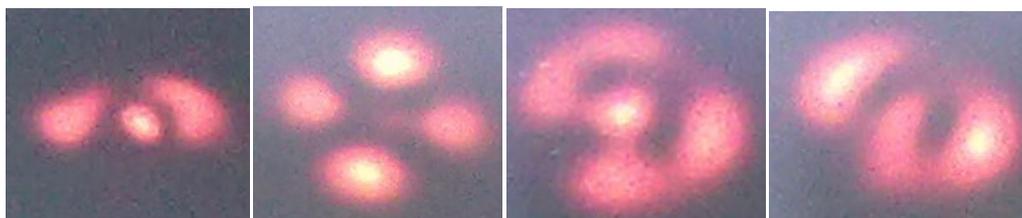


Рис. 3. Модовый состав излучения

### 3. Результаты измерений

Первая серия экспериментов была посвящена исследованию апертурного ограничения приемного пучка излучения на флуктуации принимаемого излучения. Для этого на оптические апертуры экспериментального прибора поочередно устанавливались диафрагмы со световым диаметром от 10 до 90 мм. Затем в течение 200 – 300с с периодом 0,1 с измерялась мощность принимаемого сигнала, как на исследуемом приборе, так и на эталонном. После статистической обработки и нормировки на эталон определялась относительная дисперсия сигнала в соответствии с выражением (2). Для сопоставления данных всех экспериментов был рассчитан параметр флуктуации  $G$  - отношение относительной дисперсии сигнала для каждой диафрагмы к относительной дисперсии сигнала для диафрагмы диаметром 10 мм (минимальной приемной апертуры):

$$G = \frac{\sigma_i^2(R)}{\sigma_i^2(R_{\min})}, \quad (4)$$

где  $\sigma_i^2(R_{\min})$  - дисперсия флуктуаций при минимальной приемной апертуре.

Зависимость  $G$  от отношения диаметра приемной апертуры к размеру первой зоны Френеля  $\frac{2 \cdot R}{\sqrt{\lambda L}}$  представлена на рисунке 4.

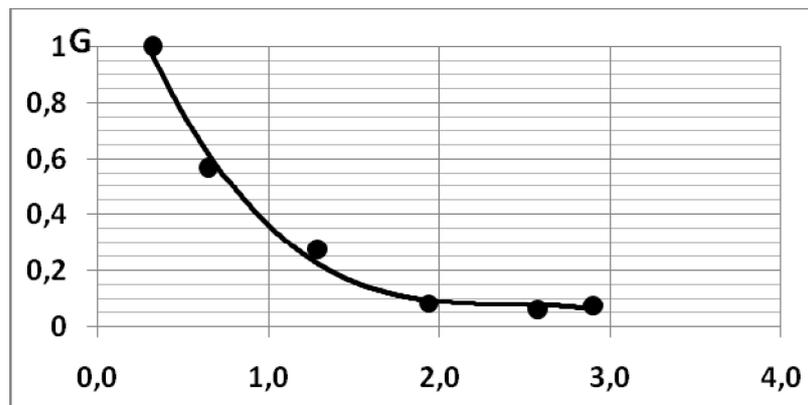


Рис. 4. Зависимость параметра  $G$  от относительного диаметра приемной апертуры

Из данных, проведенных экспериментов следует, что дисперсия флуктуаций многомодового излучения в 3-9 раз меньше, в зависимости от длительности измерений. Зависимость измеренной дисперсии от длительности измерений связана с тем, что в измерениях в нарастающем темпе начинают присутствовать низкочастотные изменения состояния атмосферы. В большей степени они определяются неустойчивыми гидрометеорами достаточно больших размеров, сопровождающими деятельность предприятия. Кроме того, из экспериментов следует, что одномодовое излучение значительно более чувствительно к процессам флуктуаций в атмосфере.

### Вывод

Полученные в данной работе результаты позволили провести успешное макетирование оборудования с возможностью передачи через беспроводный оптический канал потока 40 Гбит/с за счет волнового мультиплексирования четырех потоков 10Гбит/

### Библиографический список

1. Аксенов В.П., Канев Ф.Ю., Куксенко Д. С., Макенова Н.А., Хапаева А. В. Известия Томского политехнического университета. 323, N 2. С. 181. (2013).
2. Гурвич А. С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С. С. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. (М.: Наука, 1976).
3. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Многократное рассеяние, турбулентность, шероховатые поверхности и дистанционное зондирование. Пер. с англ. (М.: Мир, 1981).
4. Зуев В. Е. Распространение лазерного излучения в атмосфере. — М.: Радио и связь, -1981. — 288 с, ил.
5. Heinz Willebrand, Ph.D., and Baksheesh S. Ghuman, "Free-Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks", 2002 by Sams Publishing.

УДК 004.932; ГРНТИ 89.57.35

## БЕСПРОВОДНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЙ КОНСТРУКЦИЙ

**В.Ю. Вердеш, В.В. Климаков, Н.А. Маюров, В.Ю. Мишин, А.Е. Серебряков**

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, ulogii121@gmail.com*

*Аннотация.* В данной работе разработан и создан макет беспроводной системы мониторинга состояний конструкций. Разработанная система позволяет регистрировать и накапливать данные о линейном и угловом движении элементов конструкции не зависимо от внешних источников информации, без привязки к спутниковому сигналу.

*Ключевые слова.* Инерциальный измерительный модуль, беспроводная система мониторинга, акселерометр, магнитометр, ESP8266.

## WIRELESS MONITORING SYSTEM OF CONDITIONS CONSTRUCTIONS

**V.Yu. Verdeshe, V.V. Klimakov, N.A. Mayurov, V.Yu. Mishin, A.E. Serebryakov**

*Ryazan State Engineering University,  
Russia, Ryazan, ulogii121@gmail.com*

*Abstract.* In this paper, a model of a wireless system for monitoring structural states has been developed and created. The developed system allows to register and accumulate data on linear and angular motion of structural elements, regardless of external sources of information, without reference to the satellite signal.

*Keywords.* Inertial measurement unit, wireless monitoring system, accelerometer, magnetometer, ESP8266.

### 1. Введение

В настоящее время по-прежнему отсутствует эффективный и экономичный способ, позволяющий непрерывно контролировать структурную целостность строительных конструкций в течение всего их срока службы. Инспекция строительных конструкций, особенно мостов, в настоящее время осуществляется путем визуальной проверки. Существуют несколько невизуальных методик, которые используют проводные сенсорные сети, которые относительно дороги, уязвимы для повреждения и требуют много времени для установки.[1] Недавние достижения в области микроэлектромеханических систем позволили внедрить недорогие, самонастраивающиеся беспроводные сети датчиков для мониторинга объектов с довольно точной детализацией. Потенциальные преимущества подобных систем по сравнению с традиционными кабельными системами мониторинга: низкая стоимость установки, высоко масштабируемые свойства, возможность дистанционного управления. Обслуживание, основанное на неразрушающем мониторинге состояний конструкций с помощью измерительных датчиков, может обеспечить эффективную поддержку в оптимизации планового

ремонта существующих зданий и сооружений, что позволит продлить срок их службы. На сегодняшний момент существует ряд опытных и несколько коммерческих решений в этой области. [2-4] В частности имеются решения, ориентированные на мониторинг состояния особых конструкций: памятников архитектуры [2], мостов [3].

Как правило, эти системы мониторинга [2-4] представляют собой беспроводную сеть, состоящую из множества распределенных в пространстве измерительных узлов и одной базовой станции. Основой измерительного узла является микроконтроллер, с пониженным энергопотреблением. Наборы датчиков подключаемых к каждому измерительному узлу подбираются для каждого конкретного приложения. Для организации беспроводной сети из узлов и базовой станции используется маломощный приемопередатчик. Беспроводные сенсорные узлы с заданным периодом выполняют регистрацию данных с подключенных к ним датчиков и их первичную обработку. Далее полученные результаты в виде пакета передаются в точку сбора по радиоканалу. Сеть имеет многоячеювую топологию, то есть каждый узел в случае необходимости ретранслирует пакеты для их доставки в точке сбора. Базовая станция регистрирует данные поступающие от распределенных датчиков и передает их на сервер для последующей обработки и отображения.

Целью данной работы является создание универсальной и доступной беспроводной системы мониторинга состояний конструкций.

## 2. Структура беспроводной сети мониторинга

В данной работе разработан и создан макет беспроводной системы мониторинга состояний конструкций. В отличие от аналогов, разработанная система позволяет регистрировать и накапливать данные о линейных и угловых движениях элементов конструкции не зависимо от внешних источников информации, без привязки к спутниковому сигналу. Система представляет собой комплекс инерциальных измерительных модулей размещенных на элементах сооружений, объединенных по общему каналу передачи данных с приемником (базовой станцией), которая реализует функции вычислителя (рис. 1).



Рис. 1. Структура беспроводной сети сбора данных

Беспроводные измерительные модули выполняют непрерывные измерения, таких характеристик как высота их расположения относительно земли, направление на север и их отклонение от вертикали. Далее полученные данные группируются в пакеты и отправляются

по радиоканалу на базовую станцию, в качестве которой используется персональный компьютер. Сеть имеет топологию «звезда», то есть каждый узел передает пакеты на базовую станцию. Базовая станция в режиме реального времени собирает данные от модулей, сохраняет их в базу данных и осуществляет их анализ. Если регистрируется опасное состояние конструкции, то генерируется предупреждающее сообщение для пользователя.

## 2. Измерительный модуль

На рисунке 2 показана блок-схема измерительного модуля. Каждый модуль состоит из управляющего микроконтроллера, нескольких датчиков и батареи питания. Был использован микроконтроллер ESP8266, производителем которого является китайская компания Espressif. [5] Данный микроконтроллер оснащен встроенным интерфейсом Wi-Fi, с помощью которого и осуществляется связь с базовой станцией. Дальность связи составляет до 50 м.

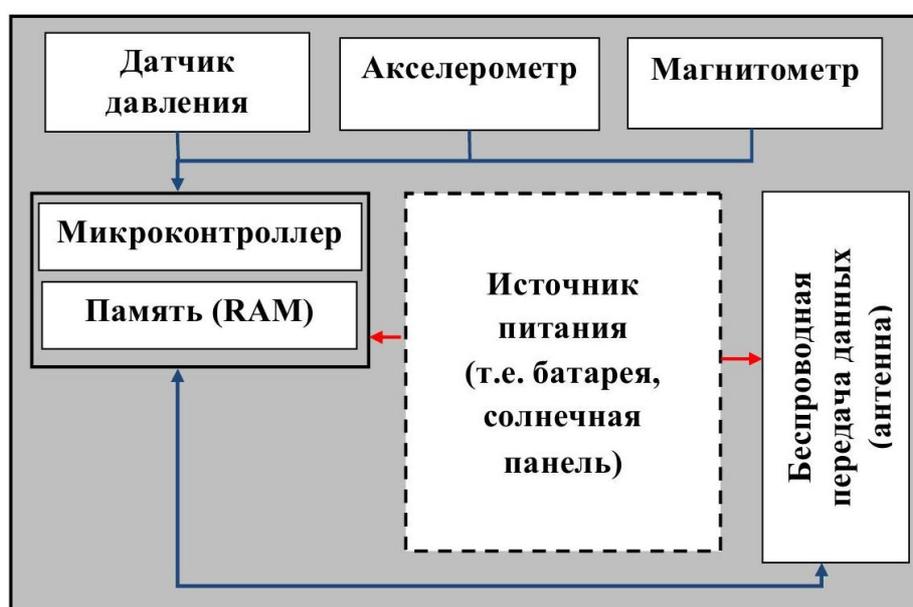


Рис. 2. Блок-схема измерительного модуля

Для измерения требуемых характеристик, к микроконтроллеру по цифровому интерфейсу I<sup>2</sup>C подключаются три датчика: датчик давления, акселерометр и магнитометр. Датчики находятся внутри корпуса измерительного модуля. Использование датчиков с цифровым интерфейсом I<sup>2</sup>C позволяет унифицировать процесс сбора данных. Также упрощается конструкция измерительного модуля, поскольку отпадает необходимость в модуле аналого-цифрового преобразования. Измерительные модули, разработанной системы мониторинга, должны обладать следующими характеристиками: точность регистрации давления 0,05 Па, точность регистрации ускорения порядка 0,01 м/с<sup>2</sup>, точность регистрации направления на север 0,1°. Кроме того датчики, используемые в составе модулей, должны иметь минимально возможный дрейф нуля.

В измерительных модулях, был использован модуль MPU9250, который включает в себя: 3-х осевой акселерометр и 3-х осевой магнитометр АК8963. [6] Акселерометр имеет программно перестраиваемые диапазоны  $\pm (2 \div 16)$  g, и обладает разрешением порядка 0,005 м/с<sup>2</sup>. На его базе был реализован датчик отклонения от вертикали.

Для регистрации направления на север использовался магнитометр AK8963, реализованный на датчике Холла, который имеет полный диапазон измерений  $\pm 4800$  мкТл и разрешение порядка 0.6 мкТл.

Также модуль комплектуется датчиком давления bmp180 фирмы Bosh с цифровым интерфейсом I<sup>2</sup>C. [7] Чувствительным элементом является пьезо-резистивный датчик. Датчик позволяет измерять давление в диапазоне от  $3 \cdot 10^3$  до  $11 \cdot 10^4$  Па, с точностью 10 Па. В корпусе датчика, имеется встроенный датчик температуры, показания которого используются для коррекции измеренных значений давления.

Для питания модуля используется никель-металлогидридный аккумулятор, напряжением 3.6 В и емкостью 600 мАч.

### 3. Принцип работы системы

Блок-схема микропрограммы измерительного модуля представлена на рисунке 3.



Рис. 3. Блок-схема микропрограммы измерительного модуля

После включения питания измерительного модуля осуществляется инициализация и первичная настройка микроконтроллера. Осуществляется настройка датчиков, подключенных к микроконтроллеру и запускается таймер. По прерыванию таймера, с интервалом в 1 минуту, модуль опрашивает подключенные к нему датчики. В случае отсутствия ошибок, выполняется нормировка полученных данных и формируется пакет для отправки данных. Далее осуществляется передачу пакета данных на базовую станцию по интерфейсу Wi-Fi.

Базовая станция накапливает данные от измерительных модулей, сохраняет их в базе данных и отображает на экране пользователя. Осуществляется непрерывный анализ полученных данных. Если какой то из контролируемых параметров (отклонение от вертикали, высота датчика, направление на север) выйдет за установленные границы, выполняется немедленное оповещение пользователя.

### Выводы

В работе предлагается универсальная и доступная беспроводная система мониторинга состояний конструкций. Особенностью данной системы является то, что используются небольшое число (от 2 и более) унифицированных измерительных модулей, размещаемых на элементах конструкции. Система полностью автономна, ей не требуются внешние источники информации, такие как сигналы от спутников. Система позволит инспектировать текущее техническое состояние и своевременно реагировать на необходимость ремонта сооружений.

Наиболее перспективным направлением применения предлагаемой системы коллектив авторов видит в мониторинге и прогнозировании процессов деградации, опорных и несущих элементов памятников архитектуры. Так как стоимость процесса реставрации по истечении определенного времени и при возникновении необратимых процессов в таких сооружениях будет расти по экспоненциальному закону.

### Библиографический список

1. T.H. Yi, H.N. Li, Methodology developments in sensor placement for health monitoring of civil infrastructures, International Journal of Distributed Sensor Networks, vol. 2012, Article ID 612726, 11 pages, 2012.
2. D. Zonta, H. Wu, M. Pozzi, P. Zanon, M. Ceriotti, L. Mottola, G.P. Picco, A.L. Murphy, M. Corra, Wireless sensor networks for permanent health monitoring of historic buildings, Smart Structures and Systems, Vol. 6, No. 5-6 (2010) 595-618.
3. Structural Health monitoring on bridges [Электронный ресурс], URL: <http://www.banair.com> (дата обращения 26.01.2018).
4. Grosse C.U., Glaser S.D., Krüger M. Condition monitoring of concrete structures using wireless sensor networks and MEMS // Proceedings of SPIE, Symposium on Smart Structures & Materials, San Diego, California, March 2006.
5. ESP8266EX Datasheet [Электронный ресурс], URL: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documenta-tion/0a-esp8266ex\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documenta-tion/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf) (дата обращения 26.01.2018)
6. MPU-9250 DATASHEET [Электронный ресурс], URL: <http://datasheet.su/datasheet/InvenSense/mpu-9250> (дата обращения 26.01.2018)
7. BMP180 DATASHEET [Электронный ресурс], URL: <http://datasheet.su/datasheet/Bosch/bmp180> (дата обращения 26.01.2018)

УДК 621.311.61

## РАЗРАБОТКА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

М.А. Титов

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

*Аннотация.* Рассматривается солнечный элемент на монокристаллическом кремнии GM 69x110 мм. Разработан лабораторный стенд по исследованию солнечных панелей. Проведены исследования электрических характеристик, которые показали пригодность данных солнечных элементов для создания модуля питания микроконтроллера ESP8266.

*Ключевые слова.* Солнечные элементы, монокристаллический кремний, лабораторный стенд.

## DEVELOPMENT OF ALTERNATIVE SOURCES OF SUPPLY FOR MEASURING MODULE OF THE SYSTEM OF CONTROL OF BUILDINGS AND STRUCTURES ON THE BASIS OF SOLAR CELLS

M.A. Titov

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

*Abstract.* The article deals with a solar cell on the single-crystal silicon GM 69x110 mm. Developed a laboratory stand for research of the solar panels. 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, single-crystal silicon, laboratory stand.

В настоящее время солнечные элементы (СЭ) 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 независи-

мость от традиционных источников питания. Главным преимуществом солнечных элементов является их низкая стоимость, и использование там, где нет возможности в создании альтернативных источников [1].

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 [2]. Применение большего 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.

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



Рис. 1. Солнечный элемент на основе монокристаллического кремния GM 69x100

В качестве объекта исследования были выбраны солнечные элементы на основе монокристаллического кремния GM 69x110 (рис. 1.), так как он удовлетворяет 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 [3,4].

Как заявлено производителем, выбранный солнечный элемент обладает следующими параметрами:

- Напряжение: 5 В;
- Ток: 240 мА;
- КПД: 22%;
- Рабочий диапазон температур: от  $-40$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ .

Для питания аккумуляторных батарей модуля системы контроля необходимы следующие параметры: напряжение 3,6 В и ток 120 мА. Исследование электрических параметров от освещенности и температуры были проведены на лабораторном стенде, состоящий из солнечного элемента GM 69x100, люксметра, мультиметра и имитатора солнечного освещения (прожектор с галогенной лампой).

Экспериментальные измерения напряжения и тока при различной освещенности прожектора показаны в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики солнечного элемента

Освещенность СЭ E, лк	Характеристики солнечного элемента			
	Ток I, mA		Напряжение U, В	
	10 см	15 см	10 см	15 см
$10^4$	4,3	3,8	4,75	4,6
$50 \times 10^4$	88	78	5,6	5,5
$10^5$	157	142	5,7	5,6

В ходе исследований было выявлено, что с увеличением расстояния между прожектором и солнечным элементом, заметно изменяется напряжение и ток при изменении расстояния прожектора, а также с увеличением освещенности растет ток. Так в результате увеличения освещенности солнечного элемента с  $10^4$  Лк до  $10^5$  Лк происходит рост напряжения 18 %, а ток в цепи в 37 раз.

В результате начальных экспериментов были выявлены недостатки:

- не достижимость заявленного производителем тока;
- при увеличении светового потока происходит разогрев солнечного элемента.

Первый недостаток можно исправить, используя несколько солнечных элементов соединенных параллельно, а с увеличением температуры выявлено ухудшение эффективности солнечных элементов. Первопричиной этого является сильная зависимость темнового тока с увеличением температуры. Основные экспериментальные результаты показаны в таблице 2.

Таблица 2. Зависимость ВАХ солнечного элемента от температуры

Время измерения температуры t, мин	Температура солнечного элемента T, °C		Напряжение на солнечном элементе U, В	
	10 см	15 см	10 см	15 см
0	25	24	5,92	5,73
3	55,8	34	5,37	5,49
6	59,2	39	5,11	5,39
9	77	42,7	4,9	5,32
12	83	45	4,74	5,28
15	85	47,3	4,5	5,24

Аналогичные исследования были проведены и на других расстояниях от источника света до солнечного элемента (20 см, 25 см и 30 см). Экспериментальные расчеты показали, что с увеличением температуры солнечного элемента с  $25^\circ\text{C}$  до  $85^\circ\text{C}$  происходит максимальное падение напряжения на 1,4 В при постоянном токе, в результате чего происходит уменьшение мощности.

Для зарядки аккумуляторных батарей необходимы следующие параметры напряжения 3,6 В и тока 240 мА. Исследование ВАХ при различных нагрузках в цепи солнечного элемента проводилось при расстоянии между прожектором и солнечным элементом равном 15 см. В цепь по очереди включались резисторы с различным сопротивлением, данные эксперимента приведены в таблице 3.

Таблица 3. Зависимость тока и напряжения от внешней нагрузки

Сопrotивление нагрузки R, Ом	Ток на солнечном элементе I, мА	Напряжение на солнечном элементе U, В
100	42,2	4,7
200	23,8	4,8
400	11,3	4,89
800	5,84	4,91
1000	4,84	4,91
1600	3,05	4,91

Значения, приведенные в таблице 3, показали достаточно хорошую стабильность напряжения от внешней нагрузки, поэтому полученные результаты показывают, что выбранный солнечный элемент на монокристаллическом кремнии GM 69x100, возможно, использовать для создания источника питания модуля микроконтроллера ESP8266 системы контроля зданий. Поэтому дальнейшие исследования будут посвящены разработке модуля питания на солнечных элементах GM 69x100 для микроконтроллера ESP8266 и аккумуляторных батарей NiMH 3.6 В, 600 мАч.

### Библиографический список

1. Алфёров Ж. И., Андреев В. М., Румянцев В. Д. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики // Физика и техника полупроводников, 2004, Т. 38, вып. 8, с. 937-948.
2. 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.
3. 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.
4. Юрченко А.В., Миносков 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.

УДК 681.586.2; ГРНТИ 50.09.97

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ГИРОСКОПА НА ЭФФЕКТЕ БРАЙАНА

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

*Рязанский государственный радиотехнический университет*

*Россия, Рязань, [lisovetsky2011@yandex.ru](mailto:lisovetsky2011@yandex.ru) [burmistrov10@mail.ru](mailto:burmistrov10@mail.ru)*

*Аннотация.* В данной работе проводится сравнение характеристик резонаторов волновых твердотельных гироскопов в зависимости от конструкции их чувствительного элемента.

*Ключевые слова.* ВТГ, металлический резонатор, моделирование.

## MODELING OF THE CHARACTERISTICS OF THE GYRO SENSOR ON THE BRIAN EFFECT

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

*Ryazan State Radioengineering University*

*Russia, Ryazan, [lisovetsky2011@yandex.ru](mailto:lisovetsky2011@yandex.ru) [burmistrov10@mail.ru](mailto:burmistrov10@mail.ru)*

*Annotation.* In this paper, the characteristics of resonators of wave solid-state gyroscopes are compared depending on the design of their sensitive element.

*Keywords.* GBEW, metal resonator, modeling.

## 1. Введение

Идея волнового твердотельного гироскопа (ВТГ) появилась в конце 19 века и была предложена в статье Дж. Х. Брайана «О биении колебаний вращающегося цилиндра или конуса», напечатанной в трудах Кембриджского философского общества в 1892 г. Однако должно было пройти еще полвека, прежде чем специалисты исследовательской компании Delco заново открыли работу Брайана и был создан первый прототип современного ВТГ. [1]

В настоящее время ВТГ способен обеспечить требуемую точность при решении задач высокоточной навигации и прецизионного наведения. С точки зрения соотношения себестоимости изготовления и точности получаемой навигационной информации, он является одним из перспективных современных инерциальных датчиков.

Принцип действия ВТГ основан на явлении прецессии упругих волн, возбужденных в осесимметричных оболочках резонаторов с жестко зафиксированной точкой крепления.[2] При ударе по ободу оболочки, резонатор приходит в движение и производит стоячую волну, которая резонирует на определенной частоте. При правильном ударе стоячая волна будет иметь моду наименьшего порядка и частоту чистого тона. Вращение колеблющейся оболочки резонатора относительно основания приведет к тому, что узлы колебаний на краю оболочки начнут двигаться с угловой скоростью (или скоростью прецессии) меньшей, чем скорость самой оболочки, что объясняется действием кориолисовых сил инерции. [1,2]

Угловая скорость вращения кромки оболочки резонатора,  $\Omega$ , и возбужденной в ней стоячей волны,  $\tilde{\Omega}$ , связаны соотношением [2,3]:

$$\tilde{\Omega} = K\Omega, \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент прецессии (коэффициент Брайана).

Эффект Брайана справедлив для любого закона вращения основания  $\Omega(t)$  и на его основе можно построить датчик угловой скорости и углового перемещения. Угол поворота стоячей волны относительно кольцевого резонатора определяется формулой[3]:

$$\varphi(t) = -\frac{2}{1+n^2} \int_0^t \Omega(\tau) d\tau, \quad (2)$$

где  $n$  – параметр, определяющий моду колебаний кольца.

Для определения произвольного углового движения объекта относительно инерциального пространства необходимо иметь три таких датчика, ориентированных по трем взаимно перпендикулярным осям.

Резонаторы изготавливают из металлических сплавов и кварцевого стекла. В виду своей трудоемкости, технологии изготовления чувствительного элемента из кварцевого стекла применяется для сферических резонаторов прецизионных ВТГ, используемых для навигации в качестве датчика угловой скорости. Себестоимость металлических резонаторов ВТГ значительно ниже кварцевых и их широко применяют в качестве датчика углового перемещения.

Цель представленной работы сравнить характеристики двух видов металлических резонаторов ВТГ в зависимости от геометрии их чувствительного элемента.

Достижение поставленной цели требует анализа существующих конструкций резонаторов ВТГ и их математического моделирования.

## 2. Металлические резонаторы. Разновидности конструкций. Достоинства и недостатки

В работе проведено сравнение двух перспективных геометрий металлических чувствительных элементов ВТГ: цилиндрической и «китайский» колокол. Данные конструкции обладают наилучшим сочетанием расщепления частоты и коэффициента прецессии [3]. Основной материал резонатора NiCrTi-сплав с низким коэффициентом линейного теплового расширения [2].

На рисунке 1 представлен ВТГ с цилиндрическим чувствительным элементом, разработанный фирмой Innalabs (Великобритания). В представленной конструкции резонатор 3 (диаметром 17. . .43 мм) закреплен на основании 4 винтом 2 и установлен в корпус 1. На дно резонатора 3 приклеены пьезокерамические элементы, используемые как для возбуждения, так и для измерения колебаний. Подавление синфазных и квадратурных колебаний в узлах резонатора осуществляется путем подачи противофазных переменных напряжений на соответствующие элементы пьезокерамики. Добротность резонатора составляет  $1-1,5 \cdot 10^4$ . Блок управления ВТГ представляет собой плату размером 45 x 45 мм. Гироскоп способен работать при температуре от  $-40$  до  $+75^\circ\text{C}$ . Скорость случайного дрейфа для данной конструкции составляет 1 град/ч [4].

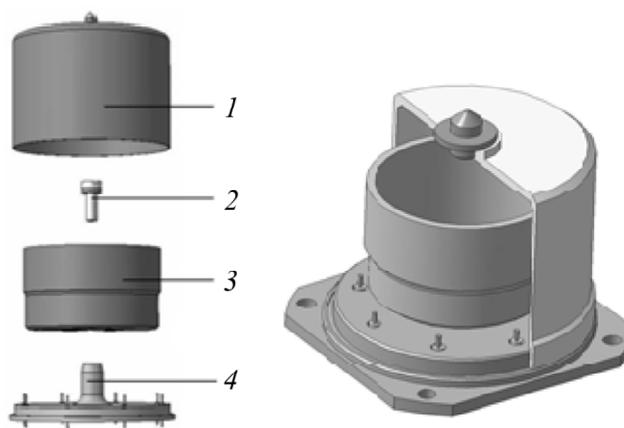


Рис. 1. Конструкция ВТГ с цилиндрическим резонатором [4]:  
1 — корпус; 2 — крепежный винт; 3 — резонатор; 4 — основание

Достоинствам приведенной конструкции является малое энергопотребление, радиационная стойкость и виброустойчивость, а недостатками чувствительность геометрии резонатора ВТГ к качеству его изготовления.

В работе [5] рассмотрена конструкция ВТГ с колоколообразным резонатором (рисунок 2), который получил название «китайский» колокол (BVG). Конструкция резонатора разработана с учетом упрощения процедур проектирования и уменьшения стоимости изготовления. Форма конструкции резонатора колокола получается путем слияния верхней конической структуры со средней и нижней в виде параболы. Это слияние не изменяет характер колебаний резонатора, но позволяет упростить процесс его изготовления. Возбуждающие и регистрирующие пьезокерамические элементы приклеены к внешней поверхности колокола.

Экспериментальные результаты показывают, что «китайский» колокол обладает теми же достоинствами и недостатками, что и цилиндрическая конструкция, но отличается простой конструкцией и улучшенной стойкостью к ударам при измерениях низкой и средней угловой скорости.

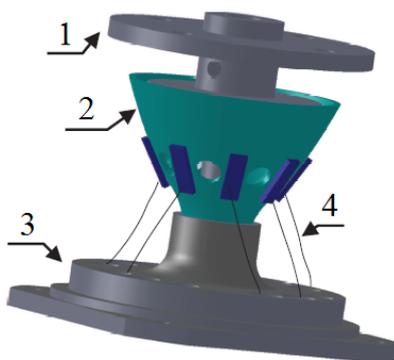


Рис. 2. Конструкция ВТГ «китайский» колокол QianLong Bell [5]:  
1- фиксированная ось; 2 – чувствительный элемент; 3 – основание; 4 - провода

### 3. Конечно-элементное моделирование резонатора ВТГ

Точность ВТГ в основном зависит от геометрических параметров чувствительного элемента и материала, из которого он изготовлен. Одним из направлений повышения точности ВТГ является отработка научно-технических проблем, направленных на решение конструкторско-технологических задач [3].

Исследование влияния геометрии чувствительного элемента ВТГ, на его резонансные характеристики и моделирование термоупругих состояний резонатора выполнено в среде мультифизического моделирования COMSOL Multiphysics.

В качестве расчетной геометрии были выбраны две конструкции резонатора ВТГ представленные на рисунке 3 с размерами, взятыми из работ [4,5].

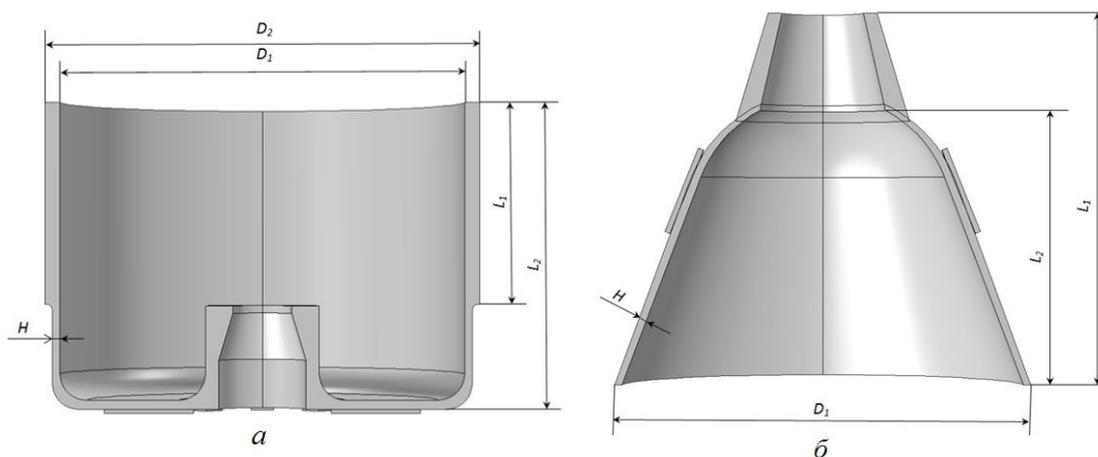


Рис. 3. Геометрия резонатора ВТГ:

- а) размеры цилиндрического резонатора:  $D_1 = 26,3\text{ мм}$ ;  $D_2 = 27,5\text{ мм}$ ;  $L_1 = 13\text{ мм}$ ;  $L_2 = 20\text{ мм}$ ;  $H = 0,6\text{ мм}$ .  
б) размеры колоколообразного резонатора:  $D_1 = 27,5\text{ мм}$ ;  $L_1 = 27,5\text{ мм}$ ;  $L_2 = 20\text{ мм}$ ;  $H = 0,6\text{ мм}$ .

При моделировании крепление резонатора осуществлялось через донное отверстие, сам он помещался в теплоизолированную среду. Материал резонатора задавался сплавом 36Н (инвар) физические свойства которого: плотность  $8050\text{ кг/м}^3$ ; коэффициент Пуассона 0,28; модуль Юнга  $1,48 \cdot 10^{11}\text{ Па}$ ; температурный коэффициент линейного расширения  $1,3 \cdot 10^{-6}\text{ 1/}^\circ\text{C}$ ; коэффициент теплопроводности  $515\text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$ ; удельная теплоёмкость  $12\text{ Дж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$ .

Конечно-элементная сетка, созданная в COMSOL Multiphysics с учетом особенностей конструкции, приведена на рисунке 4.

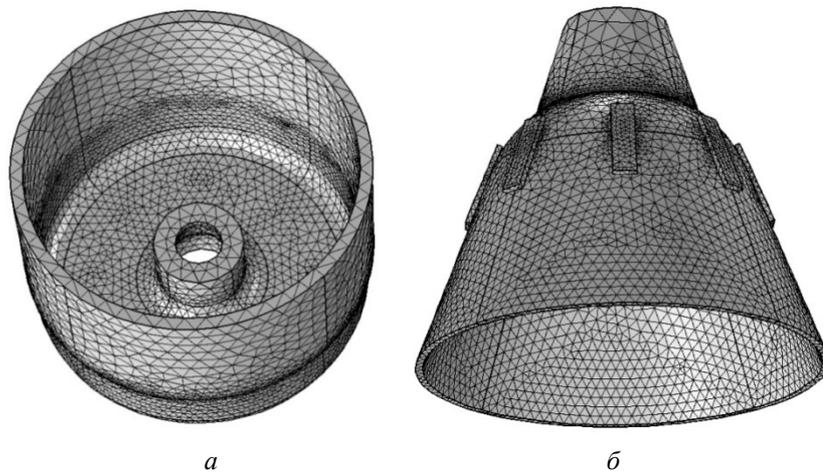


Рис. 4. Конечно-элементная аппроксимация трехмерных моделей резонаторов ВТГ:  
а) цилиндрический, б) «китайский» колокол

#### 4. Моделирование мод резонансных колебаний и термоупругого состояния резонатора ВТГ

Резонансные моды колебаний и их частоты приведены на рисунке 5.

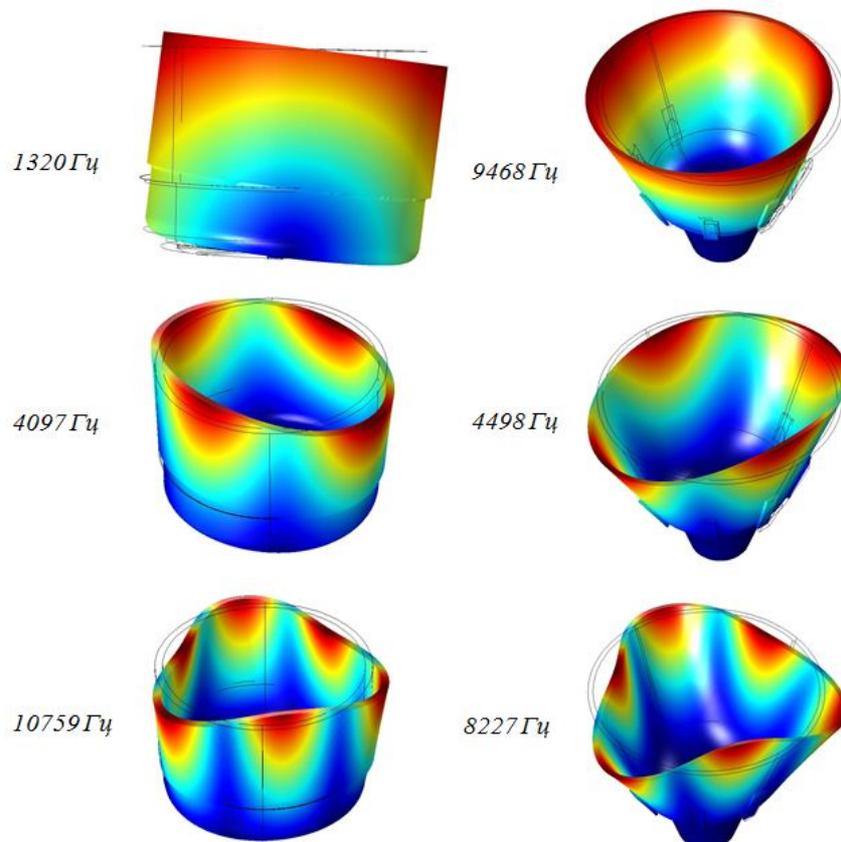


Рис. 5. Резонансные моды колебаний чувствительных элементов ВТГ

Помимо первой, второй и третьей основных форм колебаний (рис. 5), были получены дополнительные моды на более высоких частотах. Вторая форма колебаний используется в качестве рабочей, она является наименьшей собственной формой изгибных колебаний резона-

торов ВТГ [6]. Поэтому в дальнейшем исследования велись на частотах 4097 и 4498 Гц для цилиндрического и колоколообразного резонатора соответственно.

Величина добротности, по результатам моделирования составила 33505 для цилиндрического резонатора и 30388 для колокола.

При колебаниях резонатора, из-за внутреннего трения в материале, часть механической энергии переходит в тепловую. В ходе моделирования было получено изменение температуры стенок резонатора при колебаниях (рис. 6).

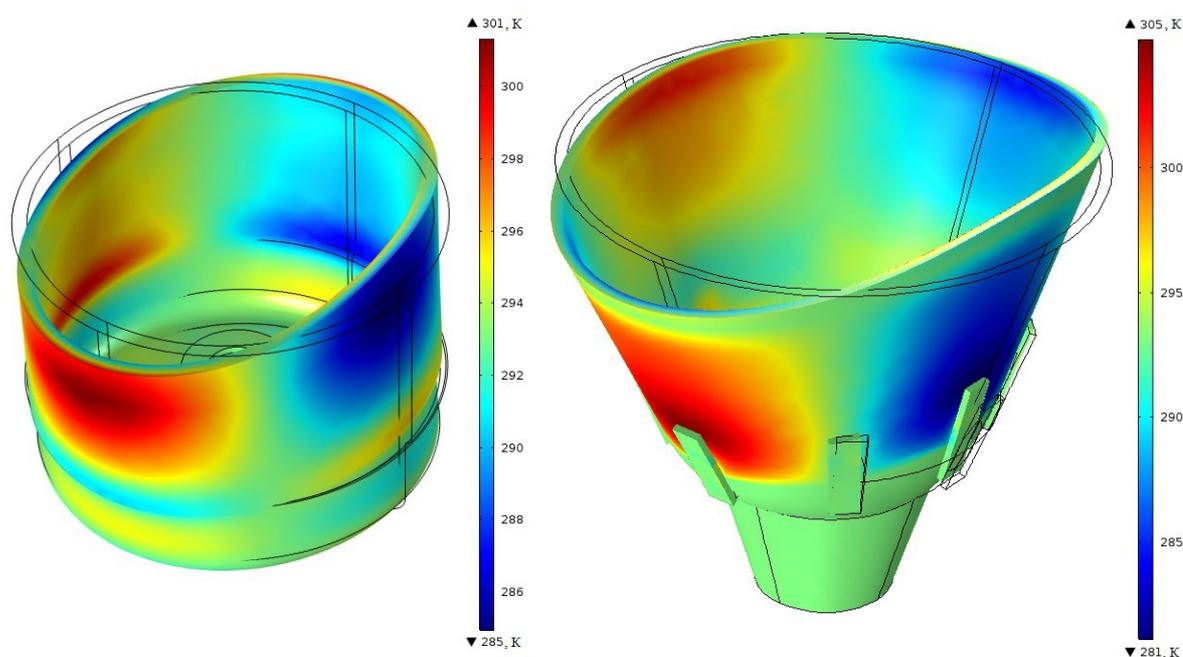


Рис. 6. Изменение температурного поля при возникновении внутреннего трения на второй форме колебаний резонаторов

Согласно результатам моделирования при колебаниях резонатора, температура в разных точках зависит от локальной деформации. Более «холодные» или «горячие» участки окрашены соответственно, синим и красным цветами. По рисунку 6 видно, что наибольшая диссипация энергии наблюдается на рабочем кольце резонаторов, т.к. этот элемент конструкции больше всего деформируется [4].

Результаты моделирования позволяют сделать вывод, что по своим характеристикам резонаторы в виде цилиндра и колокола существенно не отличаются. Максимальная добротность определяется термоупругими потерями в резонаторе.

В связи с этим, необходимо обращать внимание на качество обработки резонатора и его балансировку.

### Библиографический список

1. Мейер Д., Розелле Д. Инерциальная навигационная система на основе миниатюрного волнового твердотельного гироскопа // Гироскопия и навигация. 2012., №3(78), С.45-54.
2. Лунин Б.С., Матвеев В.А., Басараб М.А. Волновой твердотельный гироскоп. Теория и технология / монография. М.: Радиотехника, 2014. – 176 с.
3. [Вахлярский Д.С.](#), [Гуськов А.М.](#), [Басараб М.А.](#), [Матвеев В.А.](#) Численное исследование резонаторов ВТГ различной формы при наличии дефектов различного типа // Наука и образование. Электрон. журн. 2016. № 10. DOI: 10.7463/1016.0848188.

4. 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
5. Ning L., Zhong S., Qing L., MengYin F., Hong L., JunFang F. Characterization of the bell-shaped vibratory angular rate gyro. Sensors 2013, 13, 10123-10150.
6. В.А. Матвеев, В.И. Липатников, А.В. Алёхин Проектирование волнового твердотельного гироскопа: Учебное пособие для вузов. – М.: издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана, 1998 г. – 168 с.

УДК 621.372.544.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПОВЕРХНОСТИ pHEMT ТРАНЗИСТОРА

К.А. Видергольд, А.А. Сивоконь

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, sivokon.7@yandex.ru*

*Аннотация.* Рассматривается pHEMT СВЧ транзистор на основе арсенида галлия, его основные достоинства и структура. Разработан математический аппарат по расчету распределения температуры на поверхности СВЧ транзистора. Проведенные расчеты показали, что в данном температурном диапазоне pHEMT транзистор в рабочем режиме.

*Ключевые слова.* pHEMT СВЧ транзистор, GaAs структура, математический расчет.

## RESEARCH OF DISTRIBUTION OF TEMPERATURE ON THE pHEMT TRANSISTOR SURFACE

K.A. Vidergold, A.A. Sivokon

*Ryazan State Radioengineering University,  
Russia, Ryazan, sivokon.7@yandex.ru*

*Abstract.* In the submitted article pHEMT microwave oven the transistor on the basis of gallium arsenide, its main advantages and structure is considered. The mathematical apparatus by calculation of distribution of temperature to the surfaces of the microwave oven of the transistor is developed. The carried-out calculations showed that in this temperature range of pHEMT the transistor in operating duty.

*Keywords.* pHEMT microwaves transistor, GaAs structure, mathematical calculation.

В настоящее время проводятся исследования тепловых параметров в активной области pHEMT СВЧ транзисторов на основе арсенида галлия. Это связано с тем, что увеличение температуры может привести к пробое исследуемого устройства. Чтобы определить максимальную рабочую температуру проводится несколько исследований для регистрации температуры в центральной части транзистора. Результаты полученных параметров можно использовать для расчетов надежности и времени жизни pHEMT транзистора [1].

В данный момент широко используют структуры из арсенида галлия и гетероструктур AlGaAs/GaAs и InGaAs/GaAs, который получили название HEMT или транзистор с высокой подвижностью электронов. Усовершенствование такой технологии привело к появлению псевдоморфных транзисторов с высокой подвижностью электронов pHEMT, которые позволяют изготовить малощумящие транзисторы с наилучшими характеристиками в широком частотном диапазоне [2].

Транзистор с высокой подвижностью электронов (HEMT) – полевой транзистор, в котором для создания канала используется контакт двух полупроводниковых материалов с различной шириной запрещенной зоны. HEMT транзистор, у которых гетеропереход образован материалами с различными константами решетки (AlGaAs/InGaAs, InGaAs/InAlAs, InGaP/InGaAs и т.п.), получили название *псевдоморфных транзисторов* (pHEMT). Они относятся к полевым транзисторам и имеют идентичные принципы работы. Отличие состоит в эпитаксиальной структуре слоя [3]. На рисунке 1 показана структура транзистора, изготовленного по pHEMT технологии.

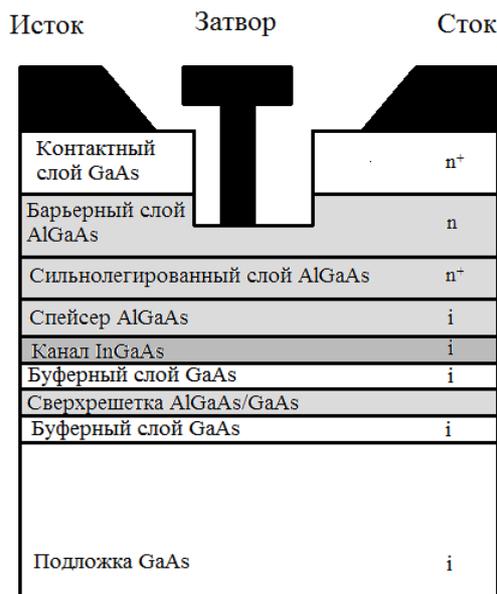


Рис. 1. Структура рНЕМТ транзистора [4]

Лидером такой технологии является компания TriQuint Semiconductor. В ее стенах впервые был изготовлен рНЕМТ транзистор с минимальным размером элементов 0,15 мкм.

В рНЕМТ структуре тонкий напряженный эпитаксиальный слой InGaAs с малой долей In выращивается между GaAs и AlGaAs. Сама структура формируется на подложке GaAs, где создается буферный слой, который является сверхрешеткой типа AlAs/GaAs. InGaAs является каналным слоем, т.е. тонким слоем с такой шириной запрещенной зоны, что образуется 2D электронный газ. К каналному слою примыкает слой спейсера, т.е. тонкого разделительного слоя нелегированного AlGaAs, необходимого для разделения 2D электронного газа и рассеивающих центров между GaAs и AlGaAs [5].

Из слоев InGaAs и AlGaAs формируется квантовая яма, где происходит скопление электронов, которые и формируют 2D электронный газ, с помощью которого происходит управление рНЕМТ транзистором посредством изменения напряжения затвора.

В данной статье расчет теплового сопротивления транзистора на GaAs производится методом суммирования тепловых потоков, исходящих от образца при теплопередачи теплопроводностью и конвекцией с использованием тепловой камеры. Расчет производится по формулам в аналитической форме для начальной оценки результатов.

Тепловое сопротивление рассчитывается по формуле:

$$R_t = \frac{h}{F\lambda},$$

где  $h$  – высота слоя структуры;

$F$  – площадь соприкосновения при теплопередаче;

$\lambda$  – теплопроводность.

Тепловой поток при теплопередаче теплопроводностью:

$$Q_1 = \frac{\Delta T}{R_t} = \frac{\lambda F}{h} (T_1 - T_2),$$

где  $T_1$  - измеренная и пересчитанная температура в активной области транзистора;

$T_2$  - температура на нагревательном столике.

Тепловой поток при теплопередаче конвекцией:

$$Q_2 = \alpha F(T_1 - T_2),$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплопередачи в воздушной среде.

Общий тепловой поток:

$$Q = Q_1 + Q_2,$$

$$Q = \left( \frac{1}{R_{t1}} + \frac{1}{R_{t2}} + \frac{1}{R_{t3}} + \dots + \frac{1}{R_{tn}} \right) \Delta T_1 + \alpha F \Delta T_2,$$

где  $\Delta T_1 = T_1 - T_2$ , а  $\Delta T_2 = T_1 - T_{окр}$ .

$$Q = \frac{\Delta T_1}{R_{тобщ}} + \alpha F \Delta T_2.$$

Общий тепловой поток в этой работе заменяется на выделяемую мощность транзистором:

$$P = I_c \times U_c,$$

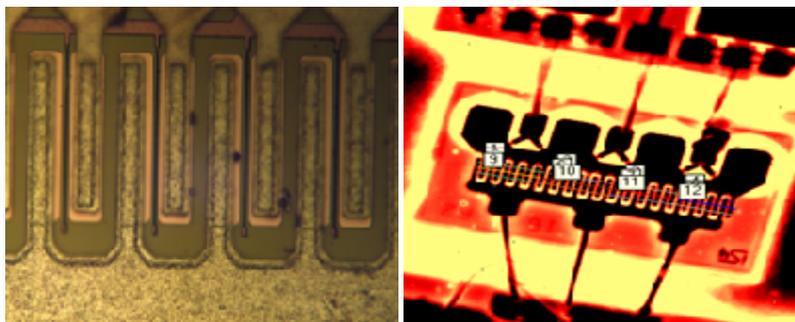
где  $I_c$  – ток стока,  $U_c$  – напряжение на стоке.

$$P = \frac{\Delta T_1}{R_{тобщ}} + \alpha F \Delta T_2.$$

Из этой формулы выражается общее тепловое сопротивление:

$$R_{тобщ} = \frac{\Delta T_1}{P - \alpha F \Delta T_2}.$$

Для анализа выбрана область перегиба в гребенчатой структуре (рис. 2). Исследование температуры происходит в области, обозначенной линиями с метками, изображенными на рисунке 2 (б).



а)

б)

Рис. 2. Фото из микроскопа гребенчатой структуры транзистора (а) и тепловое изображение транзистора и линий, усредняющих значения цветовых температур на гребенке (б)

По разработанному математическому аппарату и экспериментальным исследования были получены следующие результаты, показанные в табл. 1.

Таблица 1. Результаты тепловых измерений

№	$U_3$ , В	$U_c$ , В	$I_c$ , А	$P$ , Вт	$T_{изм.}$ , °С	$T_{н.с.}$ , °С	$R_t$ , °С/Вт
1	3	1	0,12	0,12	28,8	27	15,6
2	3	2	0,12	0,24	33,6	28	23,3
3	3	3	0,13	0,40	41,1	30,5	26,2

Полученные результаты показывают изменение температуры в активной области гребенчатой структуры рНЕМТ транзистора, изменения температуры нагревательного столика и рассчитанное тепловое сопротивление.

Как видно из таблицы 1 с результатами тепловых измерений в рабочих режимах транзистора в центральной части гребенчатой структуры, с увеличением температуры в активной области транзистора увеличивается тепловое сопротивление. Это явление уменьшает вероятность электротеплового пробоя рНЕМТ транзистора. При экспериментально полученных температурах транзистор остается в рабочем состоянии. Продолжая исследование можно определить максимальную рабочую температуру транзистора.

### Библиографический список

1. Шахнович И.П. Твердотельные СВЧ-приборы и технологии. Состояние и перспективы // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. – 2005. – № 5. – С. 58–64.
2. Крутов А. В. Серия малозумящих GaAs рНЕМТ транзисторов ЗПЗ102 / А. В. Крутов, Н. А. Кувшинова, А. С. Ребров // ФГУП "Научно-производственное предприятие "Исток". - 2010. - 4 с.
3. Козловский Э. Ю. Малошумящие полевые транзисторы на основе гетероструктуры (Al, In)GaAs/GaAs: дис. д-ра физ.-мат. наук: 05. 27. 01 / Козловский Эдуард Юрьевич. - Санкт-Петербург, 2013. - 167 с.
4. Козловский Э. Ю. Технология СВЧ микроприборов на основе рНЕМТ наногетероструктур / Э.Ю. Козловский, Б.И. Селезнев // Сборник конкурсных научных работ аспирантов и молодых ученых по направлению «Стратегическое партнерство вузов и предприятий радиоэлектронной промышленности». – Санкт-Петербург, 2009. – С.14-19.
5. Федосова М. А. Технология GaAs рНЕМТ с самосовмещенными омическими контактами / М. А. Федосова, А. М. Гаврилова, Е. В. Ерофеев, В. С. Арыков // Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники ЗАО "НПФ"Микран". - 2011. - 696 с.

УДК 621.373.826; ГРНТИ 47.35.31

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ДВУХЧАСТОТНЫЙ АКТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ HE – NE ЛАЗЕРА

В.С. Зоркин, Е.Г. Чуляева, А. В. Степура

*Акционерное общество «Плазма»,*

*Российская Федерация, Рязань, [tera@plasmalabs.ru](mailto:tera@plasmalabs.ru)*

*Аннотация.* В настоящей работе исследовано влияние магнитных полей на выходную мощность лазерного излучения и форму амплитудно – частотной характеристики с целью создания стабилизированного по мощности лазера.

*Ключевые слова.* Амплитудно – частотная характеристика, магнитное поле, мощность, стабилизированный лазер.

## THE RESEARCH OF IMPACT OF MAGNETIC FIELDS TO TWO - FREQUENCY HE - NE LASER TUBE

V.S. Zorkin, E.G. Chulyaeva, A.V. Stepura

JSC «PLASMA»,

Russian Federation, Ryazan, mera@plasmalabs.ru

*Abstract.* In this paper the impact of magnetic fields to laser radiation power and shape of amplitude - frequency response with the aim of creation of power stabilized laser.

*Keywords.* Amplitude - frequency response, magnetic field, power, stabilized laser.

### 1. Введение

Важнейшую роль в обеспечении качества и конкурентоспособности продукции практически всех отраслей промышленности, возможности проведения научных исследований играет контрольно измерительная техника, в которой особое место занимают средства измерения и контроля геометрических параметров ответственных деталей, узлов машин и механизмов.

Ключевым элементом таких средств измерения является источник когерентного оптического излучения.

Одним из наиболее часто используемых источников, является He –Ne лазер, работающей на длине волны 0.63 мкм.

He – Ne лазеры, делятся на два типа: 1) нестабилизированные [1] ; 2) стабилизированные [2], по одному из рабочих параметров.

Нестабилизированные модели отличаются большими выходными мощностями, по сравнению с стабилизированными вариантам. Однако, стабилизированные лазеры отличаются высокой временной когерентностью, вплоть до километровых значений, что позволяет производить измерения линейных и угловых размеров с нанометрической точностью [3].

*Целью настоящей работы* является исследование влияния магнитного поля на свойства лазерного излучения, обеспечивающих возможность создания малогабаритного стабилизированного по мощности (на уровне не менее 0.8 мВт) лазера повышенной когерентности (длина временной когерентности не менее 350мм.) работающего в одночастотном режиме.

### 2. Теоретическая часть

В качестве источника излучения выбран активный элемент с внутренними зеркалами габариты которого представлены на рисунке 1.

Средняя мощность лазерного излучения активных элементов представленных габаритов составляет 1 мВт.

Рассчитаем спектральный состав.

Доплеровская ширина линии излучения He – Ne лазеров составляет  $\Delta\nu_D = 1500$  МГц.

Частотный интервал между двумя продольными модами резонатора равна:

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L}, \quad (1)$$

где,  $c$  – скорость света, м/с;

$L$  – длина резонатора, м.

Учитывая, что  $L$  составляет 135 мм,  $\Delta\nu = 1111$  МГц, что соответствует двухчастотному спектральному составу

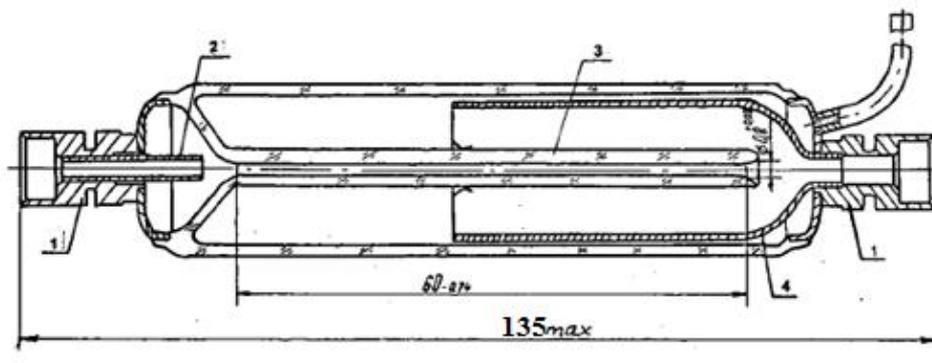


Рис. 1. Устройство активного элемента;  
1 – Юстировочный узел; 2 – анод; 3 - разрядный капилляр; 4 – катод

Рассмотрим существующие методы стабилизации характеристик лазерного излучения, с целью выбора наиболее оптимального для данной задачи.

а) Ввиду двухчастотного спектрального состава данного активного элемента, возможна стабилизация по равенству интенсивностей ортогональных компонент лазерного излучения [4,5,6].

б) Стабилизация путём сравнения измеряемого сигнала с опорным значением.

Стабилизация лазера с активным элементом данного типа будет осуществляться путём сравнения измеряемого сигнала с опорным значением, где, измеряемым сигналом является мощность излучения активного элемента, а опорное значение – искусственно заданная величина, рассчитываемая, как процент от максимальной мощности.

Вследствие не плавной перестройки частот в коротких двухчастотных резонаторах (наличие перескоков вблизи максимума и краёв контура усиления) [7], являются возможными срывы стабилизации вблизи максимума мощности. В совокупности с вероятностью одновременного существования обеих поляризаций вблизи максимума мощности использование выбранного типа стабилизации ограничено.

С целью предотвращения срывов стабилизации и подавления второй поляризации в излучении с помощью оптических элементов, предложено использование магнитооптических эффектов, описанных в [8,9,10].

Данные эффекты заключаются в приложении поперечного магнитного поля к части активной среды, меняющего соотношение мощностей  $\sigma$  и  $\pi$  компонент лазерного излучения вплоть до исчезновения одной из компонент.

В соответствии с [11,12] существование бистабильных явлений и скачков поляризации можно объяснить из лэмбовских уравнений движений. В соответствии с этим, зависимости интенсивностей компонент лазерного излучения от расстройки резонатора можно описать следующим соотношением:

$$\begin{cases} I_{\sigma}(\delta) \sim \frac{1}{\alpha} \left( C e^{-\left(\frac{2\delta + g\mu H}{Ku}\right)^2} \right) \cdot (A_6 \cdot \delta^6 + A_5 \cdot \delta^5 + A_4 \cdot \delta^4 + A_3 \cdot \delta^3 + A_2 \cdot \delta^2 + A_1 \cdot \delta^1 + A_0) \\ I_{\pi}(\delta) \sim \frac{1}{\alpha} \left( C e^{-\left(\frac{-2\delta + g\mu H}{Ku}\right)^2} \right) \cdot (A_6 \cdot \delta^6 - A_5 \cdot \delta^5 + A_4 \cdot \delta^4 - A_3 \cdot \delta^3 + A_2 \cdot \delta^2 - A_1 \cdot \delta^1 + A_0) \end{cases}, \quad (2)$$

где  $I_{\sigma}, I_{\pi}$  – интенсивности  $\sigma$  и  $\pi$  компонент лазерного излучения, соответственно;  
 $\alpha$  – коэффициент усиления самонасыщения;  
 $\delta$  – расстройка резонатора;  
 $g$  – фактор Ланде;

$\mu$  – магнитная проницаемость активной среды;  
 $H$  – напряжённость магнитного поля;  
 $K_{\mu}$  – полуширина доплеровского контура;  
 $C, A_{6...0}$  – коэффициенты пропорциональности.

Зависимости, рассчитанные по соотношениям (2), представлены на рисунке 2.

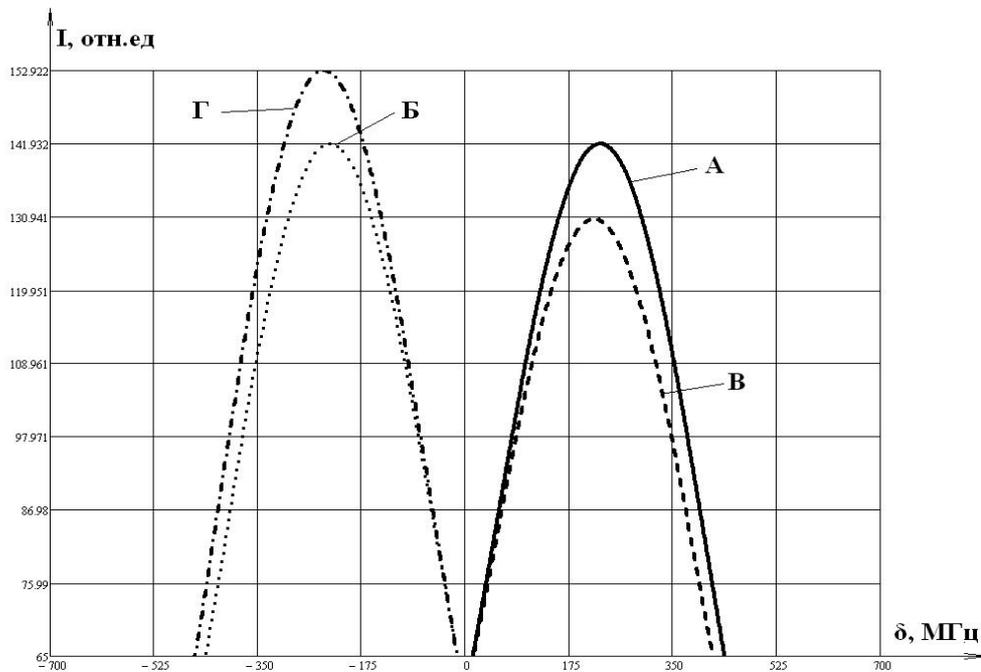


Рис. 2. Зависимости интенсивности  $\sigma$  и  $\pi$  компонент лазерного излучения от расстройки резонатора:

- A –  $\pi$  компонента при  $H=0$ ;
- Б –  $\sigma$  компонента при  $H=0$ ;
- В –  $\pi$  компонента при  $H=50\text{Э}$ ;
- Г –  $\sigma$  компонента при  $H=50\text{Э}$

### 3. Экспериментальная часть

Для проведения эксперимента был разработан измерительный стенд, блок – схема которого представлена на рисунке 3.

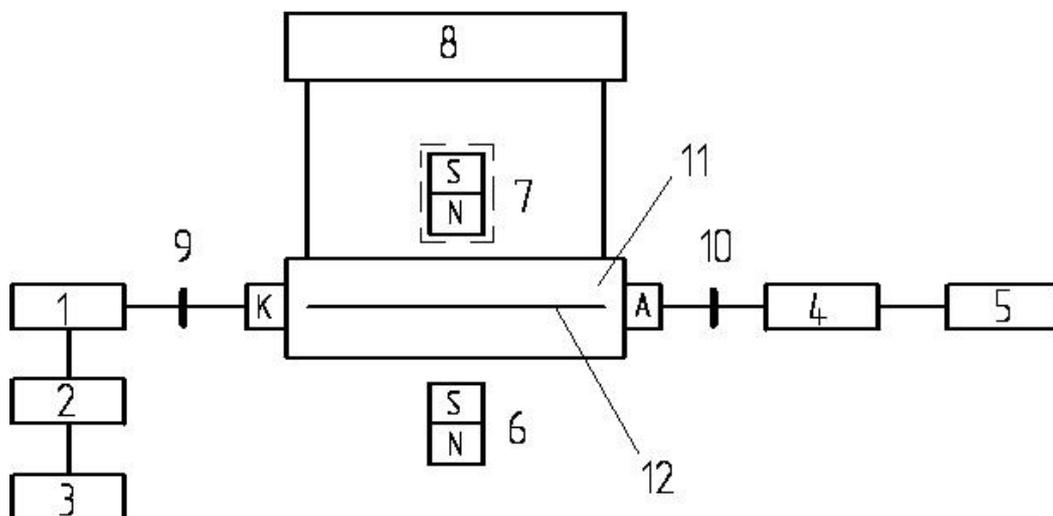


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

Излучения активного элемента 11 с разрядным капилляром 12, питающегося от высоковольтного источника 8, через поляроид 9, сориентированный таким образом, что после него проходит лишь одна продольная мода, поступает на термостатированный фотоприёмник с усилителем 1. Сигнал с фотоприёмника регистрируется с помощью цифрового мультиметра 2 (АРРА 207), данные которого поступают на персональный компьютер 3. Одновременно с этим, излучение со стороны анодного зеркала, через поляроид 10, сориентированным аналогично поляриду 9, поступает на сканирующий интерферометр 4. Сигнал со сканирующего интерферометра поступает на осциллограф 5. Помимо этого в стенд можно монтировать и демонтировать магниты 6 и 7.

Зарегистрированный сигнал будет представлять собой АЧХ отображённую относительно временной оси.

Ввиду наличия в системе стабилизации лазеров фотоприёмного устройства, сигнал с приёмника 9 будет аналогичен используемому в цепи стабилизации. Однако фотоприёмное устройство регистрирует лишь интенсивность сигнала и зачастую не способно отобразить реальную картину АЧХ при наличии областей нестабильной поляризации. С распознавания областей АЧХ с нестабильной поляризацией и служит сканирующий интерферометр.

Полученные результаты эксперимента представлены на рисунке 4 ( $\pi$  - компонента) и рисунке 5 ( $\sigma$  - компонента).

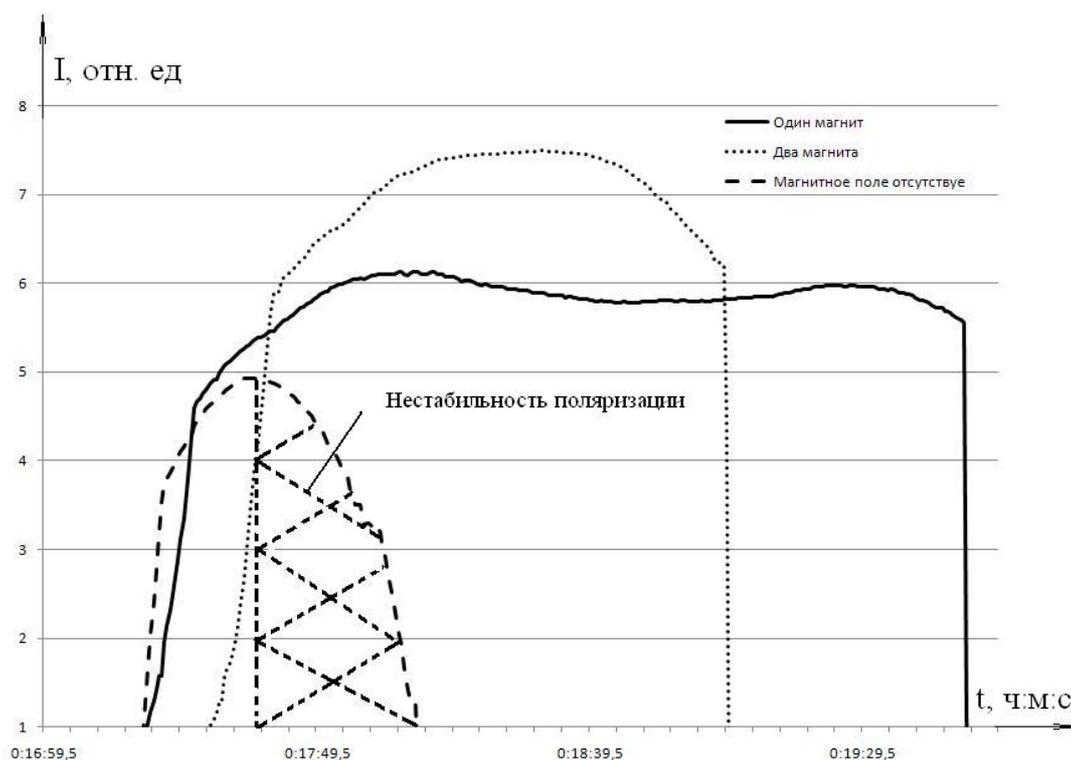


Рис. 4. Зависимость интенсивности  $\pi$  - компоненты активного элемента от времени прогрева

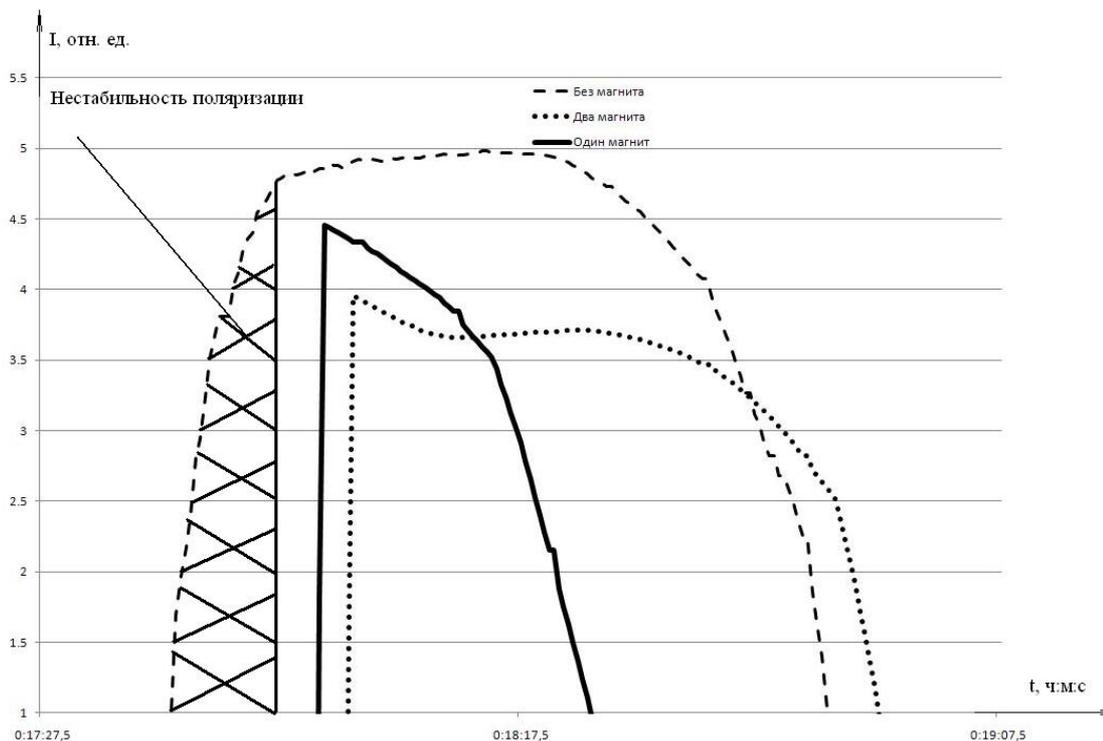


Рис. 5. Зависимость интенсивности  $\sigma$ -компоненты активного элемента от времени прогрева

Эксперимент проводился для трёх случаев:

-Магнитное поле отсутствует;

-С двух сторон активного элемента расположены цилиндрические магниты, намагниченные до уровня 70 мТл, что соответствует величине индукции магнитного поля в центре разрядного капилляра приблизительно 15 мТл;

-Магнит расположен только с одной стороны от активного элемента, что соответствует величине магнитной индукции магнитного поля в центре разрядного капилляра приблизительно 15 мТл.

#### 4. Анализ полученных результатов

Приложение поперечного магнитного поля изменяет перераспределение интенсивностей модовых составляющих лазерного излучения, а так же приводит к устранению зон нестабильной поляризации АЧХ. Однако в случае, когда к активному элементу приложен лишь один магнит, растёт продольная составляющая магнитного поля, вследствие чего помимо перераспределения интенсивностей мод резонатора происходит перераспределение ширины каждого из контуров. Данный эффект можно использовать для улучшения стабилизации лазера по уровню мощности, ввиду возможности стабилизации вдали от краёв АЧХ, что приведёт к устранению одновременного существования двухмодового режима генерации и, как следствие этого – увеличению длины временной когерентности.

#### Библиографический список

1. <http://www.plasmalabs.ru/>.
2. М.Ю.Керносов, Е.Ю.Гомозкова, В.С.Зоркин, А.А.Кондрахин, Г.В.Мельничук. Стабилизированные лазеры и их характеристики// Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. № 2. Выпуск 52. Рязань, 2015.
3. В. П. Коронкевич, А. Г. Полещук, А. Г. Седухин, Г. А. Ленкова. Лазерные интерферометрические и дифракционные системы. // Компьютерная оптика. Том 34. № 1. 2010г. С.4- 20.

4. А. Н. Власов, С. И. Хилов. Частотно-стабилизированные гелий - неоновые лазеры для интерферометрии. // Фотоника. Выпуск 5. 2007г.
5. D. Matthew Dobbins. Frequency Stabilization of a Helium-Neon Laser - University of Rochester, Fall 1995.  
Yuanchi Zhao. Implementing Thermal Feedback Control of a Helium-Neon Laser for Frequency Stabilization. Intel Science Talent Search. Physics. November 2008.
6. М.Ю. Керносов, Ю.В. Киселев, Г.В. Мельничук, Е.Г. Чуляева. Подавление поляризационной нестабильности в частотно - стабилизированных гелий - неоновых лазерах. //Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки № 2. Выпуск170. Санкт - Петербург 2013
7. М. К. Дятлов, В. Г. Касьян. Поляризация излучения гелий – кадмиего ОКГ в поперечном магнитном поле. // Электронная техника. Электрорадиодетали и газоразрядные приборы. Выпуск 6.
8. А. П. Войтович. Магнитооптика газовых лазеров. // Наука и техника. 208с. 1984
9. D. Lenstra. On the theory of polarization effects in gas lasers.
10. У.Лэмб Теория оптических лазеров.// Квантовая оптика и квантовая радиофизика. Изд-во «Мир». 1965. С.452.
11. В. Г. Гуделев. Влияние шума на проявления поляризационной динамики анизотропного газового лазера.// Квантовая электроника.- 1997 Т.24. - №1.- С.5-10.

УДК 621.385.6; ГРНТИ 47.29.37

## ЦИФРОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МАЛОШУМЯЩЕЙ ЛБВ

**В. Пахомов**

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

*Аннотация.* В данной работе, с помощью методов компьютерного моделирования, проведено проектирование электронно-оптических систем малошумящей ЛБВ. 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.* Лампа бегущей волны, электронно-оптическая система, коллектор, первенс, электрод.

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

**V. Pahomov**

*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 low-noise TWT. 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.* A traveling wave tube, an electron-optic system, manifold, peruvian, electrode.

### Введение

Лампы бегущей волны типа-О представляют важный класс СВЧ приборов, которые находят применение в широкодиапазонных радиолокационных станциях, в т.ч. в РЛС с фазированными антенными решетками, в аппаратуре радиорелейных линий связи, в бортовой аппаратуре спутников связи, в системах радиомаскировки и радиопротиводействия [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 малошумящей ЛБВ.

## 1. 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]:

$$\bar{R}^2 \frac{d^2 u}{d\bar{q}_1^2} + 2\bar{R} \frac{d\bar{R}}{d\bar{q}_1} \frac{du}{d\bar{q}_1} + 4u\bar{R} \frac{d^2 \bar{R}}{d\bar{q}_1^2} + \gamma_n^2 \frac{\bar{R}^4 \bar{B}^2 - \bar{R}_k^4 \bar{B}_k^2}{\bar{R}^2} = \frac{i}{\sqrt{u}} \quad (1)$$

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]:

$$\bar{U} = u + \mu^2 q_2^2 \left( u\bar{R} \frac{d^2 \bar{R}}{d\bar{q}_1^2} + \frac{\gamma^2 \bar{R}^4 \bar{B}^2 - \bar{R}_k^4 \bar{B}_k^2}{4\bar{R}^2} \right) + \frac{\mu^2 i}{4\sqrt{u}} (1 - q_2^2 + \ln q_2^2). \quad (2)$$

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]:

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

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

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

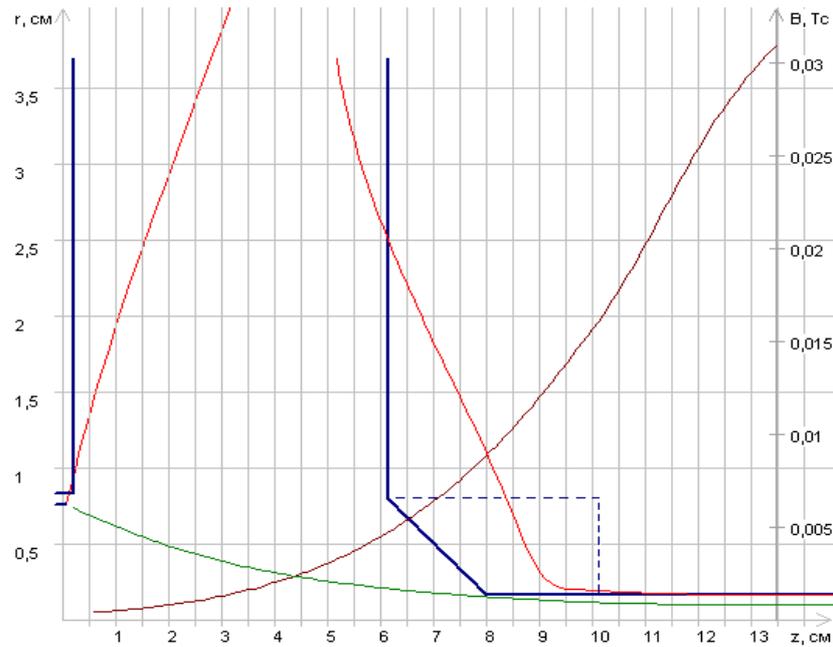
$$div\vec{j} = 0 \quad \text{- уравнение непрерывности плотности тока.} \quad (6)$$

Здесь  $\vec{E}$  - вектор напряженности электрического поля,  $\varphi$  - скалярный электрический потенциал,  $\vec{S}$  и  $\vec{V}$  - векторы, определяющие положение и скорость частицы,  $\vec{B}$  - вектор магнитной индукции,  $\vec{j}$  - вектор плотности тока,  $\rho$  - 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.

## 2. Моделирование ЭОС малошумящей ЛБВ

На первом этапе был проведен расчет электронной пушки методом синтеза на заданные параметры: первеанс пучка -  $0,04 \cdot 10^{-6} \text{ A/V}^{3/2}$ , 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.



$$P_m = 0,042 \cdot 10^{-6} \text{ A/B}^{3/2} \quad U_0 = 17,5 \text{ кВ} \quad R_0 = 0,1 \quad k_a = 0,6 \quad A_k = -2 \quad N_R = 1,5$$

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 первенсом  $0,042 \cdot 10^{-6}$  и коэффициентом заполнения пролетного канала – 0,6 (рис. 2,а).

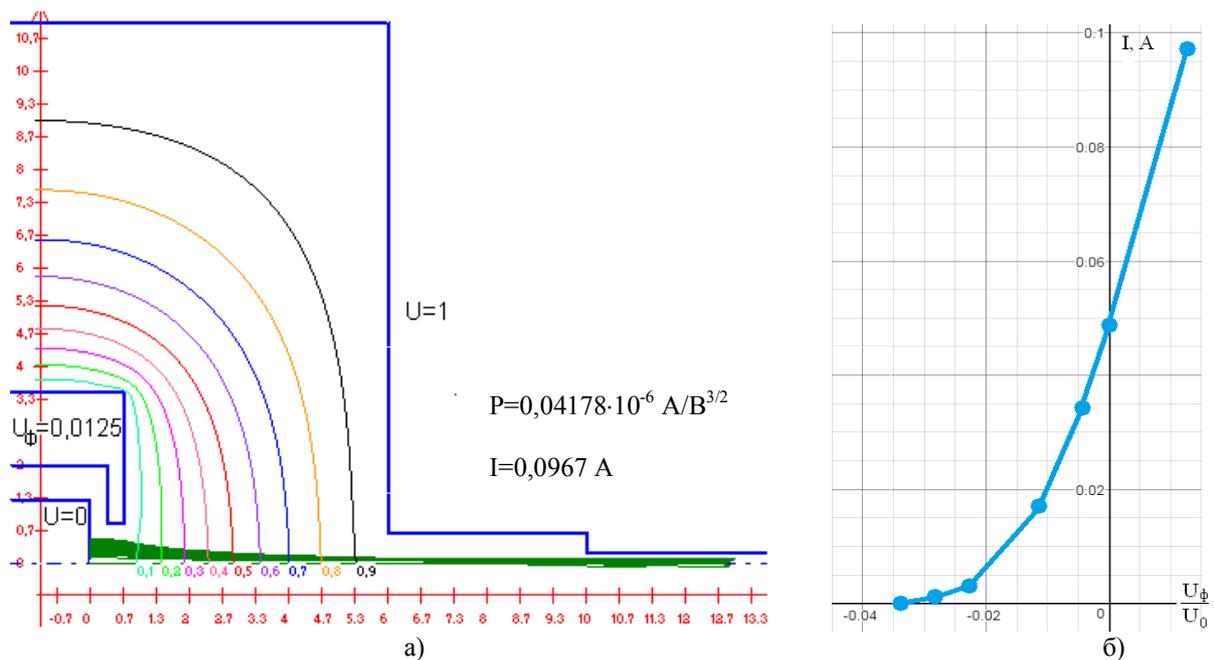


Рис. 2. Расчет пушки по программе «Анализ»:

а) – результаты траекторного анализа; б) – запирающая характеристика пушки

Для определения величины запирающего напряжения постепенно уменьшался потенциал на фокусирующем электроде. На рисунке 3.2,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.

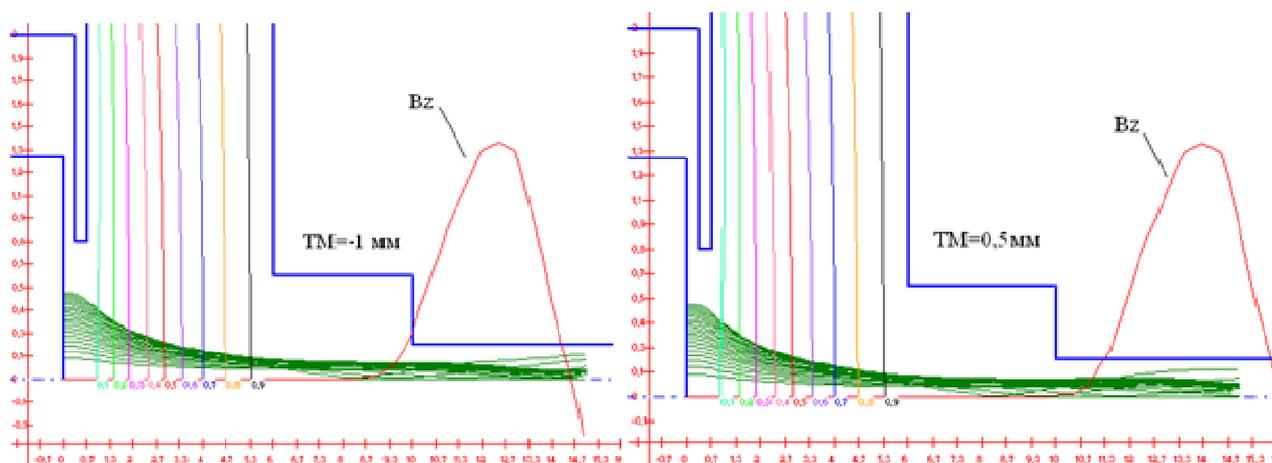


Рис. 3. Определение оптимального распределения магнитного поля

Сквозной расчет пучка в длинном пролетном канале проводился в режиме инжекции с плоскости кроссовера ( $z=13$  мм). Пучок встреливался 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).

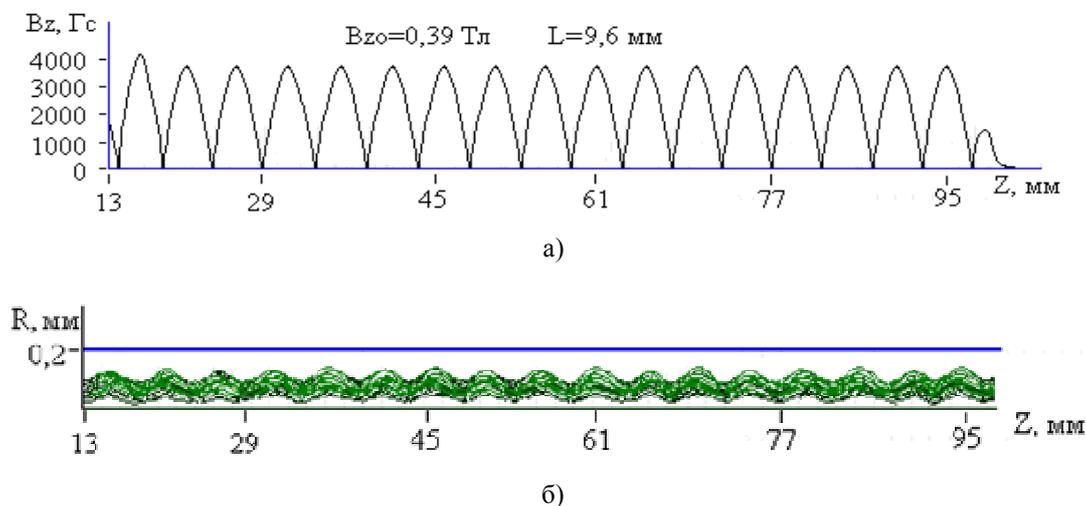


Рис. 4. Расчет пучка в пролетном канале:  
а -распределение магнитного поля; б -траектории электронов

Для повышения к.п.д. в коллекторе прибора использовался режим рекуперации. Коллектор имел двухсекционную конструкцию. 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.

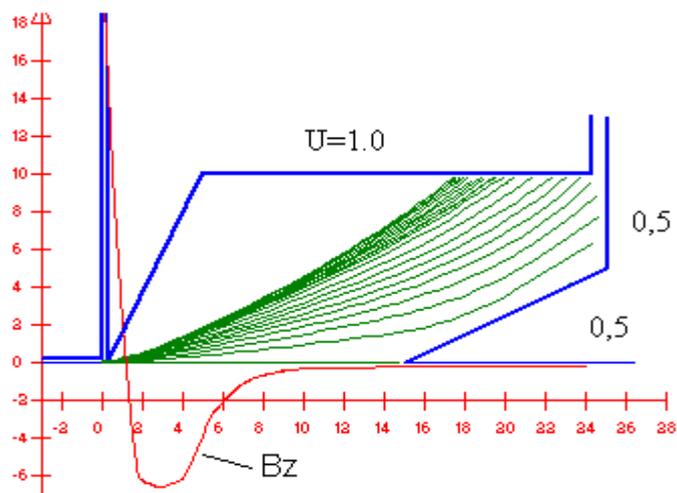


Рис. 5. Расчет траекторий пучка в коллекторе

### Выводы

Методами компьютерного моделирования по программам синтеза и анализа подобрана конфигурация и потенциалы электродов электронной пушки, формирующей низкоперевансный электронный поток для малошумящей ЛБВ 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 621.385

## РАЗРАБОТКА ДВУХСЕКЦИОННОЙ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ МОЩНОЙ ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ X-ДИАПАЗОНА

Ю.Н. Парамонов, С.В. Сурков, Б.А. Шульгин

АО «НПП «Торий»

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

*Аннотация.* В данной работе рассматривается вопрос согласования замедляющей системы типа цепочки связанных резонаторов. Описана методика согласования, представлены результаты трёхмерного проектирования секции ЛБВ, произведено сравнение результатов численного расчёта и эксперимента.

*Ключевые слова.* Замедляющая система, цепочка связанных резонаторов, лампа бегущей волны, согласование, коэффициент стоячей волны.

## DEVELOPMENT OF A TWO-SECTION SLOWING-DOWN SYSTEM FOR A POWERFUL TRAVELLING WAVE TUBE X-RANGE

Yu.N. Paramonov, S.V. Surkov, B.A. Shulgin

JSC "SPE" Toriy"

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

*Annotation.* In this paper, we consider the development of a technique for matching a slowing-down system such as a chain of coupled resonators. The matching technique is described, the results of 3D design of the TWT section are presented, the results of numerical calculation and experiment are compared.

*Keywords.* Deceleration system, chain of coupled resonators, traveling wave tube, matching, standing wave ratio.

### Введение

Работа посвящена исследованию возможностей преодоления принципиальных трудностей согласования замедляющих систем (ЗС), возникающих при разработке и проектировании согласующих элементов ламп бегущей волны (ЛБВ). Проведён поиск конструктивных методов согласования неоднородной ЗС мощного усилителя X-диапазона длин волн с использованием трёхмерного численного моделирования электродинамических характеристик ЗС.

### 1. Методика согласования ЗС на ЦСР

Метод согласования мощных ЛБВ с многосекционной замедляющей структурой типа цепочки связанных резонаторов сводится к выполнению следующих действий [1]:

а) Проектирование промежуточных ячеек, в ходе которого определяются геометрические размеры элементов ячейки.

Полученные оценки рассматриваются как опорные варианты для оптимизации ячейки с применением модели функционального подобия, реализуемой в пакете трёхмерного моделирования. В качестве параметров оптимизации выступали: изменения размера резонатора, толщин трубок дрейфа, размер щели связи между ячейками.

б) Аналитический расчёт секции замедляющей системы.

Он проводится в специальной одномерной программе в соответствии с моделью, где каждая ячейка описывается с помощью трёх параметров: собственной частоты, собственной добротности и коэффициента связи. Согласование осуществляется путём подбора параметров системы. Результатом аналитического расчёта секции замедляющей системы является такое описание ЗС на ЦСР, которое позволяет осуществить переход к проектированию опорного варианта.

в) Трёхмерное моделирование секции замедляющей системы.

На основании параметров, полученных при проектировании промежуточных ячеек, таких как частоты волноводного и согласующего резонаторов, а также коэффициента связи

между ними проектируется функциональное подобие ЗС на ЦСР и проводится оптимизация замедляющей системы. Оптимизация каждого параметра включает последовательные расчёты волноводного резонатора, щели связи, параметры отдельных ячеек и связи между ними.

г) Последним этапом является согласование секций между собой.

## 2. Моделирование ячеек ЗС на ЦСР

После получения с помощью аналитической программы значений частот и добротностей волноводного и согласующего резонаторов, а также коэффициента связи между ними, определяются геометрические размеры секции ЗС на ЦСР.

Использование условий симметрии и настройка резонаторов на целевые значения обладает рядом преимуществ: пакет прикладных программ используется для моделирования не более двух резонаторов, что резко сокращает время расчёта и снижает требования к машинным ресурсам.

Вначале проектировался волноводный резонатор, связанный с волноводом. Для этого необходимо убрать в согласованной секции все резонаторы, кроме первого для получения зависимости КСВн от частоты. Модель проектируемой ячейки и результат её моделирования представлены на рисунке 1.

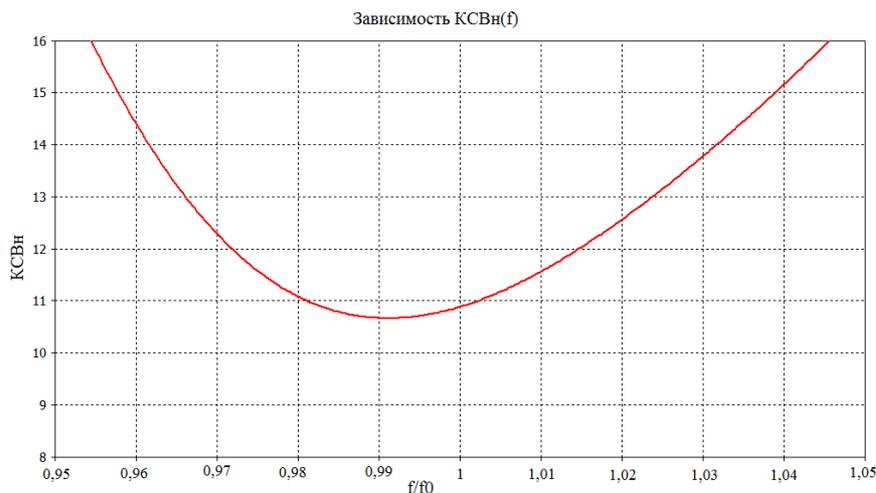
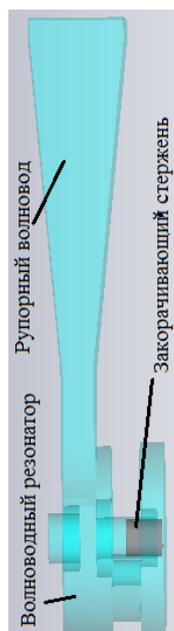


Рис. 1. Трёхмерное моделирование волноводной ячейки

Затем производилось проектирование двух связанных (волноводной и согласующей) ячеек. В результате настройки в трёхмерном пакете неоднородной ячейки секции была получена зависимость КСВн от частоты для модели, представленной на рисунке 2.

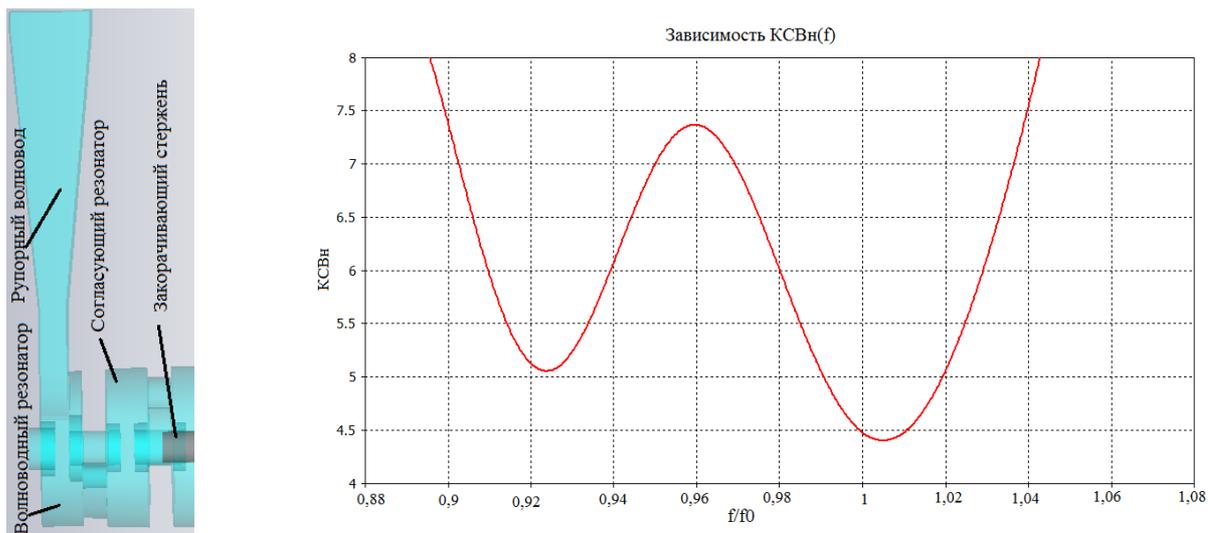


Рис. 2. Трёхмерное моделирование неоднородных ячеек секции ЗС на ЦСР

После настройки неоднородных элементов замедляющей системы на требуемые параметры, проектировалась вся секция целиком (рис. 3). При этом не нужно производить согласование регулярной секции с согласующей, а можно просто соединить их в единую конструкцию.

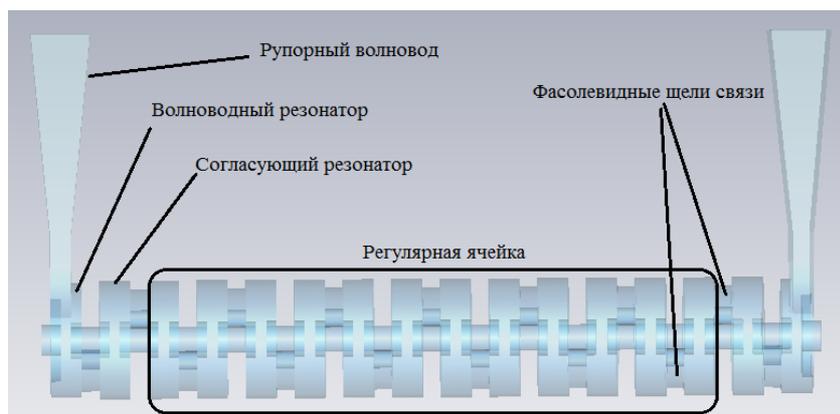


Рис. 3. Трёхмерное проектирование секции ЛБВ

Результаты разработанной методики согласования обеих секций ЗС лампы свидетельствуют о том, что в результате трёхмерного численного проектирования удалось добиться согласования во всем рабочем диапазоне усиливаемых частот (рис. 4, рис. 5).

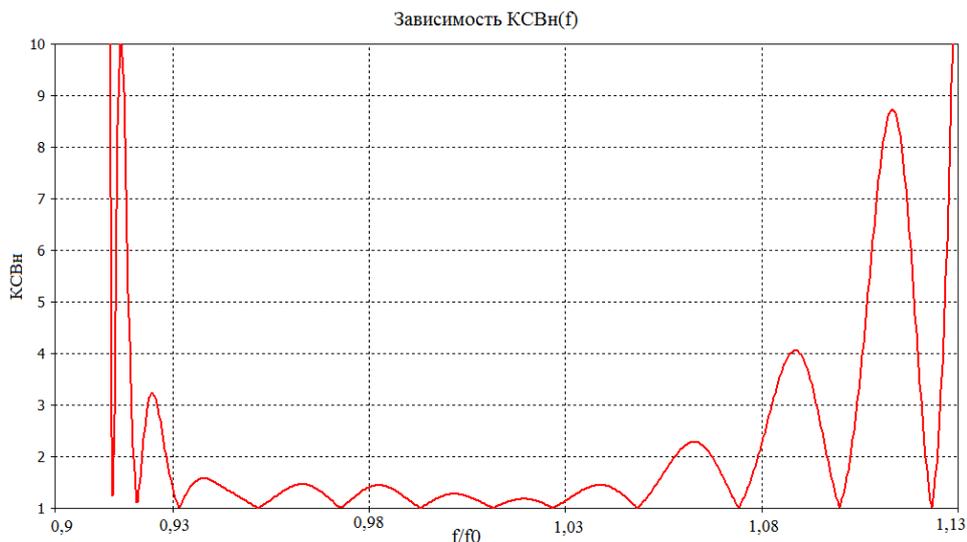


Рис. 4. Результаты согласования проектируемой секции

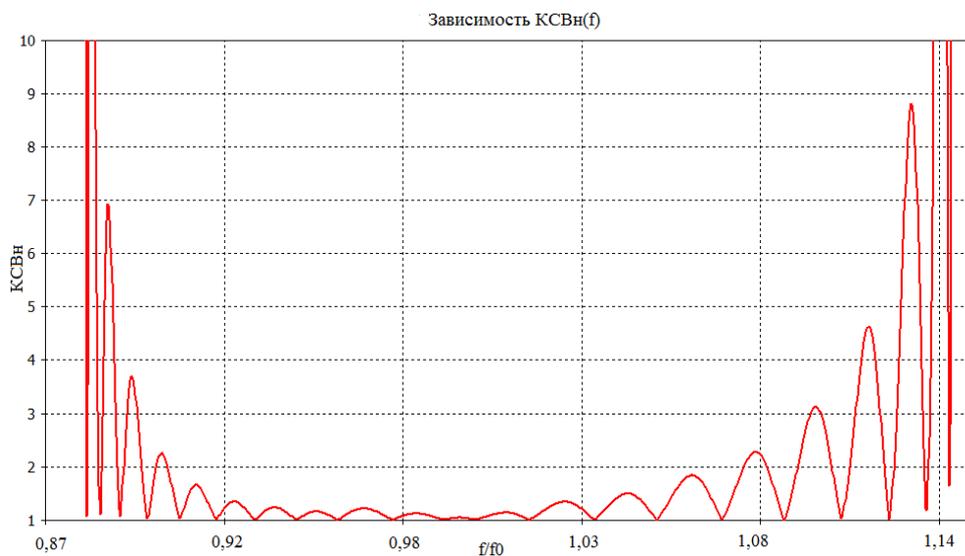


Рис. 5. Результаты согласования проектируемой выходной секции ЗС

### 3. Экспериментальное исследование секции ЗС лампы

Наиболее распространенным для измерения добротности резонаторов является частотный метод, основанный на получении резонансной кривой и последующем определении полосы пропускания резонатора. Функциональная схема установки работает следующим образом: частотно-модулированный сигнал возбуждает исследуемый резонатор и резонансный волномер. Резонатор слабо связан с детектором. После детектирования колебания подаются на усилитель, а затем на вертикально отклоняющие пластины осциллографа. На экране осциллографа наблюдается изображение резонансной кривой исследуемого резонатора и изображение частотной «метки» от волномера.

На рисунке 6 представлена панорама для измерения КСВн секций ЛБВ, а так же добротностей резонаторов и проведения радиотехнического контроля. Также здесь представлена фотография опытного образца прибора и результаты проведенного экспериментального исследования.



а)



б)



в)



г)

Рис. 6. Фотография измерительного стенда (б), опытного образца ЗС (а) и результаты эксперимента: согласование входной (в) и выходной (г) секций ЗС

Результаты, приведённые на рисунках 7 и 8, свидетельствуют о хорошем соответствии трёхмерного численного моделирования и результатов, полученных в ходе эксперимента.

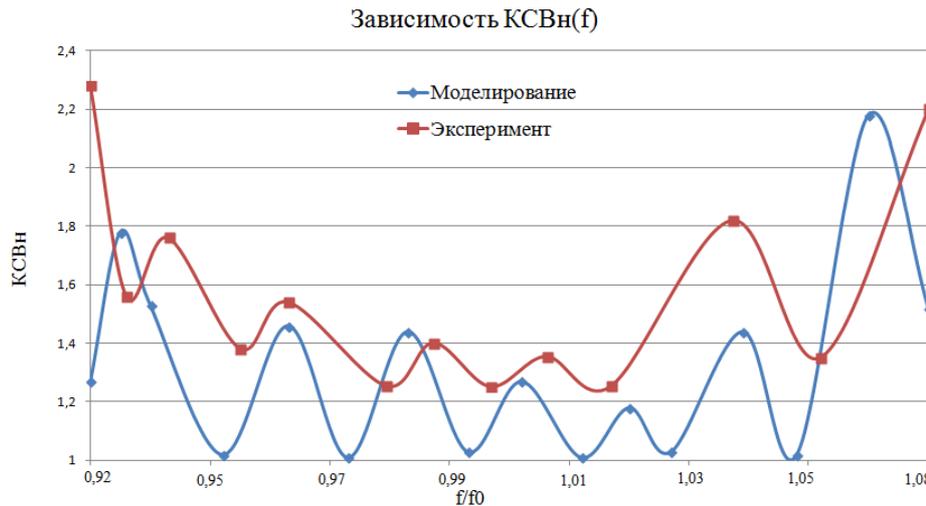


Рис. 7. Сравнение результатов трёхмерного моделирования и эксперимента входной секции ЗС

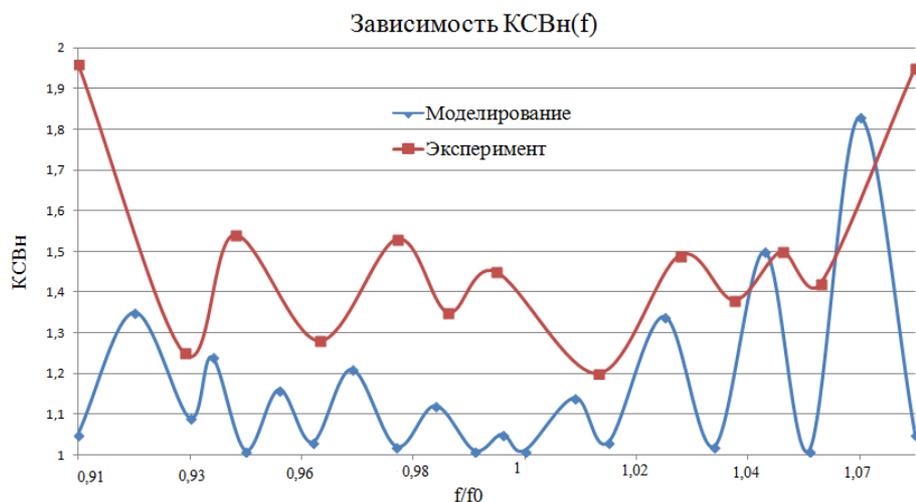


Рис. 8. Сравнение результатов трёхмерного моделирования и эксперимента выходной секции ЗС

### Выводы

Таким образом, разработана и предложена методика согласования ЗС на основе ЦСР для мощной ЛБВ X-диапазона. Благодаря найденным конструктивным методам согласования удастся осуществить подстройку уровня КСВн на начальных этапах изготовления прибора, что позволит уменьшить затраты на производство и снизить процент брака.

### Библиографический список

1. Комаров Д.А., Морев С.П., Гудович А.В. Проектирование устройств широкополосного согласования мощных ламп бегущей волны на цепочке связанных резонаторов. – М. Радиотехника и электроника, 2010г., том 55, № 6, с. 720-725.

УДК 621.385.69

## МЕТОДИКА РАСЧЁТА КПД ГЕНЕРАТОРНОГО СВЧ ДИОДА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Н.А. Титов

*Рязанский государственный радиотехнический университет**Россия, Рязань, [titov.nikolai2011@yandex.ru](mailto:titov.nikolai2011@yandex.ru)*

*Аннотация.* В данной работе даны соотношения для определения электронного КПД диода через разницу электрической энергии источника питания и кинетической энергии частиц, осаждающихся на аноде диода в динамическом режиме.

*Ключевые слова.* СВЧ диод, электронный КПД, уравнение движения.

## METHOD FOR CALCULATING THE EFFICIENCY OF A GENERATOR UHF DIODE USING THE ENERGY METHOD

N.A. Titov

*Ryazan State Radioengineering University**Russia, Ryazan, [titov.nikolai2011@yandex.ru](mailto:titov.nikolai2011@yandex.ru)*

*Annotation.* In this paper, we give the relationships for determining the electronic efficiency of a diode through the difference in the electrical energy of the power source and the kinetic energy of the particles deposited at the anode of the diode in a dynamic mode.

*Keywords.* UHF diode, electronic efficiency, equations of motion.

### Введение

Для многих целей в настоящее время требуются СВЧ-генераторы средней мощности, главными достоинствами которых являются малый вес и габариты (отсутствие фокусирующих магнитных систем и т.д.), а также простота и высокая надежность конструкции. При этом КПД не является первостепенным параметром. Области применения таких генераторов весьма разнообразны: переносные медицинские и технологические установки, бытовые микроволновые приборы с большим сроком службы, приборы для учебной лаборатории и измерительной антенной техники и т.д.[1]. Такими генераторами простой конструкции является диод [1], монокотрон [2], генератор на двухзазорном резонаторе[3,4]. Возможности монокотрона исследованы довольно подробно как в России[2], так и за рубежом. КПД классического монокотрона не превышает 18%[2].

Генератор на двухзазорном резонаторе может работать на первом синфазном виде колебаний, когда переменные напряжения на зазорах находится в фазе и на противофазном виде колебаний, когда напряжения сдвинуты на угол  $\pi$ . Электрический КПД такого генератора может составлять 50%[3].

Наименее исследованным является диодный автогенератор. Известна только одна статья, посвящённая этому прибору[1], где было показано, что КПД генератора на обращенном коаксиальном диоде может составлять 33%. Основное допущение этой работы состоит в том, что с катода поступает сплошной поток с постоянным током, т.е. катод работает в режиме насыщения. В реальном диоде ток катода зависит от фазы переменного напряжения на аноде.

Целью настоящей статьи является разработка методики расчета электронных процессов в диодном СВЧ генераторе в нелинейном режиме с учетом зависимости катодного тока от фазы переменного напряжения и электронного КПД по изменению кинетической энергии одного периода электронного потока в результате его взаимодействия с СВЧ полем диодного промежутка.

### Решение уравнений движения

В известной литературе уравнения движения решаются для случая, когда к диоду приложено только переменное напряжение [5,6]. Здесь рассматриваются режимы, когда на аноде есть как постоянное напряжение  $U_0$ , так и переменное  $U_m \sin(\omega t + \varphi)$ . Одномерное

нерелятивистское уравнение движения в этом случае будет иметь вид

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \frac{eU_a}{md} + \frac{eU_m}{md} \sin(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

где  $z$  - продольная координата;

$t$  - время;

$e$  и  $m$  - заряд и масса электрона;

$U_m$  и  $\omega$  - амплитуда и круговая частота переменного напряжения на зазоре длиной  $d$ ;

$U_a$  - постоянное напряжение.

Учитывая, что в момент выхода электрона из катода при  $\omega t = \varphi$ , координата  $z=0$  и скорость  $\vartheta = 0$ , после первого интегрирования получаем:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{eU_a t}{md} + \frac{eU_m}{\omega md} (\cos \varphi - \cos \omega t) \quad (2)$$

после второго интегрирования получаем:

$$z = \frac{eU_a t^2}{2md} + \frac{eU_m}{\omega^2 md} (\sin \varphi - \sin(\omega t + \varphi) + \omega t \cos \varphi) \quad (3)$$

Полученные выражения позволяют определить скорость электрона  $v$  и пройденный им путь  $x$  в зависимости от времени  $t$  при разных значениях фазы выхода электрона из катода  $\varphi$ .

Введем нормированные переменные  $Z = \frac{z}{d}$ ,  $V = \frac{\vartheta}{\vartheta_0}$ ,  $\theta_d = \frac{\omega d}{\vartheta_{cp}}$  - угол пролета электронов в диодном промежутке,  $\xi = \frac{U_m}{U_a}$  - нормированная амплитуда переменного напряжения,  $\vartheta_0 = \sqrt{\frac{2e}{m} U_a}$  - скорость электронов на аноде при отсутствии переменного напряжения  $U_m = 0$ ,  $\vartheta_{cp} = \sqrt{\frac{2e}{m} U_a}$  - средняя скорость движения электрона в диоде при  $U_m = 0$ ,  $U_a$  - ускоряющее напряжение. Тогда уравнения (2) и (3) примут вид

$$V = \frac{\vartheta}{\vartheta_0} = \frac{\omega t}{\theta_d} + \frac{\xi}{\theta_d} (\cos \varphi - \cos \omega t), \quad (4)$$

$$Z = \frac{z}{d} = \frac{\omega t^2}{2\theta_d^2} + \frac{1}{2} \frac{U_m}{U_0 \theta_d^2} (\sin \varphi - \sin(\omega t + \varphi) + \cos \varphi). \quad (5)$$

С помощью уравнения (5) построены графики движения электронов при  $U_a = 0$ , приведенные на рисунке 1.

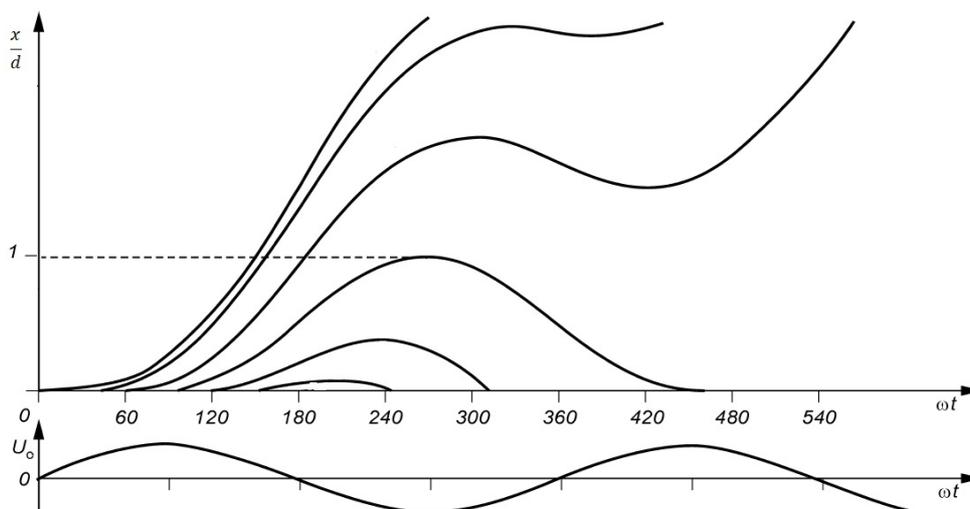


Рис. 1. Зависимость расстояния от времени для электронов.

### Расчет электронного КПД

Для расчета электронного КПД используем модель потока из крупных частиц и процесс обмена энергией между электронным потоком и переменным полем диодного промежутка.

В модели крупных частиц электронный поток в пределах целого периода  $T$  переменного напряжения разбивается на  $N$  крупных частиц. При разбиении периода на равные промежутки времени  $\Delta t = \frac{T}{N}$  заряд крупной частицы  $q_n$  в соответствии с законом “степени 3/2” будет определяться соотношением

$$q_n(\varphi_n) = 2,33 * 10^{-6} \frac{(U_a + U_m \sin \varphi_n)^{\frac{3}{2}}}{d^2} \Delta t, \quad (6)$$

где  $\varphi_n = \frac{2\pi}{N}n$  – начальная фаза переменного напряжения на катоде для  $n$ -ой частицы,  $n=1,2\dots N$ .

Электронный КПД определим по соотношению

$$\eta_e = \frac{W_0 - W_e}{W_0} = 1 - \frac{W_e}{W_0}, \quad (7)$$

где  $W_e$  – кинетическая энергия крупных частиц, осаждающихся на аноде за период  $T$ ;  
 $W_0$  – электрическая энергия, потребляемая за период  $T$  от источника питания с напряжением  $U_a$ .

При  $W_e < W_0$  источник питания часть кинетической энергии  $W_0 - W_e$  отдает переменному полю зазора и в этом случае возможна автогенерация колебаний. При  $W_e > W_0$  электронный поток дополнительно нагружает источник переменного напряжения и это явление характеризуется электронной проводимостью или электронной нагрузкой.

Кинетическая энергия частиц, поступающих на анод, определяется из соотношения

$$W_e = \sum_{n=1}^N \frac{M\vartheta_n^2}{2} = \sum_{n=1}^N \frac{mN_e\vartheta_n^2}{2},$$

где  $M = mN_e$  - масса крупной частицы;

$N_e$  - число электронов в крупной частице.

$N_e$  можно определить через заряд крупной частицы по соотношению  $N_e = \frac{q_n}{e}$ . Тогда

$$W_e = \sum_{n=1}^N \frac{mq_n\vartheta_n^2}{2e}. \quad (8)$$

Энергия источника питания определяется известным соотношением

$$W_0 = P_0T = U_0I_0T, \quad (9)$$

где  $I_0 = \frac{\sum_{n=1}^N q_n}{T}$  – постоянная составляющая тока источника питания в динамическом режиме. Подставив  $I_0$  в (9) получим

$$W_0 = \sum_{n=1}^N q_n U_0.$$

С учетом соотношений (8), (9) уравнение (7) для  $\eta_e$  примет вид

$$\eta_e = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N \frac{mq_n\vartheta_n^2}{2e}}{\sum_{n=1}^N q_n U_a} = 1 - \frac{\sum q_n V_n^2}{\sum q_n},$$

где

$$V_n^2 = \frac{\vartheta_n^2}{\vartheta_0^2} = \frac{\vartheta_n^2}{2 \frac{e}{m} U_a}.$$

Окончательно с учетом (6)

$$\eta_e = 1 - \frac{\sum (1 + \xi \sin \varphi_n)^{\frac{3}{2}} V_n^2}{\sum (1 + \xi \sin \varphi_n)^{\frac{3}{2}}}.$$

Для определения нормированной скорости частиц  $V_n$  в плоскости анода используем уравнение (4) для которого фаза прилета электрона  $\omega t$  в плоскость  $z = d$  определяется из уравнения (5). Уравнение (5) при заданном  $z$  является трансцендентным относительно фазы  $\omega t$ , поэтому для его решения используется алгоритм “шаг за шагом” который заключается в следующем. Последовательно с интервалом  $\Delta\omega t$  наращивается текущая фаза  $\omega t = \Delta\omega t, k = 1, 2, \dots$ , до тех пор пока  $z \geq d$ . Фаза пересечения частицей плоскости анода  $\omega t_a$  определяется линейной интерполяцией по двум последним шагам (рис. 2), так что

$$\frac{z_k - z_{k-1}}{1 - z_k} = \frac{\omega t_k - \omega t_{k-1}}{\omega t_a - \omega t_{k-1}},$$

$$\omega t_a - \omega t_{k-1} = \frac{\omega t_k - \omega t_{k-1}}{z_k - z_{k-1}} (1 - z_k),$$

$$\omega t_a = \omega t_{k-1} + \frac{(1 - z_k)(\omega t_k - \omega t_{k-1})}{z_k - z_{k-1}}.$$

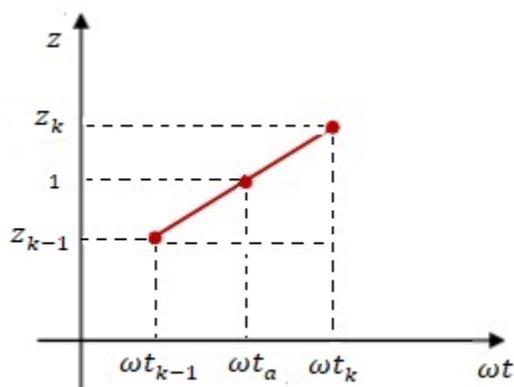


Рис. 2. Зависимость координаты от фазы прилета электрона

### Заключение

Получены нормированные уравнения для фазовых траекторий и скорости крупных частиц в случае, когда к аноду СВЧ диода приложено постоянное и переменное напряжение произвольной амплитуды. Даны соотношения для определения электронного КПД диода через разницу электрической энергии источника питания и кинетической энергии частиц, осаждающихся на аноде диода в динамическом режиме.

### Библиографический список

1. Кураев А.А., Сеницын А.К. Коаксиальный диодный генератор –диотрон // Радиотехника и Электроника. - 1997. - Т.42. - № 2. - С.214.
2. Федяев В.К., Пашков А.А. Электронная проводимость и коэффициент полезного действия плоского сверхвысокочастотного зазора в нелинейном режиме // Радиотехника и Электроника. - 2005. - Т.50. - № 3. - С. 361-365.
3. Федяев В.К., Горлин О.А. Коэффициент полезного действия питрона // Радиотехника и Электроника. - 2010. - Т.55. - № 12. - С. 1494-1500.
4. Федяев В.К., Акимова Т.С., Горлин О.А. Условия самовозбуждения питрона // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. - 2010. - Выпуск 33. - № 3. - С. 64-68.
5. Сушков А.Д. Вакуумная электроника: Физико-технические основы: Учебное пособие. - Спб.: Лань, 2004. - С. 317.
6. Коваленко В.Ф. Введение в электронику сверхвысоких частот. – М.: Советское радио, 1955. - С. 66.

УДК 62-933.2, 62-932.4, 533.9

## АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ МЕДЛЕННЫХ ФЛУКТУАЦИЙ В ЛАЗЕРНОМ ГИРОСКОПЕ

Н. Х. Дао, А. Е. Серебряков, М. В. Чиркин, М. В. Мишин, В. В. Климаков

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
daohoainam.ryazan@gmail.com*

*Аннотация.* Идентифицирована причина нестабильности дрейфа выходного сигнала для лазерного гироскопа на основе кольцевого гелий-неонового лазера с вибрационной частотной подставкой. Зарегистрированные данные включают отсчеты вертикальной составляющей угловой скорости вращения Земли и напряжений поддержания двухплечевого газового разряда в кольцевом лазере. Измерения проведены в условиях длительной работы после запуска гироскопа, стабилизации токов разряда и температуры окружающей среды.

*Ключевые слова.* Лазерный гироскоп, кольцевой гелий-неонового лазер, нестабильность дрейфа.

## ANALYSIS OF THE MECHANISMS OF SLOW FLUCTUATIONS IN THE LASER GYROSCOPE

N. Kh. Dao, A.E. Serebryakov, M.V. Chirkin, M.V. Mishin, V.V. Klimakov

*Ryazan State Radio Engineering University,  
daohoainam.ryazan@gmail.com*

*Abstract.* The cause of the instability of the drift of the output signal for a laser gyroscope based on a ring helium-neon laser with a vibrating frequency support is identified. The recorded data include counts of the vertical component of the angular velocity of the Earth's rotation and the stresses of maintaining a two-arm gas discharge in a ring laser. The measurements were carried out under conditions of prolonged operation after the gyro startup, stabilization of the discharge currents and the ambient temperature.

*Keywords.* Laser gyro, helium-neon ring laser, bias instability.

### Введение

Гироскопы на основе кольцевых гелий-неоновых лазеров являются прецизионными датчиками угловых скоростей, которые широко используются в системах инерциальной навигации [1]. Нестабильность дрейфа выходного сигнала лазерного гироскопа («сдвига нуля») является одной из важных составляющих случайной погрешности, которая проявляется в медленных хаотических изменениях отсчетов углового положения [2] и ограничивает точность регистрации положения, а также пространственной ориентации объекта. Через час автономной работы навигационной системы нестабильность дрейфа, равная  $0,005^\circ/\text{час}$ , приводит к неопределенности пространственного положения в один километр [1]. Оценка нестабильности дрейфа с помощью вариации Аллана [3] требует длительных измерений и тщательной проверки достоверности полученных данных. Кроме того, идентификация составляющих случайной погрешности с помощью такого способа неоднозначна, что может привести к грубым ошибкам при построении соответствующей вероятностной модели [4].

Известным механизмом невзаимности встречных волн в кольцевом резонаторе, приводящим к «сдвигу нуля» лазерного гироскопа является направленное движение возбужденных атомов неона в активной среде под действием газового разряда (эффект Лэнгмюра) [5]: передача импульса направленного движения электронов к атомам газа в пристеночных областях создает перепад давлений между анодом и катодом и обратный газовый поток в центре разрядного канала. Однако в работе [6] приведены результаты экспериментальных исследований, не согласующиеся с существующими представлениями о невзаимности встречных волн вследствие асимметрии плеч газового разряда постоянного тока, используемого для создания активной среды в кольцевом гелий-неоновом лазере.

Цель настоящей работы заключается в идентификации причины нестабильности «сдвига нуля» в лазерном гироскопе на основе кольцевого гелий-неонового лазера.

### Нестабильность дрейфа лазерного гироскопа

В настоящей работе исследован гироскоп на основе кольцевого гелий-неонового лазера, описанный в работе [1]. Экспериментальная установка для исследования нестабильности дрейфа гироскопа показана на рисунке 1.

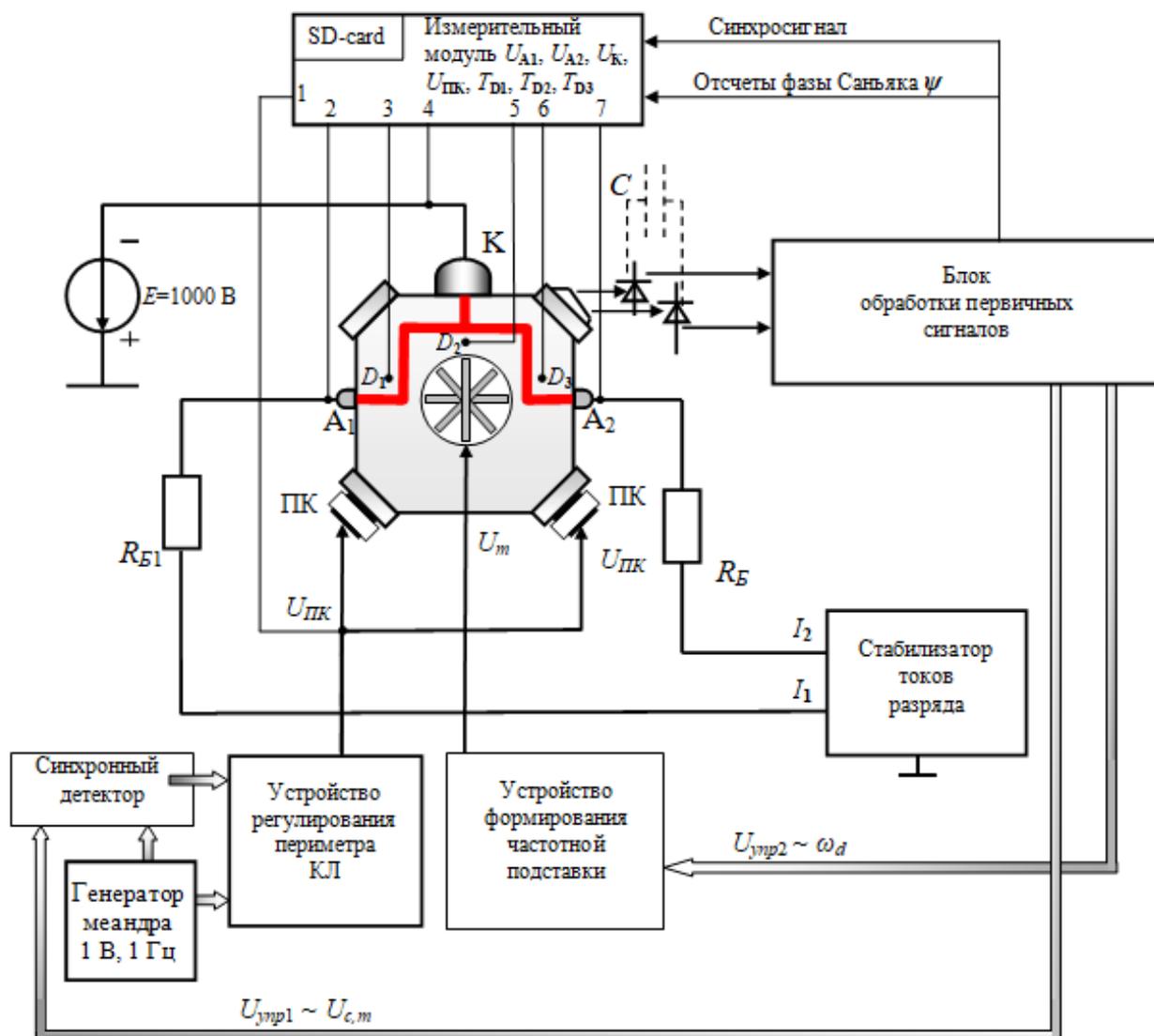


Рис. 1. Схема установки: ПК – пьезокорректор;  
 $D_1, D_2, D_3$  – температурные датчики, расположенные на поверхности  
 блока кольцевого лазера;  
 $R_B$  и  $R_{B1}$  – балластное сопротивление в двух плечах

Лазер изготовлен из ситаллового моноблока, внутри которого высверлены каналы диаметром 2,7 мм, длиной 52 мм, заполненные смесью гелия и неона в соотношении 16:1 до давления 750 Па. Активная среда лазера возбуждается симметричным двухплечевым газовым разрядом постоянного тока, для поддержания которого аноды и холодный катод соединены с источником высокого напряжения. Разрядные промежутки ограничены медными анодами  $A_{1,2}$  и холодным катодом К из алюминия, на поверхности которого сформировано эмиссионное окисное покрытие.

Для измерения значений потенциалов на катоде  $U_K$  и анодах  $U_{A1}, U_{A2}$  в экспериментальной установке предусмотрен измерительный модуль, основанный на микроконтроллере

STM32F103C8T6. Значения температур  $T_{D1}$ ,  $T_{D2}$ ,  $T_{D3}$  в прианодной и прикатодной областях измеряются с помощью цифровых датчиков температуры DS18B20 и передаются на измерительный модуль по средствам one-wire интерфейса. Регистрируемые значения потенциалов и значений температур преобразуются в цифровой вид и записываются на SD-карту в текстовом формате ASCII. Объем памяти используемой SD-карты составляет 8 Гб и позволяет производить непрерывные измерения продолжительностью не менее 16 часов.

Блок обработки первичных сигналов (ОПС) лазерного гироскопа, регистрируемых с фотоприемников, включает аналого-цифровой преобразователь (АЦП), программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС) и постпроцессор. Результатом работы ОПС является три цифровых сигнала: последовательность отсчетов фазы Саньяка ( $\Psi$ ), амплитуда угловой скорости колебаний КЛ ( $\omega_d$ ) и амплитуда квадратурных сигналов с фотоприемника ( $U_{c,m}$ ). Методика выделения информации о фазе Саньяка описана в работе [1].

Экспериментальная установка была расположена на фундаменте, который подавляет воздействие внешнего вибрационного фона. Температура окружающей среды поддерживалась неизменной. Лазерный гироскоп функционировал в условиях работы систем автоматического регулирования периметра кольцевого резонатора, ошумления подставки и стабилизации тока в каждом плече разряда с точностью не хуже 0,1 мкА. Полученные результаты приведены на рисунке 2 в форме зависимостей от времени испытаний  $t$  напряжений  $U_{A1}$ ,  $U_{A2}$ , температур и отсчетов угловой скорости, данные усреднены на интервалах времени, равных 100 с.

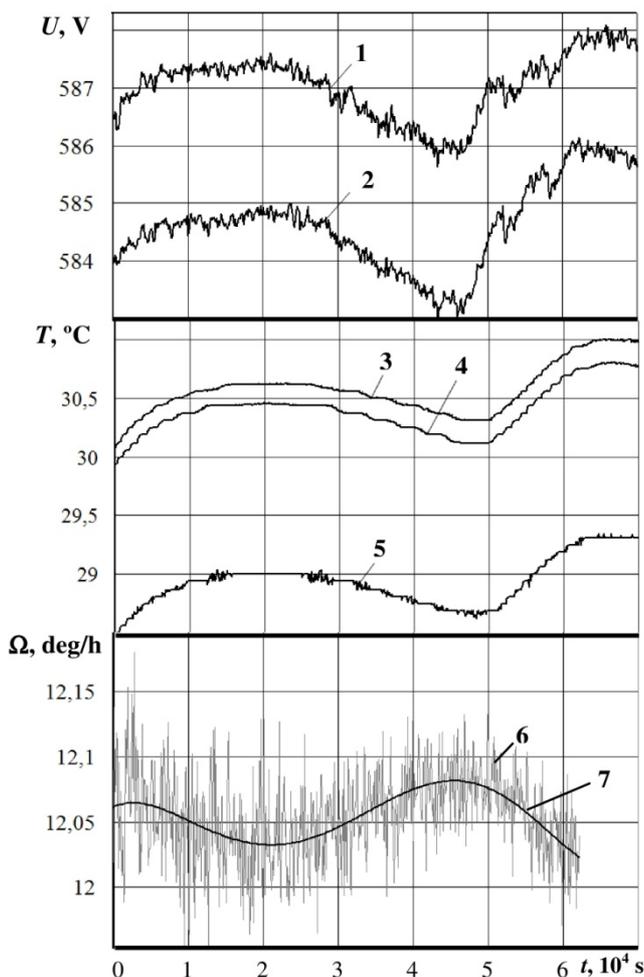


Рис. 2. Результаты долговременных испытаний лазерного гироскопа в режиме регистрации вертикальной составляющей угловой скорости вращения Земли: 1 –  $U_{A1}$ , 2 –  $U_{A2}$ , 3 – 5 показания датчиков D1 – D3, соответственно, 6 – отсчеты угловой скорости, усредненные на интервалах, равных 100 с, 7 – линия тренда отсчетов угловой скорости

Кривые 1, 2 отражают самопроизвольные колебания напряжений между анодами 3 и катодом 2, которые появляются, несмотря на стабилизацию токов в плечах разряда. Медленный спад обоих напряжений сменяется ростом; изменения температур моноблока (кривые 3 – 5) отражают колебания мощностей, рассеиваемых в плечах разряда. Изменения напряжений  $U_{A1}$ ,  $U_{A2}$  коррелируют с медленными колебаниями линии тренда для отсчетов угловой скорости (кривая 7). Количественное сопоставление кривых 1 и 2 друг с другом исключает возможность интерпретации зарегистрированных зависимостей как результата изменений с течением времени падения напряжения на прикатодной области, общей для обоих разрядных промежутков (см. рис. 1). В то же время, рост напряжений  $U_{A1}$ ,  $U_{A2}$  в диапазоне времени 45 000 – 60 000 с соответствует по инерционности очищению газовой смеси внутри разрядных каналов в результате катафореза.

Механизм образования самопроизвольных колебаний напряжений поддержания двухплечевого разряда, которые отражают кривые 1, 2, сводится к следующему. Спад напряжений вызван накоплением внутри газовой смеси атомов посторонних примесей, выделяющихся из стенок разрядного канала. Как следствие, увеличивается скорость Пеннинг-ионизации, что происходит в результате столкновений атомов примесей с метастабильными атомами гелия и неона. Поддержание баланса между генерацией заряженных частиц в плазме и их уходом на стенки требует в такой ситуации меньшей напряженности продольного электрического поля и меньшего поперечного скачка потенциала. Уменьшение кинетической энергии ионов, бомбардирующих стенки, сопровождается снижением потока атомов посторонних примесей из объема стеклокерамики в газовую фазу. Очищение газа сопровождается ростом напряженности продольного электрического поля и пристеночного скачка потенциала. Таким образом, создается предпосылка для повторения выбросов примесей из стеклокерамики в газ.

### Библиографический список

1. Кузнецов А.Г., Молчанов А.В., Чиркин М.В., Измайлов Е.А. Прецизионный лазерный гироскоп для автономной инерциальной навигации // Квантовая электроника. – 2015. – Т. 45. № 1. – С. 78-88.
2. Маюров Н.А., Мишин В.Ю., Плешаков Н.С., Серебряков А.Е. Случайная погрешность лазерного гироскопа с прецизионной регистрацией квадратурных сигналов // Материалы XXX конференции памяти Н.Н. Острякова. – СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. – С. 36-43.
3. Аллан Д.У. Вариация Аллана: история создания, преимущества и недостатки, основные области применения // Гироскопия и навигация. – 2015. – № 4. – С. 3-28.
4. Степанов О.А., Моторин А.В. Проблемно-ориентированный подход к решению задачи идентификации моделей погрешностей навигационных датчиков и оцениваемых сигналов // Материалы пленарный заседаний 9-й Российской мультikonференции по проблемам управления. – СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. – С. 49-59.
5. Кравцов Н.В., Кравцов Н.Н. Невзаимные эффекты в кольцевых лазерах // Квантовая электроника. – 1999. – Т. 27. № 2. – С. 98-120.
6. Aronovitz F. Fundamentals of the ring laser gyro // Optical Gyros and their Application. – RTO-AG-339. – 1999. – P.3-1-3-45.

## СЕКЦИЯ «ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА»

УДК 544.653.1; ГРНТИ 31.15.33

### ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ГРАДИЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СПЛАВА NI-W

**М.А. Серпова, Г.П. Гололобов, Д.В. Суворов, Д.В. Будников**

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, kmaria023@yandex.ru*

*Аннотация.* В данной работе представлены результаты исследования электрохимического синтеза покрытий на основе сплава Ni-W, имеющих градиентную структуру. Определены условия синтеза, обеспечивающие возможность управления содержанием W в сплаве Ni-W в широких пределах (от 3 ат.% до 9 ат.%). Исследовано влияние плотности тока и уровня pH на характеристики данного покрытия. Исследованы морфологические особенности градиентного покрытия Ni-W.

*Ключевые слова.* Электролитический сплав никель-молибден, градиентная структура, электролиз

### ELECTROCHEMICAL SYNTHESIS OF GRADIENTAL COATINGS BASED ALLOY NI-W

**M.A. Serpova, G.P. Gololobov, D.V. Suvorov, D.V. Budnikov**

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Ryazan, Russia, kmaria023@yandex.ru*

*Abstract.* This paper presents the results of a study of electrochemical synthesis coatings on alloy based Ni-W, having a gradient structure. The synthesis conditions are determined, which make it possible to control the content of W in the Ni-W alloy in a wide range (from 3 at% to 9 at%). The influence of the current density and the pH level on the characteristics of this coating was investigated. Morphological features of the Ni-W gradient coating were investigated.

*Keywords.* Electrolytic nickel-molybdenum alloy, alternating current, electrolysis

#### Введение

Бинарный сплав Ni-W обладает высокой износостойкостью, твердостью, коррозионной стойкостью [1-3]. Отдельно необходимо выделить высокую стойкость сплава Ni-W к электрической эрозии. Микротвердость гальванических покрытий на основе сплава Ni-W зависит от содержания вольфрама и составляет 5-7 ГПа, и после термической обработки повышается до 9-10 ГПа [1].

Покрытия бинарным сплавом Ni-W являются перспективной заменой твердых хромовых покрытий. Преимуществом покрытий Ni-W по сравнению с хромовыми покрытиями является сохранение твердости при высоких температурах и большая коррозионная стойкость. Одной из «врожденных» проблем покрытий на основе сплава Ni-W является возникновение сетки трещин, существенно ухудшающих коррозионную стойкость покрытия.

Другой важной задачей является получение гладких покрытий с малым уровнем шероховатости. Одним из наиболее эффективных методов значительного снижения растрескивания покрытия является формирование градиентной структуры покрытия, в которой содержание вольфрама увеличивается от подложки к поверхности покрытия. Так в работе [7] исследован процесс электрохимического осаждения и характеристики покрытия Ni-W имеющего градиентную структуру. Использовался импульсный режим электроосаждения в цитратном электролите. Содержание вольфрама в покрытии [7] увеличивается от 1.5–1.8 % до 4.5–5.0 % (по массе) в направлении от подложки к поверхности, покрытие имеет удовлетворительные характеристики сопротивления абразивному износу и коррозионной стойкости,

что обусловлено сравнительно малым содержанием вольфрама в сплаве, но имеет редкую сетку трещин.

Актуальной задачей является поиск методов формирования градиентной структуры покрытия с высоким содержанием вольфрама и обеспечивающих малое число дефектов покрытия.

### Методика и условия эксперимента

В данной работе для электрохимического осаждения использовался пирофосфатный электролит, разработанный и исследованный в [4-6] содержащий 0,2 М NiSO<sub>4</sub>, 0,2 М Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>, 0,6 М K<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, 0,15 М (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, температура электролита – 40 °С, уровень pH варьировался от 8,5 до 9,5.

В качестве подложек использовались пластины бескислородной меди последовательно обработанные ацетоном в ультразвуковой ванне и 1 М растворе HCl. Для осаждения покрытий с изменяющимся содержанием вольфрама по толщине покрытия использовался гальванодинамический режим, при котором плотность тока линейно изменялась от 10 до 1 А/дм<sup>2</sup> и от 5 до 1 А/дм<sup>2</sup>. Все образцы покрытий имели металлический блеск, хорошую адгезию к подложке. Полученные образцы покрытий исследовались с использованием растрового электронного аналитического микроскопа JSM-6610LV (JEOL, Japan) с энергодисперсионным микроанализатором INCA X-MAX (Oxford Instruments).

Распределение содержания вольфрама по глубине покрытия определялось многоточечным сканированием поперечного сечения покрытия энергодисперсионным микроанализатором по схеме представленной на рисунке 1. Исследование внутренней структуры сплава проводилось методом рентгеновской дифрактометрии с использованием рентгеновского дифрактометра D8 Discover (Bruker, Германия). Использовалось CuKα излучение, параболическое зеркало Гёбеля и щель 0,6 мм на первичном пучке. Применялась геометрия скользящего падения под углом 2 градуса к поверхности образца. Регистрация дифрактограммы проводилась сканированием детектора по углу 2θ с щелью Соллера (апертура 0,2 градуса).

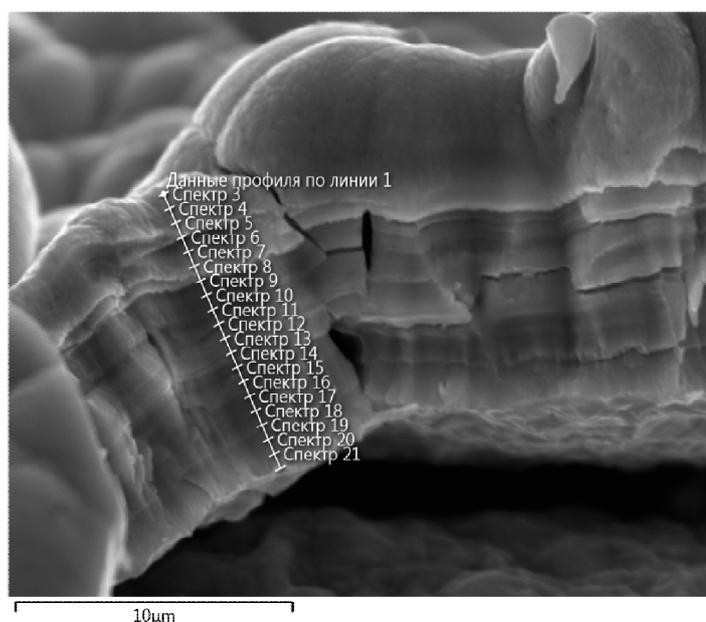
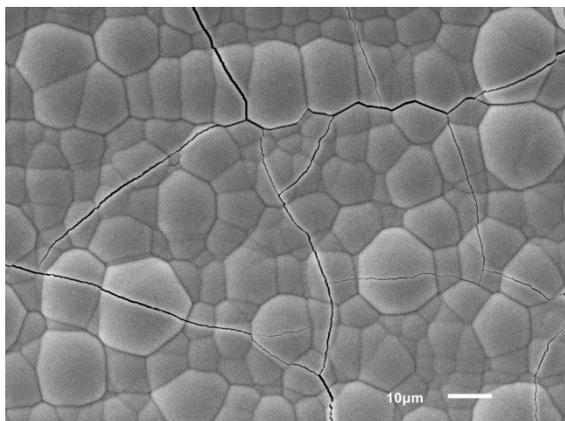


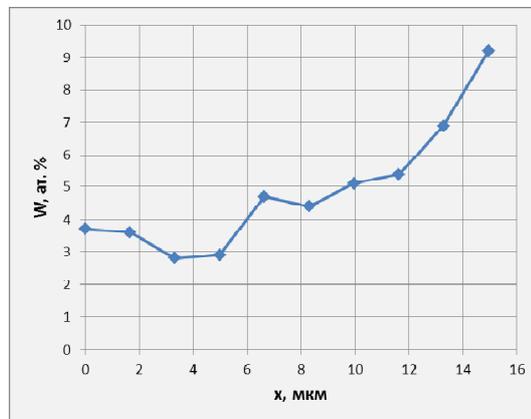
Рис. 1. Схема многоточечного сканирования поперечного сечения градиентного покрытия на основе сплава Ni-W (градиент содержания W: 5 - 31,8%, толщина 10 мкм)

### Результаты эксперимента

На рисунке 2 представлены изображения поверхности покрытия полученного при линейном изменении плотности тока от 10 до 1 А/см<sup>2</sup> при уровне pH - 9,5 и распределение содержания вольфрама по глубине покрытия.



а)



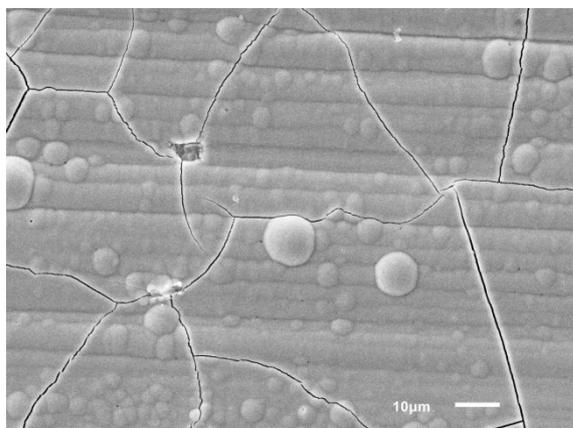
б)

Рис.2. Характеристики градиентного покрытия Ni-W, полученного при линейном изменении плотности тока от 10 до 1 А/см<sup>2</sup> (уровень pH - 9,5):

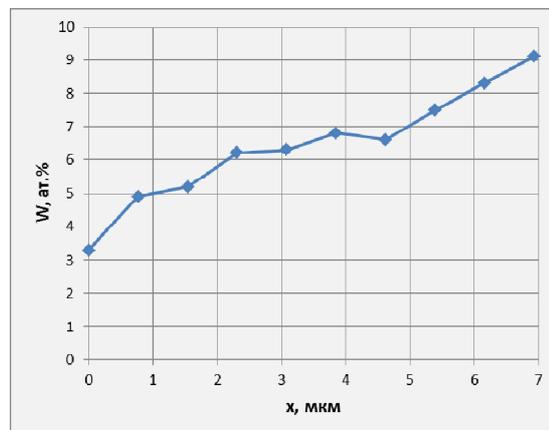
- а) - морфология поверхности покрытия;  
 б) - распределение содержания вольфрама по глубине покрытия Ni-W

Полученное покрытие имеет ярко выраженную глобулярную структуру (размер глобул 5-30 мкм) и сравнительно редкую сетку трещин (около 24 пересечений на 1 мм). Сетка трещин формируется стохастическим образом и только в некоторых фрагментах совпадает с границами глобул. Анализ полученного значения градиента элементного состава показывает, что вблизи подложки наблюдаются незначительные колебания концентрации вольфрама в пределах 2,8-3,7 ат. % и далее наблюдается практически линейный рост концентрации вольфрама до 9,2 ат. % на поверхности покрытия. Область колебаний и низких значений концентрации вольфрама соответствует высоким значениям плотности тока 10 А/дм<sup>2</sup> – 5 А/дм<sup>2</sup>.

Для достижения линейного градиента концентрации вольфрама в покрытии выполнено осаждение при тех же условиях, но с изменением плотности тока от 5 А/дм<sup>2</sup> до 1 А/дм<sup>2</sup> (рис. 3).



а)



б)

Рис. 3. Характеристики градиентного покрытия Ni-W, полученного при линейном изменении плотности тока от 5 до 1 А/см<sup>2</sup> (уровень pH - 9,5):

- а) - морфология поверхности покрытия;  
 б) - распределение содержания вольфрама по глубине покрытия Ni-W

Полученное покрытие достаточно гладкое, имеет некоторое число отдельно расположенных крупных глобул, размер которых не превышает 10 мкм. Сетка трещин стохастическая, достаточно редкая аналогичная предыдущему случаю. Получен достаточно линейный градиент содержания вольфрама в покрытии увеличивающийся от 3,3 ат.% на поверхности подложки до 9,2 ат.% на поверхности покрытия.

Покрытия, полученные при рН электролита равном 8,5 достаточно гладкие, имеют небольшое число отдельных глобул, однако распределение концентрации вольфрама по глубине покрытия имеет сложный характер и изменяется в узких пределах от 15,5 ат.% до 18,4 ат.%.

### Выводы

Анализ и сопоставление полученных экспериментальных данных показывает, что пирофосфорный электролит указанного состава при уровне рН - 9,5 обеспечивает возможность управления элементным составом покрытия в пределах 3,3 ат.% - 9,2 ат.% путем изменения катодной плотности тока в пределах от 1 до 5 А/дм<sup>2</sup>. При этом обеспечивается сравнительно редкая сетка трещин и малая шероховатость покрытия. Большее значение плотности тока приводит к образованию ярко выраженной глобулярной структуры. В более кислотных электролитах с рН равном 8,5 образуются покрытия с достаточно высоким содержанием вольфрама, но возможность управления структурой покрытия путем изменения катодной плотности тока не обеспечивается.

Таким образом, продемонстрирована возможность электрохимического синтеза градиентных покрытий на основе сплава Ni-W с сравнительно высоким содержанием вольфрама в пределах 3,3 ат.% - 9,2 ат.% в направлении от подложки к поверхности покрытия. Установлено, что для пирофосфатного электролита при рН равном 9,5 обеспечивается управление составом покрытия путем изменения катодной плотности тока. При этом в диапазоне от 1 до 5 А/дм<sup>2</sup> наблюдается практически линейная зависимость содержания вольфрама в покрытии от катодной плотности тока и формируются достаточно гладкие покрытия.

### Библиографический список

1. Tohru Yamasaki. High-strength nanocrystalline Ni-W alloys produced by electrodeposition. Mater. Phys. Mesh., 2000, V.1, p. 127-132.
2. N. Eliaz, T.M. Sridhar, E. Gileadi. Synthesis and characterization of nickel tungsten alloys by electrodeposition. Electrochimica Acta, Volume 50, Issue 14, 5 May 2005, Pages 2893–2904.
3. K.R. Sriraman, S. Ganesh Sundara Raman, S.K. Seshadri. Corrosion behaviour of electrodeposited nanocrystalline Ni-W and Ni-Fe-W alloys. Materials Science and Engineering: A, Volumes 460–461, 2007, p. 39–45.
4. Красиков А. В. Исследование технологических параметров осаждения сплава Ni-W из пирофосфатно-аммонийного электролита. Вопросы материаловедения, 2012, № 1(69), с. 68–73.
5. Фурмон М.С., Красиков А.В., Дроздова Н.Ф. Состав, микротвердость и структура покрытий из сплава системы никель-вольфрам, полученных методом электрохимического осаждения. Вопросы материаловедения, 2012, № 1(69), с. 74–79.
6. Красиков А.В., Красиков В.Л. Механизм электроосаждения сплава никель-вольфрам из пирофосфатного электролита. Известия СПбГТИ (ТУ), 2016, №36 (62), с. 12 – 23.
7. M. H. Allahyarzadeh, M. Aliofkhaeaei, A. R. Sabour Rouhaghdam, V. Torabinejad. Functionally graded nickel-tungsten coating: electrodeposition, corrosion and wear behaviour. Canadian Metallurgical Quarterly 55 (3), 303-311.

УДК 538.915; ГРНТИ 29.19.31

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХКАСКАДНОГО СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВЕ A-Si:H И A-SiC:H

А.В. Пиругин, В.Г. Мишустин

*Рязанский государственный радиотехнический университет  
Россия, Рязань, tailer013013@gmail.com*

*Аннотация.* В данной работе представлена модель для расчета вольт-амперных характеристик солнечных элементов на основе неупорядоченных полупроводников, учитывающая особенности материалов. Проведено моделирование вольт-амперной характеристики двухкаскадного солнечного элемента с *p-i-n* структурой на основе *a-Si:H* и *a-SiC:H*.

*Ключевые слова.* Вольт-амперная характеристика, физическая модель, компьютерное моделирование, солнечные элементы, аморфный водородизированный кремний.

## SIMULATION OF CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF DOUBLE-JUNCTION SOLAR CELLS BASED ON A-Si:H AND A-SiC:H

A.V. Piryugin, V.G. Mishustin

*Ryazan State Radio Engineering University  
Ryazan, Russia, tailer013013@gmail.com*

*Abstract.* In this paper we suggest a model to calculate current-voltage characteristics of solar cells based on non-crystalline semiconductors, taking into account the material features. We simulated current-voltage characteristics of double-junction solar cells with *p-i-n* structures based on *a-Si:H* and *a-SiC:H*.

*Keywords.* Current-voltage characteristics, physical model, simulation, solar cells, amorphous hydrogenated silicon.

### Введение

В настоящее время солнечная энергетика получила широкое распространение в мире и продолжает оставаться перспективным направлением для получения электроэнергии из возобновляемых источников [1]. Основным фактором, сдерживающим ее развитие, остается относительно невысокие значения КПД серийных солнечных элементов (СЭ) и их соотношения цена/мощность по сравнению с традиционными источниками энергии [2]. Таким образом, исследования, направленные на повышение эффективности СЭ, являются весьма актуальными.

Основным методом оценки качества и эксплуатационных характеристик солнечных элементов является измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ). Компьютерное моделирование ВАХ является более быстрым, гибким и дешевым способом отработки конструкции и технологии производства СЭ по сравнению с реальным экспериментом, хотя и не лишены некоторых ограничений [3]. Таким образом, целью данной работы является моделирование ВАХ характеристик двухкаскадных солнечных элементов на основе системы *a-Si:H/a-SiC:H*, необходимое для проведения работ по улучшению КПД серийно производимых солнечных элементов.

### Разработанная модель

Целью данной работы является моделирование двухкаскадного солнечного элемента с *p-i-n* структурой на основе *a-Si:H* и *a-SiC:H* (рисунок 1). Данные солнечные элементы производятся серийно. Результаты моделирования их характеристик с помощью известных программ [4-6] имеют существенные отклонения от экспериментальных результатов. Поэтому была разработана компьютерная программа в среде MatLab, которая ориентирована именно на такой тип солнечных элементов.

Плотности фототока и темного тока рассчитываются исходя из плотности светового потока, а также значений темного тока, генерируемого в  $n$ - и  $p$ -базах и  $i$ -области  $p$ - $i$ - $n$  структуры.

Для расчета фототока используются выражения, учитывающие толщину СЭ, спектр поглощения и коэффициент отражения [7].

Плотность дырочного фототока, генерируемая фотонами с длиной волны  $\lambda$ , на краю обедненной области  $n$ -базы [8]:

$$J_p = -eD_p \left( \frac{dp_n}{dx} \right)_{x_j}, \quad (1)$$

$$J_p = \left[ \frac{eF(1-R)\alpha L_p}{(\alpha^2 L_p^2 - 1)} \right] \times \left[ \frac{\left( \frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha L_p \right) e^{-\alpha x_j} \left[ \left( \frac{S_p L_p}{D_p} \right) \cosh \left( \frac{x_j}{L_p} \right) + \sinh \left( \frac{x_j}{L_p} \right) \right]}{\left( \frac{S_p L_p}{D_p} \right) \sinh \left( \frac{x_j}{L_p} \right) + \cosh \left( \frac{x_j}{L_p} \right)} - \alpha L_p e^{-\alpha x} \right], \quad (2)$$

где  $e$  – заряд электрона;

$J_p$  плотность дырочного тока;

$L_p = (D_p \tau_p)^{1/2}$  – диффузионная длина дырок;

$F(\lambda)$  – плотность потока падающих фотонов в единичном спектральном интервале;

$\alpha(\lambda)$  – коэффициент поглощения;

$R(\lambda)$  – доля фотонов, отражающихся от поверхности;

$S_p$  – скорость поверхностной рекомбинации дырок;

$D_p = \frac{kT}{e} \mu_p$  – коэффициент диффузии дырок;

$x_j$  – толщина квазинейтральной области  $n$ -базы,

$x$  – толщина активной области, в которой происходит оптическое поглощение.

Плотность электронного фототока, генерируемого фотонами с длиной волны  $\lambda$ , на краю обедненной области  $p$ -базы ( $x = x_j + W$ ):

$$J_n = -eD_n \left( \frac{dn_p}{dx} \right)_{x_j+W}, \quad (3)$$

$$J_n = \left[ \frac{eF(1-R)\alpha L_n}{(\alpha^2 L_n^2 - 1)} \right] e^{-\alpha(x_j+W)} \times \left[ \alpha L_n - \frac{\left( \frac{S_n L_n}{D_n} \right) \left[ \cosh \left( \frac{H_1}{L_n} \right) - e^{-\alpha H_1} \right] + \sinh \left( \frac{H_1}{L_n} \right) + \alpha L_n e^{-\alpha H_1}}{\left( \frac{S_n L_n}{D_n} \right) \sinh \left( \frac{H_1}{L_n} \right) + \cosh \left( \frac{H_1}{L_n} \right)} \right], \quad (4)$$

где  $J_n$  – плотность электронного тока;

$L_n = (D_n \tau_n)^{1/2}$  – диффузионная длина электронов;  
 $S_n$  — скорость поверхностной рекомбинации электронов;  
 $D_n = \frac{kT}{e} \mu_n$  – коэффициент диффузии электронов;  
 $W$  – ширина обедненной области;  
 $H_1$  – толщина квазинейтральной области р-базы.  
 Дрейфовая плотность фототока в обедненной области:

$$J_{dp} = eF(1-R)e^{-\alpha x_j} (1 - e^{-\alpha W}) \quad (5)$$

Таким образом, фототок, генерируемый в солнечном элементе светом с длиной волны  $\lambda$ , определяется суммой выражений (2), (4) и (5):

$$J_L(\lambda) = J_p(\lambda) + J_n(\lambda) + J_{dp}(\lambda). \quad (6)$$

Полная плотность фототока, протекающего при освещении элемента на основе  $p-i-n$  структуры солнечным светом со спектральным распределением  $F(\lambda)$ , можно получить, интегрируя выражение (6):

$$J_\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [J_p(\lambda) + J_n(\lambda) + J_{dp}(\lambda)] d\lambda, \quad (7)$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – коротковолновая и длинноволновая границы спектра поглощения.

При расчете плотности темнового тока используется выражение:

$$J_T = J_{01} \left[ \exp\left(\frac{e(V - JR_{II})}{nkT}\right) - 1 \right] + J_{02} \left[ \exp\left(\frac{e(V - JR_{II})}{2nkT}\right) - 1 \right] + \frac{V - JR_{II}}{R_{III}}, \quad (8)$$

где  $J_{01}$  – плотность диффузионного тока насыщения;  
 $J_{02}$  – плотность рекомбинационного тока насыщения;  
 $R_{II}, R_{III}$  — последовательное и шунтирующее сопротивления;  
 $n$  — коэффициент неидеальности (для неупорядоченных полупроводников  $n = 2$ ).

Плотность диффузионного и рекомбинационного токов определяется соотношениями (9) и (10), соответственно:

$$J_{01} = \frac{eD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{eD_n n_{p0}}{L_n}, \quad (9)$$

$$J_{02} = \frac{en_i W A_j}{2\sqrt{\tau_n \tau_p}}, \quad (10)$$

где  $p_{n0}$  и  $n_{p0}$  — равновесная концентрация дырок и электронов в  $n$ - и  $p$ -области соответственно;

$n_i$  — собственная концентрация носителей заряда;

$A_j$  — площадь поперечного сечения;

$\tau_n$  и  $\tau_p$  — время жизни неосновных носителей электронов и дырок в  $p$ - и  $n$ -области соответственно.

Полная плотность тока  $J$  получается путем наложения темнового тока и фототока

$$J = J_T - J_\Phi. \quad (11)$$

В данной модели используются следующие упрощения:

- туннелирование носителей заряда через границу  $p$ - $n$  областей предполагается несущественным;
- температура солнечных элементов не меняется и составляет 300 К;
- вся  $i$ -область  $p$ - $i$ - $n$  структуры является обедненной.

### Результаты моделирования

Используя разработанную модель, был произведен расчет ВАХ двухкаскадного солнечного элемента с  $p$ - $i$ - $n$  структурой, представленного на рисунке 1.

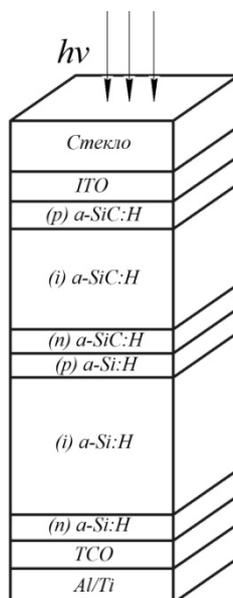


Рис. 1. Структура двухкаскадного солнечного элемента с  $p$ - $i$ - $n$  структурой на основе  $a$ -Si:H и  $a$ -SiC:H

В рассматриваемом СЭ первый  $p$ - $i$ - $n$  элемент на основе  $a$ -SiC:H поглощает фотоны из коротковолновой части спектра, а фотоны с более низкой энергией проходят через нее и поглощаются в следующем  $p$ - $i$ - $n$  элементе на основе  $a$ -Si:H. В первом приближении двухкаскадный солнечный элемент можно рассматривать как последовательное включение двух однослойных элементов. Поэтому их напряжение в разомкнутом контуре является суммой напряжений холостого хода  $p$ - $i$ - $n$  слоев, а ток короткого замыкания лимитирован минимальным значением тока короткого замыкания одного из двух каскадов. ВАХ двухкаскадного солнечного элемента является компиляцией результатов моделирования характеристик отдельных элементов.

В результате моделирования характеристик каждого слоя по отдельности были получены ВАХ  $p-i-n$  структур на основе  $a\text{-Si:H}$  и  $a\text{-SiC:H}$  (рисунок 2), их параметры представлены в таблице 1. При моделировании СЭ использовали солнечный спектр AM1.5 в диапазоне длин волн  $0.3 < \lambda < 1 \mu\text{м}$ .

Таблица 1. Расчетные характеристики слоев солнечного элемента

	$V_{x,x}$ , В	$J_{к.з}$ , мА/см <sup>2</sup>	$\eta$ , %	$FF$ , %
СЭ с $p-i-n$ структурой на основе $a\text{-SiC:H}$	0.73	26.6	14.8	76
СЭ с $p-i-n$ структурой на основе $a\text{-Si:H}$	0.64	17.9	8.1	71

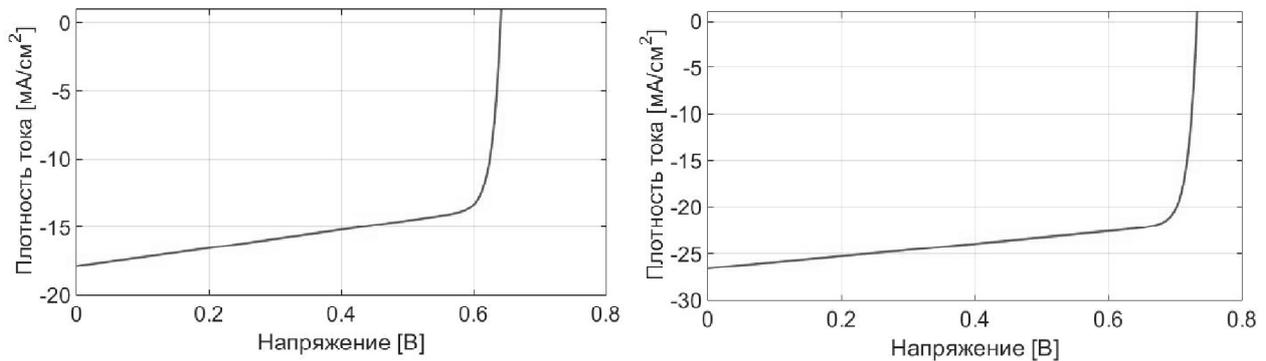


Рис. 2. Расчетная ВАХ солнечных элементов с  $p-i-n$  структурой на основе  $a\text{-Si:H}$  (слева) и  $a\text{-SiC:H}$  (справа)

На основе полученных данных было произведено моделирование двухкаскадного солнечного элемента, используя эквивалентную схему замещения и программу MicroCap. Результат моделирования ВАХ двухкаскадного солнечного элемента представлен на рисунке 3, зависимость коэффициента заполнения от напряжения на СЭ показана на рисунке 4.

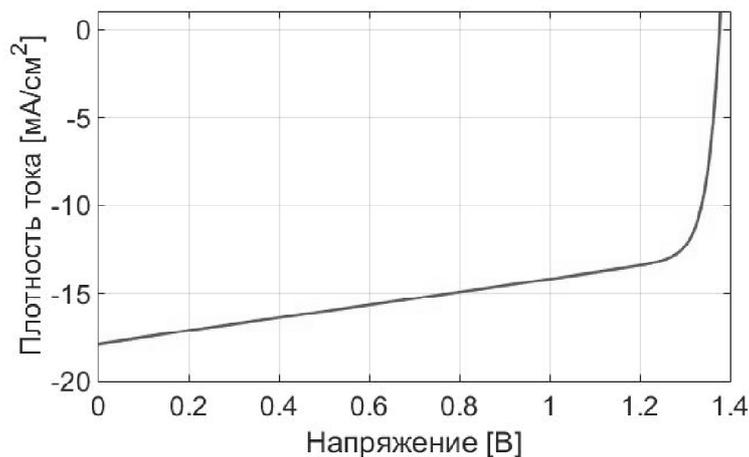


Рис. 3. ВАХ двухкаскадного солнечного элемента с  $p-i-n$  структурой на основе  $a\text{-SiC:H}$  и  $a\text{-Si:H}$

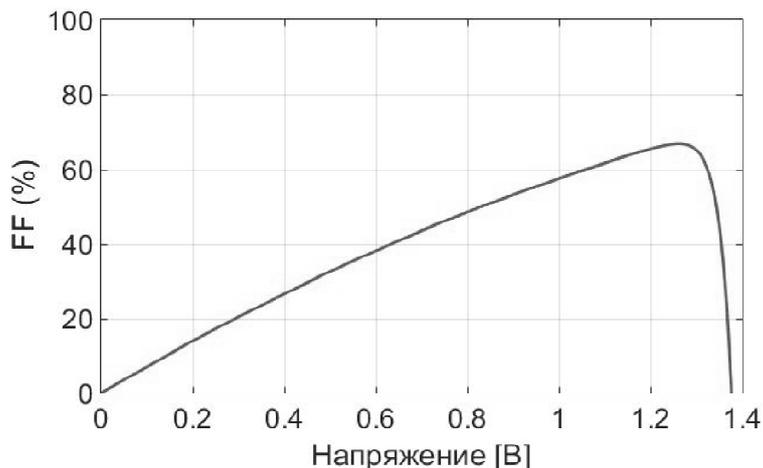


Рис. 4. Значение коэффициента заполнения ВАХ двухкаскадного солнечного элемента с  $p-i-n$  структурой на основе  $a-SiC:H$  и  $a-Si:H$

По результатам моделирования вольт-амперной характеристики были получены следующие параметры солнечного элемента:

- максимальная генерируемая плотность тока  $J_{к.з} = 17.6 \text{ мА/см}^2$ ;
- напряжение холостого хода  $V_{х.х} = 1.38 \text{ В}$ ;
- коэффициент заполнения ВАХ  $FF = 67\%$ ;
- коэффициент полезного действия  $\eta = 16.4\%$ .

### Заключение

В данной работе предложена модель расчета вольт-амперных характеристик для двухкаскадного солнечного элемента с  $p-i-n$  структурой на основе системы  $a-Si:H/a-SiC:H$ . Модель базируется на уравнениях для расчета фототока и темнового тока  $p-i-n$  перехода, в которые внесены изменения, учитывающие особенности электрофизических характеристик неупорядоченных полупроводников.

На основе предложенной модели проведен расчет вольт-амперных характеристик двухкаскадного солнечного элемента как системы последовательно включенных  $p-i-n$  структур на основе  $a-Si:H$  и  $a-SiC:H$ . Полученные результаты находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными для тестовых образцов аналогичных двухкаскадных солнечных элементов [8, 9]. Данные результаты могут быть использованы для доработки и повышения эффективности серийно производимых двухкаскадных солнечных элементов.

Работа выполнена с использованием оборудования РЦЗМкп РГРТУ.

### Библиографический список

1. REN21. Renewables 2017 Global Status Report. Paris: REN21 Secretariat, 2017.
2. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Second Edition. Edited by A. Luque and S. Hegedus. John Wiley & Sons, Ltd., 2010.
3. А.В. Пирюгин, В.Г. Мишустин. Разработка двухкаскадного тонкопленочного солнечного элемента на основе аморфного гидrogenизированного кремния // Сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. СТНО-2017 Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2017. Т. 4. С. 243 – 247.
4. PC1D [Электронный ресурс]. <http://www.pveducation.org/pvcdrom/welcome-to-pvcdrom/pc1d> (07.02.2018)
5. A manual for AMPS-1D [Электронный ресурс]. <http://www.ampsmodeling.org/latest.html> (07.02.2018)
6. AFORS-HET: numerical simulation of Solar Cells and Measurements [Электронный ресурс]. [http://www.helmholtz-berlin.de/forschung/oe/ee/si-pv/projekte/asicsi/afors-het/index\\_en.html](http://www.helmholtz-berlin.de/forschung/oe/ee/si-pv/projekte/asicsi/afors-het/index_en.html) (07.02.2018)
7. Афанасьев В.П., Теруков Е.И., Шерченков А.А. Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния. 2-е изд. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. 168 с.

8. Семенов А.В. Технология тонкопленочных солнечных модулей большой площади на основе аморфного и микрокристаллического кремния: Автореф. дис. канд. техн. наук, Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ». Санкт-Петербург, 2015.

9. A.V. Sachenko, Yu.V. Kryuchenko, V.P. Kostilyov et. al., The temperature dependence of the characteristics of crystalline-silicon-based heterojunction solar cells, Technical Physics Letters, Vol. 42, Iss. 3, 2016, pp. 313–316.

УДК 621.383.29+621.315.592; ГРНТИ 47.33.33+29.19.31

## **ФОТОПРИЕМНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРОВ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И СТРУКТУР**

**Е.П. Трусов, В.Г. Литвинов**

*Рязанский государственный радиотехнический университет*

*Россия, Рязань, eptrusov@yandex.ru, vglit@yandex.ru*

*Аннотация.* В данной работе описана модернизированная установка для автоматизированного измерения и анализа спектров люминесценции на основе монохроматора МДР-2 Ломо. Показаны основные узлы фотоприемного устройства и его характеристики.

*Ключевые слова.* Фотоэлектронный умножитель, усилитель, монохроматор, блок питания.

## **PHOTODETECTOR DEVICE FOR STUDYING THE PHOTOLUMINESCENCE SPECTRA OF SEMICONDUCTOR MATERIALS AND STRUCTURES**

**E.P. Trusov, V.G. Litvinov**

*Ryazan State Radio Engineering University*

*Russia, Ryazan, eptrusov@yandex.ru, vglit@yandex.ru*

*Abstract.* This article describes the modernization of the installation for automated measurement and analysis of luminescence spectra based on the MDR-2 Lomo monochromator. The main components of the photodetector device and its characteristics are shown.

*Keywords.* Photoelectric multiplier, amplifier, monochromator, power supply.

### **Введение**

В региональном центре зондовой микроскопии коллективного пользования при РГРТУ появилось необходимость в модернизации оборудования, использовавшегося для получения спектров люминесценции полупроводниковых материалов и структур. Необходимо было повысить чувствительность детектора оптического излучения, который перекрывал бы весь видимый диапазон спектра. Такие устройства есть на рынке и представлены в основном зарубежными компаниями, например, фирмой Hamamatsu. Однако они имеют высокую цену и не самые лучшие характеристики, поэтому было принято решение разработать такое устройство.

### **Описание установки**

Все элементы, входящие в состав установки для автоматизированного измерения и анализа спектров на основе монохроматора МДР-2 Ломо, и порядок их взаимодействия представлены на функциональной схеме – рисунок 1.



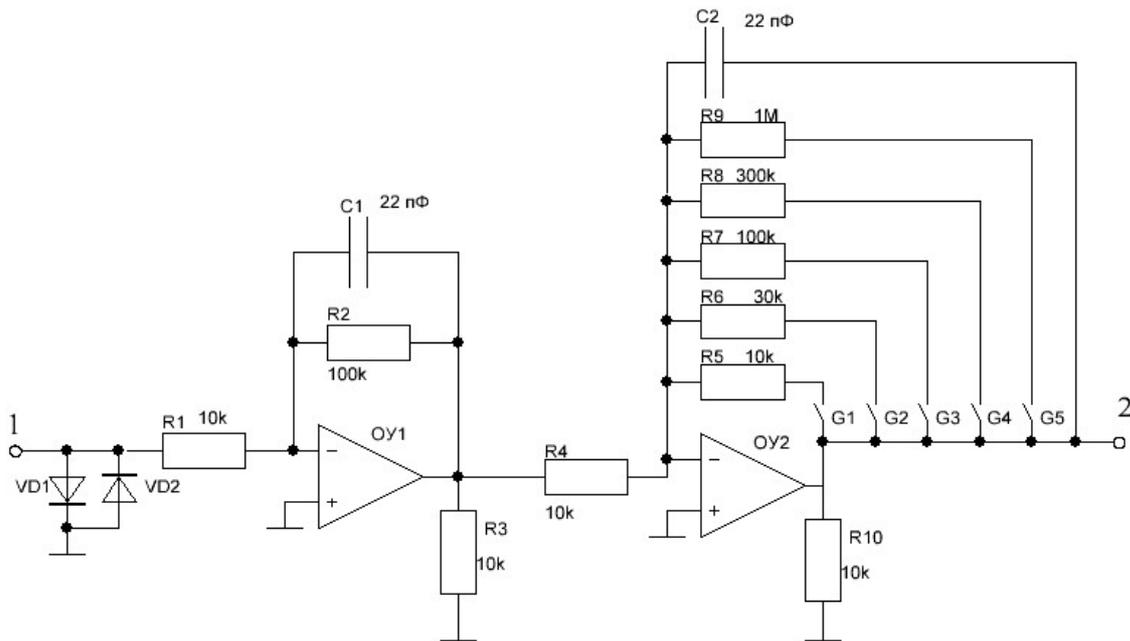


Рис. 1. Принципиальная схема усилителя

Символом G обозначены герконовые реле. В качестве герконовых реле были использованы реле EDR101A0500 с напряжением переключения 5В[3]. Коммутация контактов осуществляется программно оператором с помощью разработанного программного обеспечения на языке графического инженерного программирования NI LabVIEW 2010. Управляющие контакты герконовых реле подсоединены к терминальному блоку BNC-2120 и через плату сбора данных NI PCI-6251 к ПК[1].

Аналоговый сигнал, поступающий на вход усилителя (контакт 1), идет на вход операционного усилителя OY1 и усиливается в 10 раз. Далее сигнал передается на вход операционного усилителя OY2. Теперь же коэффициент усиления зависит от того, какой ключ замкнут, т.е. на какое герконовое реле подано напряжение. И только потом усиленный сигнал (с выхода 2) поступает на терминальный блок. Защитные диоды VD1 и VD2 исключают перегрузку усилителя при поступлении на вход недопустимо высокого напряжения. Конденсаторы C1 и C2 защищают операционные усилители от самовозбуждения (рис. 1).

Калибровка фотоприемного устройства происходила с помощью ртутной лампы, спектр которой известен.

Схемы разработанного высоковольтного источника питания с возможностью подстройки выходного напряжения, питающийся от сети переменного тока 220 В представлены на рисунках 3-5.

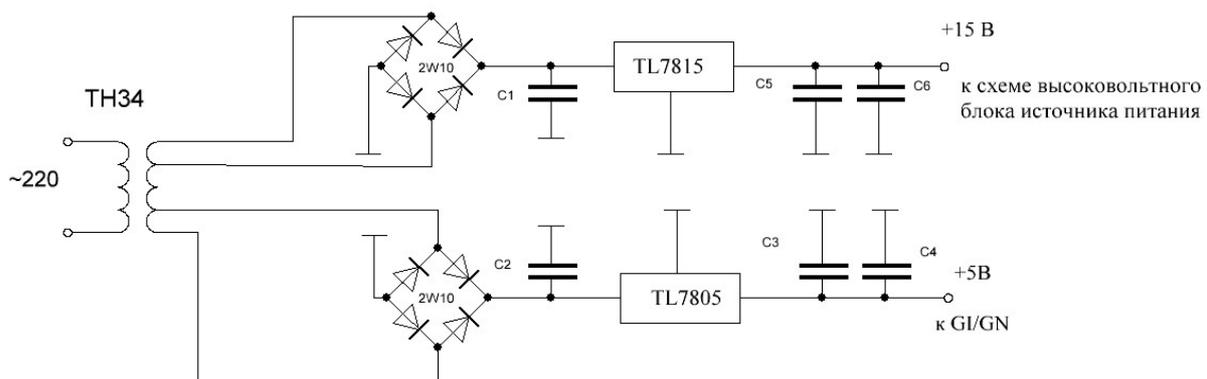


Рис. 3. Схема стабилизатора напряжения для питания задающего генератора и высоковольтного блока

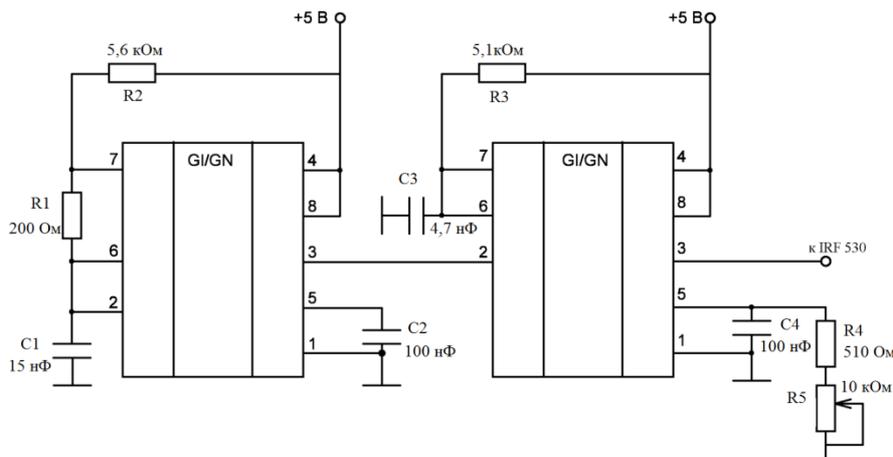


Рис. 4. Схема генератора импульсного напряжения

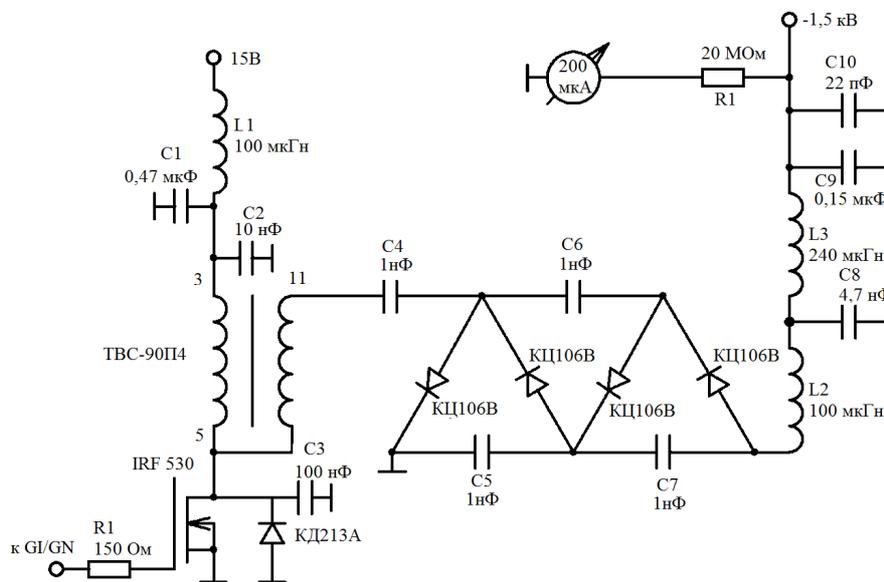


Рис. 5. Схема высоковольтного блока источника питания

Разработанный источник питания обладает простой конструкцией, обладает следующими характеристиками:  $U_{вх} = 220 \text{ В}$ ,  $U_{вых} = 1500 \text{ В}$  при  $I_{вых} = 1 \text{ мА}$ , уровень шума 0,2% [4].

### Выводы

Таким образом, разработанное фотоприемное устройство для исследования спектров фотолюминесценции обладает областью спектральной чувствительности 300-800 нм, имеет регулируемый в автоматическом режиме во время измерений коэффициент усиления.

### Благодарности

Авторы выражают признательность Мальченко С.И. за большую помощь в осуществлении данной работы.

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

### Библиографический список

1. Тревис Дж. LabVIEW для всех/ Джеффри Тревис: Пер. с англ. Клушин Н.А., —М.ЖДМК Пресс; Прибор-Комплект, 2005. — 544 с.
2. ФЭУ 27 Параметры и характеристики/ Исток-2 [Электронный ресурс], URL: <https://istok2.com/data/2843> (Дата обращения 08.02.2018).
3. Электронные компоненты и устройства/ ЧИП И ДИП [Электронный ресурс] URL: <https://www.chipdip.ru/product/edr101a0500> (Дата обращения 08.02.2018).
4. Трусов Е.П., Мальченко С.И., Литвинов В.Г.. Разработка высоковольтного источника питания фотоэлектронного умножителя в составе измерительного комплекса фотолюминесценции// Физика полупроводников. Микроэлектроника. Радиоэлектронные устройства, Межвузовский сборник научных трудов. – Рязань, РГРТУ, 2017.-С. 44-48.

УДК 621.383; ГРНТИ 44.41.35

## РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МАКЕТА НА ОСНОВЕ СПЕКТРОФОТОМЕТРА СФ-26 ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КВАНТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

А.С. Сапельников, Н.В. Вишняков

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Российская Федерация, Рязань, sapelnikov-aleksandr@yandex.ru*

*Аннотация.* В данной работе представлены результаты теоретических исследований и практических работ по созданию измерительного макета на основе спектрофотометра СФ-26 для измерения спектральной зависимости квантовой эффективности фотоэлектрического преобразователя.

*Ключевые слова.* фотоэлектрический преобразователь, солнечный элемент, квантовая эффективность, спектральная зависимость, измерительный макет.

## DEVELOPMENT OF MEASURING MODEL BASED ON THE SPECTROPHOTOMETER SF-26 FOR RESEARCH OF SPECTRAL DEPENDENCE OF THE PHOTOELECTRIC CONVERTER QUANTUM EFFICIENCY

Sapelnikov A.S., Vishnyakov N.V.

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Russian Federation, Ryazan, sapelnikov-aleksandr@yandex.ru*

*Abstract.* The results of theoretical studies and practical works on creation of measuring model based on the spectrophotometer SF-26 for measurement of spectral dependence of the quantum efficiency of the Photoelectric Converter are presented in this paper.

*Keywords.* Photoelectric Converter, solar cell, quantum efficiency, spectral dependence, measuring model

### Введение

В современном мире земная атмосфера постоянно подвергается загрязнению вредными продуктами техногенного происхождения. Это влечет за собой потепление климата на нашей планете. В связи с этим применение известных, и разработка новых экологически чистых источников электрической энергии приобретают особое значение. Наиболее перспективными источниками такого рода являются полупроводниковые фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) солнечной энергии. Достоинством этих устройств является безотходность технологии преобразования энергии и относительно простая конструкция, что позволяет использовать их в самых различных климатических условиях. К недостаткам ФЭП следует отнести высокая стоимость из-за необходимости аккумулирования энергии и применения дорогостоящих и редких компонентов, зависимость от погодных условий. Также к недостаткам ФЭП относят относительно низкие (в диапазоне 7-25% для серийного производства) значения коэффициента полезного действия. Повышение коэффициента полезного действия ФЭП связано с увеличением квантовой эффективности преобразования светового излучения в электрический ток. Этот параметр можно увеличить за счет новых конструктивных и технологических решений. В частности, для повышения эффективности преобразования солнечной энергии представляется привлекательным соединить в одном устройстве два (тандем) или более p-n переходов с тем, чтобы каждый из них работал с высокой эффективностью в определенном спектральном диапазоне светового излучения [1]. Кроме того, в последнее время бурное развитие получила так называемая НТТ-технология (Heterojunction with Intrinsic Thin layer) [2].

Из общих соображений ясно, что не каждый падающий фотон приводит к возникновению пары носителей заряда, создающих вырабатываемый СЭ ток. Частично излучение может отражаться от поверхности СЭ. 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 числу фотонов, падающих на светочувствительную область кристалла ФЭП за определенный промежуток времени. Эта характеристика и получила название «квантовая эффективность или эффективный квантовый выход». Немаловажной особенностью данной величины является возможность измерения ее спектральной дисперсии, показывающей эффективность преобразования излучения отдельных областей спектра и полноту использования солнечной энергии [3].

С понятием квантовой эффективности неразрывно связано такое понятие, как квантовый выход внутреннего фотоэффекта. Ранее в работе [5] уже упоминалось, что квантовый выход — это отношение числа фотоэлектронов, образовавшихся в активной области полупроводниковой структуры или вблизи ее границы в результате внутреннего фотоэффекта, к числу упавших на этот полупроводник фотонов. Квантовая эффективность или эффективный квантовый выход - это квантовый выход светочувствительной части фотопреобразователя, умноженный на коэффициент преобразования заряда фотоэлектрона в зарегистрированный полезный сигнал [2, 4]:

$$Q_{эфф} = \beta\gamma, \quad (1)$$

где  $\beta$  - квантовый выход внутреннего фотоэффекта;

$\gamma$  - эффективность собирания носителей (или, иначе, коэффициент разделения носителей) потенциальным барьером p-n-перехода, показывающая, какая часть из общего числа пар, созданных оптическим излучением, участвует в формировании тока короткого замыкания солнечного элемента при подключении внешнего регистрирующего прибора.

Поскольку этот коэффициент всегда меньше единицы, то квантовая эффективность также меньше квантового выхода. Из формулы (1) очевидно, что для определения квантовой эффективности ФЭП необходимо знать величину квантового выхода внутреннего фотоэффекта  $\beta$  и эффективность собирания фотогенерированных носителей заряда  $\gamma$ , создающих ток во внешней цепи. Экспериментальное определение каждой из этих величин является самостоятельной и непростой задачей. В настоящей работе для измерения квантовой эффективности ФЭП предлагается применить подход, основанный на сравнении токов короткого замыкания исследуемого ФЭП с эталонным фотодиодом [6].

### Теоретические основы процедуры измерения квантовой эффективности ФЭП

Из обоснования теоретических основ процедур измерения квантовой эффективности ФЭП, представленных в работе [5] следует, что для экспериментального измерения  $Q_{эфф}$  нужно измерять ток, вырабатываемый ФЭП в ответ на освещение его поверхности монохроматическим источником, а также световой поток источника. Если измерение фототока не представляет принципиальных проблем, то измерение светового потока может происходить несколькими путями. В первом случае, в распоряжении экспериментатора должен быть прибор, непосредственно предназначенный для измерения светового потока или мощности излучения. Во втором случае, для измерения мощности может применяться эталонный 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  $\Phi$  в формуле (2) [5].

$$Q_{эфф} = \frac{h \cdot c \cdot I}{e \cdot \lambda \cdot \Phi} \quad (2)$$

Также эта зависимость может задаваться как спектральная дисперсия квантовой эффективности фотодиода  $Q_{эффэт}$ . В этом случае можно использовать (2) для получения значения светового потока, падающего на поверхность эталонного фотодатчика:

$$\Phi = \frac{h \cdot c \cdot I_{эт}}{e \cdot \lambda \cdot Q_{эффэт}} \quad (3)$$

где  $I_{эт}$  - ток в цепи эталонного фотодиода.

При подстановке (3) в формулу (2) можно вычислить значение квантовой эффективности для исследуемого ФЭП:

$$Q_{эфф} = Q_{эффэт} \cdot \frac{I}{I_{эт}} \quad (4)$$

Необходимо отметить, что площадь светового пятна, используемого для измерения квантового выхода ФЭП, должна быть такой же, как и фоточувствительная площадь эталонного фотодиода.

### **Макет на основе спектрофотометра СФ-26 для измерения спектральной зависимости квантовой эффективности фотоэлектрического преобразователя**

Как уже отмечалось в работе [5], для измерения спектральной дисперсии квантовой эффективности СЭ 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;

диафрагма, обеспечивающая локализацию светового пятна на поверхности исследуемого образца и измерителя мощности;

светонепроницаемая камера с системой крепления образца;

чувствительный амперметр.

Для реализации макета был использован спектрофотометр СФ-26, который имеет широкий спектральный диапазон от 186 до 1100 нм. На рисунке 1 представлена оптическая схема спектрофотометра СФ-26.

Оптическая схема монохроматора — автоколлимационная. Излучение от источника 1 (рис. 1) или 1' падает на зеркальный конденсор 2, который направляет его на плоское поворотное зеркало 3 и дает изображение источника излучения в плоскости линзы 4, расположенной вблизи входной щели 5. Прошедшее через входную щель излучение падает на зеркальный объектив 6 и, отразившись, параллельным пучком направляется на призму 7. Пройдя призму под углом, близким к углу наименьшего отклонения, и отразившись от ее алюминированной грани, диспергированный пучок направляется обратно на объектив и фокусируется им на выходной щели 8, расположенной над входной щелью. При вращении призмы монохроматическое излучение различных длин волн проходит через выходную щель 8, линзу 9, контрольный или измеряемый образец, линзу 10 и с помощью поворотного зеркала 11 собирается на светочувствительном слое одного из фотоэлементов 12 или 13 [7].

На рисунке 2 представлена функциональная схема измерительного макета. Для измерения спектральной квантовой эффективности в кюветное отделение прибора помещается эталонный фотодиод и исследуемый солнечный элемент. Так как данный спектрофотометр однолучевой, то измерения производятся попеременно. Фототок с обоих ФЭП попеременно поступает на вход прецизионного микроамперметра 6, и с него по протоколу RS232 передается на персональный компьютер 7. После прохождения выходной щели монохроматора луч света проходит через специальную диафрагму и попадает на эталонный фотодиод, либо на измеряемый ФЭП.

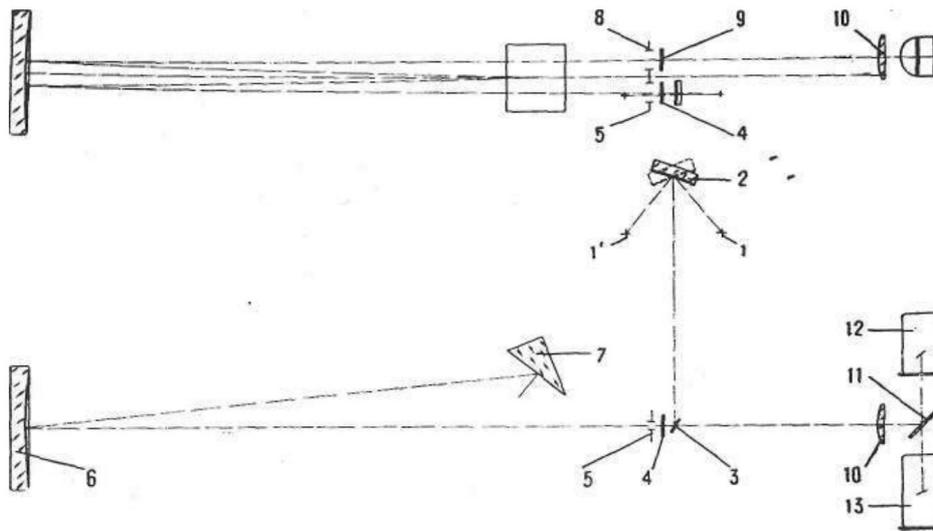


Рис. 1. Оптическая схема монохроматора – автоколлимационная:

1 – источник излучения; 2 - зеркальный конденсатор; 3 – плоское поворотное зеркало; 4 – линза; 5 – входная щель; 6 – зеркальный объектив; 7 - призма; 8 – выходная щель; 9 – линза; 10 – линза; 11 – поворотное зеркало; 12, 13 – фотоэлементы [7].

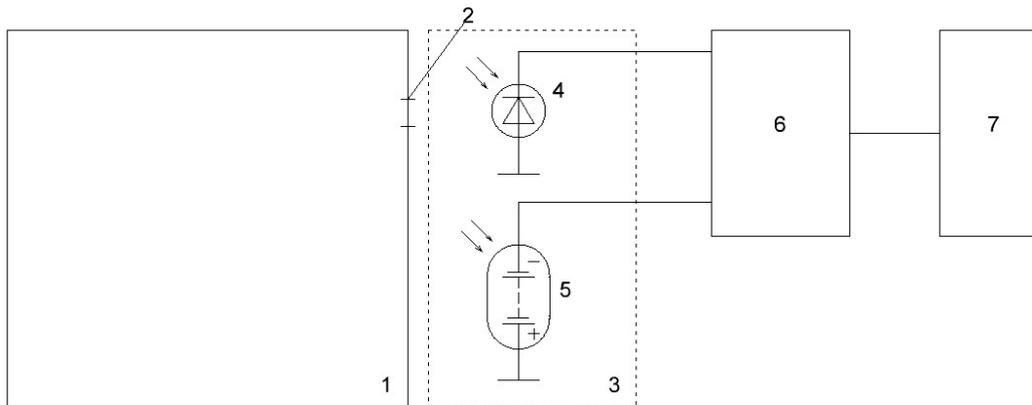


Рис. 2. Функциональная схема измерительного макета для исследования спектральной квантовой эффективности ФЭП: 1 – монохроматор; 2 - выходная щель; 3 – кюветная камера; 4 – эталонный фотодиод; 5 – исследуемый ФЭП; 6 – чувствительный амперметр; 7 – ПК с программным обеспечением NI LabVIEW.

## Выводы

В результате работы был создан измерительный макет на основе спектрофотометра СФ-26 для измерения спектральной зависимости квантовой эффективности фотоэлектрического преобразователя, который обеспечивает следующие параметры:

- спектральный диапазон: 200 – 1100 нм;
- время отклика: 1 нс;
- чувствительность: 0.44 А/Вт;
- диаметр светочувствительной области: 1 мм.

## Библиографический список

1. Алферов Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. Тенденции и перспективы развития солнечной энергетики. Физика и техника полупроводников. 2004, Т.38, вып.8. С. 937–948.
2. Wilfried G.J.H.M. van Sark, L. Korte, Fr. Roca Physics and Technology of Amorphous-Crystalline Heterostructure Silicon Solar Cells// Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2012. 602 p. DOI 10.1007/978-3-642-22275-7

3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. Кн. 2. М.: Мир, 1984. – 456 с.
4. Чебогарев С.Н., Пашенко А.С., Лунина М.Л. Моделирование зависимостей функциональных характеристик кремниевых солнечных элементов, полученных методом ионно-лучевого осаждения, от толщины и уровня легирования фронтального слоя// Вестник Южного Научного Центра РАН Том 7, № 4, 2011, стр. 25–30.
5. Сапельников А.С., Воробьев Ю.В., Вишняков Н.В., Мишустин В.Г. Разработка программно-аппаратного комплекса для исследования спектральной зависимости квантовой эффективности фотоэлектрического преобразователя. Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2017. Том 4. Рязань, РГРТУ, 2017, С. 161-166.
6. Колтун М.М. Оптика и метрология солнечных элементов. М.: Наука, 1985. – 280 с.
7. Спектрофотометр СФ-26. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 1978. – 19 с.

УДК 621.383; ГРНТИ 29.19.31

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

**В. Шубаркин, В. Литвинов**

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, 7zmei9@mail.ru*

*Аннотация.* В данной работе описан измерительно-аналитический комплекс для экспресс-диагностики и анализа параметров полупроводниковых структур для фотоэлектрических преобразователей. Приведено описание элементов разработанного комплекса и основного алгоритма расчета получаемых параметров.

*Ключевые слова.* Измерительно – аналитический комплекс, фотоэлектрический преобразователь, полупроводник.

## MEASURING COMPLEX FOR EXPRESS DIAGNOSTICS OF PHOTOVOLTAIC CONVERTERS

**V. Shubarkin, V. Litvinov**

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Russia, Ryazan, 7zmei9@mail.ru*

*Abstract.* In this paper the implementation of measuring and analytical complex of express diagnostics for studying the properties of semiconductor structures for photovoltaic converters is described. A brief description of the elements of the complex and the main algorithm for calculating the parameters obtained are presented.

*Keywords.* Measuring and analytical complex, photovoltaic converter, semiconductor.

### Введение

В настоящее время правительства многих стран активно проводят политику повышения энергетической эффективности и улучшения целевых показателей, к которым, в том числе, относится степень замещения традиционных источников возобновляемыми. Солнечная энергетика в некоторых странах в настоящее время уже стала конкурентоспособной, т.к. коэффициент полезного действия (КПД) солнечных электростанций достигает 25%, что в частности зависит от качества каждого солнечного элемента (СЭ) в отдельности, а стоимость установленного киловатта пиковой мощности стала ниже 2000 долларов. Сегодня на солнечную энергетику приходится 14% производящих мощностей на основе возобновляемых источников [1]. Годовой темп роста, учитывая показатель средней годовой скорости роста стоимости инвестиционных вложений для данной отрасли за пять последних лет составил 54%.

Основные принципы создания солнечных элементов известны более полувека, поэтому, сегодня основной идеей является достижение теоретического предела КПД фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) для СЭ с помощью оптимизации конструкции и технологии изготовления. Для качественного и быстрого анализа ФЭП предлагается комплексный метод исследования их электрофизических и оптических свойств. Получение широкого ряда харак-

теристик контролируемой структуры позволяет сформировать данные о ее достоинствах и недостатках.

Основные алгоритмы получения параметров ФЭП и блок-схема установки

Разработанный комплекс для экспресс-диагностики включает в себя исследование вольт-амперных характеристик СЭ или ФЭП, которые предоставляют полезную информацию об его основных параметрах.

В основу анализа измеряемых характеристик положены следующие основные формулы и выражения. Вольт-амперная ( $I$ - $V$ ) характеристика солнечного элемента определяется выражениями [2]:

$$I = I_B \left( e^{qV/kT} - 1 \right) - I_L, \quad (1)$$

$$J_B = I_B/A = qN_c N_V \left( \frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} + \frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \right) e^{-E_g/kT}, \quad (2)$$

где  $I_B$  – ток насыщения;  
 $q$  – элементарный заряд;  
 $N_c$  – плотность состояний в зоне проводимости;  
 $N_V$  – плотность состояний в валентной зоне;  
 $N_A$  – концентрация акцепторов;  
 $N_D$  – концентрация доноров;  
 $D_n$  – коэффициент диффузии электронов;  
 $D_p$  – коэффициент диффузии дырок;  
 $\tau_n$  – время жизни электронов;  
 $\tau_p$  – время жизни дырок;  
 $E_g$  – ширина запрещенной зоны;  
 $k$  – постоянная Больцмана;  
 $T$  – температура.

При соответствующем подборе оптимального сопротивления нагрузки (что является еще одной из сложных и наиболее важных научно-технических задач) вырабатываемая энергия может достигать 80% произведения  $I_{кз} V_{xx}$  ( $I_{кз}$  – ток короткого замыкания,  $V_{xx}$  – напряжения холостого хода элементов) [2].

Из уравнения (1) получается выражение для напряжения холостого хода (при  $I = 0$ ):

$$V_{xx} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_L}{I_B} + 1 \right) \approx \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_L}{I_B} \right) \quad (3)$$

При заданном токе  $I_L$  напряжение холостого хода логарифмически возрастает при уменьшении тока насыщения  $I_B$ . Выходная мощность равна:

$$P - IV = I_B V (e^{qV/kT} - 1) - I_L U. \quad (4)$$

Условие максимума мощности получается при  $dP/dV = 0$ :

$$I_m = I_B \beta V_m e^{\beta V_m} \cong I_L \left( 1 - \frac{1}{\beta V_m} \right), \quad (5)$$

$$V_m = \frac{1}{\beta} \ln \left( \frac{I_L/I_B + 1}{1 + \beta V_m} \right) \cong U_{xx} - \frac{1}{\beta} \ln(1 + \beta V_m), \quad (6)$$

где  $\beta = q/kT$ .

Максимальная выходная мощность определяется выражением

$$P_m = I_m V_m \cong I_L \left[ V_{xx} - \frac{1}{\beta} \ln(1 + \beta V_m) - \frac{1}{\beta} \right] = I_L (E_m / q), \quad (7)$$

где

$$E_m \cong q \left[ V_{xx} - \frac{1}{\beta} \ln(1 + \beta V_m) - \frac{1}{\beta} \right]. \quad (8)$$

Величина  $E_m$  соответствует той максимальной энергии, которая выделяется в нагрузке при поглощении одного фотона и при оптимальном согласовании элемента с внешней цепью [2].

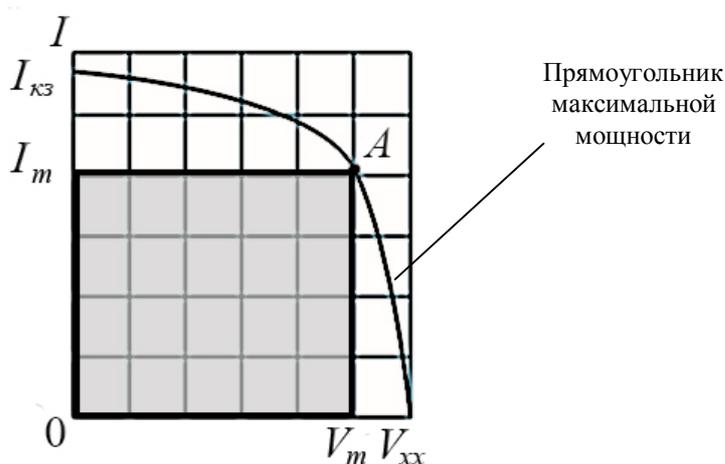


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика ФЭП

Максимальная мощность отбирается в том случае, когда ФЭП находится на режиме, отмеченный точкой  $A$  на рисунке 1.

Если значения  $J_B$  и  $J_L$  известны, величину  $E_m$  можно получить с помощью численного решения трансцендентных уравнений (3), (6) и (8).

Идеальная эффективность преобразования реализуется при оптимальном выборе параметров материала, когда величина  $J_B$  минимальна. Коэффициент полезного действия равен отношению максимальной выходной мощности к внешней мощности (мощность падающего излучения)  $P_{in}$  и может быть определена как:

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_L (E_m / q)}{P_{in}} = \left[ V_m^2 I_B (q / kT) e^{qV_m / kT} \right] / P_{in} \quad (9)$$

Предельное значение эффективности СЭ можно вычислить на основании принципа детального равновесия или в предположении, что потери обусловлены лишь излучательной рекомбинацией.

Для решения ряда задач по исследованию полупроводниковых структур для ФЭП при измерении  $I$ - $V$  характеристик был разработан измерительно-аналитический комплекс, состоящий из мультиметра RIGOL DM3051, ЭВМ, среды программирования LabVIEW, регулируемого источника питания, источника света. Структурная схема разработанного комплекса представлена на рисунке 2. Его особенностью является простота использования, интуитивно понятный интерфейс виртуального прибора, изготовленного в среде инженерного графического программирования LabVIEW, широкий диапазон измеряемых токов и напряжений, экспрессность измерений.

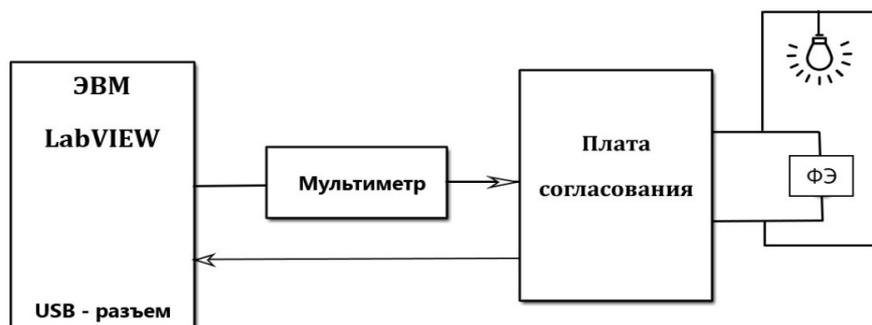


Рис. 2. Блок-схема измерительно-аналитического комплекса

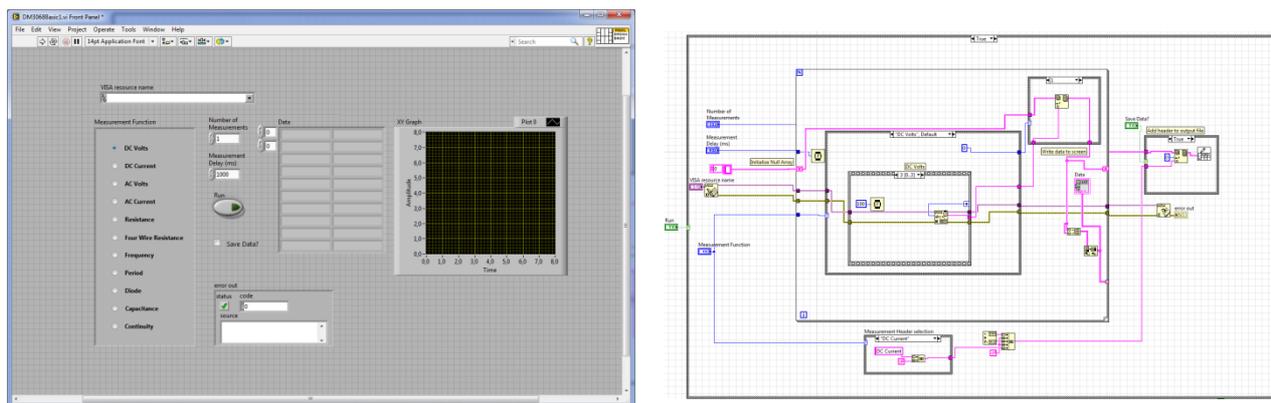


Рис. 3. Лицевая панель и алгоритм расчета параметров ФЭП в LabVIEW

Для передачи данных по шине используется дифференциальный способ передачи сигналов D+ и D- по двум проводам в USB – разъеме. Определение развертки по току и напряжению позволяет оценивать КПД ФЭП. Переменный источник напряжения позволяет изменять длину волны источника света для получения спектральной зависимости  $I_{кз}$  и  $V_{хх}$ .

### Выводы и перспективы

Наиболее эффективным решением задачи контроля свойств материалов для создания ФЭП является использование разработанного измерительно-аналитического комплекса. Благодаря указанному методу исследования пользователь получает картину, достаточную для анализа исследуемого ФЭПа. Основным достоинством данной установки является быстрое получение минимально необходимых данных для анализа исследуемых образцов для солнечных элементов[3].

Особенностью комплекса является возможность наращивания как самих приборов для исследования, так и методов анализа для получения большей информации о материале с целью создания фотоэлектрического преобразователя солнечной энергии с максимальным коэффициентом полезного действия.

### Библиографический список

1. Будущее солнечных батарей [Электронный ресурс], URL: <http://helios-resource.ru/buduschee-solnechnyh-batarej.html> (дата обращения 11.02.2018).
2. С. Зи. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х тт. 2-е изд. М., Мир, 1984. 456с.
3. В.Г. Литвинов, В.О. Шубаркин, В.В. Гудзев Измерительно-аналитический комплекс для исследования полупроводниковых микро- и наноструктур для ФЭП //Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2017 [текст]: сб. тр. между- нар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: в 9 т. Т.4./ под общ. ред. О.В. Миловорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, Рязань, 2017, – С. 174-177;

УДК 537.311.322; ГРНТИ 29.19.31

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В МИКРО- И НАНОСТРУКТУРАХ****А.В. Логвин\*, М.В. Зубков\*\***\*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, [logvin\\_anton@mail.ru](mailto:logvin_anton@mail.ru), [logvin\\_anton@ro.ru](mailto:logvin_anton@ro.ru)\*\* Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, [mihailzubkow@yandex.ru](mailto:mihailzubkow@yandex.ru)

*Аннотация.* Производится моделирование с различными подходами к определению толщины области эмиссии носителей заряда, а также анализируется влияние коэффициента  $\theta$ , учитывающего эффект смещения границы ОПЗ.

*Ключевые слова.* Моделирование микропроцессов, релаксационные процессы, микроструктура, наноструктура.

**SIMULATION OF RELAXATION PROCESSES IN MICRO- AND NANOSTRUCTURES****A.V. Logvin, M.V. Zubkov \*\***\* Ryazan State Radio Engineering University,  
Russia, Ryazan, [logvin\\_anton@mail.ru](mailto:logvin_anton@mail.ru), [logvin\\_anton@ro.ru](mailto:logvin_anton@ro.ru)\*\* Ryazan State Radio Engineering University,  
Russia, Ryazan, [mihailzubkow@yandex.ru](mailto:mihailzubkow@yandex.ru)

*Annotation.* Modeling with different approaches to the determination of the thickness of the region of emission of charge carriers is carried out, as well as the effect of the coefficient  $\theta$ , which takes into account the effect of the shift of the boundary of the HMO, is analyzed.

*Keywords.* Modeling of microprocesses, relaxation processes, microstructure, nanostructure.

Для анализа и контроля дефектов, приводящих к возникновению глубоких уровней (ГУ) в запрещенной зоне полупроводникового материала, широко используется метод релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ), в зарубежной литературе метод DLTS.

Определение энергии ионизации и концентрации глубоких центров (ГЦ) по спектрам DLTS возможно при следующих допущениях:

- 1) Время релаксации заряда ГЦ не зависит от напряженности электрического поля в области пространственного заряда (ОПЗ) барьерных слоев;
- 2) После окончания релаксационного процесса перезарядки ГЦ барьерный слой представляет собой область с однородной плотностью объемного заряда глубоких и мелких центров, ионизированных в пределах всей ОПЗ;
- 3) Концентрация ГЦ не превышает концентрации основной легирующей примеси во всех рассматриваемых случаях [1].

Наиболее распространенными методами РСГУ являются: токовый и емкостной. Отличие токового метода от емкостного заключается в схемах преобразования входного сигнала: емкость-напряжение, ток-напряжение.

Для определения концентрации ГЦ используют следующую формулу:

$$N_t = \frac{\Delta U}{meS\delta\theta},$$

где  $\Delta U$  – амплитуда пика;  $m$  – коэффициент передачи сквозного тракта РСГУ – спектрометра;  $e$  – элементарный заряд;  $S$  – площадь барьера;  $\delta$  – толщина области эмиссии носителей заряда с ГУ;  $\theta$  – множитель учитывающий эффект смещения границы ОПЗ в процессе релаксации объемного заряда.

В последнее время в теории РСГУ предложены новые формулы для определения энергии ионизации глубоких уровней, отличающиеся различными подходами к определению толщины области эмиссии носителей заряда в случае неоднородного и однородного распределений концентраций мелких доноров по глубине полупроводниковой пластины [1,2].

$$\Delta E_{t1} = e \left( \frac{\Delta U_2 \cdot \sqrt{\frac{V_1}{N_1}} - \Delta U_1 \cdot \sqrt{\frac{V_2}{N_2}}}{\frac{\Delta U_2}{\sqrt{N_1}} - \frac{\Delta U_1}{\sqrt{N_2}}} \right) + \frac{k \cdot T_{max}}{e} \cdot \ln \left( \frac{N_C}{N_{Cp}} \right) \quad (1)$$

$$\Delta E_{t2} = \frac{e \cdot N_{dm}}{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \left( \frac{\Delta U_2 \cdot (d_1 - \lambda_1 - \delta_1) - \Delta U_1 \cdot (d_2 - \lambda_2 - \delta_2)}{\Delta U_2 - \Delta U_1} \right)^2 + \frac{k \cdot T_{max}}{e} \cdot \ln \left( \frac{N_C}{N_{DM}} \right) \quad (2)$$

$$\Delta E_{t3} = \frac{e \cdot N_{dm}}{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \left( \frac{\Delta U_2 \cdot d_1 - \Delta U_1 \cdot d_2}{\Delta U_2 - \Delta U_1} \right)^2 + \frac{k \cdot T_{max}}{e} \cdot \ln \left( \frac{N_C}{N_{DM}} \right) \quad (3)$$

$$\Delta E_{t2} = \frac{e \cdot N_{dm}}{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \left( \frac{\Delta U_2 \cdot (d_1 - \delta_1) - \Delta U_1 \cdot (d_2 - \delta_2)}{\Delta U_2 - \Delta U_1} \right)^2 + \frac{k \cdot T_{max}}{e} \cdot \ln \left( \frac{N_C}{N_{DM}} \right) \quad (4)$$

Рассмотрим результаты моделирования указанных зависимостей (1), (2), (3), (4) на примере экспериментальных данных полученных методом РСГУ в диоде Шоттки Al-n-Si [2]. На рисунке 1 приведен РСГУ спектр и график Арениуса (рис. 2), по углу наклона определена энергия  $\Delta E = E_C - E_t = 0.56$  эВ.

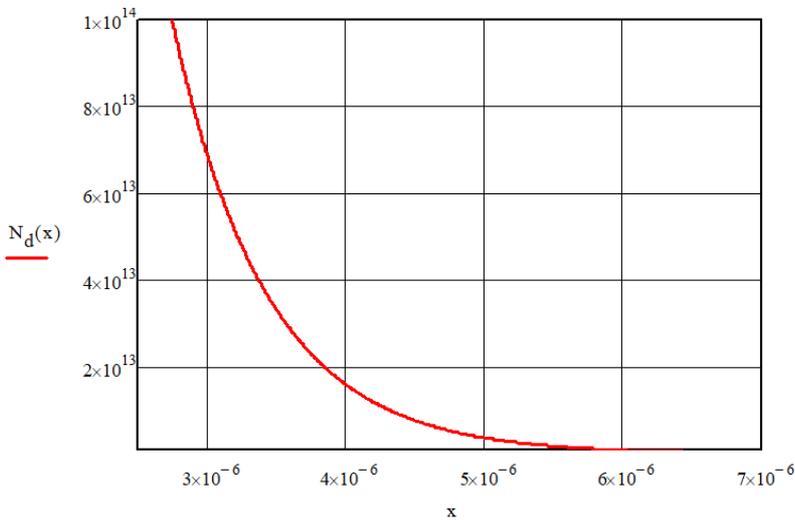


Рис. 1. Профиль концентрации мелких доноров в барьерной структуре

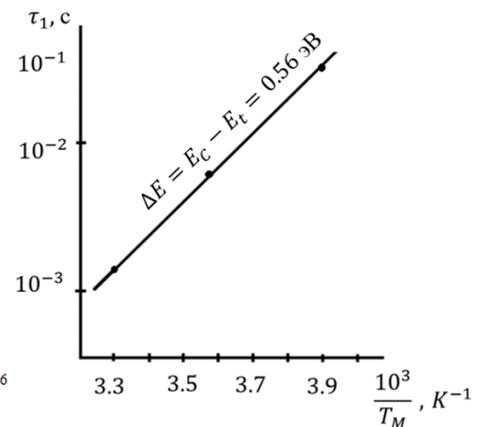


Рис. 2. Экспериментальный график Арениуса

Для моделирования зависимостей (1, 2, 3, 4) использован профиль концентрации мелких доноров, показанный на рисунке 1.

Результаты компьютерного моделирования приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты моделирования

$\Delta E_{t1}$ , эВ	$\Delta E_{t2}$ , эВ	$\Delta E_{t3}$ , эВ	$\Delta E_{t4}$ , эВ
0.512	0.541	0.518	0.478

В первом столбце таблицы рассчитана энергия ионизации глубоких уровней с учетом концентраций мелких доноров  $N_1$  и  $N_2$  (1).

Во втором столбце таблицы учитывается влияние толщины области эмиссии с ГЦ  $\delta = d - \lambda$ , толщина ОПЗ  $d$  (2).

В третьем столбце исключено влияние толщины области эмиссии с ГЦ  $\delta$  и толщина слоя неполной ионизации  $\lambda$  (3).

Четвертый столбец отображает влияние толщины ОПЗ  $d$  и толщины области эмиссии с ГЦ  $\delta$ .

Для заданного значения энергии ионизации  $\Delta E = E_C - E_t = 0.56$  эВ проведено моделирование зависимости коэффициента  $\theta$  для двух случаев. На рисунке 3 представлены зависимости для различных значений  $E_F - E_t$  при  $V_K = 0.5$  В. Из рисунка 3 видно, что влияние

фактора  $\theta$  на расчеты параметров глубоких центров возрастает с ростом обратного напряжения  $V$ . Аналогичные результаты получены в случае, когда  $V = 0$  В, а  $V_K$  меняется в пределах 0..5 В (рис. 4)

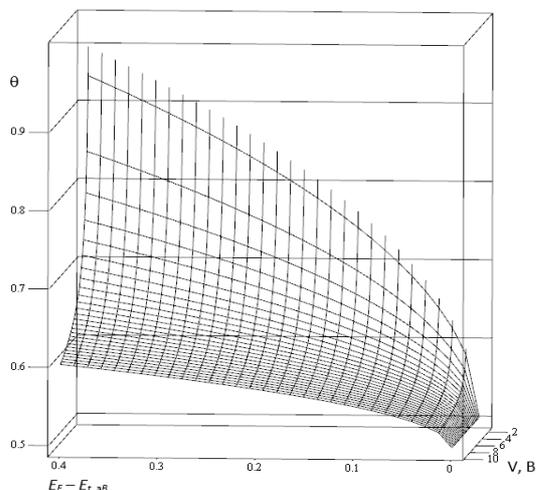


Рис. 3. Зависимость коэффициента  $\theta$  от напряжения  $V$  и энергии ГЦ  $E_F - E_t$ , при  $V_K = 0.5$  В

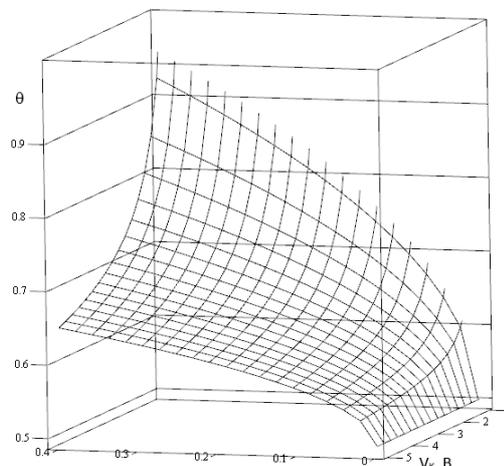


Рис. 4. Зависимость коэффициента  $\theta$  от напряжения  $V_K$  и энергии ГЦ  $E_F - E_t$ , при  $V = 0$  В

Таким образом, проведенное моделирование релаксационных процессов показывает, что результаты расчетов  $\Delta E_t$  по формулам (1-4) предложенных в работах [1], [2] находится в пределах погрешности и соответствует значению полученному по экспериментальному графику Аррениуса  $\Delta E = E_C - E_t = 0.56$  эВ. При этом наилучшая корреляция результатов расчета с экспериментальными данными наблюдается при использовании соотношения (2). Кроме того, учитывая зависимости коэффициента  $\theta$  от напряжения (рисунок 4), можно повысить точность определения концентрации глубоких центров.

### Библиографический список

1. Гудзев В.В., Зубков М.В., Литвинов В.Г. Особенности определения ионизации равномерно распределенных дефектов в полупроводниковых барьерных структурах. ISSN 1995–4565. Вестник РГРТУ. №2 (выпуск 40). –Рязань, 2012. –С. 75–79.
2. Гудзев В.В., Зубков М.В., Кусакин Д.С., Литвинов В.Г. Способ определения ионизации равномерно распределенных дефектов с глубокими уровнями в полупроводниковых барьерных структурах с неоднородным легирование базы. ISSN 1995–4565. Вестник РГРТУ. №2 (выпуск 52). –Рязань, 2015. –С. 163–168.

УДК 53.043; ГРНТИ 29.19.31

## ПРИМЕНЕНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ НАУЧНОЙ ПРОГРАММНОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ AFORS-HET В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ

А.Д. Маслов, Е.В. Безуглая

Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, Maslov.a.d@mail.ru

*Аннотация.* В данной работе проведено обоснование использования специализированной современной программы AFORS-HET, получившей широкое распространение в научных кругах для исследования характеристик солнечных элементов, в образовательном процессе подготовки обучающихся технических специальностей. Полученные навыки работы в программной среде актуальны и востребованы в научно-технических центрах, конструкторских бюро, компаниях-производителях новой и активно развивающейся в России отрасли солнечной энергетики.

*Ключевые слова.* AFORS-HET, моделирование, солнечные элементы, образовательный процесс

## APPLICATION OF SPECIAL SCIENTIFIC SOFTWARE TO INVESTIGATE CHARACTERISTICS OF SOLAR CELLS AFORS-HET IN EDUCATION

A.D. Maslov, E.V. Bezuglaya

Ryazan State Radio Engineering University,  
Russia, Ryazan, Maslov.a.d@mail.ru

*Abstract.* This paper describe application of special widespread scientific software AFORS-HET in education. It helps students to get the necessary knowledge about physics and investigating solar cells. This abilities are interested by Russian research and development centers, manufacturers that deal with solar energetics.

*Keywords.* AFORS-HET, simulation, solar cells, education

### Введение

На сегодняшний день в мировом научном сообществе для моделирования характеристик перспективных высокоэффективных солнечных элементов наибольшую популярность приобрела программная среда AFORS-HET [1, 2]. Эта программа разработана научной группой из Института материалов и энергии имени Гельмгольца, Берлин, Германия, и находится в свободном доступе на сайте организации [3]. Пакет прикладных программ AFORS-HET изначально был предназначен для моделирования энергетических зонных диаграмм простейших полупроводниковых гомопереходных элементов, однако в настоящее время текущая версия уже позволяет моделировать не только энергетические, но и электрофизические, а также оптические характеристики как простых, так и сложных, например, каскадных гетеропереходных полупроводниковых приборов. Поскольку программа получила широкое распространение в специализированных научных кругах, то представляется актуальным ее внедрение в образовательный процесс в качестве лабораторных работ для моделирования характеристик серийно выпускаемых в России солнечных элементов. Таким образом обучающиеся в ВУЗах страны имеют возможность получить навыки моделирования, которые могут быть полезны на этапе создания и отработки технологического процесса полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей.

### Обоснование использования AFORS-HET

Программа позволяет изучать ключевые энергетические, электрофизические и электрооптические характеристики исследуемых солнечных элементов:

энергетические характеристики и зонные диаграммы;

вольт-амперные характеристики (напряжение холостого хода, ток короткого замыкания, коэффициент заполнения ВАХ и эффективность фотоэлектрического преобразования);

квантовая эффективность;

время жизни неосновных носителей заряда;

Помимо этого в программе предусмотрены следующие методы исследования:

вольт-фарадные характеристики;

спектроскопия адмиттанса;

зависимость емкости от температуры;

квазиравновесная стационарная фотопроводимость;

фото- и электролюминисценция.

В программе также есть и другие методики, представленные на рисунке 1.

Программа предусматривает освещение как монохроматическим, так и светом, соответствующим спектру Солнца, с фронтальной или противоположной стороны с различной контролируемой интенсивностью света.

Также возможно приложение внешнего напряжения смещения на структуру, в том числе, под действием освещения.

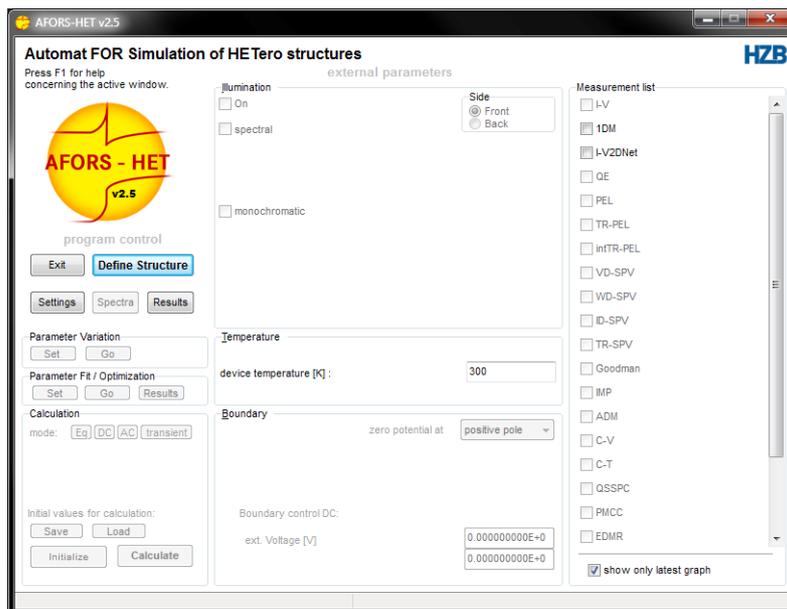


Рис. 1. Лицевая панель программной среды AFORS-HET, на которой представлены предусмотренные методы исследования. Все сокращения соответствуют общепринятым англоязычным аббревиатурам [3]

### Особенности задания структуры

Пользователь имеет возможность задать необходимое количество слоев, выбрать модель переноса носителей заряда через границы раздела между слоями, определить тип контакта металл-полупроводник, в том числе задать работу выхода электронов из материала, задать угол текстурирования поверхности, задать последовательное и/или параллельное шунтирующее сопротивление структуры, задать показатель преломления границы воздух/материал (рис. 2).

### Особенности исходных параметров материалов используемых слоев

Для пользователя предусмотрено задание электрических свойств материала, оптических свойств, а также параметров дефектных состояний слоя (рис. 3).

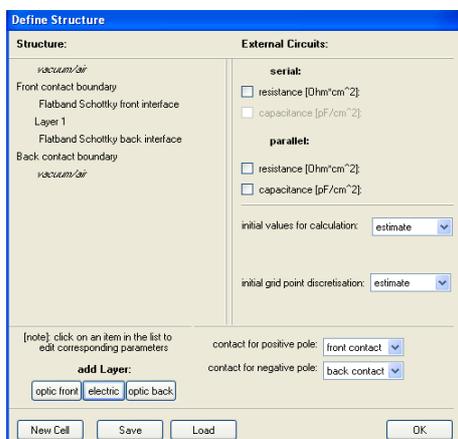


Рис. 2. Задание свойств структуры солнечного элемента

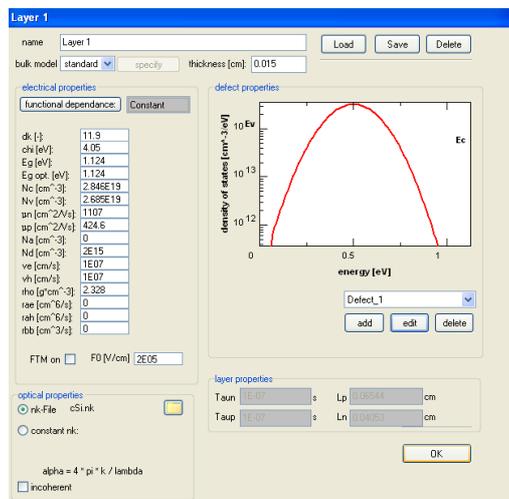


Рис. 3. Задание электрических и оптических свойств слоя, а также параметров дефектов. Все сокращения соответствуют общепринятым англоязычным аббревиатурам

Исключительной особенностью этой программной среды является задание как концентрации дефектных состояний, их сечения захвата, а также их энергетического распределения, в том числе характерного для неупорядоченного некристаллического полупроводникового слоя, например аморфного кремния.

### Пример реализации лабораторной работы по измерению ключевых характеристик солнечного элемента

В качестве примера использования программной среды AFORS-HEТ для обучающихся в образовательном процессе можно реализовать работу по исследованию ключевых фотоэлектрических характеристик солнечного элемента.

Для примера зададим простую структуру, состоящую из гетероперехода тонкого слоя аморфного кремния, нанесенного на подложку кристаллического кремния. Введем ряд упрощений: пренебрежем квантово-механическими эффектами на границе раздела, зададим идеальные невыпрямляющие металлические контакты, работу элемента будем оценивать при комнатной температуре (300 К), зададим нулевое последовательное и бесконечно большое параллельное шунтирующее сопротивление.

Электрофизические, энергетические и оптические параметры материалов слоев задаются согласно библиографическим данным [4]. Зададим точечный единичный дефект в слое кристаллического кремния с концентрацией много меньшей концентрации легирующей примеси. В аморфном кремнии зададим доноро- и акцептороподобные дефектные состояния, распределенные по Гауссу, согласно классическим представлениям о некристаллических неупорядоченных твердых телах [5].

Будем освещать элемент со стороны слоя аморфного кремния солнечным светом со спектром и значением интенсивности, соответствующим международному стандарту AM1.5G.

Измерим световую вольт-амперную характеристику в диапазоне от -0,8 до 0,8 В (рис. 4). Определим ключевые электрофизические характеристики прибора: напряжение холостого хода  $V_{oc} = 0,647$  В, ток короткого замыкания  $J_{sc} = 34,86$  мА, коэффициент заполнения ВАХ  $FF = 80,52$  % и эффективность фотоэлектрического преобразования  $Eff = 18,17$  %.

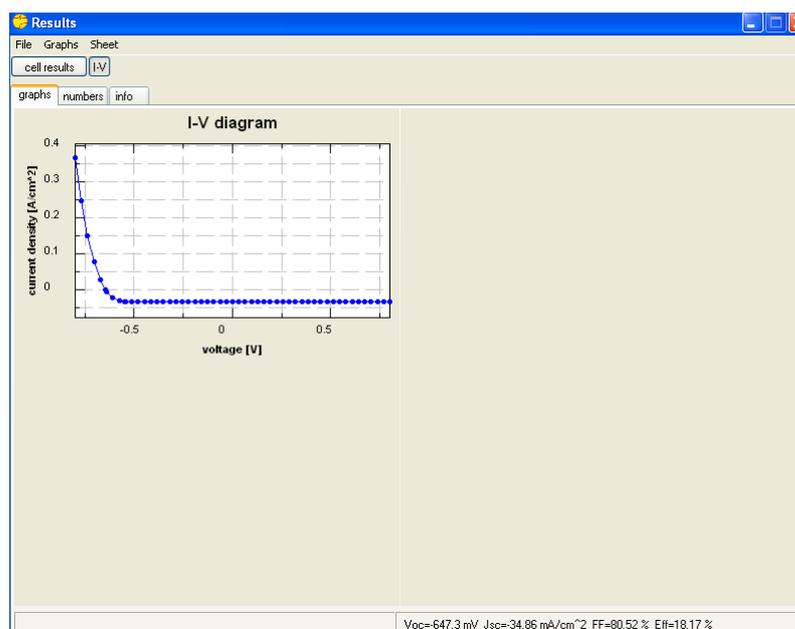


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика и ключевые электрофизические параметры заданной структуры

Таким образом работа сводится к следующему алгоритму:

задание количества слоев, общего последовательного и параллельного сопротивления, типа контакта металл-полупроводник и механизма переноса через границу раздела;

задание электрофизических и оптических свойств материалов слоев, а также наличия и особенностей энергетического распределения, электрических, оптических свойств дефектных состояний в материале;

задание источника и типа возбуждения (электрическое или оптическое);

выбор метода исследования;

обработка полученных данных.

### Выводы

Использование данного программного продукта является актуальным в вопросе подготовки кадров для отрасли солнечной энергетики, поскольку навыки моделирования полученные в данной среде могут способствовать всестороннему исследованию солнечного элемента, что может способствовать оптимизации конструкции, технологических параметров и условий с целью повышения выходных потребительских параметров.

AFORS-HET это перспективный научный пакет прикладных программ, который может быть интегрирован в образовательный процесс технических специальностей высших учебных заведений, позволяющий получить представление о физических процессах, происходящих в элементе, влиянии параметров материалов слоев и границ раздела на свойства готового прибора, методах диагностики характеристик элемента, а также конструкции и выходных потребительских характеристиках устройства. Такие навыки на сегодняшний день востребованы активно развивающимися Российскими производителями солнечных элементов.

### Библиографический список

1. Wang Lisheng, Chen Fengxiang, and Ai Yu. Simulation of High Efficiency Heterojunction Solar Cells with AFORS-HET // Journal of Physics: Conference Series 276 (2011) 012177
2. [Jean-Paul Kleider](#), [Jose Alvarez](#), [Alexander Vitalievitch Ankudinov](#), [Alexander Sergeevitch Gudovskikh](#), [Ekaterina Vladimirovna Gushchina](#), [Martin Labrune](#), [Olga Alexandrovna Maslova](#), [Wilfried Favre](#), [Marie-Estelle Gueunier-Farret](#), [Pere Roca i Cabarrocas](#), and [Eugene Ivanovitch Terukov](#). Characterization of silicon heterojunctions for solar cells // [Nanoscale Res Lett.](#) 6(1) (2011) 152
3. R. Varache, C. Leendertz, M. E. Gueunier-Farret, J. Haschke, D. Muñoz, and L. Korte. "Investigation of Selective Junctions Using a Newly Developed Tunnel Current Model for Solar Cell Applications." Solar Energy Materials and Solar Cells 141 (2015) 14–23
4. Liu Jian, Huang Shihua, and He Lü. Simulation of a high-efficiency silicon-based heterojunction solar cell // Journal of Semiconductors, 36(4) (2015) 044010
5. Madan A., Melvin P. Shaw. The physics and applications of amorphous semiconductors. Academicpress, INC. 1988. - 545 p.

УДК 621.315.592; ГРНТИ 29.19.04

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ SCALE-SPACE К ИССЛЕДОВАНИЮ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТЕЙ

А.В. Алпатов, Н.В. Рыбина, Д.Ю. Трынов

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, trynovdmirii@mail.ru*

*Аннотация.* В данной работе описан метод scale-space для исследования корреляционных свойств сложных поверхностей материалов нано- и микроэлектроники. Проведена апробация метода на моделированных и реальных поверхностях. Проведено сравнение зависимостей флуктуационной функции от масштаба, полученных для исходных поверхностей и поверхностей, обработанных методом scale-space.

*Ключевые слова.* Корреляционные свойства, scale-space, 2D DFA, рельеф поверхности, степень сглаживания

## SCALE-SPACE THEORY APPLICATION TO INVESTIGATE SURFACE CORRELATION PROPERTIES

A.V. Alpatov, N.V. Rybina, D.Yu. Trynov

Ryazan State Radioengineering University,

Russia, Ryazan, trynovdmitrii@mail.ru

*Abstract.* The scale-space theory to investigate complex surfaces correlation properties materials for nano- and microelectronics is described. The method testing on the model and the real surfaces is carried out. The comparison of the fluctuation function-scale dependences obtained for the original surfaces and the scale-space method processed surfaces is done.

*Keywords.* Correlation properties, scale-space theory, 2D DFA, surface relief, scale parameter

### Введение

Самоорганизующиеся структуры представляют большой интерес в микро- и нано-электронике. Рельеф поверхности отражает структуру материала в объеме. Рельеф можно получить с помощью методов атомно-силовой, сканирующей туннельной, просвечивающей электронной, растровой электронной микроскопии.

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

При исследовании сложных самоорганизующихся структур часто возникает задача разложения их на составляющие, т.е. выделения частотных характеристик. Использование методов 2D DFA и СВИ не всегда позволяет решить эту задачу. Например, на зависимости флуктуационной функции от масштаба бывает много перегибов, которые в результате сливаются.

Данную проблему может решить метод scale-space [6-8].

### Методика scale-space DFA

В результате развития метода «scale-space» была продемонстрирована его работоспособность для двумерного случая. В данной работе используется изображение поверхности для изучения ее свойств.

Методика исследования поверхностей материалов с помощью scale-space DFA заключается в следующем:

- 1) получение изображение 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 функция при различных масштабах позволяет определить значения скейлингового показателя и корреляционного вектора, на основании которых можно получить необходимую информацию о сложной структуре поверхности.

### Исследование модельных поверхностей

В данной работе модельная поверхность создавалась путем наложения друг на друга трех синусоидальных составляющих различных амплитуд и периодов (рис. 1). Условно были выбраны следующие значения: периоды 8 нм, 16 нм, 32 нм для соответствующих амплитуд 10 нм, 20 нм, 40 нм.

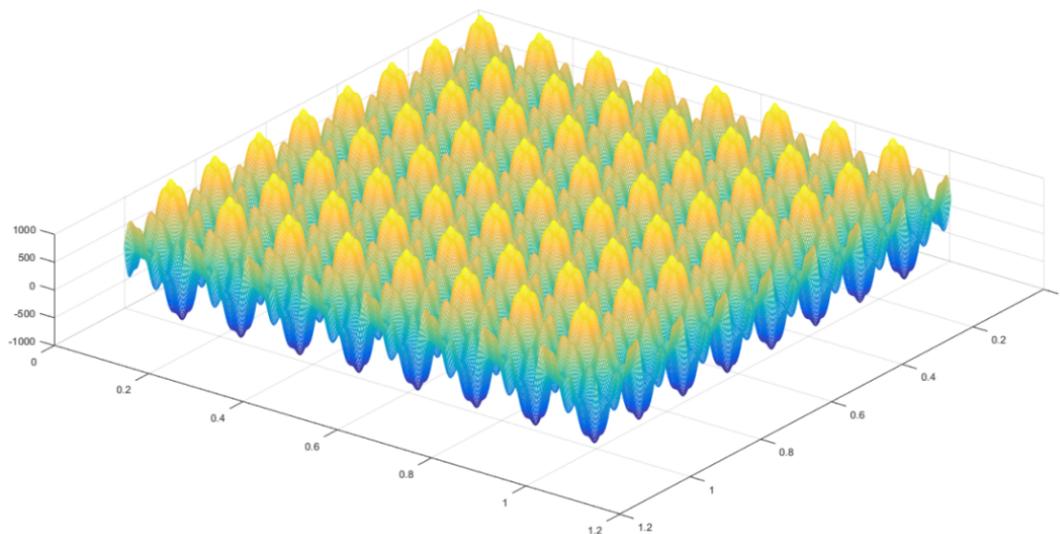


Рис. 1. Модельная поверхность

Далее проводилась обработка поверхности методом scale-space. На рисунке 2 показаны зависимости флуктуационной функции от масштаба для исходной поверхности и обработанных поверхностей методом scale-space при различных степенях сглаживания.

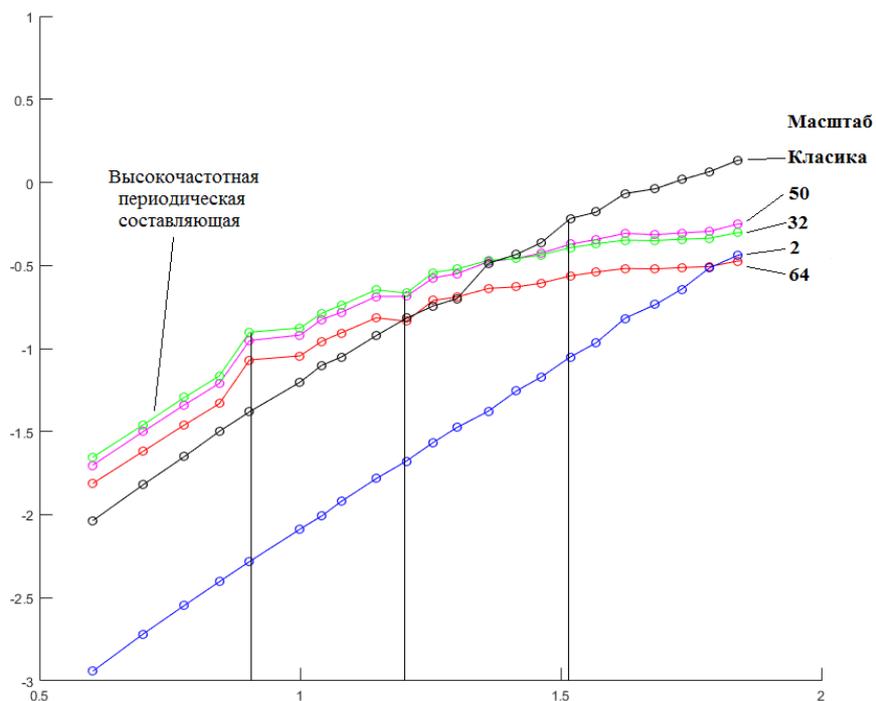


Рис. 2. Зависимость флуктуационной функции от масштаба для модельной поверхности

Масштаб «Исходный» соответствует исходному изображению поверхности. Значение масштаба «2» соответствует максимальному сглаживанию, а значение «64» – минимальному.

Как видно из графика, на зависимости флуктуационной функции от масштаба для исходной поверхности четко наблюдается только один перегиб. Использование методики scale-space DFA позволило выявить еще два перегиба. Рассчитанные по этим перегибам значения корреляционных векторов составляют 8; 16 и 35 нм. Это практически полностью совпадает с истинными значениями периодов синусоидальных составляющих (8; 16 и 32 нм).

В данном случае метод scale-space позволил выявить высокочастотные периодические составляющие. Это доказывает, что методика scale-space DFA может использоваться при исследовании сложных самоорганизованных поверхностей.

### Исследование реальных поверхностей

В качестве экспериментальных поверхностей были взяты изображения пленок nc-Si/a-Si:H, изученных в работе [5]. Плёнки a-Si:H толщиной 300 нм были изготовлены методом плазмохимического осаждения из газовой фазы при разложении смеси моносилана ( $\text{SiH}_4$ ) и аргона (Ar). Температура подложки (кварц) в процессе осаждения пленки была равна 240 °С. Обработка пленок a-Si:H фемтосекундными импульсами осуществлялась излучением лазерной системы на основе кристалла Yb:KGW с частотой повторения импульсов 200 кГц и длиной волны 1030 нм. Длительность импульсов для образца №1 и №2 (рис. 3) составляла 300 фс. Использовался сканирующий метод обработки поверхности a-Si:H. Мощность лазерного излучения для образца №1 составляла 360 мВт, для образца №2 – 280 мВт.

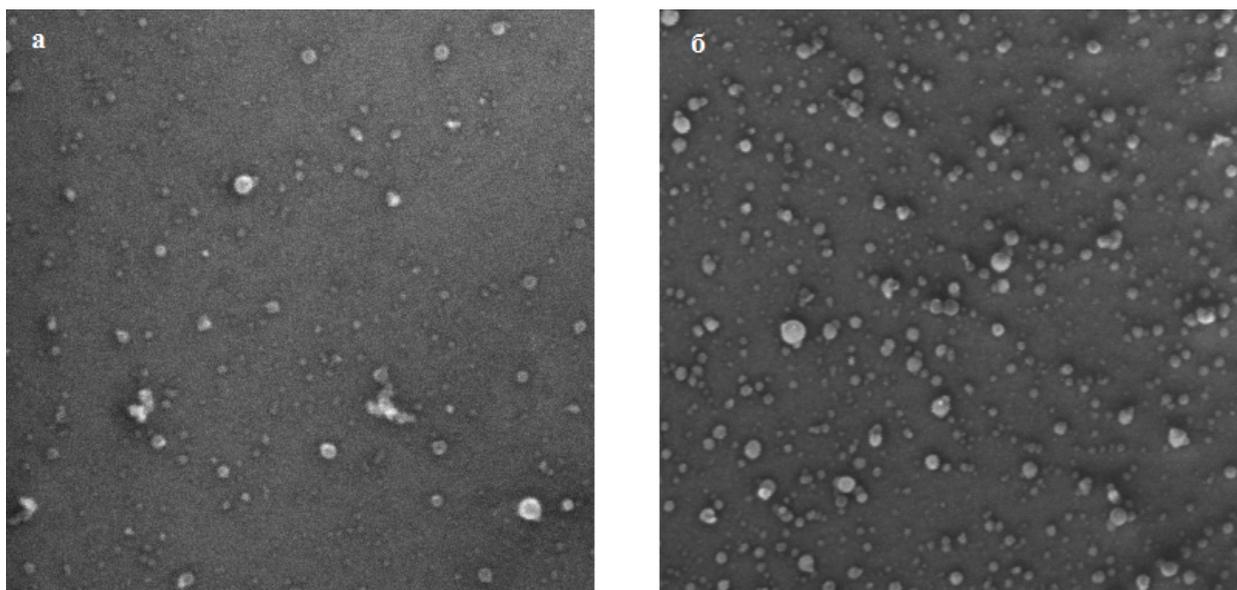


Рис. 3. РЭМ-изображение поверхности образцов: а - №1, б - №2

Графики флуктуационных функций для данных структур представлены на рисунках 4 и 5.

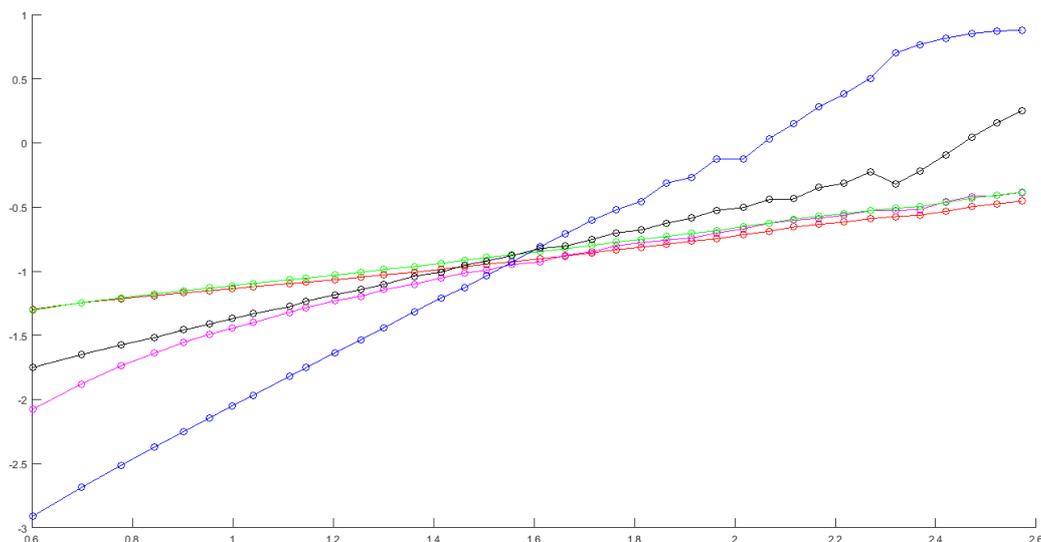


Рис. 4. Зависимость флуктационной функции от масштаба для образца №1

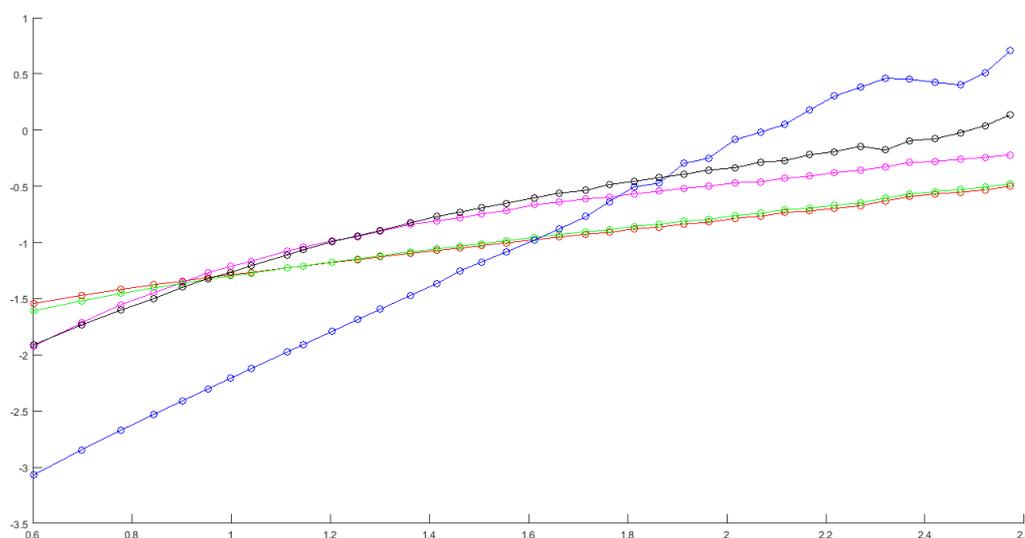


Рис. 5. Зависимость флуктационной функции от масштаба для образца №2

На графиках флуктационной функции наблюдаются перегибы на разных участках кривых. Наличие нескольких перегибов на графике соответствует наличию нескольких корреляционных векторов в структуре пленок nc-Si/a-Si:H. С помощью метода scale-space при различных степенях сглаживания удалось выявить корреляционные векторы на различных масштабах.

### Выводы

Представлены результаты исследования сложных модельных и реальных поверхностей методом scale-space. Показано, что методика scale-space DFA позволяет оценивать структурную сложность поверхностей. Апробация методики scale-space DFA проведена на пленках nc-Si/a-Si:H.

### 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. Cybern. 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 53.086; ГРНТИ 29.19.22

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ С ПОМОЩЬЮ РАСТРОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

И.О. Кошкин, Н. Б. Рыбин

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Рязанская область, Рязань, ygrik13@yandex.ru*

*Аннотация.* В данной работе приводится алгоритм проведения исследований материалов солнечной энергетики методом растровой электронной микроскопии, определены оптимальные режимы исследования поверхности текстурированных кремниевых пластин, применяемых в солнечной энергетике.

*Ключевые слова.* Солнечная энергетика, растровая электронная микроскопия, методика измерения.

## RESEARCH METHODOLOGY THE STRUCTURE OF THE SURFACE MATERIALS OF SOLAR ENERGY WITH THE SCANNING ELECTRON MICROSCOPY

I. O. Koshkin, N. B. Rybin

*Ryazan State Radioengineering University,  
Ryazan, Russia, ygrik13@yandex.ru*

*Abstract.* In this paper, the algorithm of research of solar energy materials by raster electron microscopy is presented, the optimal study modes of the surface of textured silicon plates used in solar energy are determined.

*Keywords.* Solar energy, scanning electron microscopy, methods of measurement.

### Введение

Бурное развитие нанотехнологий позволило создавать новые наноструктурные материалы, применяемые для различных целей. Одной из них является применение наноструктурных материалов для изготовления фотоэлектрических преобразователей.

По сравнению с прочими методами получения энергии, использование фотоэлектрических преобразователей имеет ряд положительных особенностей, благодаря которым применение солнечных элементов получило такое широкое распространение. К таким особенностям относят: постоянная работа, не требуют топлива, бесшумность процесса получения энергии, длительный срок безаварийной службы, надежность (в ФЭП на кристаллическом кремнии), общедоступность, возможность произвольного изменения мощности системы, экологичность.

К отрицательным сторонам фотоэлектрических преобразователей можно отнести сниженную производительность солнечных батарей в зимнее время, низкую эффективность для использования в отопительных системах, высокую себестоимость и др.

Основными параметрами материалов солнечной энергетики являются коэффициент полезного действия, ток короткого замыкания, напряжение холостого хода, коэффициент заполнения ВАХ [1]. На величины этих параметров оказывает значительное влияние коэффициент поглощения поверхности; увеличение этого параметра приводит к качественному улучшению параметров фотоэлектрического преобразователя.

Для увеличения коэффициента поглощения применяются различные способы, в том числе текстурирование поверхности. Поэтому изучение влияния структуры поверхности фотоэлектрического преобразователя на коэффициент поглощения является актуальной задачей.

Для решения этой задачи была разработана методика исследования структуры поверхности материалов солнечной энергетики с помощью растровой электронной микроскопии.

### Алгоритм проведения исследования

Данная методика разрабатывалась для растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6610LV. Это РЭМ с вольфрамовым катодом, имеющий возможность проводить измерения в низком вакууме.

Проведение исследований с помощью растрового электронного микроскопа проводится с помощью алгоритма, представленного на рисунке 1.

Выбор режима вакуума производится в зависимости от электрической проводимости образца. Использование высокого вакуума (давление в камере 10-4 Па) позволяет достичь максимального пространственного разрешения благодаря минимальному рассеянию электронного пучка об молекулы воздуха, находящихся в измерительной ячейке. Однако если образец не обладает достаточной проводимостью, на его поверхности под действием электронного пучка накапливается отрицательный пространственный заряд, приводящий к ухудшению получаемого изображения. Режим низкого вакуума (давление в измерительной камере 1-100 Па) устраняет пространственный заряд, но уменьшает пространственное разрешение микроскопа.

Выбор сигнала. Растровый электронный микроскоп JSM-6610LV позволяет использовать сигналы, перечисленные в таблице 1.

Таблица 1 – Доступные для JSM-6610LV виды сигналов

№	Сигнал	Тип данных
1	SEI	SEI – изображение во вторичных электронах
2	BEIW	BEC – композиционное изображение в режиме отражённых электронов
		BET – топографическое изображение в отражённых электронах
		BES – стереоскопическое изображение в отражённых электронах

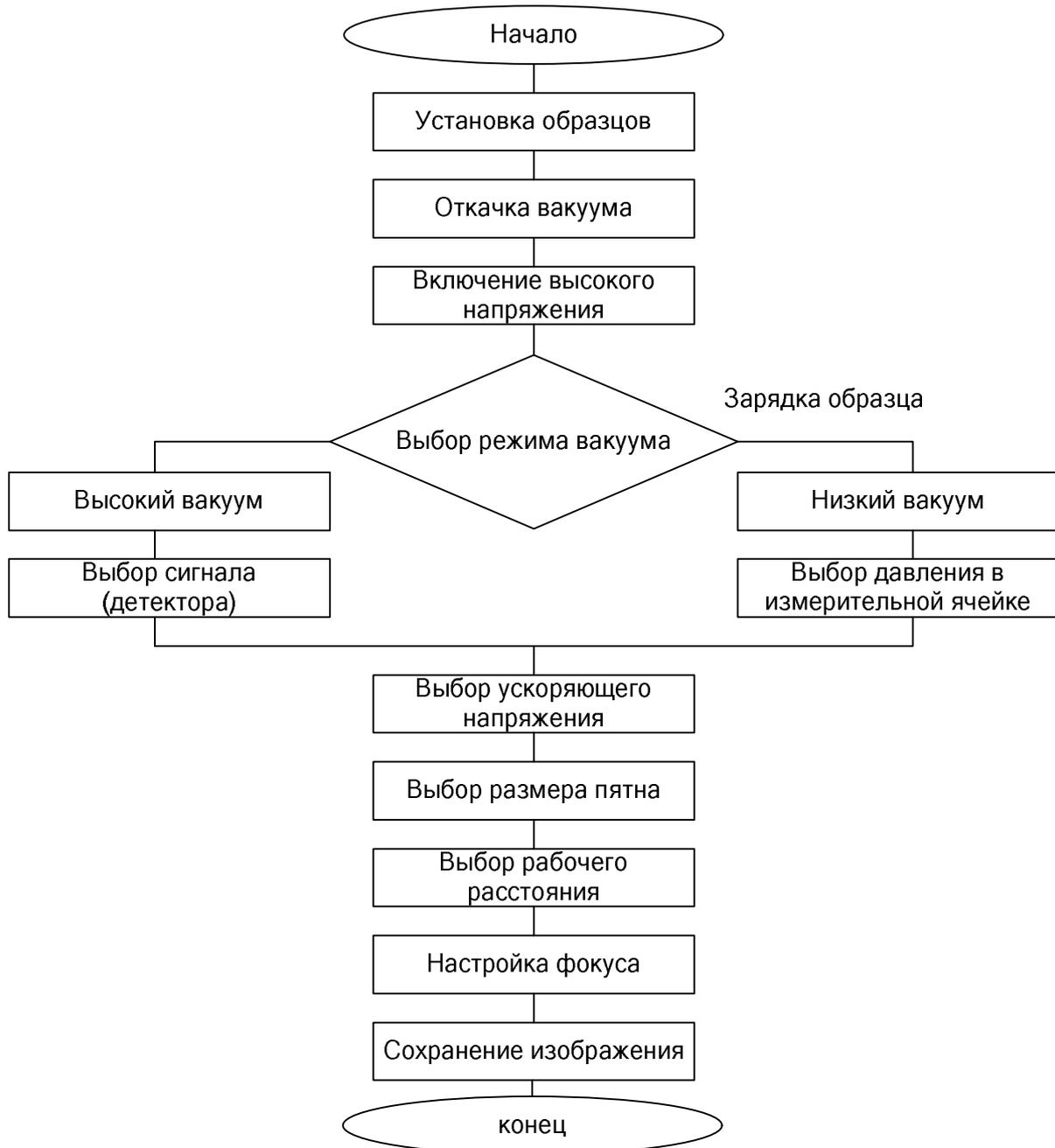


Рис. 1. Алгоритм проведения исследований СЭ методом РЭМ

Наилучшим разрешением обладают изображения, полученные в сигнале вторичных электронов. Сигнал отраженных электронов целесообразно использовать в режиме низкого вакуума или для получения композиционного контраста.

Ускоряющее напряжение выбирается из условия получения наилучшего разрешения и яркости изображения. С уменьшением ускоряющего напряжения уменьшается область возбуждения образца электронным пучком, что позволяет увеличить разрешение, однако интенсивность исследуемых сигналов (вторичных или отраженных электронов) уменьшается и возрастает интенсивность шумов. Подбор ускоряющего напряжения осуществлен эмпирически.

Параметр «размер пятна» (spotsize (SS)) определяет, какая часть от общего потока электронов пролетает через апертурную диафрагму. Этот параметр регулируется изменением оптической силы конденсорной линзы (рис. 2). Конденсорная линза позволяет уменьшать

неоднородности пучка и отсекает рассеянные электроны. Наилучшее разрешение получается при наименьшем значении  $SS$ , однако при этом теряется яркость изображения.

Таким образом, для получения наилучшего пространственного разрешения, контраста и яркости картинки, необходимо работать в режиме высокого вакуума, в сигнале вторичных электронов, при относительно высоком ускоряющем напряжении и относительно малом размере пятна.

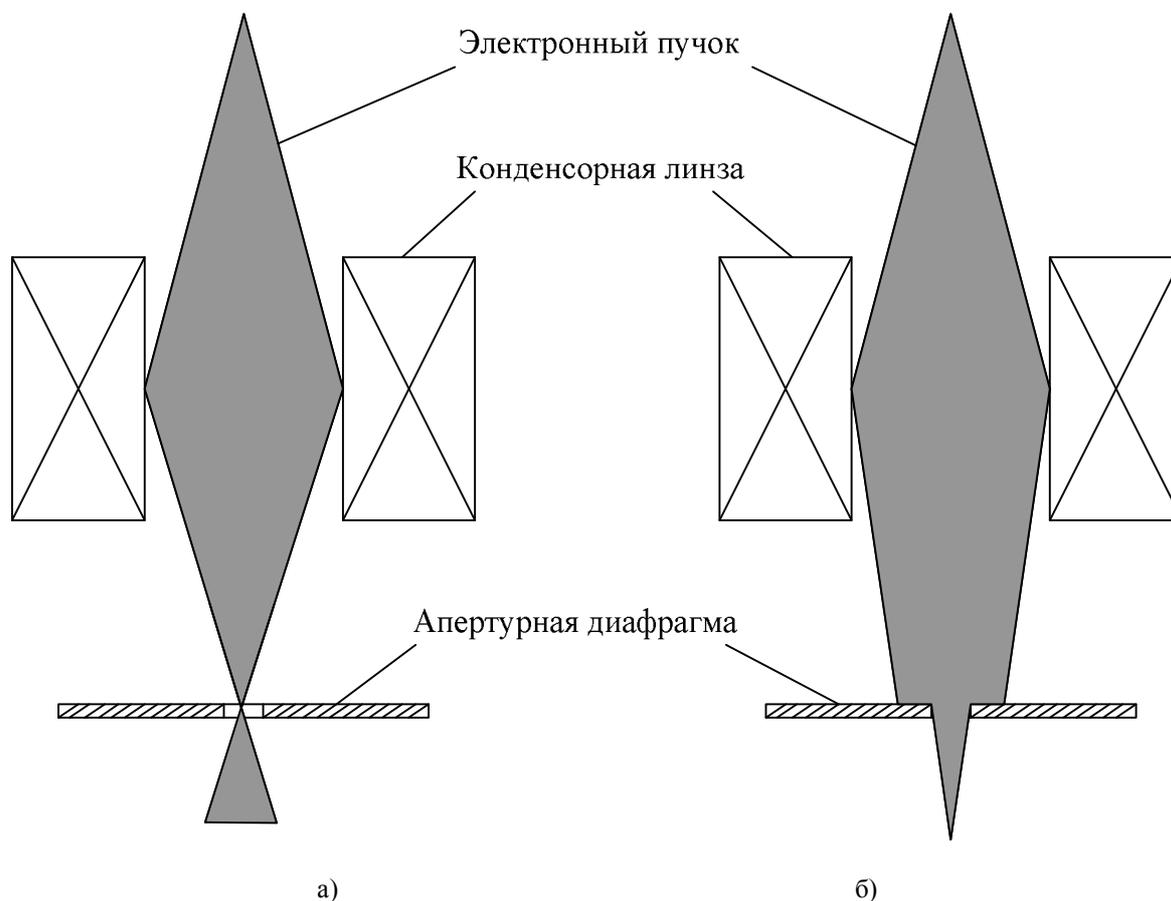


Рис. 2. Схематичное изображение прохождения электронов через конденсорную линзу и апертурную диафрагму: а –  $SS \approx 99$  отн.ед.; б -  $SS \approx 30$  отн.ед.

### Методика проведения исследования

В данной работе согласно алгоритму, приведенному на рисунке 1, была разработана методика, используемая непосредственно для исследования поверхности текстурированного кремния, предназначенного для создания фотоэлектрических преобразователей.

На этапе «Установка образца» выбрано оптимальное количество областей на исследуемых пластинках, равное пяти (рис. 3), которое позволяет максимально охватить всю площадь образца.

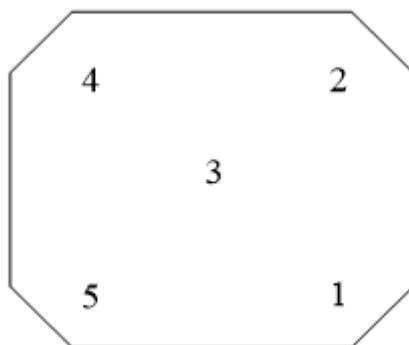


Рис. 3. Выбор областей на поверхности пластины для проведения исследований

В этих точках получают изображения поверхности текстурированного кремния, закрепляя его лицевой стороной вверх или боковой стороной вверх. Для крепления боковой стороной из пластины выкалываются куски согласно рисунку 3 и закрепляются на специальном держателе сколом вверх.

Проверка проводимости образцов показала, что исследования могут проводиться в высоком вакууме. Оптимальное ускоряющее напряжение и размер пятна были подобраны эмпирически и составили 30 кВ и 30 отн.ед. соответственно.

#### Выводы

В результате исследования были подобраны оптимальные режимы исследования поверхности текстурированного кремния методом растровой электронной микроскопии. Разработанная методика позволяет сократить время исследования подобных образцов. Полученные таким образом результаты могут быть сопоставлены с результатами исследования оптических характеристик фотоэлектрических преобразователей (например, коэффициента поглощения), и на основании таких исследований могут быть сделаны выводы о влиянии структуры поверхности на оптические характеристики фотоэлектрических преобразователей.

Работа выполнена с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования РГРТУ.

#### Библиографический список

Фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии [электронный ресурс] URL: [http://www.gigavat.com/ses\\_preobrazovateli\\_1.php](http://www.gigavat.com/ses_preobrazovateli_1.php) (8.02.2018)

УДК 537.311.322; ГРНТИ 29.19.31

### УСТАНОВКА ЕМКОСТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ГЛУБОКИХ УРОВНЕЙ

**В.В. Гудзев, К.Н. Краснов**

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, [ogner62rus@mail.ru](mailto:ogner62rus@mail.ru), [valerygudzev@yandex.ru](mailto:valerygudzev@yandex.ru)*

*Аннотация.* В данной работе описывается реализация преобразователя емкость напряжение. Приводится алгоритм работы преобразователя. а так же достоинство измерения полупроводниковых наноструктур методом емкостной спектроскопии.

*Ключевые слова.* Релаксационная спектроскопия, глубокие уровни, преобразователь емкость напряжение

## INSTALLATION OF CAPACITIVE SPECTROSCOPY OF DEEP LEVELS

V.V. Gudzev, K.N. Krasnov

Ryazan State Radio Engineering University,

Russia, Ryazan, [ogner62rus@mail.ru](mailto:ogner62rus@mail.ru), [valerygudzev@yandex.ru](mailto:valerygudzev@yandex.ru)

*Abstract.* This paper describes the implementation of the voltage capacitance Converter. The algorithm of the transducer operation is given. as well as the dignity of measurements of semiconductor nanostructures by the method of capacitance spectroscopy.

*Keywords.* Relaxation spectroscopy of deep levels, the inverter capacity voltage

Дефекты с глубокими уровнями во многом определяют качество изделий, производимых на основе полупроводниковых наноструктур. Так, например, наличие глубоких уровней провоцирует увеличение обратного тока обратно смещенной барьерной структуры, что является одним из признаков низкого качества прибора на основе этого перехода. Так же наличие глубоких центров снижает коэффициент передачи по току в транзисторах, снижает пробивное напряжение в барьерных структурах. Поэтому своевременное выявление данных дефектов позволяет еще на этапе производства выявить и устранить заведомо некачественные или бракованные изделия и не производить материальных и временных затрат на их изготовление.

Релаксационная спектроскопия глубоких уровней зарекомендовала себя как высокоэффективный метод для изучения свойств и характеристик структур. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней - чувствительный, легко реализуемый метод, позволяющий определить энергию ионизации, концентрацию глубоких уровней, сечение захвата носителей заряда, параметры разрывов зон и т.д..

Суть метода РСГУ заключается в случае опустошения ловушек основных носителей тока в области пространственного заряда перехода. На основании принципа детального равновесия скорость эмиссии электронов  $\alpha_{\tau_i}$  с глубокого уровня  $E_{\tau_i}$  определяется соотношением:

$$\alpha_{\tau_i} = \frac{1}{\tau_i} = \frac{\sigma_i V_n N_C}{g_i} \exp \frac{-\Delta E_{\tau_i}}{kT} \quad (1)$$

где  $\sigma_i$  – сечение захвата носителей;  
 $V_n$  – средняя тепловая скорость электронов;  
 $N_C$  – эффективная плотность состояний в зоне проводимости полупроводника;  
 $\Delta E_{\tau_i}$  – энергия ионизации глубоких центров;  
 $g_i$  – коэффициент вырождения глубоких центров.

По отношению к экспоненциальному множителю предэкспоненциальный член можно считать слабо зависящим от температуры, и в координатах Аррениуса зависимость (Т) линейна с наклоном, характеризующим величину  $\Delta E_{\tau_i}$ . При изменении температуры образца и периодическом заполнении и опустошении глубоких центров регистрирующее устройство, настроенное на постоянную времени  $\tau_i$ , зафиксирует пики сигнала двух ловушек (рис. 1) соответственно при температурах  $T_{m1}$  и  $T_{m2}$ .

Сечения захвата носителей тока ловушками  $\sigma_i$  могут быть вычислены по известным величинам  $N_C$ ,  $\Delta E_{\tau_i}$  и  $V_n$  для диапазона температур, в котором фиксируются пики глубоких центров. Эти величины подставляются в формулу (1). Амплитуда регистрируемого сигнала связана с концентрацией глубоких центров. Однако на величину сигнала влияет, кроме того, пространственное расположение перезаряжающихся центров между границами области про-

странственного заряда, тип ловушки, способ регистрации РСГУ, величина выбираемой постоянной времени релаксации.

Рассмотрим относительное изменение емкости перехода  $[\Delta C/C]_x$ , обусловленное захватом  $n(x)$  электронов в интервале  $\Delta x$ , удаленном на расстояние  $x$  от границы раздела  $p^+ - n$ -перехода (диода Шоттки, МДП- структуры):  $0 < x < W$ . Из уравнения Пуассона следует, что изменение напряжения, индуцированное захватом  $n(x)$  электронов в окрестности точки  $x$ , равно:

$$\Delta V = \frac{e}{\epsilon} [N_{DM} \cdot W \cdot \Delta W - n(x) \cdot x \cdot \Delta x] , \quad (2)$$

где  $N_{DM}$  – концентрация мелких доноров.

Для режима регистрации изменения емкости структуры при напряжении смещения ( $\Delta V=0$ ) получим:

$$\left[ \frac{\Delta C}{C} \right] = - \frac{n(x)}{N_{DM} \cdot W^2} x \cdot \Delta x . \quad (3)$$

Отметим, что чувствительность емкости перехода к перезарядке центров линейно изменяется от нуля (перезарядка глубоких центров вблизи границы раздела перехода) до максимального значения (перезарядка глубоких центров на внешней границе области пространственного заряда). При емкостной РСГУ это справедливо для ловушек как основных, так и не основных носителей тока.

Метод РСГУ позволяет определять все основные параметры ловушек, расположенных в слое объемного заряда (СОЗ) полупроводниковых структур. В отличие от других термостимулированных методов контроля параметров ГУ (термостимулированная поляризация, ток, емкость и т.д.), при РСГУ отпадает необходимость использования специальных законов повышения температуры образца, что исключает ошибку в определении параметров ГУ, связанную с отклонениями от заданного закона нагрева.

В работе рассматривается устройство емкостной спектроскопии глубоких уровней, данное устройство позволяет по измеренной емкости образца определить энергию ионизации ГУ, концентрацию ГУ и т.д.

Функциональная схема преобразователя емкость – напряжение приведена на рисунке 1.

Рассматриваемый С-У преобразователь предназначен для измерения емкости в полупроводниковых наноструктурах. В нем осуществляется довольно точное измерение изменения емкости на уровне 0,01 пФ относительно постоянной составляющей порядка 100 пФ. После подачи тестового сигнала на исследуемой емкости происходит процесс изменения заряда. Явление изменения (релаксации) заряда связано с протеканием через исследуемую емкость тока.

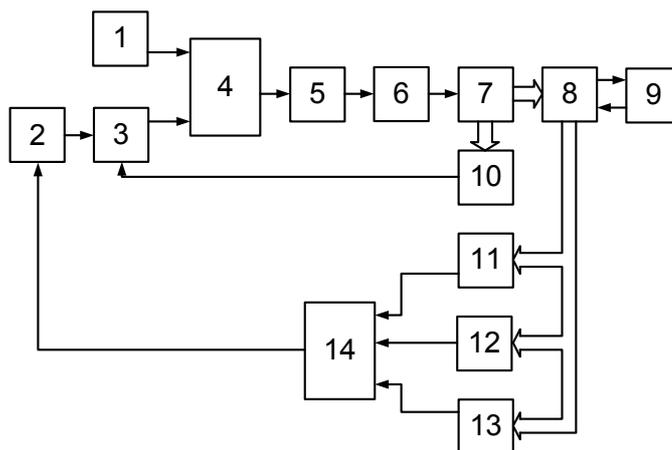


Рис. 1. Функциональная схема преобразователя емкость – напряжение:

1 – Источник опорного напряжения; 2 – Измерительная ячейка; 3 – Генератор переменного напряжения; 4 – Фазовый детектор; 5 – Фильтр низких частот; 6 – Усилитель; 7 – АЦП; 8 – RS-232; 9 – ПЭВМ; 10 – ЦАП1; 11 – ЦАП2; 12 – ЦАП3; 13 – Программируемый таймер; 14 – Сумматор

Для проведения исследований на барьерной структуре подаются импульсы заполнения и опустошения ловушек. Амплитуда импульсов задается от ПЭВМ и через интерфейс RS-232 записывается в регистры ЦАП2 (11) и ЦАП3 (12). Длительности аналогично записываются в программируемый таймер (13). Сумматор (14) в соответствии с длительностями заполнения и опустошения подает на структуру заданные напряжения. В соответствии с динамикой опустошения ловушек, меняется емкость исследуемой структуры.

Измеряемая емкость (2) является частью генератора переменного напряжения (3). При изменении этой емкости изменяется частота выходного сигнала генератора. Изменение частоты сигнала приводит к сдвигу фаз между выходным сигналом генератора и опорным сигналом. Это изменение можно зафиксировать с помощью фазового детектора (ФД) (4). На выходе ФД напряжение пропорционально разности фаз сигналов на его выходах.

Источником опорного напряжения является генератор (1). На выходе ФД сигнал получается пульсирующим. Для того чтобы выделить из него полезный сигнал, необходим фильтр нижних частот (ФНЧ).

С ФНЧ (5) сигнал поступает на усилитель (6). Усилитель необходим для согласования амплитуды входного сигнала с диапазоном преобразования АЦП. После окончания импульса опустошения структуры установившееся значение сигнала фиксируется при помощи АЦП (7) и поступает на ЦАП1 (10). Сигнал с ЦАП1 суммируется с сигналом ФНЧ и подается на управляющий элемент, который в свою очередь изменяет частоту управляемого генератора обратно изменению, вносимого измеряемой емкостью.

Таким образом, из измеряемого сигнала вычитается значение постоянной составляющей.

После преобразования аналогового сигнала в цифровой эквивалент с помощью АЦП данные о релаксации емкости поступают через интерфейс RS-232 (8) в ПЭВМ (9). В ПЭВМ происходит окончательная обработка полученных данных: определяется энергия ионизации глубоких уровней, концентрация глубоких центров, сечение захвата.

### Алгоритм работы установки емкостной РСГУ

Алгоритм работы установки емкостной РСГУ показан на рисунке 2.

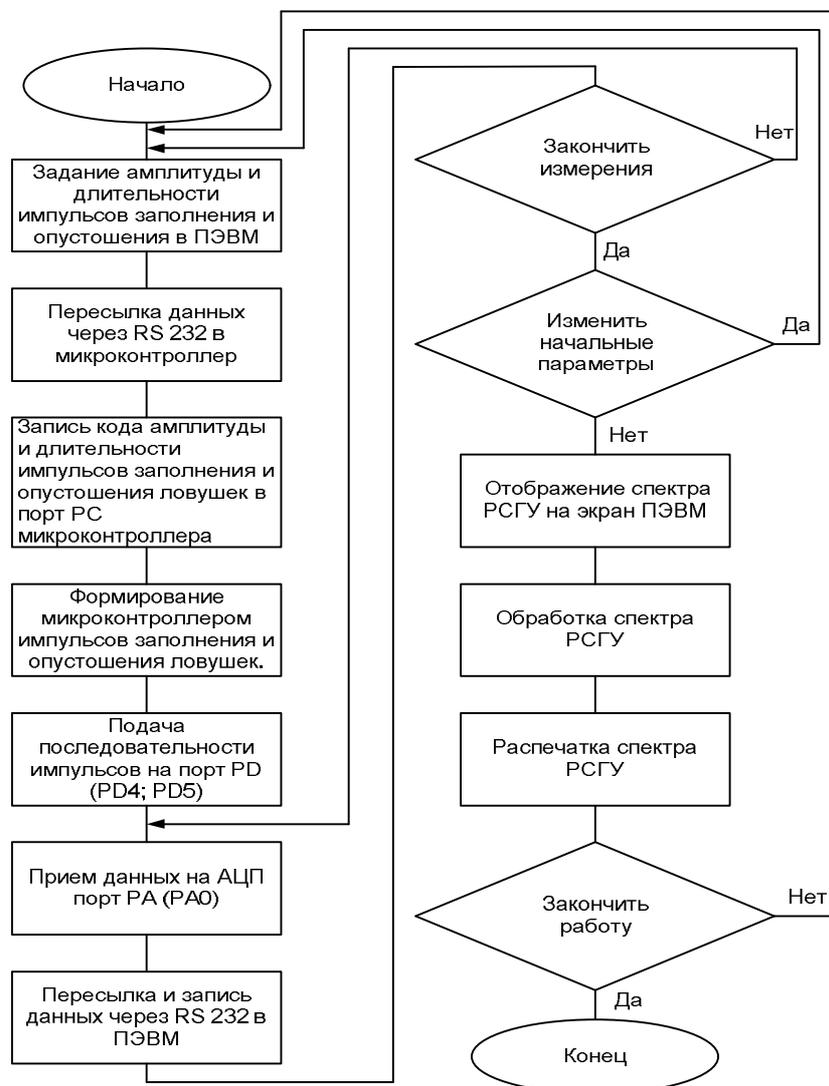


Рис. 2. Алгоритм работы преобразователя емкость – напряжение

Работа установки начинается с задания амплитуды и длительности импульсов заполнения и опустошения ловушек в ПЭВМ. После этого происходит пересылка данных через RS 232 в микроконтроллер Atmega32. Далее идет запись кода амплитуды импульсов заполнения и опустошения ловушек в порт РС микроконтроллера Atmega32. После этого следует формирование микроконтроллером импульсов заполнения и опустошения ловушек. За формированием идет подача длительности этих импульсов на порт РС (РС4; РС5).

По истечению периода измерения происходит прием данных на АЦП порт РА (РА0). С АЦП происходит пересылка и запись данных через RS 232 в ПЭВМ.

Если требуется можно изменить начальные параметры, вернувшись в начало цикла. Если этого не потребуется и измерения закончены, то на экран ПЭВМ отображается спектр РСГУ и происходит его обработка. После нее следует распечатка полученных результатов: спектр РСГУ, энергия глубоких уровней, концентрация глубоких уровней, сечение захвата.

Чувствительность РСГУ очень высока. При емкостной РСГУ чувствительность определяется произведением. Современные высокочастотные емкостные мосты позволяют реги-

стрировать величину  $\frac{\Delta C}{C}$ , на уровне  $10^{-5}$  см<sup>-3</sup>. При типичных значениях в полупроводниковых структурах  $10^{15}$ – $10^{17}$  см<sup>-3</sup> емкостная РСГУ обнаруживает ловушки с минимальной концентрацией их  $10^9$ – $10^{12}$  см<sup>-3</sup>. При использовании токовой РСГУ с малым (~10мкс) постоянным времени чувствительность достигается  $10^8$  см<sup>-3</sup> [1].

Основным источником погрешности в оценке параметров ловушек при РСГУ является ошибка в измерении температуры образца [1].

### Библиографический список

1. Денисов, А.А. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней. Обзоры по электронной технике [Текст] / А.А. Денисов, В.Н. Лактюшкин, Ю.Г. Садофьев // ЦНИИ «Электроника». – М., 1985. – № 15/144. – 52 с. – (Серия «Технология, организация производства и оборудование»).
2. Гудзев В.В., Зубков М.В., Литвинов В.Г. Особенности определения ионизации равномерно распределенных дефектов в полупроводниковых барьерных структурах. ISSN 1995–4565. Вестник РГРТУ. №2 (выпуск 40). –Рязань, 2012. –С. 75–79.

УДК 53.084.6, 53.084.872-876; ГРНТИ 29.19.31

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЛОКОМ УСТАНОВКИ СПЕКТРОСКОПИИ НЧ ШУМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НИЗКООМНЫХ ОБЪЕКТОВ

Д.С. Логинов, Т.А. Холомина, Э.Э. Кельн

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

*Аннотация.* Разработана система управления блоком установки НЧ шумовой спектроскопии, а также проведен анализ параметров чувствительности НЧ усилителей для исследования шумов в низкоомных объектах.

*Ключевые слова.* НЧ шум, шумовая спектроскопия, автоматизация, измерительная установка, система управления.

## DEVELOPMENT OF THE CONTROL SYSTEM FOR A LOW FREQUENCY NOISE SPECTROSCOPIC UNIT TO RESEARCH LOW-RESISTANCE STRUCTURES

D.S. Loginov, T.A. Kholomina, E.E. Keln

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

*Abstract.* There has been developed a control system for low-frequency noise spectroscopic unit and conducted the analysis of sensitivity of low-frequency amplifiers parameters for noise study in low-resistance structures.

*Keywords.* LF noise, noise spectroscopy, automation, measuring system, control system.

### Введение

В настоящее время существует ряд методов диагностики полупроводниковых структур:

- контроль качества поверхности при помощи наведенного заряда;
- контроль параметров интегральных схем (ИС) при пониженном напряжении питания;
- контроль электрических параметров ИС в микротоковых режимах;
- контроль качества ИС по критической величине дополнительного сопротивления в цепи питания;

выявление потенциально ненадежных ИС путем анализа формы динамического тока потребления в цепи питания;

отбраковка потенциально ненадежных ИС на биполярных структурах с помощью вольт-амперных характеристик (ВАХ).

Для анализа параметров полупроводниковых структур часто исследуют их вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики. Указанные исследования не занимают много времени и являются достаточно информативными. Перспективными в настоящее время являются методы диагностики, основанные на измерении параметров низкочастотного (НЧ) шума, в том числе с использованием внешних воздействий (электростатических разрядов, температуры, радиационного воздействия и др.) [1].

### Анализ особенностей усилителей НЧ шума

Целью настоящей работы является разработка системы управления для НЧ усилителей, используемых в спектроскопии НЧ шума при исследовании низкоомных объектов [2]. Система управления предусматривает работу с двумя усилителями одновременно. Схема первого усилителя основана на операционном усилителе (ОУ) фирмы Analog Devices AD620, включенном по схеме, приведенной на рисунке 1.

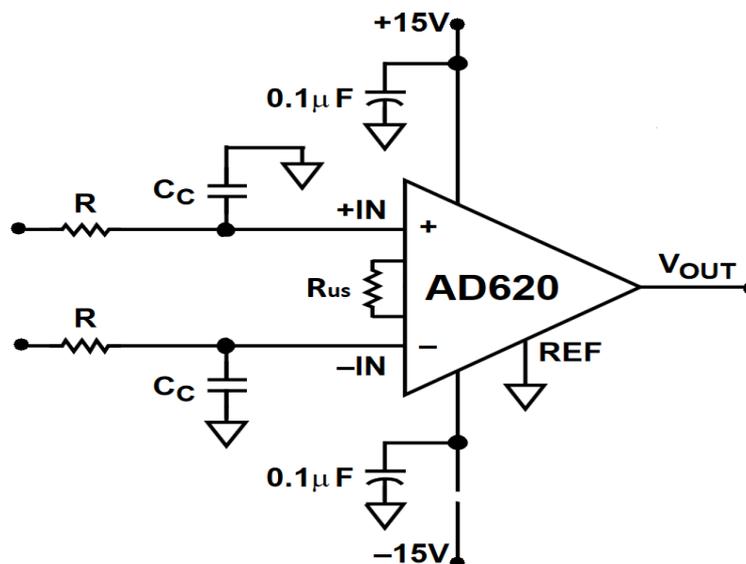


Рис. 1. Схема включения ОУ AD620

Выбранный ОУ имеет незначительный собственный шум на низких частотах, что позволяет использовать его для измерения шума в низкоомных объектах. Схема включения, приведенная на рисунке 1, позволяет подавать смещение на исследуемый образец, что необходимо в подобных измерениях.

Второй схемой является усилитель на малощумящем биполярном транзисторе, схема включения которого представлена на рисунке 2 [3].

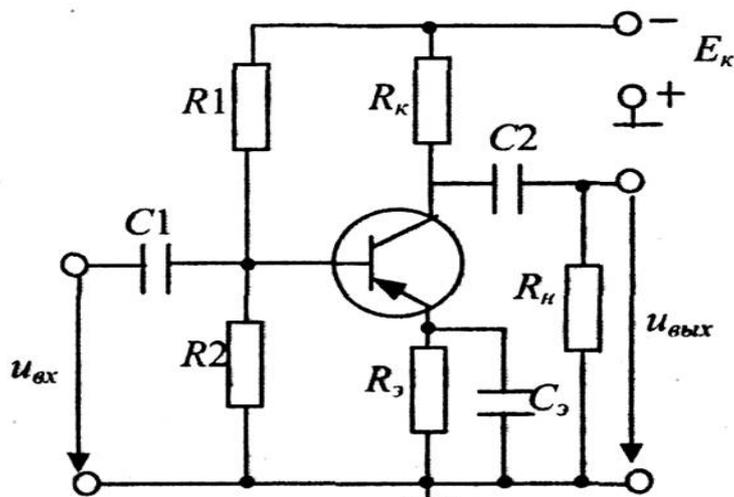


Рис. 2. Схема включения биполярного транзистора в схеме НЧ усилителя

Идея использования нескольких усиливающих схем заключается в том, чтобы разделить исследуемый диапазон частот на две части. В нижней части диапазона до 30-40 Гц работает транзисторный, а в верхней - операционный усилитель. Таким образом можно обеспечить большую чувствительность к НЧ шуму образцов из-за сокращения числа переходов, вносящих собственный шум на нижних частотах. Кроме того, становится возможным исследовать верхнюю часть интересующего диапазона (около 100 Гц) с большим коэффициентом усиления ( $K_{yc}$ ).

### Принцип работы проектируемой системы управления

Работа системы управления заключается в изменении  $K_{yc}$  для схем, приведенных на рисунках 1, 2. С этой целью за основу был взят AVR микроконтроллер фирмы Atmel. Схема управления построена на микроконтроллере ATmega328, функции которой позволяют управлять  $K_{yc}$  при помощи герконовых реле, а также выводить информацию о настройке на экран и задавать нужные параметры с помощью внешних органов управления настройки.

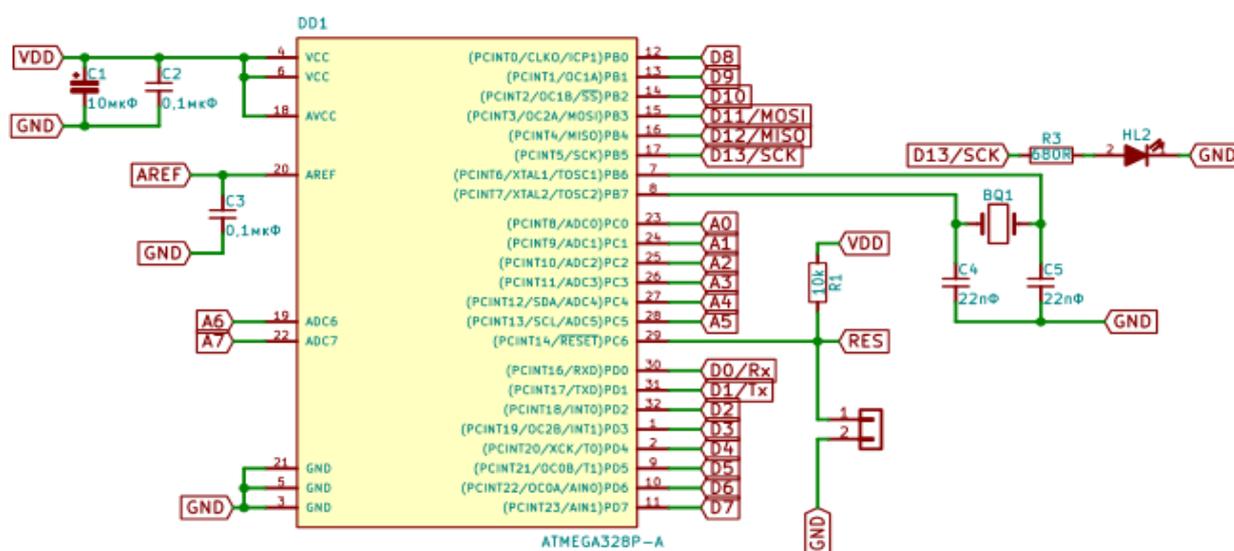


Рис. 3. Схема включения ATmega328 построенная в САПР Proteus

Программирование указанного микроконтроллера произведено на упрощенном языке C++ при помощи компилятора Arduino IDE. Это позволяет существенно сократить сроки разработки конечного устройства и более гибко настроить его работу [4].

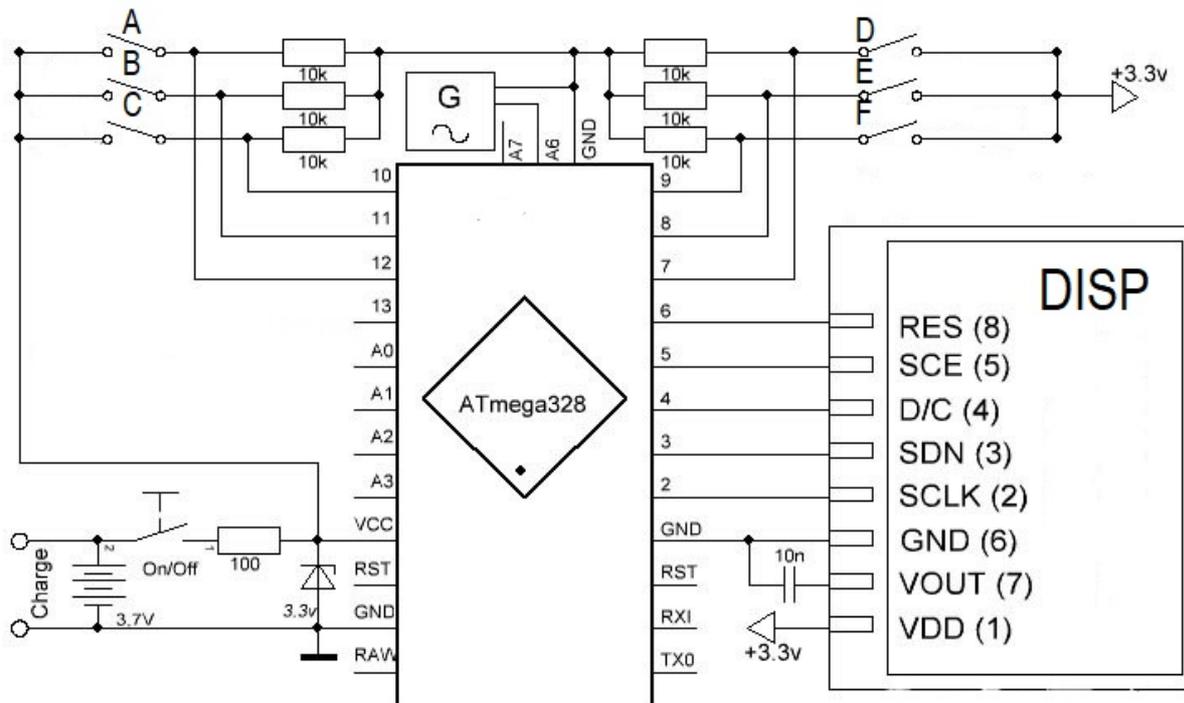


Рис. 4. Упрощенная схема управления  
(A..F- внешние кнопки управления, A0..A3- выходы управления реле)

Во время работы схемы на дисплее DISP (рис. 4) отображается выбранный усилитель с указанием изучаемого диапазона частот НЧ шума. В соответствии с этим открывается ключ (малощумящее герконовое реле), который в свою очередь коммутирует резисторы с заданным номиналом для обеспечения необходимого Кус выбранного усилителя. Для изменения Кус используются несколько ключей, коммутирующих резисторы с заданными номиналами. Управление схемой осуществляется кнопками A..F, с помощью которых настраиваются такие параметры как:

- коэффициент усиления;
- схема усиления;
- измеряемый диапазон частот;
- номер управляющего канала для контроля.

Предварительные эксперименты показали, что разработанная схема полностью согласуется с измерительным комплексом спектроскопии низкочастотных шумов полупроводниковых барьерных структур [5] и работает совместно с ним при исследовании низкоомных объектов.

## Выводы

На первых этапах развития НЧ шумовой спектроскопии возникали серьезные проблемы при измерении шума низкоомных полупроводниковых барьерных структур. Использование современных усилителей расширило возможности проведения эксперимента с минимальной вносимой погрешностью.

Рассмотрены особенности усилителей НЧ шума, а также схемы их включения и изменения Кус. Разработана система управления блоком установки спектроскопии для измерения НЧ шума в низкоомных образцах, приведены её характеристики.

Создание полностью автоматизированной установки позволило проводить эксперименты без непосредственного участия исследователя и исключить риск возникновения ошибки из-за человеческого фактора, а разработанная схема позволяет управлять параметрами измерительной системы, не внося дополнительных погрешностей.

### Библиографический список

1. Брандон Д. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля / Д. Брандон, У. Каплан. – М. : Техносфера, 2004. – 384 с.
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. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. М.: Мир, - 1983. Т.1. – С. 271-364.
4. Schmidt M. Arduino. М.: Мир – 2011. - 275 с.
5. Кострюков С.А., Холомина Т.А. Особенности анализа сигналов низкочастотного шума методом дискретного преобразования Фурье // Измерительная техника. – 2005. – №12. – С.47-50.

УДК 53.087.92; ГРНТИ 59.14.21

## РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННОГО БЛОКА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ

**С.А. Кострюков, С.В. Липатова, В.Г. Мишустин**

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, sweta29.02@mail.ru, vgmish@yandex.ru*

*Аннотация.* Работа посвящена разработке электронного блока для управления устройством подачи ингибитора в скважину при добыче природного газа в условиях крайнего севера. Разработаны принципиальная электрическая схема электронного блока управления и топология печатной платы. Все компоненты блока управления изготовлены и смонтированы на печатной плате, проведены испытания опытных образцов.

*Ключевые слова.* Блок управления, электронные компоненты, электрическая схема, печатная плата.

## DEVELOPMENT OF THE ELECTRONIC UNIT FOR CONTROLLING OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

**S.A. Kostryukov, S.V. Lipatova, V.G. Mishustin**

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Russia, Ryazan, sweta29.02@mail.ru, vgmish@yandex.ru*

*Abstract.* This work is devoted to the development of an electronic unit for controlling the device for supplying an inhibitor to a well during the extraction of natural gas in conditions of the extreme north. The electric schematic diagram of the electronic control unit and the topology of the printed circuit board are developed. All components of the control unit are made and assembled on a printed circuit board, prototypes are tested.

*Keywords.* Control unit, electronic components, electric scheme, printed circuit board.

### Введение

Традиционно технологическое оборудование для нефтегазовой отрасли поставляется в виде комплексных установок либо в виде отдельных модулей и агрегатов, обладающих полным набором необходимых функций, контролируемые с единого пульта управления. Такое оборудование имеет большую стоимость, однако при высоком уровне цен на сырье до-

бывающие компании имели возможности для его закупки. С середины 2014 года в связи с неблагоприятной экономической конъюнктурой на сырьевом рынке [1], девальвацией курса российского рубля [2], а также из-за ограничений на поставку некоторых видов технологического оборудования закупка нового оборудования стала затруднительной, особенно для небольших компаний. Таким образом, возникла задача разработки и изготовления небольших специализированных устройств, которые можно встраивать в уже существующее технологическое оборудование, в том числе осуществлять управление его работой с имеющихся пультов управления по стандартным протоколам.

Целью данной работы является разработка электронного блока управления (ЭБУ) технологическим оборудованием. Назначение ЭБУ состоит в управлении количеством и продолжительностью открытий дозирующего электромагнитного клапана для поддержания заданного расхода ингибитора при его подаче в скважину.

### **Анализ технического задания**

Из-за специфических условий эксплуатации ЭБУ должен иметь минимально возможные габариты и размещаться в стандартном взрывозащищенном корпусе. Напряжение питания ЭБУ  $=24\text{ В} \pm 5\%$ .

Наружная температура зоны установки составляет  $-60\dots+50\text{ }^\circ\text{C}$ . В таком температурном диапазоне гарантированно могут работать только электронные компоненты со специальной приемкой, а их доступность на рынке ограничена. В случае применения стандартных электронных компонентов для их корректной работы необходимо предусмотреть обогрев внутреннего объема корпуса с обеспечением контроля температуры. Для этого в конструкции устройства необходимо предусмотреть обогреватель и датчик температуры.

К физическим каналам ЭБУ предъявляются следующие требования. Обеспечение обмена информацией между ЭБУ и центральной системой управления должно быть реализовано с помощью интерфейса RS485 по протоколу Modbus RTU. Также ЭБУ должен иметь два дискретных канала, предназначенных для управления электромагнитным клапаном и обогревателем, и два аналоговых канала – один для передачи унифицированного аналогового сигнала с разрешением не менее 12 бит, другой для датчика температуры ЭБУ.

Микроконтроллер ЭБУ должен обладать следующими характеристиками: частота центрального процессора не менее 16 МГц, объем Flash памяти не менее 32 Кбайт, объем SRAM памяти не менее 2 Кбайт, программируемый последовательный интерфейс USART, последовательный интерфейс SPI Master/Slave. Также микроконтроллер должен иметь счетчик реального времени с отдельным генератором и программируемый сторожевой таймер со встроенным генератором.

### **Разработка схемы ЭБУ**

Функциональная схема ЭБУ показана на рисунке 1. В схеме ЭБУ можно выделить несколько функциональных блоков: блок питания, микроконтроллер, блок измерения сигнала с аналогового датчика, датчик температуры ЭБУ, блок измерения тока в нагрузках, блок защиты и управления клапаном, а также блок управления нагревателем.

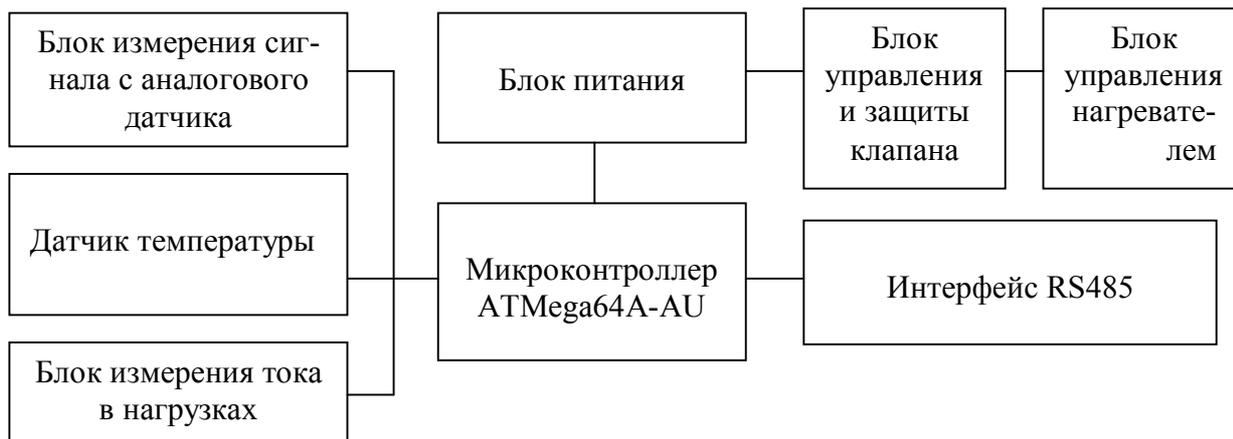


Рис. 1. Функциональная схема электронного блока управления

Для схемы ЭБУ был выбран микроконтроллер ATMega64A-AU [3]. Это высокопроизводительный 8-разрядный AVR микроконтроллер с малым потреблением энергии, прогрессивной RISC архитектурой, энергонезависимой памятью программ и данных, с рабочей частотой 16 МГц.

Данный микроконтроллер очень хорошо зарекомендовал себя при использовании в промышленной электронике, обладает хорошим соотношением цена/качество и полностью удовлетворяет требованиям технического задания. Питание схемы микроконтроллера имеет защиту от неправильной полярности. Тактовая частота задается внешним кварцевым генератором. Передача данных между микроконтроллером (DD1) и программным обеспечением «верхнего уровня» обеспечивается через гальванически развязанный интерфейс RS485 (DD2). Фрагмент принципиальной электрической схемы, содержащий данный блок ЭБУ, показан на рисунке 2.

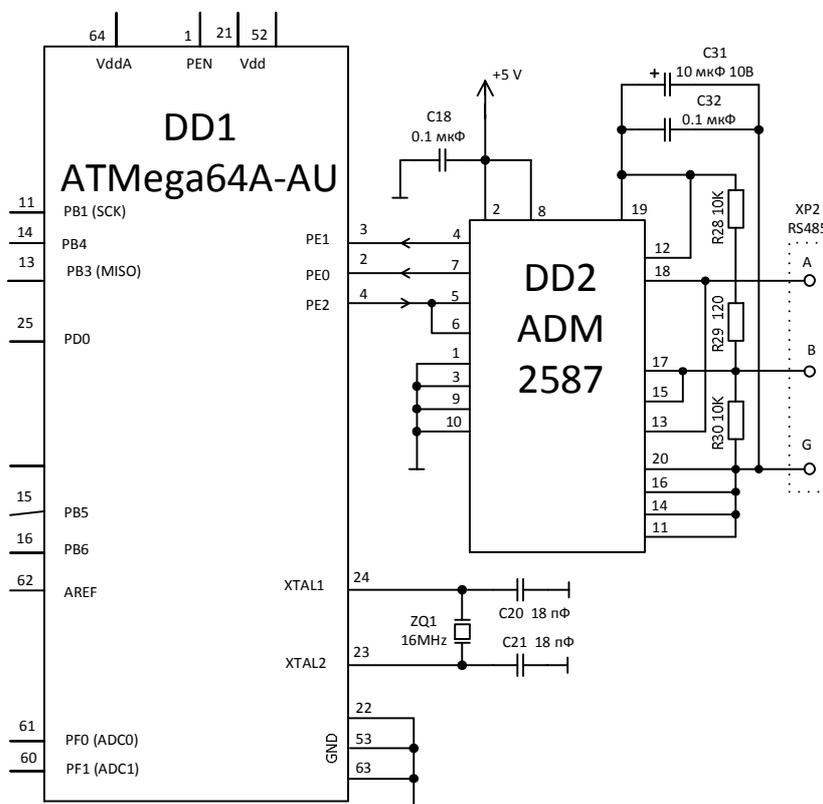


Рис. 2. Фрагмент принципиальной электрической схемы ЭБУ

Принципиальная электрическая схема блока защиты и управления электромагнитным клапаном показана на рисунке 3. Блок имеет гальваническую развязку с основной платой ЭБУ, имеет защиту от короткого замыкания (ток ограничения – 1 А) и позволяет подключать нагрузку, содержащую значительную индуктивную составляющую импеданса. Так же в нем реализована возможность измерения тока, текущего через нагрузку, и передачи полученных значений через интерфейс RS485 на центральный пульт управления технологическим оборудованием.

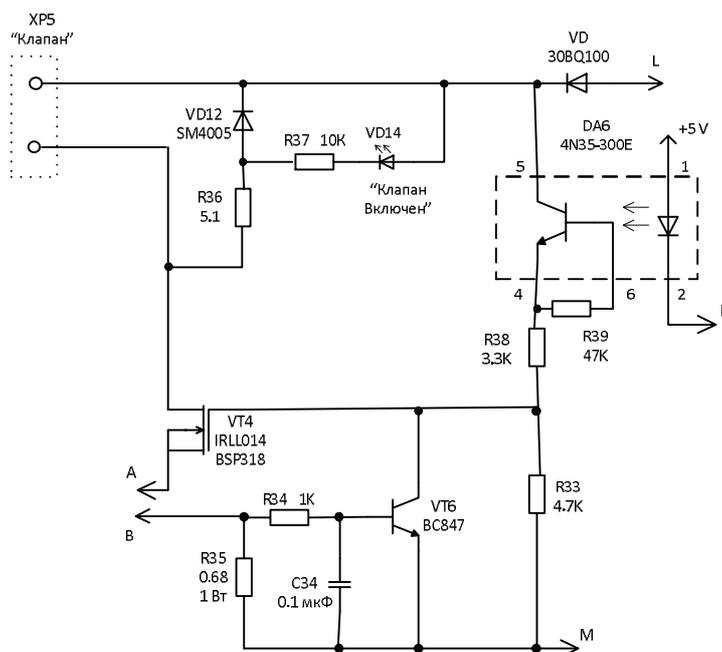


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема измерительной блока защиты и управления клапаном

Принципиальная электрическая схема блока управления нагревателем показана на рисунке 4. Блок спроектирован на минимально возможном количестве компонентов, что обеспечивает необходимую надежность его работы. Большинство элементов блока предназначены для работы при температурах до  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Логические цепи блока запитываются от параметрического стабилизатора напряжения, выполненного на элементах R31, R32, VD16, VD17, C33. Для повышения надежности этого источника применено дублирование элементов – VD16 и VD17. Выход одного из них из строя (например, в результате обрыва) не нарушит работу схемы. Операционный усилитель блока DA10 работает в режиме малых токов в нагрузке, что так же обеспечивает высокую надежность его работы. Ток нагрева можно дистанционно оценивать по току, потребляемому устройством в линии питания. Выключить питание блока нагрева можно с помощью реле К3.

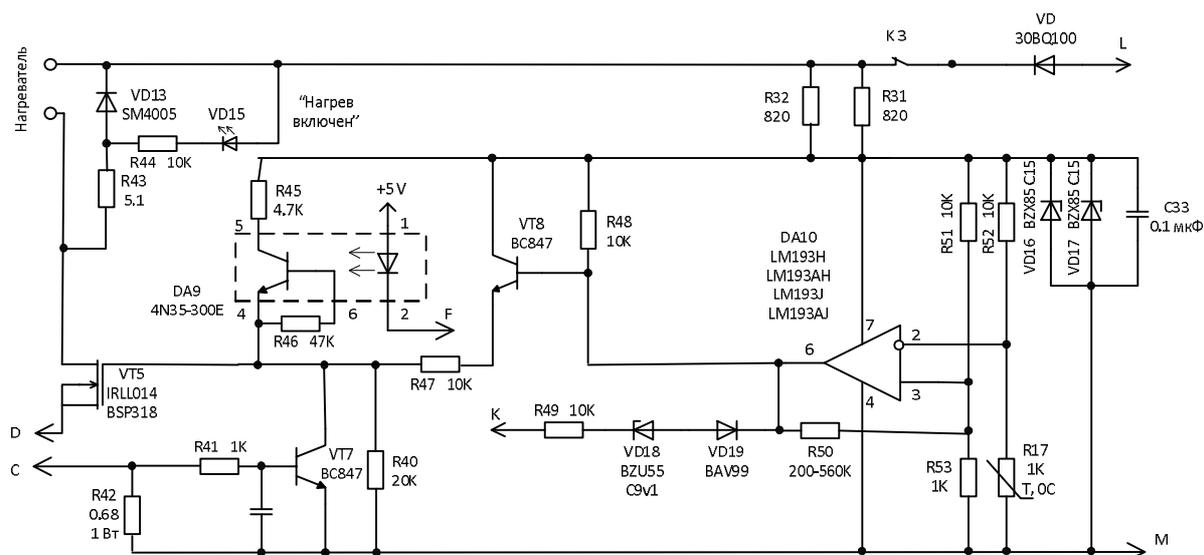


Рис. 4. Электрическая принципиальная схема блока управления нагревателем

После включения питания схемы блок управления нагревателем анализирует температуру с помощью терморезистора. При температуре ниже  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  включается нагревательный элемент. По достижении температуры  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  включается питание схемы микроконтроллера, а нагреватель отключается. Дальнейшее управление нагревателем осуществляется с помощью микроконтроллера. Схема имеет температурный гистерезис в пределах 10 градусов. Это необходимо для обеспечения стабильной работы ЭБУ. Таким образом, после подачи питания на ЭБУ фактическое управление нагревом осуществляется микроконтроллером.

### Изготовление и испытания ЭБУ

Внешний вид печатной платы ЭБУ представлен на рисунке 5. Ее габаритные размеры составляют  $70 \times 100\text{ мм}^2$ . Топология печатной платы разработана в САПР радиоэлектронных устройств Altium Designer [4], проверка отдельных схмотехнических решений при проектировании ЭБУ проводилась в программе схмотехнического моделирования Micro-Cap [5]. Для тестирования печатной платы ЭБУ с распаянными электронными компонентами было разработано диагностическое программное обеспечение в среде инженерного графического проектирования LabVIEW [6].

Испытания ЭБУ подтвердили работоспособность изготовленного устройства, а также полное соответствие его характеристик требованиям технического задания. Особое внимание было уделено температурным испытаниям ЭБУ из-за повышенных требований заказчика. Испытания в климатической камере диапазоне температур от  $-60$  до  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$  подтвердили правильность работы алгоритма блока управления обогревателем и сохранение заявленных параметров ЭБУ во всем диапазоне температур.

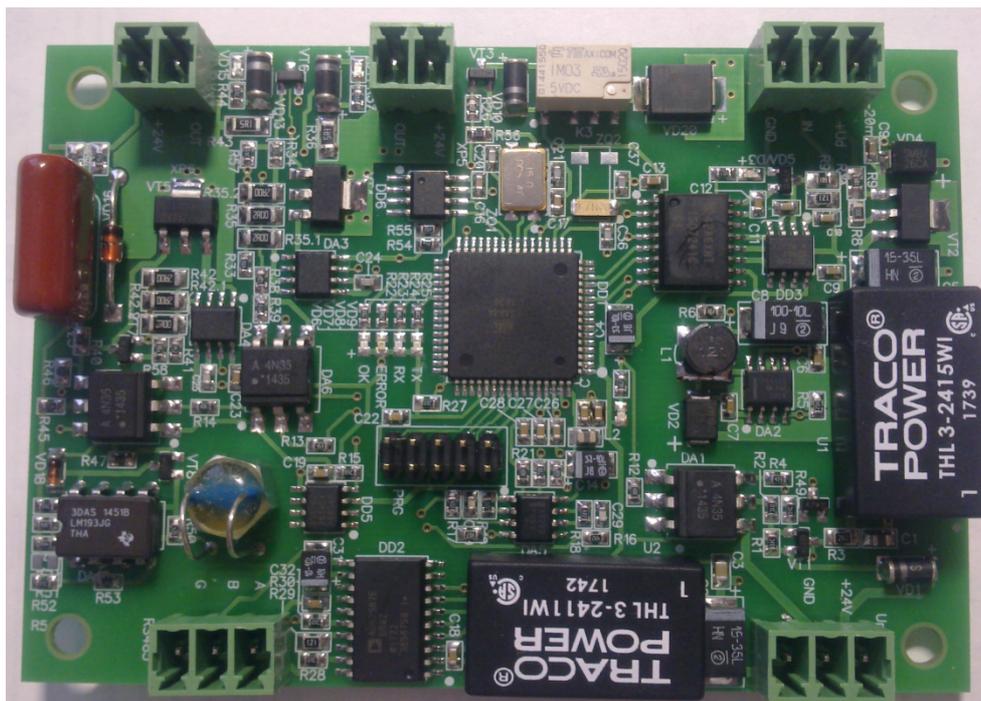


Рис. 5. Внешний вид печатной платы ЭБУ

### Заключение

Разработанный электронный блок управления дозирующим магнитным клапаном предназначен для контроля и управления подачей ингибитора в скважину при добыче природного газа в условиях крайнего севера. ЭБУ построено на основе микроконтроллера ATmega64A-AU, имеет два цифровых и два аналоговых канала. Обмен данными телеметрии и сигналами управления с центральным пультом управления идет по протоколу Modbus RTU с помощью интерфейса RS485 через электрический кабель.

Логические и силовые элементы схемы имеют гальваническую развязку друг от друга, цепи электропитания ЭБУ организованы по принципу искробезопасной цепи. Напряжение питания ЭБУ составляет  $\approx 24\text{В}$ , критически важные элементы цепи электропитания дублированы.

Испытания опытных образцов продемонстрировали работоспособность ЭБУ и соответствие их характеристик требованиям технического задания. Температурные испытания в климатической камере подтвердили возможность применения разработанного устройства для работы в условиях крайнего севера.

Таким образом, в результате выполнения работы были достигнуты все поставленные цели.

*Авторы выражают благодарность ПАО завод «Красное знамя» и лично А.П. Авачёву за помощь при испытаниях ЭБУ.*

### Библиографический список

1. Цена на нефть марки BRENT [Электронный ресурс]. – URL: <https://worldtable.info/yekonomika/cena-na-neft-marki-brent-tablica-s-1986-po-20.html> (Дата обращения: 11.02.2018).
2. Курсы валют ЦБ РФ [Электронный ресурс]. – URL: <https://excur.ru/Central-Bank/Currencies> (Дата обращения: 11.02.2018).
3. ATMEGA64-16AU datasheet [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/175177/ATMEL/ATMEGA64-16AU.html> (Дата обращения: 14.02.2018).
4. Лопаткин А. В., Проектирование печатных плат в Altium Designer. – М.: ДМК Пресс, 2015, 400 с.
5. Амелина М. А., Амелин С. А., Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 464 с. ил.
6. Суранов А. Я. LabVIEW: Справочник по функциям. – М.: ДМК Пресс, 2014, 536 с.

УДК 53.082.7; ГРНТИ 29.03.35

## МОДЕРНИЗИРОВАННАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЯЧЕЙКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУР

В.Г. Мишустин, А.Г. Романов

*Рязанский государственный радиотехнический университет,*

*Россия, Рязань, vgmish@yandex.ru, alex7371@yandex.ru*

*Аннотация.* В данной работе описана модернизированная измерительная ячейка для реализации метода компенсации тока нестационарной проводимости. Описаны функции, которые выполняет измерительная ячейка, разработана принципиальная электрическая схема и топология печатной платы. Проведено моделирование работы отдельных узлов схемы в программе Proteus Design Suite 8, проведены тестовые измерения с помощью модернизированной ячейки.

*Ключевые слова.* метод компенсации тока нестационарной проводимости, измерительная ячейка, печатная плата.

## MODERNIZED MEASURING CELL FOR RESEARCH OF SEMICONDUCTOR BARRIER STRUCTURES

V.G. Mishustin, A. G. Romanov

*Ryazan State Radio Engineering University,*

*Russia, Ryazan, vgmish@yandex.ru, alex7371@yandex.ru*

*Abstract.* In this paper modernized measuring cell for realizing the method of compensation of the nonstationary conductivity current is described. The functions of the measuring cell are described, principal electrical circuit and topology of the printed circuit board are developed. The simulation of some nodes of the circuit in the program Proteus Design Suite 8 was carried out. Test measurements were carried out using the modernized cell.

*Keywords.* The method of compensation of the nonstationary conductivity current, measuring cell, printed circuit board.

### Введение

Для исследования контактных явлений в неупорядоченных полупроводниках применяют как традиционные методы – ВАХ, ВФХ и ЭПР – так и специально разработанные для неупорядоченных полупроводников с учетом специфики их электрофизических свойств – метод компенсации тока нестационарной фотопроводимости (МКТНФ), метод локального измерения поверхностного потенциала с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ).

Задачей работы является исследование контактных явлений используя усовершенствованный макет МКТНФ – комплекса. Исследования проводились в простых и многослойных барьерных структурах на основе аморфного гидрогенизированного кремния (a-Si:H) и сплавов на его основе (a-SiC:H, a-SiGe:H и пр.) Исследуемые барьерные структуры представляют собой барьеры типа Шоттки, p-i-n структуры, гетероструктуры типа a-Si:H/c-Si, a-Si:Ge/a-SiC:H.

На рисунке 1 представлена функциональная схема макета МКТНФ – комплекса [1]. Источник оптического излучения – лампа ИСШ-100, конструктивно смонтирована в одном металлическом корпусе вместе с импульсным блоком питания и схемой управления лампой-вспышкой. Момент запуска лампы фиксируется с помощью фотодиода. Металлический корпус экранирует окружающее оборудование от электромагнитного импульса, возникающего в момент срабатывания лампы. Для выделения заданной длины волны оптического излучения используется монохроматор МДР-23.

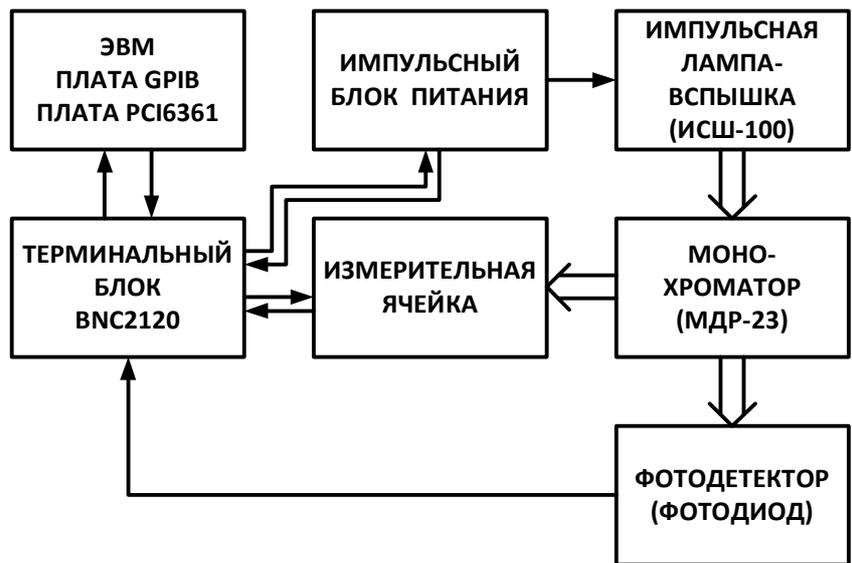


Рис. 1. Функциональная схема МКТНФ-установки

**Описание принципиальной электрической схемы и интерфейса измерительной ячейки**

Принципиальная схема измерительной ячейки с соответствующими номиналами представлена на рисунке 2.

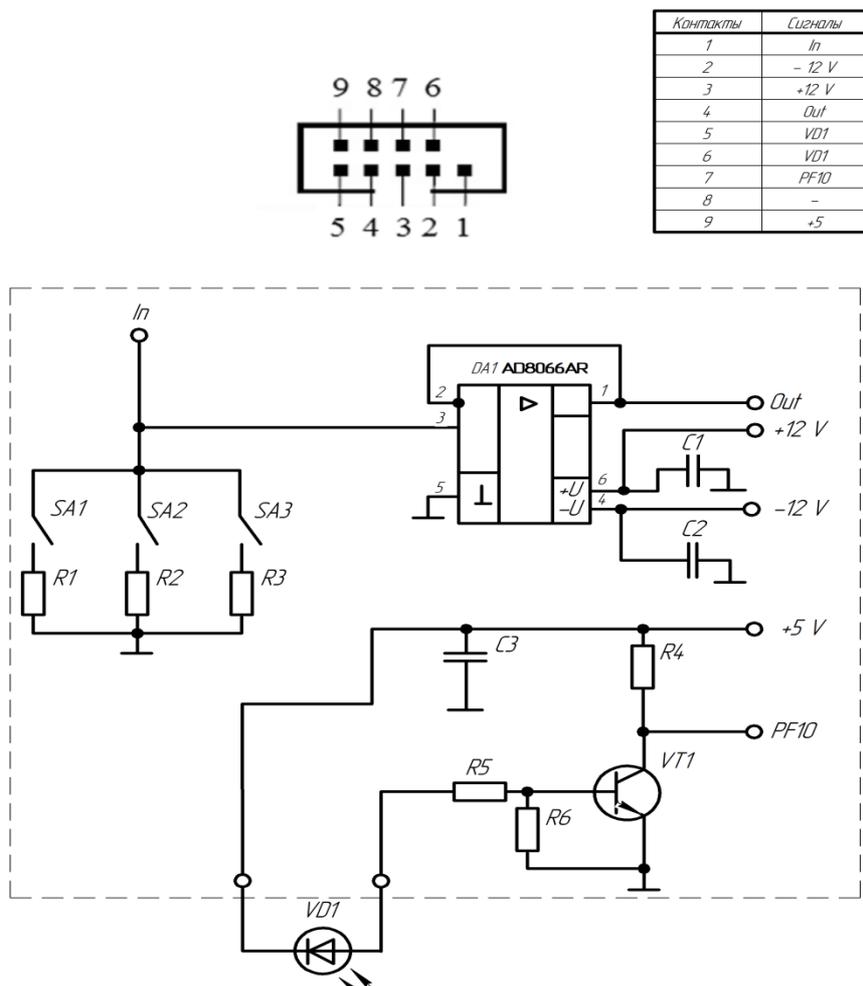


Рис. 2. Принципиальная схема измерительной ячейки и её цоколёвка для интерфейса RS-232

Номиналы резисторов подбираются таким образом, чтобы согласовать нагрузку по току и напряжению между измеряемым образцом и входом АЦП терминального блока BNC2120. Резисторы R1, R2, R3 являются нагрузочными и задают режим работы операционного усилителя. В качестве прецизионного усилителя в данной схеме используется ОУ AD8066AR, обладающий высоким быстродействием и низким уровнем собственных шумов. При широком диапазоне напряжений питания (от 4 В до 24 В) и полосе пропускания до 150 МГц выбранный ОУ удовлетворяет всем требованиям для применения в схеме измерительной ячейки (ИЯ).

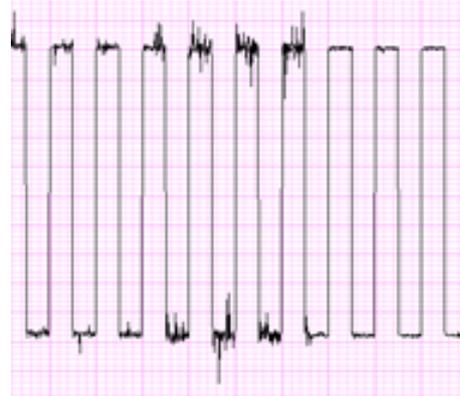
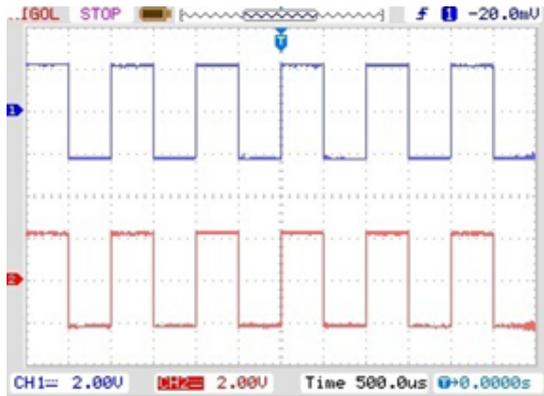
Преимущества AD8066AR: скорость нарастания напряжения – 180 В/мкс, низкий уровень искажений, низкое напряжение входного смещения – до 1 мВ [2]. Контакты печатной платы подключаются к COM – порту с помощью шлейфа COM-порт – Serial. Обмен сигналами управления и полученными данными с ПК идет по протоколу RS – 232 через экранированный кабель. Управление измерительным комплексом осуществляется с помощью ПК. Программа управления написана в среде инженерного графического проектирования LabVIEW [3], сигналы управления и экспериментальные данные заводятся в виртуальный прибор (ВП) через блок коммутации BNC 2120.

Измерительная ячейка выполняет следующие функции:

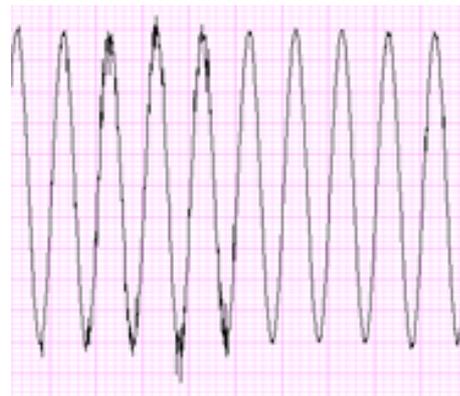
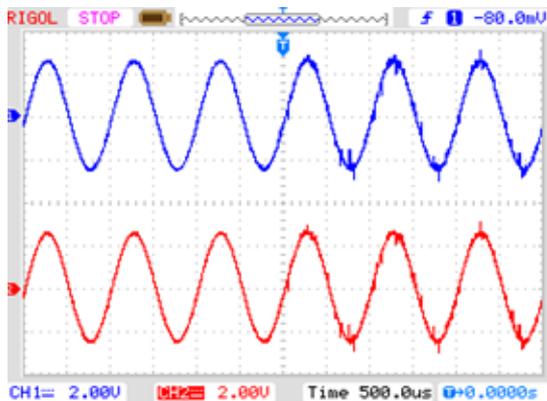
- передача с минимальными искажениями тока нестационарной фотопроводимости, возникающего вследствие освещения монохроматическим световым потоком исследуемого образца;
- преобразование светового потока, зафиксированного фотодиодом (ФД) в импульс управляющего напряжения и его усиление.

Исходя из данной схемы была изготовлена печатная плата ИЯ. Для тестирования работоспособности итоговой печатной платы измерительной ячейки были измерены временные диаграммы токов и напряжений различной формы сигналов (синусоидальный, прямоугольный, треугольный). На вход схемы подавался сигнал с генератора Rigol DS1102E. Печатная плата с электронными компонентами подключалась к осциллографу и, одновременно, к виртуальному прибору (ВП) через плату расширения NI PCI6251, установленную в персональный компьютер. Связующим звеном между платой расширения и измерительной схемой служит АЦП терминального блока BNC2120. Временные диаграммы измерялись с помощью осциллографа Rigol DS3061A, которые вместе с измерениями ВП представлены на рисунке 3.

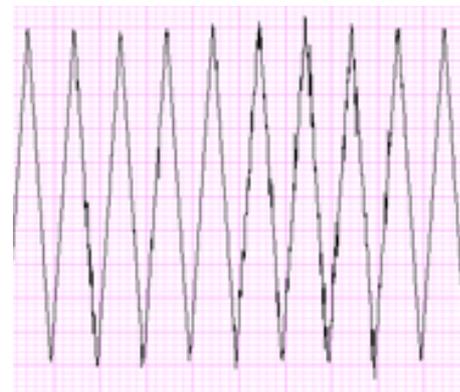
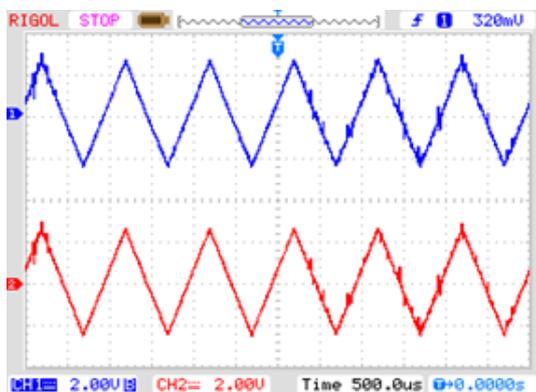
Сравнительный анализ полученных зависимостей и результатов моделирования в программе Proteus Design Suite 8.1, позволяет сделать заключение о работоспособности разработанной печатной платы. Временные диаграммы совпадают по частоте и амплитуде напряжения.



а) Прямоугольная форма сигнала



б) Синусоидальная форма сигнала



в) Треугольная форма сигнала

Рис. 3. Временные диаграммы, снятые с осциллографа и соответствующие им сигналы на лицевой панели управления процессом измерения виртуального прибора.

### Разработка конструкции измерительной ячейки

Для повышения помехозащищенности корпус модернизированной ИЯ был изготовлен из пермаллоя, а заземление выполнено по медной шине, не связанной с общим заземлением лаборатории. Во избежание наводок частотой 50 Гц, которые возникают от гальванической связи с сетью переменного тока, питание электрической схемы ИЯ сделано автономным и осуществляется от аккумуляторов.

Для повышения удобства эксплуатации вертикальное крепление исследуемых структур было заменено на горизонтальное расположение. Это потребовало введение в конструк-

цию ИЯ оптической системы, обеспечивающей освещение образца монохроматическим светом, поступающего из выходной щели монохроматора МДР-23. Электрический контакт к исследуемой структуре осуществляется с помощью специальных щупов, что исключает механическое и тепловое воздействие на образец при его соединении с помощью пайки. Корпус ИЯ состоит из трех деталей: основание измерительной ячейки, крышка измерительной ячейки и заклёпка с полукруглой головкой. В крышке измерительной ячейки сделано два отверстия для крепления системы направления монохроматического излучения. На основании ИЯ предусмотрено посадочное место DE – 9 для установки последовательного порта и отверстие для прохождения монохроматического излучения, соединяющее ИЯ с выходом оптической системы монохроматора МДР-23. Основание измерительной ячейки также имеет 4 отверстия для крепления печатной платы и предметного столика. Сопряжение основания ИЯ и крышки ИЯ происходит с помощью заклёпки с полукруглой головкой. Корпус имеет габариты 89×90×91 мм.

Для разработки конструкции системы направления монохроматического излучения была составлена схема оптимального расположения компонентов в измерительной ячейке, представленная на рисунке 5. Из приведенного рисунка видно, что при таком расположении деталей, монохроматический свет, поступающий из отверстия, которое связывает ИЯ и монохроматор МДР-23, падает полностью на зеркало, а оптимальный угол между плоскостями А и Б лежит в пределах  $40^\circ - 55^\circ$ .

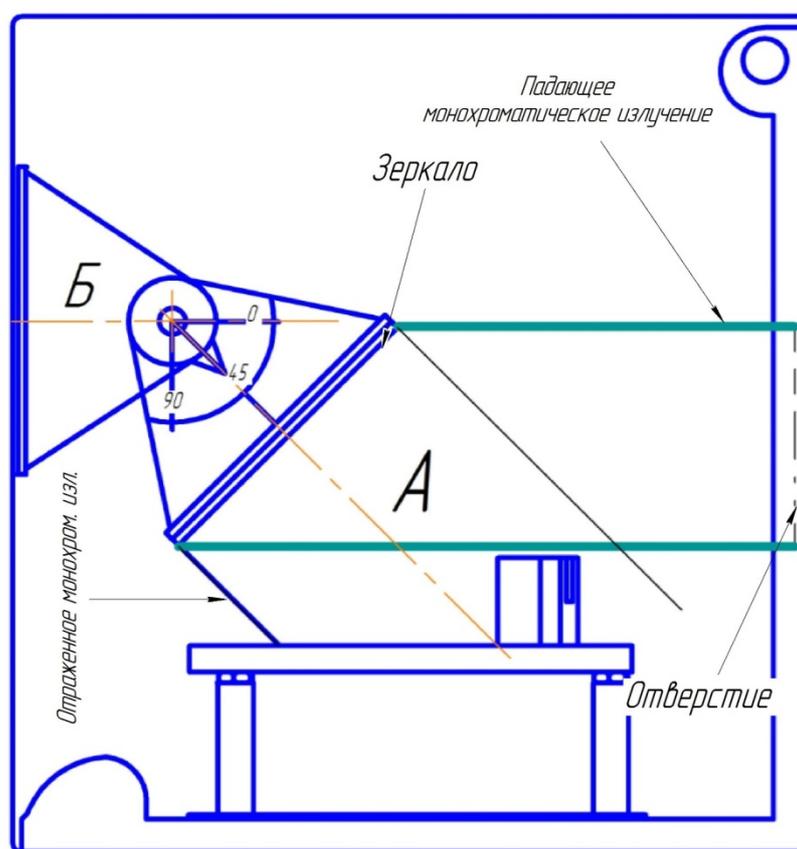


Рис. 5. Схема расположения печатной платы и оптической системы в корпусе ИЯ

## Выводы

В рамках данной работы была произведена модернизация экспериментального комплекса, реализующего метод компенсации тока нестационарной фотопроводимости [4-6], а

именно изменение конструкции измерительной ячейки с учётом эксплуатационных потребностей, что привело к улучшению технико-эксплуатационных характеристик.

Модернизированная измерительная ячейка обладает более высокой чувствительностью, быстродействием, а также обеспечивает улучшенную помехозащищенность измерительной схемы. Благодаря улучшению конструкции измерительной ячейки появилась возможность исследовать относительно короткие переходные процессы длительностью до 100 нс. Это позволяет расширить номенклатуру исследуемых материалов в сторону большей подвижности носителей заряда, например, легированный  $n^+$  или  $p^+$   $a\text{-Si:H}$ , используемый в  $p\text{-i-n}$  и НИТ-структурах фотоэлектрических преобразователей.

Данная работа выполнена с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета.

### Библиографический список

1. Кусакин Д.С., Мишустин В.Г., Романов А.Г. Разработка измерительной ячейки для реализации метода компенсации тока нестационарной фотопроводимости // сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. в 9 т. Т.4./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2017; Рязань. С. 196 – 201.
2. Описание (datasheet) электронного компонента «AD8066AR» производства Analog Devices [электронный ресурс]. – 2017. URL: <http://www.analog.com/en/search.html> (дата обращения: 05.05.2017).
3. Суранов А. Я. LabVIEW: Справочник по функциям. – М.: ДМК Пресс, 2014, 536 с.
4. R.A. Street Measurements of depletion layers in hydrogenated amorphous silicon // Physical review B. 1983. V. 27. No. 8. P. 4924 - 4932.
5. Юшка Г.Б., Монтримас Э.А. Измерение распределения электрического поля в тонких структурах  $a\text{-Si:H}$  // Литовский физический сборник 1992. Т.32, №4 С. 612 – 617.
6. N. V. Vishnyakov, S. P. Vikhrov, V. G. Mishustin, D. V. Almazov, V. G. Litvinov, and V. V. Gudzev. The Measurement of Electric Field Distribution in the Barrier Structures Based on Disordered Semiconductors. J. Nanoelectron. Optoelectron. 9, 773–777 (2014)

УДК 538.91; ГРНТИ 29.19.31

## ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНОК ZnO И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ИХ ОСНОВЕ

М.В. Голованова\*, Д.Г. Громов\*\*, Т.А. Холомина\*, В.Г. Литвинов\*, А.В. Ермачихин\*, Н.Б. Рыбин\*

\*Рязанский радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, [golovanova\\_m\\_v@rambler.ru](mailto:golovanova_m_v@rambler.ru)

\*\*Национальный исследовательский институт «Московский институт электронной техники»,  
Россия, Москва, [gromadima@gmail.com](mailto:gromadima@gmail.com)

*Аннотация.* Проведен анализ экспериментальных данных по исследованию влияния режимов высокотемпературного отжига на электрофизические характеристики гетероструктур вида  $\text{Me/ZnO/n-Si/Me}$  и морфологические особенности поверхности тонких пленок ZnO.

*Ключевые слова.* Гетероструктура, ZnO, вольт-амперная характеристика, вольт-фарадная характеристика, растровая электронная микроскопия

## RESEARCH OF MORPHOLOGY OF THE SURFACE OF ZnO FILMS AND ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF HETEROSTRUCTURES ON THEIR BASIS

M.V. Golovanova\*, D.G. Gromov\*\*, T.A. Kholomina\*, V.G. Litvinov\*, A.V. Ermachikhin\*, N.B. Rybin\*

\*Ryazan State Radio Engineering University,  
Russia, Ryazan, [golovanova\\_m\\_v@rambler.ru](mailto:golovanova_m_v@rambler.ru)

\*\* National Research University of Electronic Technology (MIET),  
Russia, Moscow, [gromadima@gmail.com](mailto:gromadima@gmail.com)

*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  $\text{Me/ZnO/n-Si/Me}$  and morphological features of a surface of ZnO thin films is carried out.

*Keywords.* Heterostructure, ZnO, current-voltage characteristic, voltage-capacitance characteristic, scanning electron microscopy

## Введение

Оксид цинка ZnO является широкозонным полупроводниковым соединением типа АІІВVI. Ширина запрещенной зоны при комнатной температуре составляет 3,4 эВ. Наличие кислородных вакансий, а также несвязанных атомов цинка, являющихся донорной примесью, объясняют тот факт, что в естественном состоянии оксид цинка является полупроводником n-типа. Благодаря своим уникальным электрофизическим и пьезоэлектрическим свойствам, пленки оксида цинка широко применяются при создании оптико-электронных устройств, работающих в видимом и ультрафиолетовом диапазоне; пьезоэлектрических датчиков; газовых сенсоров и в спинтронике [1, 2, 3]. Таким образом, изучение электрофизических характеристик тонких пленок оксида цинка является актуальным.

Целью настоящей работы явилось исследование влияния режимов отжига на морфологию тонких пленок нелегированного ZnO и электрофизические характеристики гетероструктур на их основе.

## Методика эксперимента

Исследуемые образцы представляли собой гетероструктуры вида Me/ZnO/n-Si/Me. Тонкие пленки ZnO получены методом спрей-пиролиза на кремниевых подложках, на поверхности ZnO сформированы индиевые и золотые контакты.

Высокотемпературный отжиг образцов ( $T=600^{\circ}\text{C}$ ) проводился в атмосфере кислорода и инертного газа аргона.

Исследования проведены при помощи автоматизированной установки для изучения электрофизических свойств полупроводниковых барьерных структур [4]. Исследование электрофизических характеристик включало в себя измерение и последующий анализ вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик. Изображения структуры поверхности тонких пленок ZnO получены при помощи растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6610LV.

### 3. Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлены ВАХ исследуемых образцов, полученные на контактах In-подложка. Индиевые контакты являлись невыпрямляющими.

Анализ ВАХ показал резистивный характер исследуемых структур. Некоторая нелинейность ВАХ может быть обусловлена слабо выраженными выпрямляющим свойствами структуры. Все расчеты сопротивления структур проводились для напряжения +1В. Наименьшим сопротивлением обладал образец «O1» ( $\approx 400$  кОм). Сопротивление образца «O2» наибольшее в данной группе образцов, оно составляло  $\approx 1,54$  МОм. Сопротивление образца «O3» составляло  $\approx 1,11$  МОм. Несколько большее значение сопротивления имел образец «Ar» ( $\approx 1,17$  МОм).

Отжиг образцов в атмосфере инертного газа не приводил к изменению содержания кислорода в ZnO.

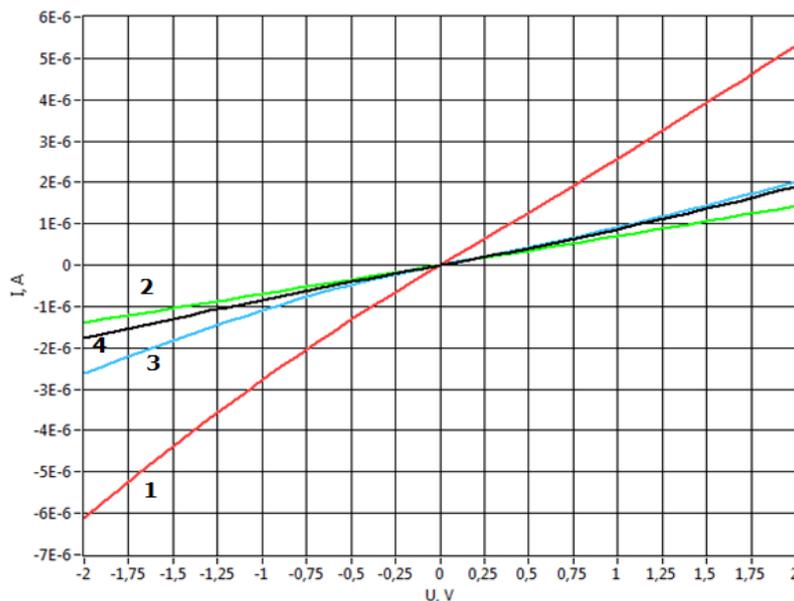


Рис. 1. ВАХ образцов, отожженных в атмосфере кислорода (1,2,3) и аргона (4).  
Номера 1, 2, 3,4 относятся к характеристикам образцов «O1», «O2», «O3» и «Ar» соответственно

Исходя из результатов анализа ВАХ, можно сделать предположение, что большое значение сопротивления образца «O2» может быть 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<sup>+</sup>) [5]. Атомы цинка Zn<sup>+</sup> находятся в междоузлиях кристаллической решетки либо в узлах кристаллической решетки, но не связаны с атомами кислорода. Сопротивление образца «O3» несколько меньше сопротивления образца «Ar», что позволяет сделать вывод о том, что отжиг проводился во влажной кислородной среде. В кислороде в некотором количестве могли содержаться остаточные газы, атомы которых являются донорами. Образец «O1» обладал наименьшим сопротивлением, что свидетельствует о большом количестве примесных донорных атомов остаточных газов и водорода.

Высокое сопротивление исследуемых образцов позволяет сделать вывод о возможности применения тонких пленок нелегированного ZnO в качестве диэлектрика в МДП-структурах. Данное предположение подтверждается при анализе ВФХ образцов, представленных на рисунке 2.

Емкость образцов измерялась при частоте 1 кГц. Характер ВФХ свидетельствует о том, что исследуемые образцы являются МДП-структурами на кремнии.

Определение влияния режимов высокотемпературного отжига основывалось на анализе изображений поверхности пленок ZnO, приведенных на рисунке 3. Данные получены методом РЭМ.

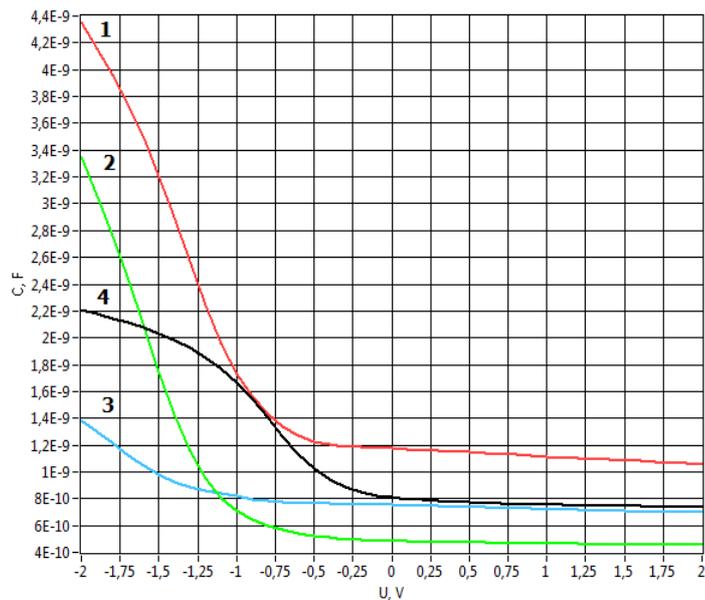
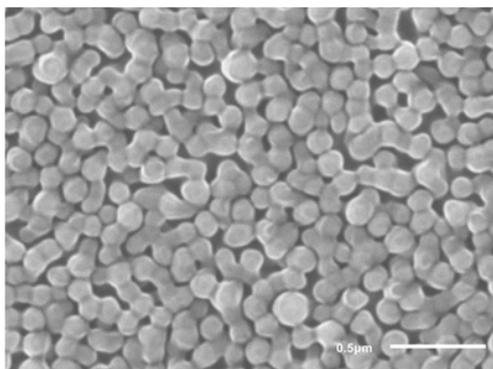
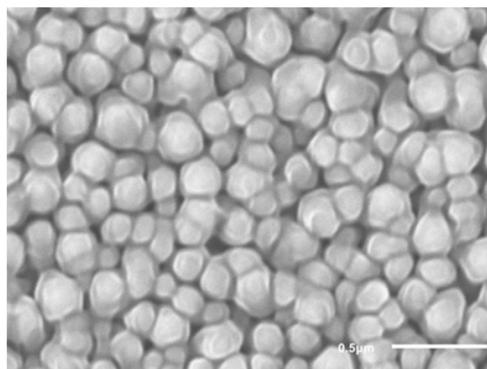


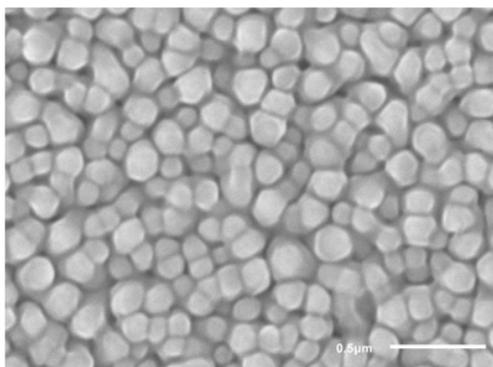
Рис. 2. ВФХ образцов, отожженных в атмосфере кислорода (1,2,3) и аргона (4). Номера 1, 2, 3,4 относятся к характеристикам образцов «O1», «O2», «O3» и «Ar» соответственно



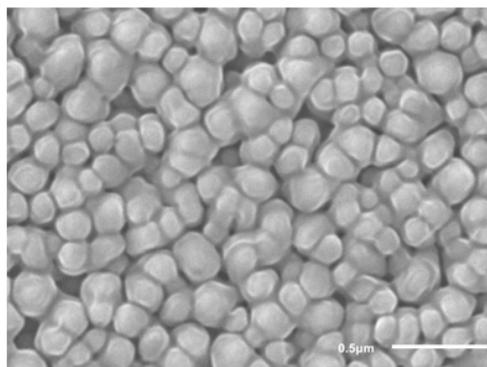
«Ar»



«O1»



«O2»



«O3»

Рис. 3. РЭМ изображения поверхности образцов

Анализ результатов свидетельствует о том, что слои ZnO имели гексагональную кристаллическую структуру типа вюрцита [6]. Тонкие пленки ZnO, полученные методом

спрей-пиролиза, имели волокнистую структуру. Волокна ZnO представляют собой шестигранные столбики. Анализ РЭМ изображений поверхности образцов показал, что при отжиге в атмосфере аргона волокна ZnO имели наиболее ярко выраженную гексагональную структуру, а также малый разброс геометрических размеров волокон. Расчет ширины сечения волокон образцов произведен на основании нахождения среднего значения ширины сечения для 10 случайно выбранных волокон. Средняя ширина сечения волокон образца «Ar» составляет  $\approx 0,13$  мкм. При отжиге в кислородной среде волокна ZnO «спекаются» и их гексагональная структура выражена менее явно. Средняя ширина сечения волокон образцов «O1», «O2» и «O3» составили соответственно  $\approx 0,22$  мкм,  $\approx 0,17$  мкм и  $\approx 0,20$  мкм. Наиболее ярко выраженной гексагональной структурой волокон и менее «спеченными» волокнами обладал образец «O2», который подвергнулся отжигу в чистом кислороде без примесей.

### Выводы

Проведен анализ влияния режимов отжига на морфологию тонких пленок нелегированного ZnO и электрофизические характеристики структур Me/ZnO/n-Si/Me на основании экспериментальных данных. Тонкие пленки нелегированного ZnO получены методом спрей-пиролиза, образцы подвергнуты высокотемпературному отжигу в атмосфере аргона и кислорода. Режимы отжига образцов влияют на электрофизические и морфологические характеристики тонких пленок ZnO следующим образом: наличие в атмосфере кислорода остаточных газов и водорода, атомы которых являются донорами, снижало сопротивление структуры и изменяло морфологию пленок ZnO. Образцы, подвергнутые отжигу в чистом кислороде, проявляли наилучшие диэлектрические свойства и при этом имели наиболее ярко выраженную гексагональную структуру поверхности ZnO по сравнению с образцами, отожженными в кислородной атмосфере. Отжиг образцов в атмосфере инертного газа сохранял гексагональную структуру волокон ZnO.

### Библиографический список

1. Громов Д.Г., Козьмин А.М., Шулятьев А.С., Поломошнов С.А., Шаманаев С.В., Технология формирования пленок ZnO:Ga для создания преобразователей акустического давления // Известия вузов. Электроника.- 2012.- №2 (94).- С.92-94.
2. Зима В.Н., Козлов А.Г., Танская Т.Н., Блинов В.И., Лобов И.А., Структура и морфология пленок оксида цинка, полученных реактивным магнетронным напылением // Вестник Омского университета.-2013.-№2.-С.75-79.
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. 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.
5. 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
6. Определение локальной атомной структуры вокруг примесных атомов в разбавленных магнитных полупроводниках [Электронный ресурс], URL: <http://nanospectr.sfedu.ru/modul5> (дата обращения 10.02.18).

УДК 539.21 ; ГРНТИ 29.19.22

## АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕМРИСТОРНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Степанов Д.В., Рыбин Н.Б.

*Рязанский государственный радиотехнический университет,*

*Россия, Рязань, Stepanov.rsreu@yandex.ru*

*Аннотация.* В данной работе проведено исследование электрофизических характеристик мемристорных структур на основе оксида алюминия. Получена вольт-амперная характеристика структуры и проведён её анализ, сделан вывод о механизме проводимости структуры.

*Ключевые слова.* Мемристор, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ТОПЗ.

## ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS ANALYSIS OF ALUMINUM OXIDE-BASED MEMRISTOR STRUCTURES

Stepanov D.V., Rybin N.B.

*Ryazan State Radio Engineering University,*

*Russia, Ryazan, Stepanov.rsreu@yandex.ru*

*Abstract.* This work contains research of aluminum oxide-based memristor structures. Research demonstrates a volt-ampere characteristic and conductivity mechanism of the structure.

*Keywords.* Memristor, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SCLC.

### Введение

Развитие микро- и наноэлектроники обуславливает развитие информационных технологий, которые требуют создания быстродействующих устройств чтения, обработки и записи информации. Разработка устройств на основе аналоговой архитектуры искусственных нейронных сетей предоставляет большие перспективы по оптимизации обработки информации по сравнению с классическими на данный момент цифровыми принципами, применяемыми в машине фон Неймана. Элементарной ячейкой такой нейроморфической системы является мемристор - ([англ.](#) memristor, от memoгу- память, и resistor- электрическое сопротивление) - пассивный элемент, способный изменять своё сопротивление в зависимости от протекавшего через него заряда. Первое упоминание о таком элементе приводится в статье, написанной инженером-электриком Леоном Чуа (Leon Chua) в 1971 году [1]. Мемристоры в нейроморфической системе обладают высокой связностью, позволяющей распараллелить выполнение операций, что приводит к значительному росту производительности процессора.

Так же на основе мемристорных структур разрабатываются элементы энергонезависимой резистивной памяти (ReRAM (Resistive Random Access Memory)). Сравнительные характеристики различных типов памяти приведены в таблице 1 [2].

Таблица 1. Характеристики различных типов памяти

	ReRAM	DRAM	Flash	HDD
Время чтения, с	10-8	(1-5)·10 <sup>-8</sup>	2,5·10 <sup>-5</sup>	(5 – 8)·10 <sup>-3</sup>
Время записи, с	(2-200) ·10 <sup>-10</sup>	(1-5)·10 <sup>-8</sup>	2·10 <sup>-4</sup>	(5 – 8)·10 <sup>-3</sup>
Время хранения информации	>5 лет	8-64 мс	3-5 лет	>10 лет
Количество циклов записи	10 <sup>12</sup>	10 <sup>16</sup>	10 <sup>3</sup> - 10 <sup>6</sup>	10 <sup>15</sup>
Энергия на запись одного бита информации, Дж	(1-30)·10 <sup>-13</sup>	2·10 <sup>-12</sup>	10 <sup>-8</sup>	(1 – 10)·10 <sup>-3</sup>

Впервые экспериментально мемристор на основе структуры Pt-TiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>n-1-Pt был показан Струковым и его соавторами в 2008 году [3]. Было показано, что мемристорный эффект возникает в структурах типа металл - диэлектрик – металл и обусловлен перемещением зарядов в слое диэлектрика.

В настоящее время мемристорный эффект был получен на большом количестве структур. Наибольший интерес представляют структуры на основе широко распространённых элементов с низкой стоимостью, которые, в перспективе, позволят создать дешёвый и технологичный мемристор с высокими характеристиками.

Широко распространённым материалом в современной электронике является оксид алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Высокие эксплуатационные характеристики, низкая стоимость и высокая технологичность делают Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> перспективным материалом для создания мемристорных структур на его основе.

Целью данной работы является изучение электрофизических характеристик мемристорных структур на основе оксида алюминия.

### Методика эксперимента

В качестве экспериментального образца выступала структура Au-Ta-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cr, полученная кремниевой подложке методом атомно-слоевого осаждения (ALD) (рис. 1).

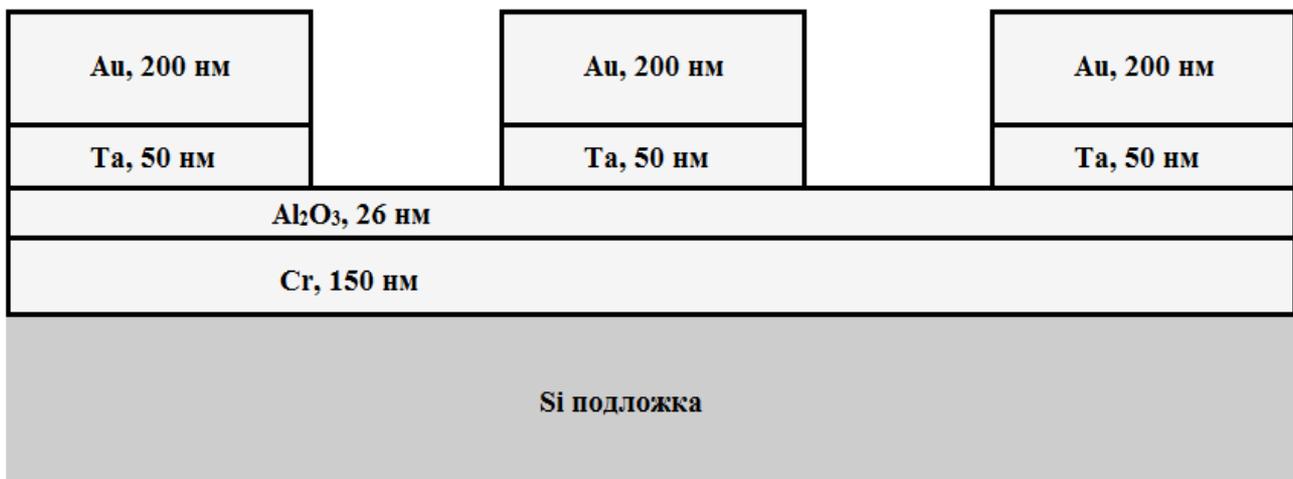
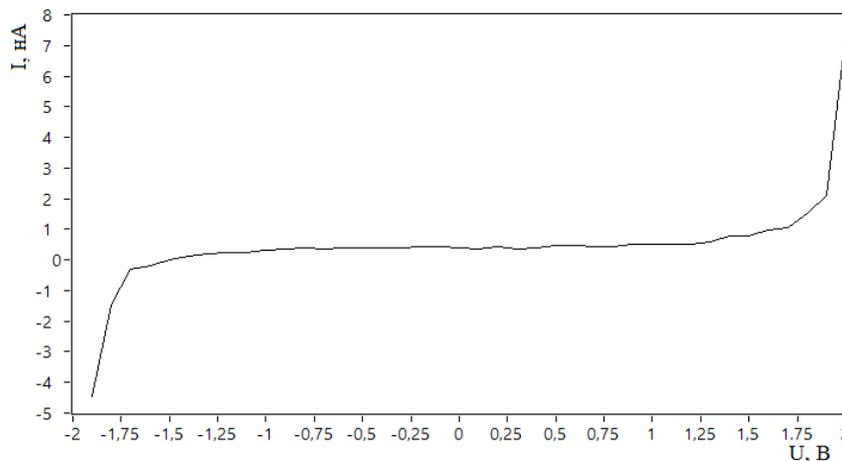


Рис. 1. Структура исследованного образца Au-Ta-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cr

Экспериментальное исследование структуры Au-Ta-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cr проводилось путём снятия вольт - амперной характеристики в диапазоне напряжений U<sub>см</sub> от -2 до 2 В с шагом 0,1 В на частоте  $f = 1\text{кГц}$  при температуре  $T = 291\text{ К}$  на измерителе иммитанса Agilent E4980A в измерительной ячейке на основе криостата замкнутого типа Janis CCS 400/204N. В качестве верхнего электрода выступал слой золота, а в качестве нижнего электрода выступал слой хрома.

### Результаты и обсуждения

Полученная вольт - амперная характеристика, обладает нелинейностью, симметрией относительно полярности напряжения (рис. 2).

Рис. 2. ВАХ структуры Au-Ta-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cr

Детальный анализ ВАХ структуры показал, что в двойном логарифмическом масштабе появляются три участка характеристики, соответствующие линейной, квадратичной и степенной зависимостям. Это позволило предположить, что проводимость структуры может быть описана в рамках теории токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ) (рис. 3).

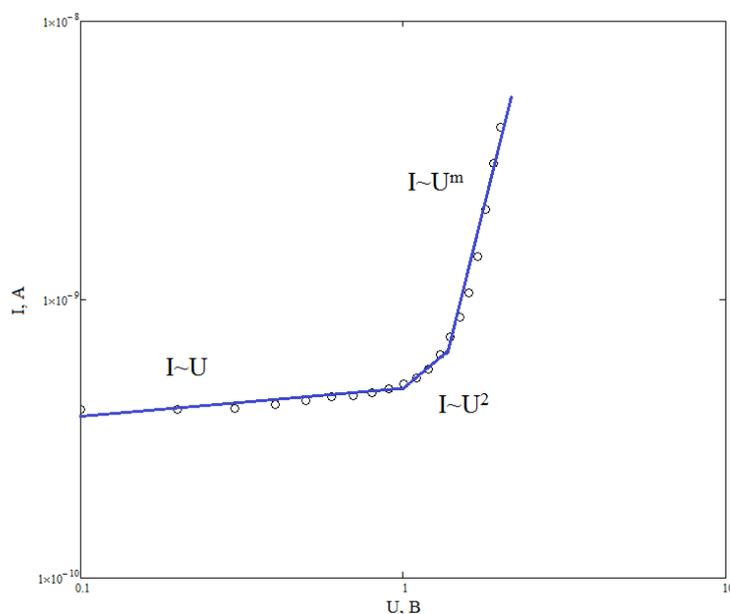


Рис. 3. Вольт - амперная характеристика образца в двойном логарифмическом масштабе

На первом участке плотность носителей заряда эмитированных из электрода значительно ниже плотности термостгенерированных носителей, в связи с чем наблюдается линейная зависимость ( $I \sim U$ ). На втором участке наблюдается квадратичная зависимость тока от напряжения ( $I \sim U^2$ ), описываемая выражением:

$$I = \frac{\theta \epsilon \mu V^2}{L^3}, \quad (1)$$

где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость;

$\mu$  – подвижность свободных носителей в разрешённой зоне;

$L$  – расстояние между контактами.

Данное выражение называется ловушечным квадратичным законом, и от закона Мотта-Генри отличается наличием множителя  $\theta$ , характеризующей долю свободных носителей от инжектированных [4]:

$$\theta = \frac{N_c}{gN_t} \exp \frac{E_t - E_c}{kT}, \dots \dots \dots (2)$$

где  $N_c$  – плотность состояний в зоне проводимости;

$g$  – коэффициент вырождения ГУ;

$N_t$  – концентрация ловушек;

$(E_t - E_c)$  – энергия активации ловушек;

$k$  – постоянная Больцмана.

После области с квадратичной зависимостью наблюдается область более высокого возрастания тока ( $I \sim Um, m > 2$ ). Эта зависимость близка к экспоненциальной, что обычно связывается с ионизацией локальных центров [5].

Таким образом, из анализа вольт – амперной характеристики мемристорной структуры следует, что механизмы токопрохождения в ней могут быть описаны в рамках модели ТОПЗ.

### Библиографический список

1. Chua L.O. Memristor – the missing circuit element. // IEEE Trans. - 1971. -Vol.18. - P.507–519.
2. Lee J.S. Progress in non-volatile memory devices based on nanostructured materials and nanofabrication // J. Mater. Chem. – 2011. – Vol. 21. – P. 14097–14112.
3. D.B. Strukov, G.S. Snider, D.R. Stewart, R.S. Williams. Nature, 2008, 453, p. 80.
4. Ning Li, Brian E. Lassiter, Richard R. Lunt, Guodan Wei, Stephen R. Forrest //Appl. Phys. Lett. 2009. V. 94. P. 023307.
5. E. Voronkov. J. Non-Cryst. Sol., 353, 2591 (2007)

УДК 537.226

## ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТРИГЛИЦИНСУЛЬФАТА, ВНЕДРЕННОГО В МАТРИЦУ SBA-15

О.В. Ефимова, Е.В. Стукова

Амурский государственный университет,  
Россия, Благовещенск, xefimova@gmail.com

*Аннотация.* Исследовано влияние ограниченной геометрии на диэлектрические свойства TGS, внедренного в матрицу SBA-15, в цикле нагрев-охлаждение. Установлено повышение температуры фазового перехода на 2 – 5 К наноразмерного TGS по сравнению с объемным триглицинсульфатом. Для нанокompозита наблюдается низкочастотная дисперсия. Значения энергии активации для наноразмерного TGS в сегнетофазе и парафазе меньше по сравнению со значениями энергии активации объемного триглицинсульфата.

*Ключевые слова.* Сегнетоэлектрик, диэлектрическая проницаемость, фазовый переход, размерные эффекты.

## DIELECTRIC PROPERTIES OF TRIGLYCINSULFATE, INTEGRATED TO SBA-15 MATRIX

O.V. Efimova, E.V. Stukova

Amur State University,

Russia, Blagoveshchensk, xefimova@gmail.com

*Abstract.* We investigated the dielectric properties of the nanocomposite TGS / SBA-15 by heating-cooling cycle. We determined that the temperature phase transition TGS in SBA-15 matrix increases by 2 – 5 K compared to bulk triglycinesulfate. A low-frequency dispersion is observed for a nanocomposite. The activation energies for nano-sized TGS in the ferroelectric phase and in the parafase are smaller than the activation energies of bulk triglycine sulfate.

*Keywords.* Ferroelectric, dielectric permeability, phase transition, size effects.

В настоящий момент проблема создания наноразмерных материалов, обладающих такими диэлектрическими свойствами, как гигантская диэлектрическая проницаемость, большая нелинейность и т.д. является одной из актуальных в области исследования сегнетоэлектрических композитов. Такими материалами могут служить гетероструктуры, состоящие из сегнетоэлектрических компонент, внедренных в наноразмерные матрицы. Нанокompозиты могут обладать диэлектрическими характеристиками, существенно отличающимися от соответствующих объемных сегнетоэлектриков. Геометрия сетки пор, размеры пор, взаимодействие наночастиц сегнетоэлектриков с матрицей и между собой оказывают влияние на диэлектрические свойства наноразмерных композитов. Так в ряде работ [1, 2] было показано, что для TGS в пористых матрицах происходит уширение максимума на температурных зависимостях диэлектрической проницаемости. В работе [3] было установлено, что для наноразмерного TGS температура фазового перехода повышается по сравнению с объемным триглицинсульфатом. Фиксации поляризованного состояния сложных сегнетоэлектрических молекулярных структур способствует химическое взаимодействие их со стенками наноразмерной матрицы [4].

Диэлектрические свойства сегнетоэлектриков в наноразмерных матрицах мало изучены. Целью нашей работы является исследование влияния ограниченной геометрии на диэлектрические свойства триглицинсульфата, внедренного в матрицу SBA-15 с нанометровыми размерами пор.

Структура силикатных матриц SBA-15 представляет собой гексагонально упорядоченные 1D каналы, соединенные между собой мелкими порами [5]. Параметры матриц, используемых в нашей работе, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры силикатных матриц

Удельная поверхность каналов S, м <sup>2</sup> /г	589
Удельный объем каналов V, см <sup>3</sup> /г	0,60
Размер пор d, нм	6,91

Триглицинсульфат  $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$  является сегнетоэлектриком моноклинной системы при комнатной температуре. При температуре 322 К происходит сегнетоэлектрический фазовый переход второго рода. При переходе из сегнетофазы в парафазу точечная группа симметрии  $2/m$  изменяется на 2. Кристалл TGS состоит из молекул глицина  $\text{CH}_2\text{NH}_2\text{COOH}$  и тетраэдров  $\text{SO}_4$ , соединенных между собой водородными связями типа – О-Н...О и N-Н...О. Значение спонтанной поляризации равно 2,8 мкКл/см<sup>2</sup> при 293 К [6].

Для заполнения пор силикатных матриц SBA-15 триглицинсульфат растворялся в дистиллированной воде до получения насыщенного раствора. Затем порошок SBA-15 засыпался в полученный раствор так, чтобы весь раствор проник в поры. После чего смесь высушивалась при комнатной температуре. Процедура внедрения проводилась 3 раза для повы-

шения степени заполненности пор. Из полученной высушенной смеси прессовались образцы в виде таблеток диаметром 12 мм и толщиной  $\sim 1$  мм под  $P=6000$  кг/см<sup>2</sup>. На торцевые поверхности образца наносились электроды из In-Ga пасты, в результате образец представлял собой плоский конденсатор.

Измерения емкости полученного конденсатора проводились в режиме нагрев-охлаждение в температурном интервале от 298 К до 353 К с помощью измерителя импеданса LCRmeter HIОKI 3532-50 на частотах 10 кГц, 100 кГц, 1 МГц. После чего вычислялась диэлектрическая проницаемость нанокompозита TGS/SBA-15. Температуру измеряли с помощью хромель-алюмелевой термопары электронного термометра CENTER-304 с точностью 0,1 К.

Как видно, из показанных на рисунке 1 температурных зависимостей диэлектрической проницаемости, максимумы на кривых размыты и с уменьшением частоты измерений смещаются в область более высоких температур, так на частоте 1 МГц максимум находится в районе 324 К, на частоте 10 кГц – в области 327 К. Тогда как у объемного TGS температура фазового перехода равна 322 К и не зависит от частоты измерений [6]. Температурный гистерезис составляет не более 1 К. Значения диэлектрической проницаемости в области фазового перехода значительно выше при нагреве, чем при охлаждении. Для нанокompозита TGS/SBA-15 наблюдается низкочастотная дисперсия диэлектрической проницаемости.

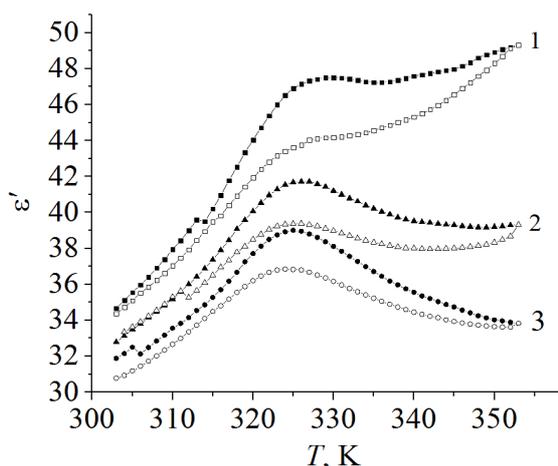


Рис. 1. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости для TGS в матрице SBA-15 при нагревании (закрашенные маркеры) и охлаждении (пустые маркеры) на разных частотах: 1 – 10 кГц, 2 – 100 кГц, 3 – 1 МГц.

Обсудим полученные результаты. Причиной стабилизации сегнетоэлектрического состояния TGS в пористых матрицах, как установлено в работе [4] являются химические взаимодействия на поверхности кристаллитов триглицинсульфата и матрицей, которые приводят к образованию внутренних смещающих полей, которые в свою очередь способствуют закреплению полярного состояния молекул триглицинсульфата. Для того, чтобы объяснить смещение максимума диэлектрической проницаемости на температурной зависимости с изменением частоты измерений требуются дополнительные структурные исследования нанокompозита TGS/SBA-15.

Размытие фазового перехода нанокompозитов можно объяснить неоднородностью поляризации, которая является следствием наличия в нанокompозите доменных границ, поверхностных слоев, тепловых флуктуаций, дефектов. В сегнетоэлектрических включениях пористой матрицы появляется некоторое распределение локальных температур перехода, значения которых зависят от распределения неоднородностей и дефектов по различным областям кристалла [7].

Уменьшение величины диэлектрической проницаемости при охлаждении по сравнению со значениями  $\epsilon'$ , измеренными при нагреве на той же частоте, для образца TGS/SBA-15 в области фазового перехода возможно связано с образованием двойного электрического слоя (запирающего слоя) на границах сегнетоэлектрических включений, в результате химического взаимодействия TGS со стенками матрицы [4]. Этот двойной слой препятствует возникновению и разрастанию доменов при переходе из парафазы в сегнетофазу, а так как основной вклад в величину диэлектрической проницаемости вносят колебания доменных стенок [8], то значения  $\epsilon'$  становятся ниже при охлаждении, чем при нагреве.

Низкочастотная дисперсия диэлектрической проницаемости в области фазового перехода обусловлена тем, что основной вклад в величину  $\epsilon'$  на низких частотах дают релаксационные процессы, такие как поляризация Максвелла-Вагнера, доменная поляризация. С ростом частоты вклад этих механизмов быстро убывает, что приводит к низкочастотной дисперсии.

На рисунке 2 представлена зависимость проводимости от температуры в аррениусовских координатах для наноразмерного TGS при нагреве на частоте 1 МГц. Для нанокompозита TGS/SBA-15 максимум DC-проводимости находится в районе 324 К, что совпадает с температурой максимума действительной части диэлектрической проницаемости. На представленной зависимости можно выделить два участка, близких к линейному виду. Это соответствует закону  $\sigma = \sigma_0 \exp(-\Delta E_0/kT)$  для термоактивационного механизма проводимости. Значения энергии активации наноразмерного TGS в сегнетофазе  $E_{a1}=0,2$  эВ и в парафазе  $E_{a2}=0,1$  эВ меньше по сравнению с энергией активации объемного TGS, которая составляет  $E_{a1} = 0,4$  и  $0,6$  эВ в сегнетофазе и в парафазе соответственно [9]. Уменьшение энергии активации для наноразмерного TGS возможно связано с большой площадью границ раздела в нанокompозите и наличием на этих границах несвязанных зарядов.

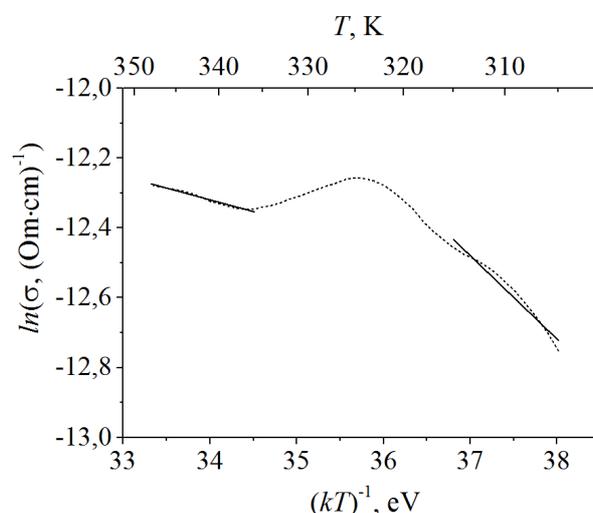


Рис. 2. Температурная зависимость проводимости в аррениусовских координатах для TGS в матрице SBA-15 при нагревании на частоте 1 МГц (пунктирная линия) и аппроксимация участков графика близких к линейному виду (сплошная прямая линия)

Таким образом, в наноразмерном состоянии диэлектрические характеристики триглицинсульфата в результате влияния ограниченной геометрии отличаются от диэлектрических свойств объемного TGS. Выделим основные различия:

- 1) максимумы диэлектрической проницаемости, соответствующие фазовым переходам триглицинсульфата в матрице SBA-15, смещены относительно  $T_C$  объемного TGS в область высоких температур не более чем на 2 – 5 К;
- 2) для нанокompозита TGS/SBA-15 наблюдается низкочастотная дисперсия диэлектрической проницаемости;

3) значения энергии активации наноразмерного TGS в сегнетофазе и в парафазе меньше по сравнению с энергией активации объемного TGS.

### Библиографический список

1. Трюхан, Т.А., Стукова, Е.В., Барышников, С.В. Диэлектрические свойства триглицинсульфата в пористых матрицах // Известия Самарского научного центра РАН. – 2010. – Т.12, №4. – С.97–99.
2. Маслов, В.В., Трюхан, Т.А., Барышников, С.В. Уширение фазового перехода для триглицинсульфата в пористых матрицах // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. – 2010. – № 122. – С. 84-90.
3. Барышников, С.В., Чарная, Е.В., Шацкая, Ю.А., Милинский, А.Ю., Самойлович, М.И., Michel, D., Tien, C. Влияние ограниченной геометрии на линейные и нелинейные диэлектрические свойства триглицинсульфата вблизи фазового перехода // Физика твердого тела. – 2011. – Т. 53, Вып. 6. – С.1146-1149.
4. Поправко Н.Г., Сидоркин А.С., Миловидова С.Д., Рогазинская О.В. ИК-спектроскопия сегнетоэлектрических композитов // Физика твердого тела. – 2015, Т. 57, №. 3. – С. 510 – 514.
5. Zhao D., Feng J., Huo Q., Melosh N., Fredrickson G. H., Chmelka B. F., Stucky G. D. Copolymer Syntheses of mesoporous silica with periodic 50 to 300 angstrom pores // Science. – 1998. – V. 279, Is. 5350. – P. 548-552.
6. Лайнс, М., Гласс, А. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы. // Изд-во «Мир», М. – 1981. – 736 с.
7. Струков Б.А. Фазовые переходы в сегнетоэлектрических кристаллах с дефектами // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 12. – С. 95-101.
8. Лотонов А.М., Новик В.К., Гаврилова Н.Д. О дисперсии диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика триглицинсульфата (TGS) в широкой области температур // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2006. – №5. – С. 27-32.
9. Желудев, И.С. Основы сегнетоэлектричества // Атомиздат, М.: 1973. – 472 с.

УДК 621.315.592

## КИНЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЛЕГИРОВАННОМ ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ГЕТЕРОПЕРЕХОДЕ

К.В. Бухенский<sup>1</sup>, А.Б. Дюбуа<sup>1</sup>, С.И. Кучерявый<sup>2</sup>, С.Н. Машнина<sup>1</sup>, А.С. Сафoshкин<sup>1</sup>, А.А. Иванова<sup>1</sup>,  
Е.С. Куликова<sup>1</sup>, В.В. Потапова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Рязанский государственный радиотехнический университет

<sup>2</sup>Обнинский институт атомной энергетики

Национального исследовательского ядерного университета МИФИ

e-mail: safoshkin.a.s@rsreu.ru

*Аннотация.* Работа направлена на выяснение вклада внутриподзонной и межподзонной электрон – электронной релаксации в затухание квантования Ландау осцилляций поперечного магнитосопротивления. Для сильнолегированного гетероперехода, аппроксимированного треугольным потенциальным профилем, когда заполнены основная и возбужденная подзоны размерного квантования, получены выражения параметрических зависимостей от температуры, которые объясняют экспериментальные зависимости.

*Ключевые слова.* Электрон-электронные взаимодействия, гетеропереход, метод хаотических фаз.

## KINETIC PROCESSES IN THE DOPED SEMICONDUCTOR HETEROJUNCTION

K.V. Bukhensky<sup>1</sup>, A.B. Dubois<sup>1</sup>, S.I. Kucheryavy<sup>2</sup>, S.N. Mashnina<sup>1</sup>, A.S. Safoshkin<sup>1</sup>, A.A. Ivanova<sup>1</sup>,  
E.S. Kulikova<sup>1</sup>, V.V. Potapova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ryazan State Radio Engineering University

<sup>2</sup>Obninsk Institute of Atomic Energy of the National Research Nuclear University MEPhI

e-mail: safoshkin.a.s@rsreu.ru

*Abstract.* The work is aimed at identifying the contribution intrasubband and intersubband electron - electron relaxation oscillation damping Landau quantization of the transverse magnetoresistance. For heavily doped heterojunction approximated by a triangular potential profile when ground and excited subband are filled, parametric expressions depending on the temperature are obtained, which explain the experimental dependence.

*Keywords.* Electron-electron interactions, heterojunction, the method of the random phase.

Впервые методика изучения процессов электрон-электронных взаимодействий в полупроводниковых гетероструктурах обоснована в работе [1]. В работе [2] исследовались свойства 2D электронов в полупроводниковых инверсионных слоях при заполнении нескольких подзон размерного квантования. Было исследовано влияние экранирования внешнего потенциала как внешнего возмущения на всю двумерную электронную систему. Оказалось, что влияние вышеуказанного фактора удобно описывать матричной диэлектрической функцией. Было показано, что степень экранирования в двумерном электронном газе, в противоположность объемному случаю, слабо зависит от концентрации электронов.

Решена проблема качественного и количественного исследования вклада электрон-электронных взаимодействий с учетом заряженных примесей в поверхностную проводимость. Используя аппарат гриновских функций [1] нам удалось получить температурные зависимости для электрон-электронного рассеяния для внутри и межподзонных переходов.

Роль внешнего возмущения играет потенциал экранирования в который входит диэлектрическая функция электронного газа. Далее, Фурье – образ внешнего возмущения подставляется в уравнение Больцмана, результатом решения которого является время электрон-электронной релаксации. Зонные диаграммы исследованной наноструктуры были рассчитаны методом самосогласованного решения уравнений Шредингера

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dz^2} + E(z) \right] \psi(z) = E\psi(z) \quad (1)$$

и Пуассона

$$E(z) = -eV(z), \quad -\frac{d^2V}{dz^2} = \frac{4\pi\rho(z)}{\chi(\mathbf{q}, \omega)}, \quad (2)$$

где  $\chi(\mathbf{q}, \omega)$  - диэлектрическая функция.

На рисунке 1 показана зависимость  $E(z)$ , квадрат модуля волновой функции электронов на энергетическом уровне основной  $E_1$  подзоны размерного квантования. Для решения поставленной задачи реальный профиль  $E(z)$  зоны проводимости гетероперехода аппроксимируем треугольной ямой, так как это представлено на рисунке 1, аналогично [3].

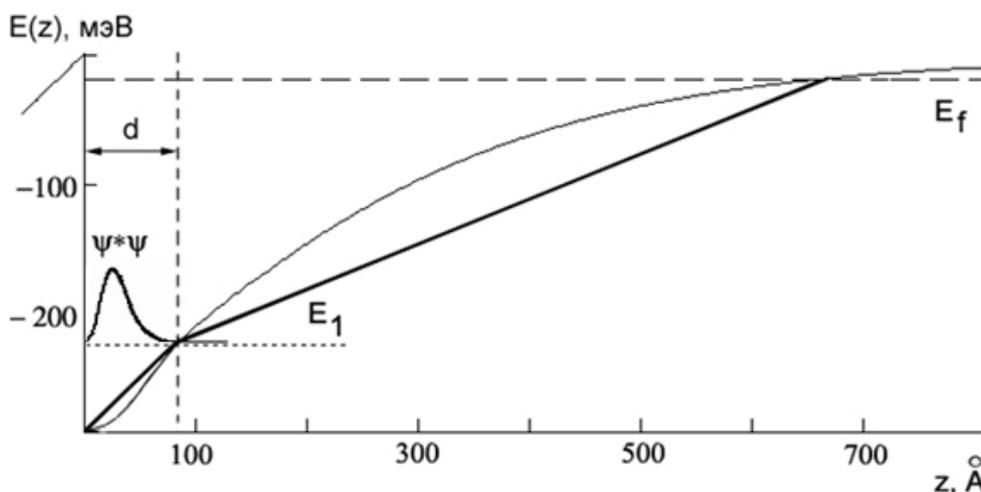


Рис. 1. Энергетическая диаграмма зоны проводимости  $E_c(z)$  гетероперехода с одной заполненной подзоной размерного квантования

Тогда Фурье-образ кулоновской экранировки будет иметь вид:

$$V_{ext}(\mathbf{q}) = \frac{1}{S} \int \frac{d^2\mathbf{r}}{(2\pi)^2} e^{-i\mathbf{q}\mathbf{r}} E_{ext}(\mathbf{r}), \quad (3)$$

где  $S = L^2$ ,  $L$  - линейные размеры системы, а Фурье-образ полной экранировки

$$V_{tot}(\mathbf{q}, \omega) = \frac{V_{ext}(\mathbf{q})}{\chi(\mathbf{q}, \omega)}. \quad (4)$$

Используя приближение хаотических фаз (ПХФ) [4] представим диэлектрическую функцию в виде

$$\chi(\mathbf{q}, \omega) = 1 - \frac{e^2}{2\pi q} \int \frac{d^2\mathbf{k} (f_{\mathbf{k}-\mathbf{q}/2} - f_{\mathbf{k}+\mathbf{q}/2})}{\hbar^2 \mathbf{k} \cdot \mathbf{q} / m^* + \hbar\omega}. \quad (5)$$

Рассмотрим процесс взаимодействия частиц с импульсом  $\mathbf{k}$  и  $\mathbf{p}$ . В результате взаимодействия получаются частицы с импульсами  $\mathbf{k} + \mathbf{q}$  и  $\mathbf{p} - \mathbf{q}$ . Вероятность такого процесса пропорциональна интегралу столкновений

$$\sum_{\mathbf{k}, \mathbf{p}} \delta(E_j(\mathbf{k} + \mathbf{q}) + E_l(\mathbf{p} - \mathbf{q}) - E_i(\mathbf{k}) - E_k(\mathbf{p})) f_{\mathbf{k}} f_{\mathbf{p}} (1 - f_{\mathbf{k}+\mathbf{q}}) (1 - f_{\mathbf{p}-\mathbf{q}}), \quad (6)$$

где  $f$  — функция распределения Ферми — Дирака.

Индексы  $i, j, k, l$  обозначают следующее: электрон, находящийся в состоянии  $i$  взаимодействует с электроном в состоянии  $k$ , в результате чего происходят переходы соответственно в состояния  $j$  и  $l$ . С точностью до второго члена разложения внешнего возмущающего потенциала теории возмущений выражение для времени «е-е» взаимодействия может быть представлено в виде

$$\begin{aligned} \frac{1}{\tau_{ij}^{ee}} = & \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \sum_{k,m} \sum_{\mathbf{q}} |V_{tot}^{ijkl}(\mathbf{q}, \omega)|^2 \times \\ & \times \sum_{\mathbf{k}, \mathbf{p}} \delta(E_j(\mathbf{k} + \mathbf{q}) + E_l(\mathbf{p} - \mathbf{q}) - E_i(\mathbf{k}) - E_k(\mathbf{p})) \times \\ & \times f_{\mathbf{k}} f_{\mathbf{p}} (1 - f_{\mathbf{k}+\mathbf{q}}) (1 - f_{\mathbf{p}-\mathbf{q}}), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $V_{tot}^{ijkl}(\mathbf{q}, \omega)$  — матричный элемент полного потенциала экранирования, который является Фурье-образом внешнего потенциала экранировки  $V_{ext}(\mathbf{r})$ .

Получаем:

$$V_{tot}(\mathbf{q}, \omega) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} V_{ext}(\mathbf{r}) \exp[-i(\mathbf{q}\mathbf{r} - \omega t)] d^2\mathbf{r}. \quad (8)$$

Функция  $V_{tot}(\mathbf{q}, \omega)$  имеет в комплексной плоскости частот особую точку, поэтому следует вначале проводить суммирование по волновым векторам  $\mathbf{k}$ ,  $\mathbf{p}$  и  $\mathbf{q}$ , а уже затем интегрирование по частоте  $\omega$ . Необходимо также отметить, что в большинстве работ по исследованию электрон-электронных взаимодействий используется статический предел так, что  $\chi(\mathbf{q}, \omega) \equiv \chi(\mathbf{q}, 0)$ . В нашей задаче функция распределения имеет достаточно сложную структуру. И поэтому возможно ожидать резонансные отклики на непрерывный спектр потенциала внешнего возмущения. Следовательно, решение поставленной задачи требует исследования частотной зависимости  $V_{tot}(\mathbf{q}, \omega)$  в (7) с использованием приближения хаотических фаз, суть которого состоит в пренебрежении связью между изменениями Фурье – образов плотностей, относящихся к разным длинам волн.

Для сильнолегированного гетероперехода, аппроксимированного треугольным потенциальным профилем, когда заполнены основная и возбужденная подзоны размерного квантования, получены выражения параметрических зависимостей от температуры, которые объясняют экспериментальные зависимости [2].

В ряде экспериментальных работ по исследованию особенностей осцилляций поперечного магнитосопротивления Шубникова – де Гааза (ШдГ) в широком диапазоне температур и магнитных полей для объемных 3D и двумерных 2D электронов обнаружены некоторые аномалии, имевшие определенную общность в качественном сходстве, но и существенные различия. Например, была обнаружена осциллирующая зависимость температуры Дингла  $T_D$  от температуры  $T$ , а, следовательно, и времени малоугловой релаксации  $\tau_q$  от  $T$  [3]. Эти осцилляции  $T_D(T)$  и  $\tau_q(T)$  были обнаружены для сильнолегированных гетеропереходов ( $n_s > 8.5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ), в которых заполнена основная и вторая возбужденная подзона размерного квантования. Была установлена однозначная связь этих аномалий с сильным (для вырожденных 3D и 2D электронов) электрон - электронным взаимодействием. Для качественного и количественного объяснения наблюдаемых эффектов необходимо рассмотрение каналов электрон - электронных («e-e») взаимодействий в сложной системе 2D вырожденных электронов (рис. 2).

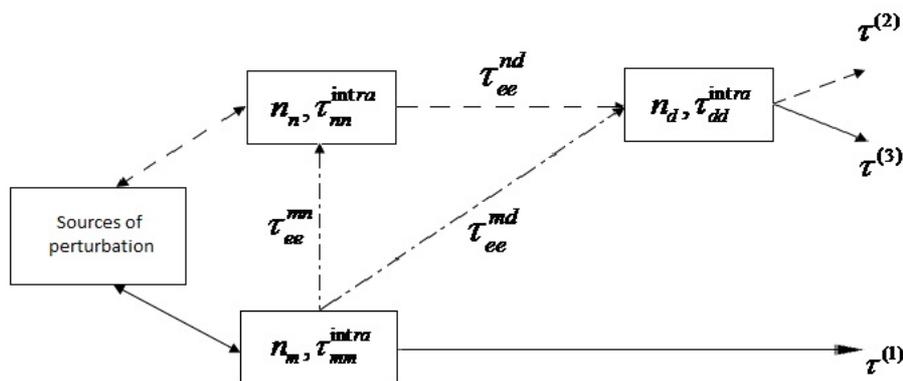


Рис. 2. Схема-модель каналов прохождения возмущения от источников. Комментарии в тексте

Рассмотрим возможные сценарии восприятия возмущения от источников и формирование за счет "e-e" взаимодействия  $\tau_q(T)$  - фактора столкновительного уширения уровней Ландау:

1) возмущение воспринимает массив 2D электронов  $n_m$  на основном уровне размерного квантования. Это взаимодействие характеризуется временем  $\tau_{ee}^{(1)}$ . За счет сильного "e-e"

внутриподзонного взаимодействия возмущение охватывает всю электронную систему и на опыте измеряется ... Траектория этого механизма показана на рисунке 1 сплошными линиями:

$$\tau^{(1)} \Rightarrow (\tau_{ee}^{mm}) \Rightarrow (\tau_{ee}^{md}, \tau_{ee}^{mn}) \Rightarrow (\tau_{ee}^{nn}, \tau_{ee}^{dd}, \tau_{ee}^{nd}) = \tau_{ee}^{(1)} ;$$

2) второй сценарий возможен, если возмущение воспринимает сателлит  $n_n$  на уровне  $E_p$  размерного квантования. В этом случае  $n_n$  непосредственно взаимодействуют с  $n_d$  и с  $n_m$  - 2D электронами. Следовательно, время разрушения квантования формируется так:

$$\tau^{(2)} \Rightarrow (\tau_{ee}^{mn}) \Rightarrow (\tau_{ee}^{nd}) \Rightarrow (\tau_{ee}^{mn}, \tau_{ee}^{nd}) \Rightarrow (\tau_{ee}^{mm}, \tau_{ee}^{dd}, \tau_{ee}^{md}) \Rightarrow \tau_{ee}^{(2)} .$$

Этот сценарий на схеме представлен штриховой траекторией.

3) если возмущение воспринимают 2D электроны на уровне  $E_m$ , то за счет взаимодействия со временем  $\tau_{ee}^{mn}$  с  $n_n$  (« $n$ -сателлитом»), а  $n_n$  за время  $\tau_{ee}^{nd}$  распространяют возмущение на  $n_d$ , так что формируется  $\tau_q^{\text{exp}}$  в цепочке  $\tau^{(3)} \Rightarrow (\tau_{ee}^{mn}) \Rightarrow (\tau_{ee}^{mn}, \tau_{ee}^{md}) \Rightarrow (\tau_{ee}^{mn}, \tau_{ee}^{dd}, \tau_{ee}^{nd}) \Rightarrow \tau_{ee}^{(3)}$ .

На схеме эта версия представлен штрих - пунктирной траекторией. Окончательные зависимости рассчитывались в соответствии с правилом Маттиссена  $(\tau_{ee}^{th})^{-1} = \sum_i (\tau_{ee}^i)^{-1}$ .

Из всех рассмотренных сценариев схемы-модели (рис. 2) случай (3) наиболее отвечает одной из кривых, рассчитанной как раз для этого случая [5]. Кроме этого можно отметить, что при низких температурах ( $T < 5K$ ) затухание квантования Ландау определяется  $n_s$  - электронами, а численный анализ разложения диэлектрических функций показывает появление немонотонностей  $\tau_{ee}^{th}(T, n_s)$  при  $n_m > 8 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  и  $T > 5K$ . Это позволяет утверждать, что характерные осцилляции  $\tau_{ee}^{th}(T)$  возникают только после заполнения электронами второй подзоны размерного квантования и отклика на температурное воздействие при  $T > 5K$ . Второй результат – это роль  $n_n$ - сателлита в возбуждении осцилляций, при этом независимо от того, какой компонент 2D электронной системы воспринимает возмущение, что показано на рис. 1 каналом  $\tau^{(3)}$ . Непосредственно это видно, если предположить  $n_n = 0$  и тогда, только  $\tau_{mm}^{\text{intra}}(T)$  и  $\tau_{dd}^{\text{intra}}(T)$  будут отличаться от нуля и осцилляции  $\tau_{ee}^{th}(T)$  не возникают. Таким образом, экспериментально наблюдаемые зависимости  $\tau_{ee}^{\text{exp}}(T)$  при  $T < 5K$  связаны только с внутриподзонами “e-e” переходами.

### Библиографический список

1. Pines D., Nozieres P. The theory of quantum liquids. W.A. Benjamin, Inc. New York, Amsterdam, 1966, 383 p.
2. Dubois A.B. Electron-electron interactions in moderately-doped heterojunction Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology (State University), 2010, Vol. 2, 1(5), 24-27.
3. Ambartsumyan V.A., Andryushchenko E.A., Bukhensky K.V., Dubois A.B., Dvoretzkova E.A., Gordova T.V., Kucheryavy S.I., Mashnina S.N., Safoshkin A.S. Channels of electron-electron interactions in highly doped heterojunction. // Nanosystems: physics, chemistry, mathematics. 2014. Vol. 5. Issue 3. PP. 343-353
4. Bukhensky K.V., Dubois A.B., Gordova T.V., Kucheryavy S.I., Mashnina S.N., Safoshkin A.S. – Electron-electron interactions in highly doped heterojunction. – Physics Procedia. – 2015. – Vol. 71. – pp. 359 – 363.
5. A V Baskakova, K V Bukhensky, A B Dubois, S I Kucheryavy, S N Mashnina and A S Safoshkin – Kinetic processes in heavily doped semiconductor heterojunctions. – Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Volume 747, Number 1, 012026.

УДК 621.315.592

## ПРОЦЕСС ДИФРАКЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ НАНОСТРУКТУРЕ

К.В. Бухенский<sup>1</sup>, А.Б. Дюбуа<sup>1</sup>, С.И. Кучерявый<sup>2</sup>, С.Н. Машнина<sup>1</sup>, А.С. Сафoshкин<sup>1</sup>, Д.А. Зенков<sup>1</sup>,  
Д.С. Крючков<sup>1</sup>, А.С. Лачугин<sup>1</sup>, А.А. Стрельников<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Рязанский государственный радиотехнический университет

<sup>2</sup>Обнинский институт атомной энергетики

Национального исследовательского ядерного университета МИФИ

e-mail: [safoshkin.a.s@rsreu.ru](mailto:safoshkin.a.s@rsreu.ru)

*Аннотация.* В работе рассмотрен процесс дифракции ТМ – поляризованной электромагнитной волны гауссова пучка на МДП (металл – диэлектрик – полупроводник) структуре с учетом нелинейности диэлектрической проницаемости полупроводниковой пленки. В рамках теории развит модовый метод расчета процесса взаимодействия излучения со структурой, позволяющий рассчитывать для фиксированного потока энергии возмущения потока энергий возникающих в процессах дифракции.

*Ключевые слова.* Гетероструктура, модовый метод.

## PROCESS OF DIFFRACTION OF ELECTROMAGNETIC WAVE ON SEMICONDUCTOR NANOSTRUCTURE

K.V. Bukhensky<sup>1</sup>, A.B. Dubois<sup>1</sup>, S.I. Kucheryavy<sup>2</sup>, S.N. Mashnina<sup>1</sup>, A.S. Safoshkin<sup>1</sup>, D.A. Zenkov<sup>1</sup>,  
D.S. Kryuchkov<sup>1</sup>, A.S. Lachugin<sup>1</sup>, A.A. Strel'nikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ryazan State Radio Engineering University

<sup>2</sup>Obninsk Institute of Atomic Energy of the National Research Nuclear University MEPhI

e-mail: [safoshkin.a.s@rsreu.ru](mailto:safoshkin.a.s@rsreu.ru)

*Abstract:* In this paper we consider the process of diffraction of TM - polarized electromagnetic Gaussian beam wave in the MIS structure (metal - insulator - semiconductor), taking into account the nonlinearity of the dielectric permittivity of the semiconductor film. The framework was developed the method of calculation of the mode of interaction of radiation with the structure of the process that allows to calculate for a fixed stream flows of energies resulting in diffraction processes.

*Keywords.* Heterostructure, modal method.

Процессы перераспределения энергии в результате дифракции электромагнитного излучения в диэлектрических средах представляют собой одну из важнейших задач интегральной оптики. По сравнению с процессами распространения электромагнитного излучения вдоль многослойных структур с параллельными (или коаксиальными) границами раздела, которые хорошо изучены и систематизированы к настоящему времени [1,2,8], дифракционные задачи изучены гораздо слабее. Основная проблема заключается в больших математических сложностях, связанных с решением уравнений Максвелла в средах, где границы раздела между средами суть не параллельные плоскости. Условия непрерывности в совокупности с уравнениями Максвелла для таких задач связаны с решением сложных интегродифференциальных уравнений [3], которые имеют аналитическое решение только для определенных геометрий [4]. В работе произведен расчет процесса отражения гауссова пучка с возбуждением поверхностных и объемных электромагнитных полей в структуре, где уже при относительно небольших напряженностях электромагнитного поля нелинейность в диэлектрической проницаемости будет сказываться на процесс отражения от нелинейной структуры. Последний представляет собой четыре области, характеризующиеся диэлектрическими проницаемостями  $\epsilon_1$  - вакуум,  $\epsilon_2$  - металл,  $\epsilon_3(\omega)$  - тонкая полупроводниковая нелинейная пленка,  $\epsilon_4$  - диэлектрик (рис. 1).

Уравнения Максвелла

$$i\omega\mathfrak{H} = c \operatorname{rot} \mathfrak{E} \text{ и } i\omega\epsilon_i(\omega)\mathfrak{E} = -c \operatorname{rot} \mathfrak{H} \quad (1)$$

в декартовой системе в совокупности с гармоническим характером распространения каждой моды вдоль оси  $X$   $\{\mathfrak{H}(x, z), \mathfrak{E}(x, z)\} = \{\mathbf{H}(z), \mathbf{E}(z)\} \exp(ik_x x)$  связывают компоненты мод ТМ — поляризованного излучения ( $E_x, E_z, H_y$ ) следующим образом:

$$E_x(x, z) = \frac{ic}{\omega \varepsilon_i} \frac{\partial H_y}{\partial z}; \quad E_z(x, z) = \frac{ic}{\omega \varepsilon_i} \frac{\partial H_y}{\partial x}; \quad E_x(z) = \frac{ic}{\omega \varepsilon_i} \frac{dH_y}{dz}; \quad E_z(z) = -\frac{c}{\omega \varepsilon_i} k_x H_y(z),$$

что легко получить из (1), учитывая планарность задачи [8]. Огибающие моды  $H(z)$ , а также волновое число  $k_x$  определяются из волнового уравнения и граничных условий. Волновое уравнение вытекает из (1) и дает зависимость поля  $H_y(z)$  для каждого из квадрантов:

$$\frac{d^2 H_y}{dz^2} + \left[ \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_i - k_x^2 \right] H_y = 0 \quad (2)$$

с граничными условиями  $H_y(z=-0) = H_y(z=+0)$ ,  $E_x(z=-0) = E_x(z=+0)$ , которые полностью определяют структуру каждой моды при  $x < 0$  и  $x > 0$ . Как нетрудно убедиться, решение уравнения (2) при  $x < 0$  имеет вид:

$$H_{1y}(z) = B_1 \exp(i\beta z) + B_2 \exp(-i\beta z), \quad E_{1z}(z) = -\frac{ck_x^{(1)}}{\omega \varepsilon_1} [B_1 \exp(i\beta z) + B_2 \exp(-i\beta z)],$$

где  $\beta$  — поперечное волновое число, для которого  $\beta^2 + (k_x^{(1)})^2 = k_0^2 \varepsilon_1$ ,  $k_0 = \omega / c = 2\pi / \lambda$  — волновое число в вакууме,  $\lambda$  — длина волны падающего излучения.

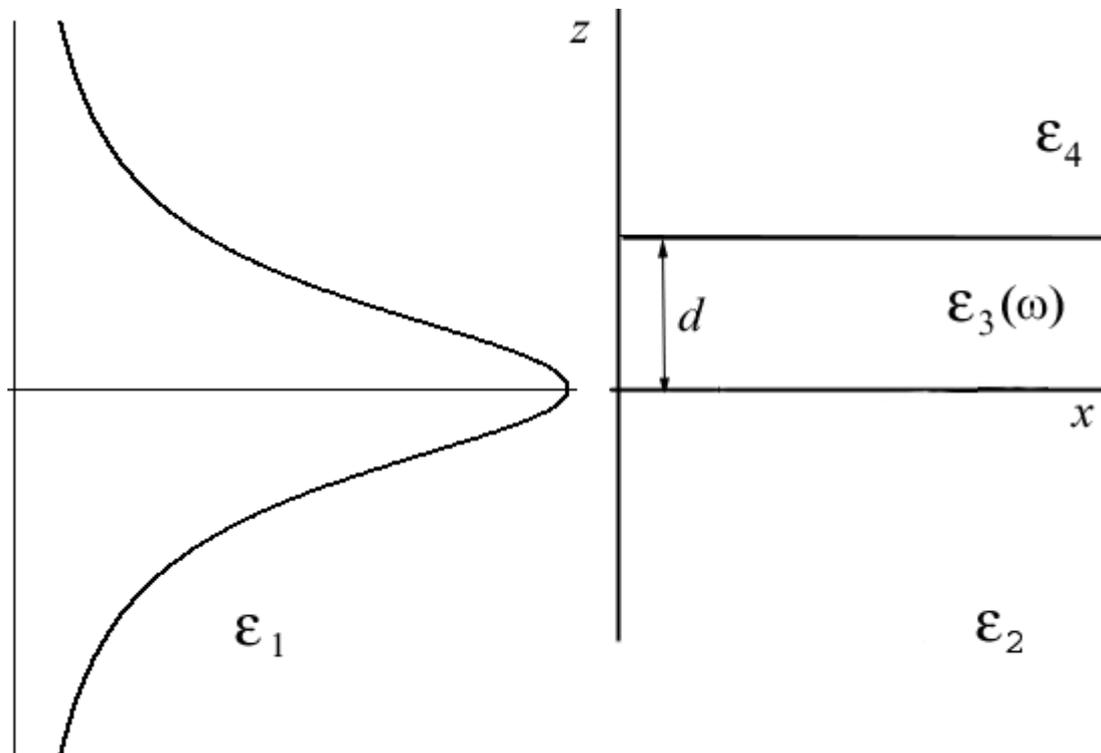


Рис. 1. Схема дифракции при нормальном падении ЭМ волны на диэлектрический барьер

Два волновых числа  $\beta$  и  $k_x$  определяются из одного уравнения. Это означает, что одно из них можно принять независимым. Пусть это будет  $\beta$ . Очевидно, что набор функций (4) будет полным, если мы переберем все возможные  $\beta$ . Видно, что в средах 1 и 3 будет по две гармоники (такое излучение будем называть вырожденным и для определенности обозначим их "+" и "-" гармониками) и соответственно две неопределенные константы для одного значения  $k_x$ . Поэтому определение связи между двумя свободными коэффициентами остается произвольным. Этот произвол устраняется наложением на собственные моды условий ортогональности и нормировки:

$$\int_{-\infty}^{\infty} E_{1z}^{\beta\pm} H_{1z}^{\beta\mp} dz = 0 \text{ и } \int_{-\infty}^{\infty} E_{1z}^{\beta\pm} H_{1y}^{\beta\pm} dz = -\frac{c}{\omega} k_x^{(1)} \delta(\beta - \beta'). \quad (3)$$

Найдем коэффициенты  $B_1$  и  $B_2$ . Подставив в условие нормировки значения электрического и магнитного полей, получим:  $B_1 = B_2^* = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{2\pi}} (1 \pm i)$ . Таким образом, в среде 1 магнитное поле будет  $H_{1y}^{\beta\pm}(z) = \frac{1}{2} B_{1\beta} [(1 \mp i) \exp(-i\beta z) + (1 \pm i) \exp(i\beta z)]$ , где  $B_{1\beta} = (\varepsilon_1/2\pi)^{1/2}$  — нормировочная постоянная.

Учитывая вышеизложенное, записываем падающее и отраженное излучение в виде

$$H_{1y}^i(x, z) = \int_0^{\infty} [I_{\beta}^+ H_{1y}^{\beta+} + I_{\beta}^- H_{1y}^{\beta-}] \exp(ik_x^{(1)} x) d\beta, \quad (4.1)$$

$$\mathcal{H}_{1y}^r(x, z) = \int_0^{\infty} [R_{\beta}^+ H_{1y}^{\beta+} + R_{\beta}^- H_{1y}^{\beta-}] \exp(-ik_x^{(1)} x) d\beta, \quad (4.2)$$

где  $I_{\beta}^{\pm}$  и  $R_{\beta}^{\pm}$  — амплитуды падающей и отраженной волн. Падающее излучение можно определить из предпоследнего уравнения. Для этого представим магнитное поле как  $\mathcal{H}(x, z) = G(z) \exp(-ik_x x)$ , где  $G(z) = C_0 / (1 + z^2/W_0^2)$ , а  $C_0$  и  $W_0$  — параметры пучка.

С учетом вышесказанного умножим (4.1) сначала на  $E_{1z}^{\beta+}(z)$ , затем на  $E_{1z}^{\beta-}(z)$  и по очереди проинтегрируем по  $z$ . Принимая во внимание условия ортогональности и нормировки

$$(3), \text{ получаем: } \int_{-\infty}^{\infty} G(z) E_{1z}^{\beta\pm} dz = -\frac{c}{\omega} k_x^{(1)} I_{\beta}^{\pm}.$$

Полученные результаты должны удовлетворять закону сохранения энергии [5]:  $P^i = P^R + P^T + P^{sp}$ , где  $P^i$  - падающее излучение,  $P^R$  - отраженное объемное излучение,  $P^T$  - прошедшее излучение и  $P^{sp}$  - поток поверхностного поляритона. То есть должно выполняться равенство:

$$\int_0^{\infty} (2I_{\beta}^+ I_{\beta}^* - R_{\beta}^+ R_{\beta}^{*+} - R_{\beta}^- R_{\beta}^{*-}) k_x^{(1)} d\beta = TT^* k_s + \int_0^{\infty} T_{\beta} T_{\beta}^* k_x^{(2)} d\beta,$$

которое в совокупности с законом Френеля [6] является критерием истинности полученных результатов. Для удобства целесообразно нормировать полученные величины таким образом, чтобы падающий поток был равен единице, а вектор Пойнтинга был безразмерной вели-

чиной [7]. Для этого введем новые «нормированные» параметры гауссова пучка:  $C_n = C_0/G$ ,  $W_n = (2\pi/\lambda)W_0$ ,  $k'_x = k_x/k_0$ ,  $G$  — некоторая размерная функция.

Тогда для падающего потока

$$P_x^i = \frac{c^2}{4\pi\omega} \int_0^\infty I_\beta I_\beta^* k_x^{(1)} d\beta = \frac{c}{8\pi} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_1}} C_0^2 W_0 \frac{\pi}{2} = \left[ \frac{cG^2\lambda}{16\pi^2} \right] \left( \frac{\pi C_n^2 W_n}{2\sqrt{\epsilon_1}} \right).$$

В квадратных скобках — размерная величина, в круглых — нет. Первый множитель будет одинаков у всех потоков, поэтому на него можно сократить. Тогда нормированный па-

дающий поток будет равен  $P_{x,norm}^i = \frac{\pi C_n^2 W_n}{2\sqrt{\epsilon_1}} = 1$  при  $C_n = \sqrt{\frac{2\sqrt{\epsilon_1}}{\pi W_n}}$ .

Рассмотренные в статье процессы дифракции электромагнитного излучения в пассивной волноведущей среде относятся к той ситуации, когда нелинейные добавки к диэлектрической проницаемости малы настолько, что процессы дифракции практически не зависят от интенсивности полей и их расчет основывается на линейной модели.

### Библиографический список

1. Маркузе Д. Оптические волноводы: пер. с англ. / под ред. В.В. Шевченко - М.: Мир, 1974.
2. Нефедов Е.И. Дифракция электромагнитных волн на диэлектрических структурах.- М.: Наука, 1978.
3. Петров Д.В. // Квантовая электроника. 1(2), 329, 1974.
4. Шевченко В.В. Плавные переходы в открытых волноводах. -М.: Наука, 1978.
5. Агранович В.М., Кравцов В.Е., Лескова Т.А.. // ЖЭТФ, 81(11). – С. 1828. 1981.
6. Voronko A.I., Klimova L.G., Shkerdin G.N. // Solid State Comm., 6. P. 361, 1987.
7. Поверхностные поляритоны ./ под ред. В.М. Аграновича, Д. Миллса - М.: Наука, 1986.
8. Дюбуа А.Б., Зилотова М.А., Кучерявый С.И., Сафошкин А.С. – Кинетические процессы в умеренно легированном гетеропереходе. – Вестник РГРТУ. – 2013. – №3(45). – С. 88-92.

УДК 621.315.592; ГРНТИ 29.19.04

## АНАЛИЗ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

**В.С. Филяревич, А.В. Алпатов**

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, filyarevicv95@mail.ru*

Аннотация. В данной работе описана последовательность анализа шероховатости поверхностей, выполняемая в соответствии с ГОСТ 25142-8 и ISO-4287-1997. Проводится сравнение метода сглаживания и вайвлет-анализа

Ключевые слова. Шероховатость, базовая линия, ГОСТ 25142-82, ISO-4287-1997.

## SURFACE ROUGHNESS ANALYSIS

**V.S. Filyarevich, A.V. Alpatov**

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Russia, Ryazan, filyarevicv95@mail.ru*

Abstract. In this paper, a sequence of analysis of surface roughness, performed in accordance with GOST 25142-8 and ISO-4287-1997, is described. A comparison of the smoothing method and the vvvlet-analysis.

Keywords Roughness, baseline, GOST 25142-82, ISO-4287-1997.

### Актуальность анализа шероховатости

Проблема повышенного требования к качеству поверхности применяемых материалов, в современные электронных технологиях, имеет большое значение. Т.к. непосредственно качество обработки поверхности тех или иных материалов предоставляет необходимые физические эффекты и электрические параметры микросхем и частей электроприборов. Увеличение надёжности и срока службы микросхем и микроузлов, полупроводниковых приборов и микро и наноструктур является наиболее актуальной задачей современной микро и наноэлектроники. Данная задача является экономически значимой. Основным источником отказа в работе полупроводниковых устройств и элементов являются не механические повреждения, а поверхностные токи утечки и электрически пробой, вызванные и зависящие от качества структуры приповерхностного слоя и дефектов на поверхности подложки, которая является главной несущей конструкционной базой микроэлектронных устройств и микросхем.

В настоящее время датчики информационных и измерительных систем, полупроводниковые и интегральные микросхемы и приборы являются очень сложными и уникальными устройствами, отдельные части которых имеют размеры единиц микрон и меньше. Подложки полупроводниковых изделий, на которых формируются предметы микроэлектроники, должны отличаться высококачественной атомной структурой и высокоточной геометрией поверхности. Обеспечить необходимые параметры можно при постоянном контроле и анализе шероховатости и геометрии поверхности полупроводниковых изделий.

### Способы оценки шероховатости

Шероховатость поверхности – это показатели, обозначающие конкретное число данных, которые характеризуют состояние неровностей поверхности измеряемых на очень малых отрезках при базовой величине длины.

Шероховатость служит основной характеристикой качества поверхности. Она является основной характеристикой качества поверхности и оценивается стандартизированными параметрами. Стандартизированные параметры для оценивания качества поверхностей являются обязательными на всех предприятиях, организациях и учреждениях. Для описания и проведения анализа шероховатости поверхности определён межгосударственный стандарт ГОСТ 25142-82 и международный стандарт ISO-4287-1997. Стандарты устанавливают перечень применяемых в технике, науке и производстве термины и определения основных понятий, которые относятся к шероховатости поверхности и должны применяться при установлении требований и контроле шероховатости поверхности.

Основные параметры, применяемые для анализа шероховатости поверхности в ГОСТ 25142-82, показаны на рисунке 1 [1].

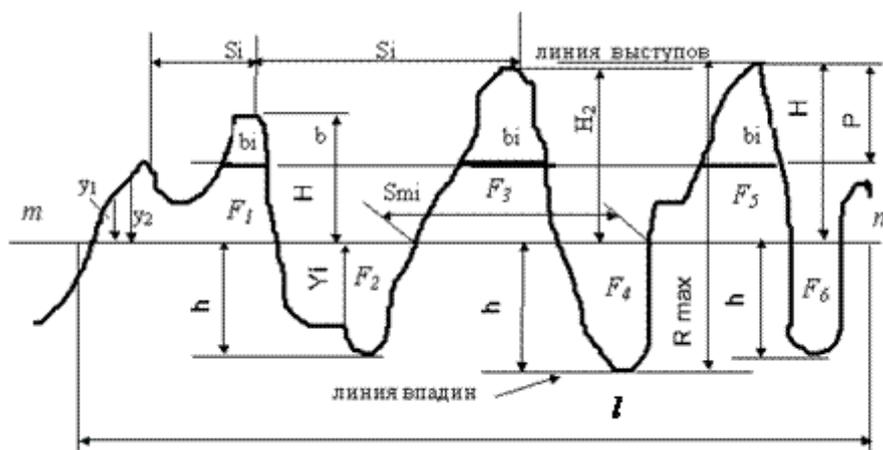


Рис. 1. Параметры шероховатости по ГОСТ 25142-82

Базовая длина  $l$  - длина базовой линии, которая используется для выявления неровностей, описывающих шероховатость поверхности. Длина оценки  $L$  - длина, непосредственно на которой оцениваются значения параметров шероховатости. Длина оценки содержит в себе одну или несколько базовых линий. Высота выступа профиля  $y_p$  - расстояние от усреднённой линии профиля до наивысшей точки выступа профиля. Глубина впадины профиля  $y_v$  - интервал от средней линии профиля до нижней точки впадины профиля. Высота наибольшего выступа профиля  $R_p$  - расстояние от средней линии до высшей точки профиля, которая оценивается в пределах базовой длины. Глубина наибольшей впадины профиля  $R_v$  - расстояние от нижней точки профиля до средней линии, оцениваемая в пределах базовой длины. Наибольшая высота неровностей профиля  $R_{max}$  - расстояние между линией выступов и впадин профиля, описываемая в пределах базовой длины.

Параметры непосредственно связанные с базовой длиной. Среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$  - среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины. Среднее квадратическое отклонение профиля  $R_q$  - среднее квадратическое значение отклонений профиля в пределах базовой длины. Среднее значение параметра шероховатости поверхности  $\bar{P}$  - среднее значений параметра шероховатости, определенных на всех длинах оценки.

На практике для анализа показателя шероховатости исследуемой поверхности нужна базовая длина, она прямо взаимосвязана с шероховатостью, а шероховатость конкретно с методом обработки поверхности. Длина базовой линии выбирается так, чтобы полученной информации хватало для определения параметров шероховатости. Базовая длина непосредственно связана с параметрами шероховатости  $R_z, R_a, R_q, \bar{P}$ .

Предпочтительнее применять параметр  $R_a$ , как наиболее высокоинформативный, также и для грубых поверхностей. Однако, параметры  $R_z$  и  $R_q$  не потеряли своего значения и их применяют в тех случаях, когда по функциональным требованиям необходимо ограничить полную высоту неровностей профиля, а также когда прямой контроль параметра  $R_a$  не представляется возможным.

### Особенности выделения базового профиля

Основной задачей является нахождение базовой длины, которая усложняется сложным рельефом поверхностей, таких как аморфный кремний, не имеющий упорядоченную структуру, солнечные модули из монокристаллического кремния. Его поверхность необходимо текстурировать, т.е. получить множество микропирамид, расположенных так, чтобы отражённый свет от одной пирамиды попадал на грань другой [2].

Согласно ГОСТ 25142-82 поперечный профиль поверхности представляется двумя составляющими: периодической (гладкой) и случайной – неровности, образующие шероховатость. Для отделения одной составляющей от другой используется понятие базовой линии, содержащая в себе одну или несколько базовых длин, в зависимости от структуры гладкой составляющей профиля поверхности. После отделения случайной составляющей по ней рассчитываются основные параметры шероховатости профиля.

Выделение шероховатого профиля производится сглаживанием (НЧ фильтрацией) исходного профиля, например скользящим средним, с последующим его вычитанием из исходного. Далее расчет шероховатости идет в рамках ISO 4287-1997 (аналог ГОСТ 25142-82) [3].



Рис. 2. Параметры шероховатости по ISO 4287-1997

Базовая длина - длина в направлении оси X, которая используется при определении неоднородностей, характеризующих оцениваемый профиль. Арифметическое среднее отклонение оцениваемого профиля  $P_a$ ,  $R_a$ ,  $W_a$  - арифметическое среднее абсолютных значений ординаты  $Z(x)$  в пределах базовой длины. Среднеквадратичное отклонение оцениваемого профиля  $P_q$ ,  $R_q$ ,  $W_q$  - среднеквадратичное значение ординаты  $Z(x)$  в пределах базовой длины.

При изменении частоты среза НЧ фильтра, получается различная амплитуда шероховатости, что вносит свои вопросы. Насколько корректно деление поверхности на базовую (гладкую) и шероховатую составляющие и не является ли базовая составляющая той же шероховатостью, только в большем масштабе?

Это зависит от того, каким образом была сформирована поверхность материала, и какие требования к ней предъявлялись. При полировке шероховатость зависит от метода полировки и является нежелательным фактором, влияющим на эксплуатационные свойства материала. В этом случае деление на гладкую и шероховатую составляющие правомерно. Однако если взять фрактальную структуру, то логика должна быть иной, поскольку фрактал бесконечно масштабирован и каждая частотная составляющая является шероховатостью на соответствующем масштабе, а базовая линия отсутствует. Естественно, что реальные процессы обладают масштабированием в ограниченном диапазоне, за пределами которого наступает насыщение и свойство самоподобия пропадет. Также очевидно, что для многих процессов со сложной структурой не всегда можно сказать, каковы их диапазоны масштабирования, в силу ограниченности времени регистрации или пространственного разрешения методов микроскопии [4].

Алгоритм реализации метода сглаживания предполагает устранение тренда на разных масштабах анализируемого процесса, что эквивалентно отделению базовой линии.

Для точного определения значения базовой длины необходимо многократное применение фильтров (фильтр профиля  $\lambda_s$ ,  $\lambda_c$ ,  $\lambda_f$ ), такая схема реализована в пакете R.

### Использование пакета R для анализа шероховатости

Для анализа шероховатости поверхностей в пакете R применяются библиотеки `imager` и `spatstat`.

Библиотека `imager` имеет возможность быстрой обработки изображений размером до четырёх измерений (два пространственных размера, глубина, цветовое измерение). Представляет традиционные инструменты обработки изображений (фильтрация, морфология,

преобразование и т.д.). А так же различные функции для анализа изображения с использованием R.

Библиотека `spatstat` содержит функцию `blur`, которая использует гауссовское размытие. Фильтр Гаусса принадлежит к ряду фильтров, которые сглаживают изображение. Сглаживающие фильтры применяются в основном для шумоподавления. Ввиду того, что шум меняется случайно от одного пикселя к другому, шумы близлежащих пикселей при сложении будут уравнивать друг друга. Чем больше значение окна фильтрации, тем в меньшей степени будет средняя интенсивность шума, однако побочное действие данного ряда фильтров это значительное размытие частей изображения. Подавление шума с использованием фильтра усреднения имеет явный недостаток: все пиксели в маске фильтра независимо от расстояния от пропускаемой точки оказывают на результат идентичный эффект. Шумоподавление может применяться более эффективно, если влияние пикселей на итог будет сокращаться с увеличением расстояния. Схема работы показана на рисунке 3.

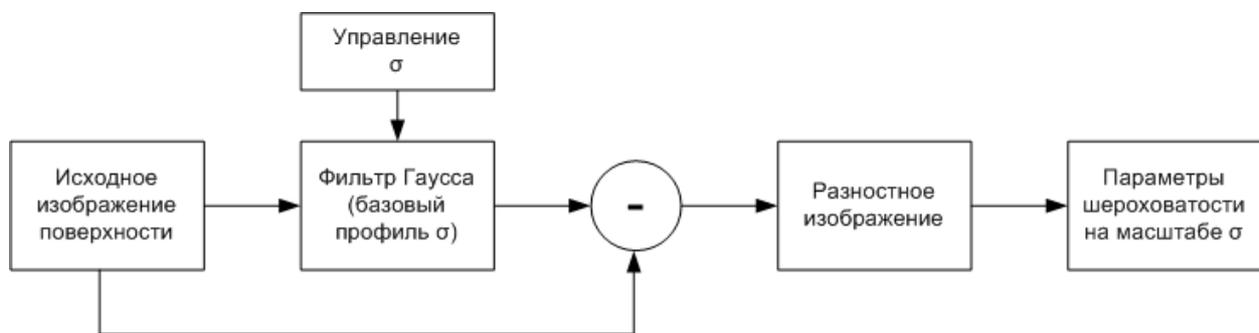


Рис. 3. Схема вычисления параметров шероховатости с масштабированием базового профиля

При использовании функции `blur` изменяется значение  $\sigma$  – ширина окна гаусса, в диапазоне 0..6, чем больше, тем больше сглаживание изображения.

Для разделения изображения на ВЧ и НЧ составляющие также можно использовать вейвлет-анализ который производит декомпозицию сигнала на множество гладких и шероховатых составляющих, из которых пользователь, путём их отбрасывания или добавления может конструировать нужную структуру шероховатости. График функции выглядит как волнообразные колебания с определённой амплитудой, значение которой уменьшается от нуля в дали от начала координат. В общем варианте анализ сигналов делается в плоскости вейвлет-коэффициентов (масштаб-время-уровень). Интегральным преобразованием определяются вейвлет коэффициенты.

### Библиографический список

1. Техэксперт/ГОСТ 25142-82 [Электронный ресурс], URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-25142-82> (дата обращения 15.02.2018).
2. Rentechno/Основы технологии кремниевых ФЭП [Электронный ресурс], URL: <https://rentechno.ua/blog/si-solar-cell-technology.html> (дата обращения 15.02.2018).
3. Техэксперт/ISO 4287-1997 [Электронный ресурс], URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200116337> (дата обращения 15.02.2018).
4. А.Н. Павлов. Методы анализа сложных сигналов. — Саратов: Научная книга, 2008. — 120 с.

УДК 538.915; ГРНТИ 29.19.31

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ГЛУБОКИХ УРОВНЕЙ В БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУРАХ Al/N-Si

А. С. Тюшин, В. В. Гудзев

*Рязанский государственный радиотехнический университет*

*Россия, Рязань, atushin95@gmail.com*

*Аннотация.* В статье рассмотрены основные положения метода РСГУ для контроля глубоких уровней в полупроводниковых структурах. Приведены результаты исследования глубоких уровней в диодах Шоттки типа Al/n-Si.

*Ключевые слова.* Дефекты, глубокие уровни, РСГУ, диоды Шоттки.

## INVESTIGATION OF THE DEEP LEVELS ENERGY SPECTRUM IN BARRIER STRUCTURES Al/N-Si

A. S. Tyushin, V. V. Gudzev

*Ryazan State Radioengineering University*

*Russia, Ryazan, atushin95@gmail.com*

*Annotation:* The article deals with the main provisions of the DLTS method for monitoring deep levels in semiconductor structures. Reduced the results of the analysis of deep levels in Schottky diodes Al/n-Si type.

*Keywords.* Defects, deep levels, DLTS, Schottky diodes.

При создании полупроводниковых структур, таких как диоды на основе p-n-перехода, диоды Шоттки и транзисторы, неизбежно возникают дефекты, вызванные технологическими операциями. Дефектом в твердом теле может быть посторонний атом (атом примеси), отсутствие атома в узле (вакансия) или наличие двух атомов в узле, сдвиг одного или более атомов от нормального положения в кристаллической решетке (сдвиг) или оборванные ковалентные связи [1]. В каждом из этих случаев дефект обладает электрической активностью и может захватывать носители заряда. Таким образом, дефекты образуют дополнительные энергетические уровни в запрещенной зоне полупроводника. Уровни, которые при комнатной температуре не являются полностью опустошенными, называют глубокими уровнями (ГУ), а дефект, создающий такой уровень – глубоким центром (ГЦ). В зависимости от положения в запрещенной зоне ГУ делятся на донорные и акцепторные.

ГЦ могут играть как положительную, так и отрицательную роль в полупроводниковой технике. Положительное значение ГЦ заключается в том, что, являясь центрами рекомбинации, они могут способствовать рассасыванию носителей заряда из базы полупроводниковых приборов, что улучшает частотные характеристики таких приборов. Отрицательное влияние заключается в том, что при работе в режиме малых сигналов носители заряда будут рекомбинировать на ГЦ, при этом сигнал будет меняться [2]. По этим причинам ГУ требуют тщательного контроля.

Релаксационная спектроскопия глубоких уровней (РСГУ, англ. DLTS – deep level transient spectroscopy) – один из наиболее часто применяемых методов для исследования ключевых параметров ГУ, таких как энергия ионизации, концентрация, населенность и сечение захвата. Суть этого метода заключается в воздействии на структуру заполняющими и опустошающими импульсами напряжения и изучении токового или емкостного отклика.

Для исследования ГУ реальных структур использовались диоды Шоттки типа Al/n-Si на тестовой ячейке ТЯ-52.

Структура была сформирована следующим образом: сначала была выбрана кремниевая подложка КДБ-10 (100) с эпитаксиальным слоем КЭФ-4,5 толщиной 10 мкм. Затем вся поверхность подложки окислялась по схеме "сухой-влажный-сухой", так как сформировать слой толщиной 3 мкм только в атмосфере сухого кислорода невозможно. Далее проводилась первая фотолитография для разделительной диффузии и вскрытие окон в слое SiO<sub>2</sub>. Затем сформированы области изоляции и проведена подготовка к проведению базовой диффузии.

После этого была проведена вторая фотолитография для базовой диффузии и вскрытие окон в слое  $\text{SiO}_2$ . Затем проводилась загонка бора в области базы и проведена подготовка к разгонке бора по следующим вариантам:

- удаление боро-силикатного стекла из области базы до поверхности Si;
- полное удаление БСС и слоя  $\text{SiO}_2$  до 0,07 мкм. Это толщина  $\text{SiO}_2$ , выращенного в сухом кислороде, который является плотным качественным диэлектриком;
- полное удаление БСС и  $\text{SiO}_2$ .

Затем выполнялась разгонка базовой примеси и подготовка к окислению эмиттера. После проведения третьей фотолитографии (вскрытие окон для областей эмиттера) была проведена  $n^+$ -диффузия. Затем были вскрыты окна под омические контакты и проведен отжиг при температуре 900 °С в атмосфере азота, время проведения отжига - 1 час. После этого были сформированы омические контакты толщиной 1 мкм и проведена четвертая фотолитография для окончательного формирования контактов. Далее для предотвращения токов утечки по поверхности был нанесен пассивирующий слой  $\text{SiO}_2$ . По пассивирующему слою была проведена пятая фотолитография для формирования контактных площадок к кристаллу; проведен отжиг в атмосфере азота, время отжига - 30 минут. После завершения всех технологических операций была произведена сборка в корпус.

В таблице 1 представлены режимы травления.

Таблица 1 – Технологические режимы травления для ДШ с алюминиевым контактом Шоттки

№ образца	Температура отжига, °С	Вид травления
10	—	ЖХТ
12	900	ЖХТ
14	—	ПХТ
11	900	ПХТ

При проведении РСГУ-исследования использовались следующие параметры:

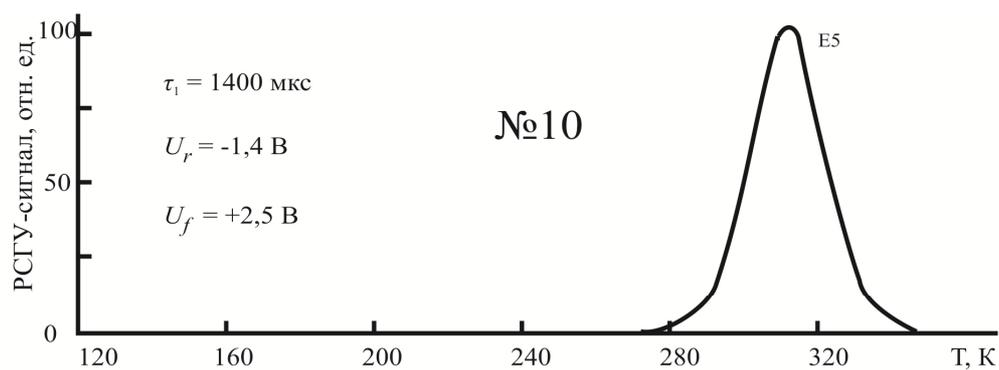
- время релаксации  $\tau = 60 - 6000$  мкс;
- температурный диапазон измерений 120 – 400 К;
- амплитуда импульсов напряжения заполнения  $U_f$  и опустошения  $U_r$  ГУ - +2,5 В и - 1,4 В соответственно. Применение заполняющего импульса обусловлено необходимостью смещения границы ОПЗ в сторону границы раздела Al/n-Si, что приводит к заполнению ГУ носителями заряда в приповерхностной области структуры. Это даёт полную картину о наличии ГЦ в структуре.

Параметры ГУ в диодах Шоттки приведены в таблице 2[2].

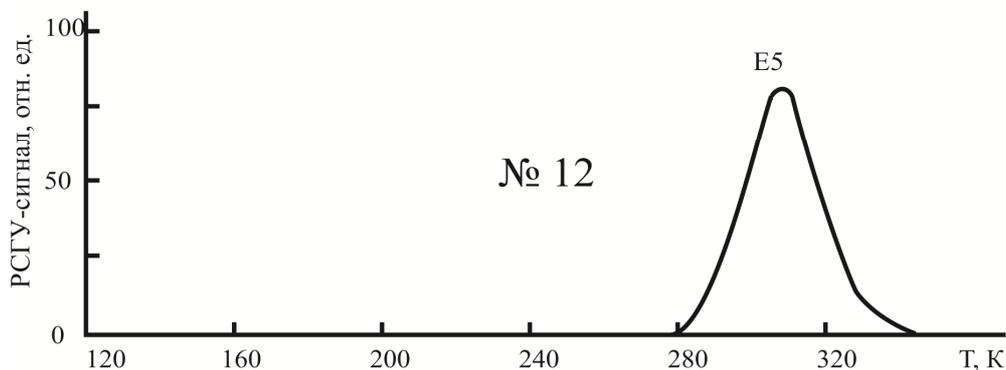
Таблица 2 - Данные по концентрации ГУ в диодах Шоттки Al/n-Si

№ образца	Температура отжига, °С	Вид травления	Концентрация глубоких центров, см <sup>-3</sup>				
			E1 E <sub>c</sub> -0,20 эВ	E2 E <sub>c</sub> -0,33 эВ	E3 E <sub>c</sub> -0,38 эВ	E4 E <sub>c</sub> -0,50 эВ	E5 E <sub>c</sub> -0,55 эВ
10	—	ЖХТ					8,1·10 <sup>11</sup>
12	900	ЖХТ					6,0·10 <sup>11</sup>
14	—	ПХТ	3,9·10 <sup>11</sup>	2,4·10 <sup>11</sup>	1,3·10 <sup>11</sup>	8,4·10 <sup>10</sup>	9,1·10 <sup>11</sup>
11	900	ПХТ				8,0·10 <sup>10</sup>	5,7·10 <sup>11</sup>

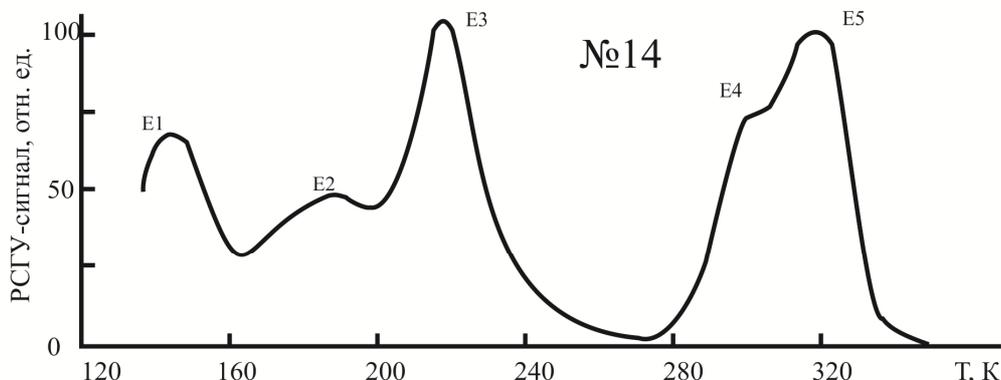
Отжиг образца №12 при T=900 К в атмосфере азота в течение часа несколько снижает концентрацию ГУ по сравнению с образцом №10. В образце №14 обнаружено 5 ГУ, 4 из которых устраняются после отжига (образец №11). РСГУ-спектр исследованных структур представлен на рисунке 1.



а



б



в

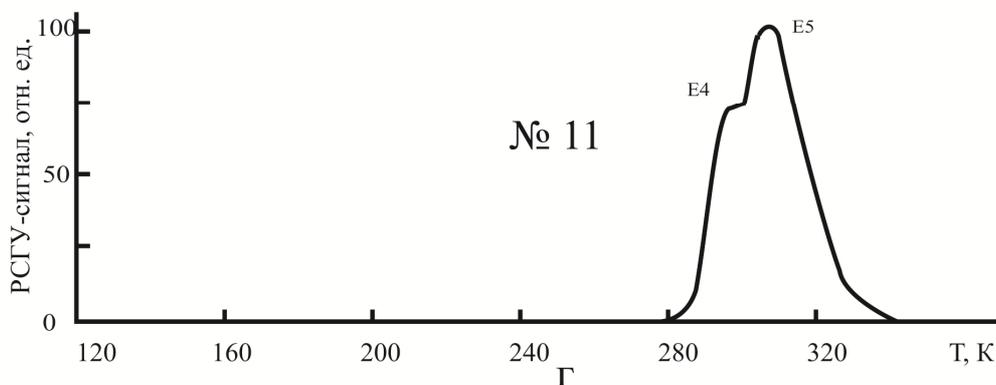


Рис. 1. PSGU-спектры диодов Шоттки Al/n-Si:

а – образец № 14; б – образец № 10; в – образец № 12; г – образец № 11

Влияние ГУ на параметры диодов Шоттки отражено на ВАХ (рисунок 4).

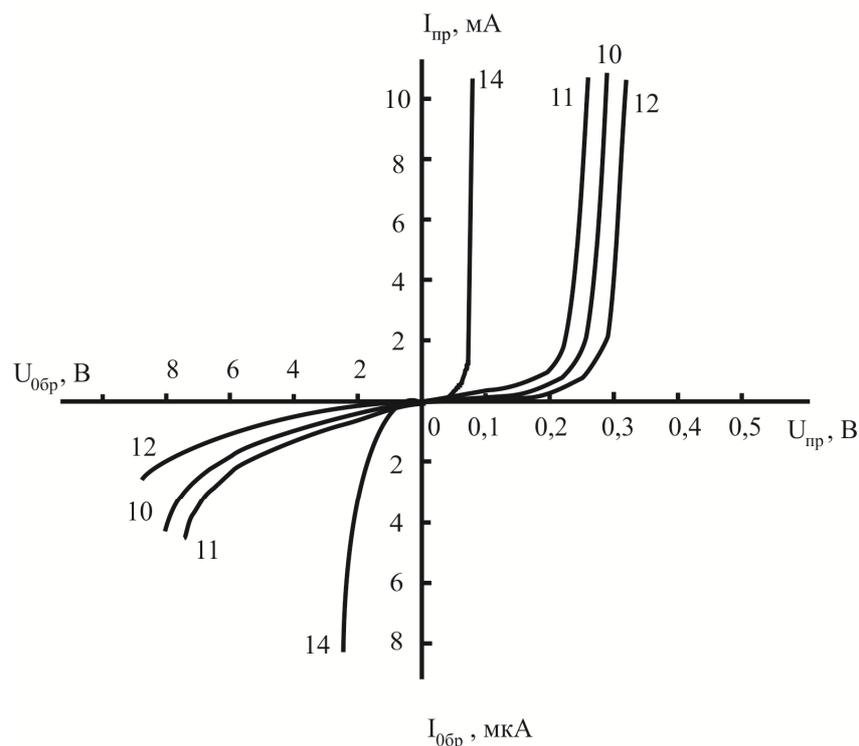


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики диодов Шоттки Al/n-Si исследуемых образцов

Исходя из высоты потенциального барьера, а также величине обратного тока сделан вывод, что наилучшими электрофизическими характеристиками обладает диод Шоттки, соответствующий образцу под №12.

### Выводы

Анализируя полученные данные установлено, что наибольшим обратным током, а также наименьшей высотой потенциального барьера обладает образец под №14. Это объясняется наибольшей суммарной концентрацией глубоких уровней и, как следствие, наличием большой генерационной составляющей в токах утечки. Наилучшими показателями обладает образец №12. Наилучшие электрофизические характеристики достигаются путём формирования структур с применением ЖХТ, а также проведением отжига.

### Библиографический список

1. Орешкин П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков / П.Т. Орешкин. М.: Высшая школа, 1977. 448 с.
2. 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 г. 168 с.

УДК 538.91; ГРНТИ 29.19.31

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛЬТ-ФАРАДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ ОКСИДА ЦИНКА

А.Р. Семенов\*, Д.Г. Громов\*\*, В.Г. Литвинов\*, Т.А. Холомина\*, С.П. Олейник\*\*, А.В. Ермачихин\*

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

\*\*Национальный исследовательский институт «Московский институт электронной техники»,  
Россия, Москва, gromadima@gmail.com

*Аннотация.* Проведено моделирование высокочастотных C-V-характеристик гетероструктур на основе оксида цинка. Исследовано влияние технологии отжига и материала контактов на характеристики структур. Получена эмпирическая зависимость поверхностного потенциала в кремнии от приложенного к структуре напряжения.

*Ключевые слова.* Моделирование, гетероструктуры, ZnO, C-V характеристики

## MODELING OF ZINC OXIDE-BASED HETEROSTRUCTURES C-V CHARACTERISTICS

A.R. Semenov\*, D.G. Gromov\*\*, V.G. Litvinov\*, T.A. Kholomina\*, S.P. Oleinik\*\*, A.V. Ermachikhin\*

\*Ryazan State Radioengineering University,  
Russia, Ryazan, sem-a-sem@mail.ru

\*\* National Research University of Electronic Technology (MIET),  
Russia, Moscow, gromadima@gmail.com

*Abstract.* C-V-characteristics of ZnO-based heterostructures were modeled. Influence of annealing technology and contacts material on structure characteristics was investigated. Empirical dependence of the surface potential in silicon on the applied voltage on the structure was derived.

*Keywords.* Modeling, heterostructures, ZnO, C-V characteristics

### Введение

В последние годы множество научных исследований посвящено изучению свойств оксида цинка. Данный материал распространён в природе и представляет интерес как прямозонный полупроводник с большой (3,36 эВ) шириной запрещённой зоны. Нелегированный материал обладает электронным типом проводимости в сочетании с хорошими оптическими свойствами и устойчивостью к воздействию излучения [1]. ZnO является перспективным материалом при производстве прозрачных проводников в солнечных элементах, светодиодах, лазерных диодах, УФ фотодиодах. Благодаря возможности получения структур с высокой электронной подвижностью, материал может применяться в быстродействующих датчиках УФ излучения [2].

### Образцы и используемые методы

В настоящей работе проводились анализ и сравнение параметров полупроводниковых гетероструктур двух типов, представляющих собой плёнки оксида цинка, выращенные на n+ кремниевой подложке с нанесёнными на их поверхности невыпрямляющими контактами In и выпрямляющими контактами Au (рис. 1).

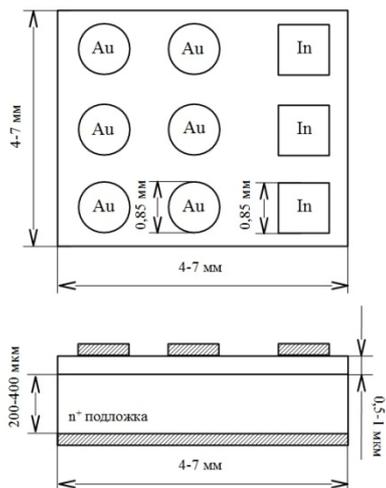


Рис. 1. Структура исследуемых образцов

Отжиг структур проводился в кислородной среде при температуре 600 °С. Толщины плёнок оксида цинка, измеренные с помощью растрового электронного микроскопа, равны 759 нм и 550 нм соответственно. Индиевые контакты имели форму квадрата со стороной 0,85 мм, а золотые контакты - форму круга того же диаметра. Измерения проводились с помощью RLC-метра Agilent E4980A.

Проведены измерения вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик образцов между верхними металлическими контактами и подложкой. Затем была проведена математическая обработка полученных результатов с целью определения проводимости образца, плотности поверхностных состояний и концентрации свободных носителей заряда.

### Методика проведения эксперимента

Результаты измерения вольт-амперных характеристик образцов на выпрямляющих контактах свидетельствовали, что полученные зависимости характерны для диода. Прямое пороговое напряжение составило порядка 2,1 В, для образца О1 (рис. 2).

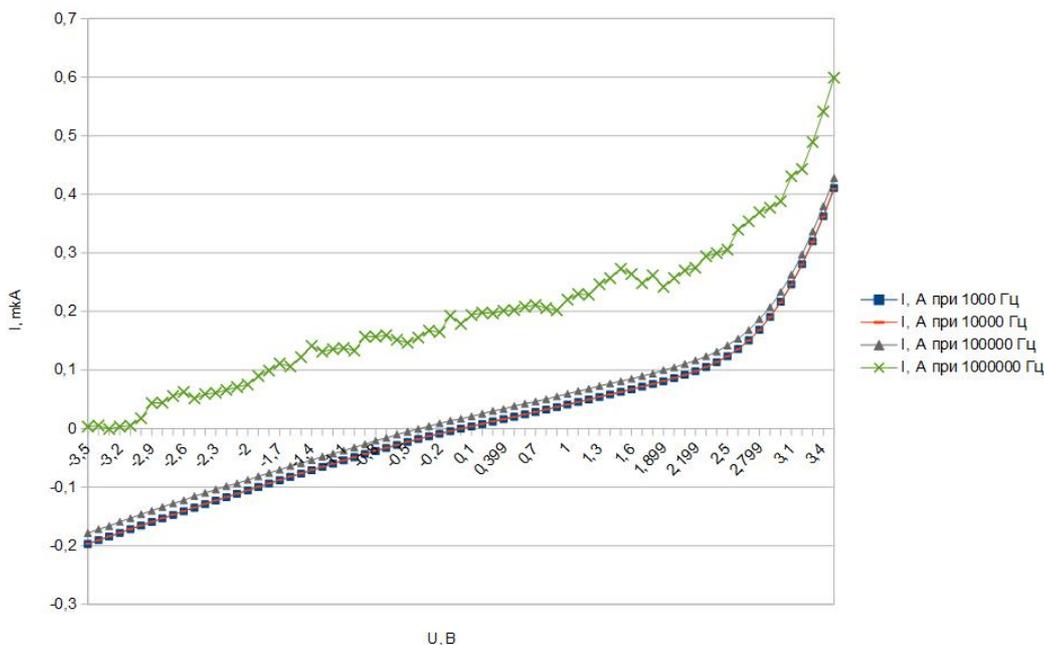


Рис. 2. ВАХ образца О1, измеренная на контактах Au- подложка

На невыпрямляющих контактах получена типичная линейная ВАХ, по которой было определено сопротивление образцов. У структур, отожжённых в кислородной среде, сопротивление составило 365 кОм и 1.4 МОм для образцов О1 и О2 соответственно.

Можно предположить, что отжиг образца О1 проводился в более влажной атмосфере кислорода и наличие атомов водорода, находящихся в междоузлиях кристаллической решетки ZnO и играющих роль мелких доноров привело к снижению сопротивления и некоторой нелинейности вольт-амперных зависимостей. [3].

Результаты измерения вольт-фарадных характеристик показали, что для всех образцов зависимости аналогичны кривым, характерным для МДП-структур. Примечательным является тот факт, что подобные C-V-характеристики получены как при подключении между выпрямляющими контактами Au-ZnO и подложкой, так и невыпрямляющими In-ZnO контактами и подложкой. Это говорит о том, что в изученных структурах оксид цинка можно считать диэлектриком.

Аппроксимация экспериментальных зависимостей проводилась на участках слабой инверсии, обеднения и аккумуляции низкочастотными C-V-характеристиками МДП-структур. Построенные модельные кривые представляли собой зависимости ёмкости от поверхностного потенциала  $\psi_s$  или потенциала, падающего на обеднённом слое полупроводниковой подложки [4].

Ёмкость структуры представлена нами как последовательное соединение ёмкости диэлектрика и дифференциальной ёмкости полупроводника:

$$C_D(\psi_s) = \frac{\varepsilon_s \cdot \varepsilon_0}{\sqrt{2} \cdot L_D} \cdot \frac{-1 + \exp(\beta \cdot \psi_s) - (p_0/n_0) \cdot (\exp(-\beta \cdot \psi_s) + 1)}{F(\psi_s)}, \quad (1)$$

$$C_{Theory}(\psi_s) = \left( \frac{1}{C_E} + \frac{1}{C_D(\psi_s)} \right)^{-1}, \quad (2)$$

где  $C_D(\psi_s)$  – эффективная дифференциальная ёмкость обеднённого слоя полупроводника;

$C_E$  – эффективная ёмкость диэлектрика;

$C_{Theory}(\psi_s)$  – эффективная расчётная ёмкость структуры;

$\varepsilon_s$  – относительная диэлектрическая проницаемость кремния;

$\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная;

$L_D$  — дебаевская длина электронов;

$\beta$  — коэффициент  $\beta = q/kT$ ;

$q$  — элементарный заряд

$k$  — постоянная Больцмана;

$n_0$  и  $p_0$  — равновесные концентрации электронов и дырок соответственно.

Функция  $F(\psi_s)$  определена как

$$F(\psi_s) = \left( (-\exp(\beta \cdot \psi_s) + \beta \cdot \psi_s + 1) - \frac{p_0}{n_0} \cdot (\exp(-\beta \cdot \psi_s) + \beta \cdot \psi_s + 1) \right)^{0.5} \quad (3)$$

Значение ёмкости плоских зон выбранного образца определялось как ёмкость при значении поверхностного потенциала  $\psi_s=0$ . Эффективная дифференциальная ёмкость в этом случае будет равна

$$C_D(0) = \frac{\epsilon_s \cdot \epsilon_0}{L_D} \quad (4)$$

Исходя из того, что в идеальной МДП-структуре нулевому поверхностному потенциалу соответствует нулевое напряжение на образце, по сдвигу экспериментальной зависимости по оси напряжений определена величина фиксированного заряда на границе ZnO-Si. В общем случае поверхностный заряд является совокупностью нескольких составляющих [4]:

1. заряд, захваченный поверхностными ловушками;
2. фиксированный заряд окисла, расположенный вблизи границы раздела;
3. заряд, захваченный в окисле, возникающий в случае рентгеновского облучения структур или инъекции горячих электронов в диэлектрик;
4. заряд подвижных ионов.

В используемой нами модели фиксированный заряд  $Q_f$  окисла считаем преобладающим, поскольку остальными составляющими поверхностного заряда можно пренебречь: образцы не подвергались облучению, заряд, захваченный поверхностными ловушками, считаем отсутствующим при  $\psi_s=0$ , а при существующих условиях изготовления наличие подвижных ионов является маловероятным.

В реальной МДП-структуре величина фиксированного поверхностного заряда равна [4]:

$$Q_f = C_{Ei} \cdot (\varphi_{ms} - \Delta V_{FB}) \quad (5)$$

где  $\varphi_{ms}$  — разность работ выхода металла и полупроводника;

$\Delta V_{FB}$  — напряжение сдвига плоских зон.

В соответствии с нашими расчётами разность работ выхода золота и кремниевой подложки составила 0,32 эВ для образца О1, откуда был получен поверхностный фиксированный заряд  $Q_f = -2,11 \cdot 10^{-7}$  Кл/см<sup>2</sup>.

Следующим этапом анализа было определение плотности поверхностных состояний на границе ZnO-Si. Полагали, что изменение заряда на структуре в состоянии плоских зон одинаково при малых изменениях напряжения на структуре и поверхностного потенциала. Значение производной поверхностного потенциала от напряжения  $d\psi_s/dV$  было найдено как отношение производных экспериментальной ёмкости от напряжения на структуре и расчётной ёмкости от поверхностного потенциала полупроводника. На примере структуры О1 при подключении контактов Au-подложка величина  $d\psi_s/dV$  в состоянии плоских зон составила 0,26. Плотность поверхностных состояний  $D_{it}$  определена по формуле [4]:

$$D_{it} = \frac{C_{Ei}}{q} \cdot \left( (d\psi_s/dV)^{-1} - 1 \right) - \frac{C_D}{q} \quad (6)$$

В первом приближении производная  $d\psi_s/dV$  считалась постоянной, следовательно  $\psi_s = 0,26 \cdot V$  и теоретическая C-V-характеристика имела вид, приведённый на рисунке 3.

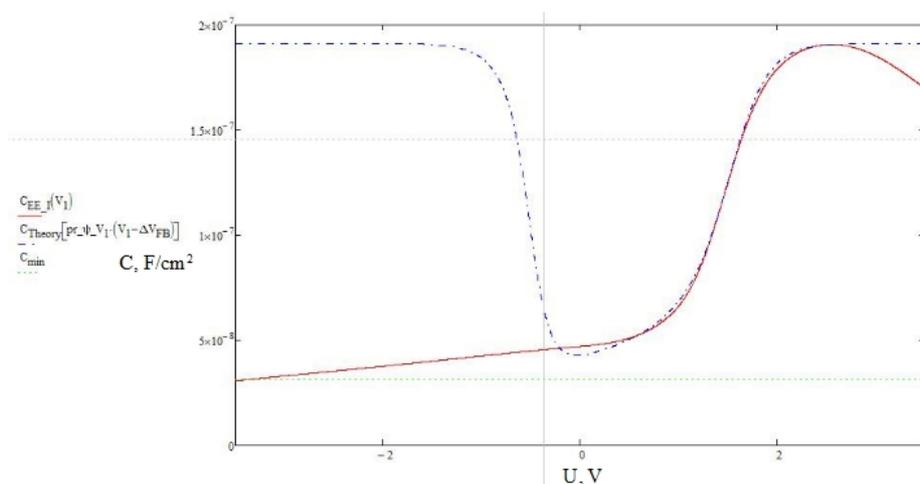


Рис. 3. Экспериментальная C-V-характеристика образца O1 на частоте 1000 Гц ( $C_{EE\_I}$ ) и теоретическая зависимость для идеальной МДП структуры при низких частотах ( $C_{Theory}$ ) с учётом встроенного поверхностного заряда и плотности поверхностных состояний при напряжении плоских зон,  $C_{min}$  - минимальная теоретическая ёмкость исследуемой структуры

## Результаты и обсуждение

Использование описанного метода даёт возможность близкого совмещения экспериментальной и теоретической C-V-характеристик. Подобная аппроксимация была проведена для всех образцов при подключении к выпрямляющим (Au) и невыпрямляющим (In) контактам. Полученные электрофизические параметры исследованных образцов представлены в таблице.

Таблица 1. Электрофизические параметры образцов

Образец, подключение	$n_0$ , $\text{см}^{-3}$	$C_{Ei}$ , $\text{Ф/см}^2$	$\Delta V_{FB}$ , В	$Q_f$ , $\frac{\text{Кл}}{\text{см}^2}$	$D_{it}$ , $\text{см}^{-2}\text{эВ}^{-1}$
O1, Au-подложка	$1,22 \cdot 10^{14}$	$1,91 \cdot 10^{-7}$	1,43	$-2,11 \cdot 10^{-7}$	$1,65 \cdot 10^{12}$
O1, In-подложка	$1,22 \cdot 10^{14}$	$2,17 \cdot 10^{-7}$	1,1	$-7,78 \cdot 10^{-7}$	$3,53 \cdot 10^{12}$
O2, Au-подложка	$9 \cdot 10^{13}$	$2,03 \cdot 10^{-7}$	1,31	$-2,02 \cdot 10^{-7}$	$1,92 \cdot 10^{12}$
O2, In-подложка	$9 \cdot 10^{13}$	$2,3 \cdot 10^{-7}$	1,44	$-4,22 \cdot 10^{-7}$	$2,4 \cdot 10^{12}$

Значение концентрации свободных носителей заряда  $n_0$  для каждой аппроксимирующей зависимости определялось соответствующим приближением. Расчёты показали, что полученные значения концентрации и ёмкости диэлектрика для разных образцов имели примерно один порядок величины, что согласуется с условиями изготовления. Полученные значения плотности поверхностных состояний находятся в диапазоне, характерном для границы раздела кремния с диэлектриками.

Величина относительной диэлектрической проницаемости, согласно расчётам, оказалась ниже табличного значения ( $\epsilon_i=9$ ). Можно предположить, что это вызвано неоднородностью поверхности плёнок ZnO и требует дополнительного изучения.

Сравнение результатов измерений проводилось для различных контактов на каждом образце. Поскольку в данном случае речь идёт об одной и той же кремниевой подложке, то дифференциальная ёмкость должна быть одинакова. Следовательно, можно говорить о растекании заряда и увеличении эффективной площади верхнего контакта при подключении In-подложка. Разница ёмкости в режиме аккумуляции у подключений Au-подложка и In-подложка, и вид C-V-характеристики для выпрямляющего контакта свидетельствовали о наличии встроенного заряда, захваченного на ловушках на границе Au-ZnO. Авторами [5] отмечено наличие электронных ловушек с энергиями 0,2 и 0,3 эВ у подобных контактов Шоттки.

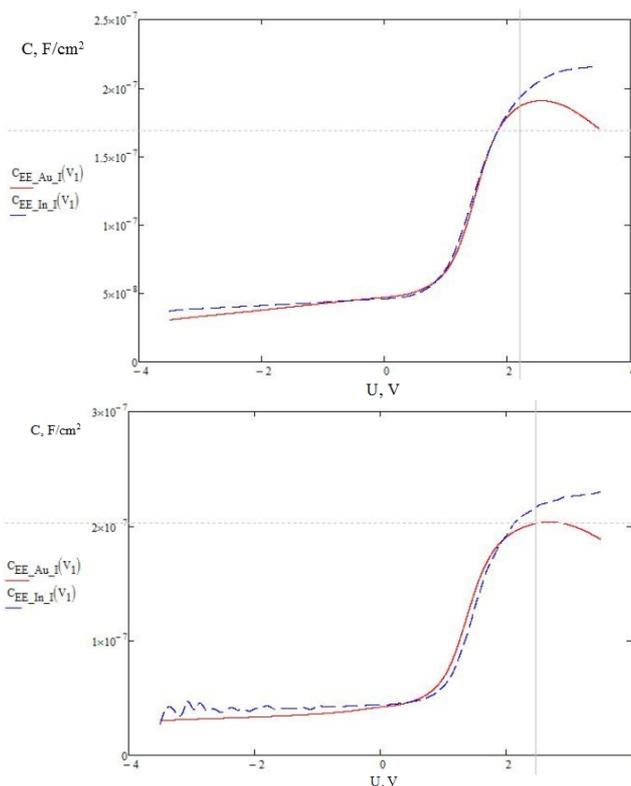


Рис. 4. Сравнение зависимостей эффективных емкостей образцов O1 и O2 от приложенного напряжения на структуре для Au и In контактов

Обработка полученных результатов в программе Mathcad позволила получить значения плотности поверхностных состояний, величину встроенного поверхностного заряда, оценить значение концентрации свободных носителей заряда в кремниевой подложке. Указанные результаты приведены в таблице.

## Выводы

Проведено моделирование высокочастотных C-V-характеристик гетероструктур на основе оксида цинка. Исследовано влияние технологии отжига и материала контактов на характеристики структур. Получена эмпирическая зависимость поверхностного потенциала в кремнии от приложенного к структуре напряжения. Полученные результаты свидетельствуют о заметном влиянии примесей на линейность вольт-амперных характеристик и зарядовое состояние исследованных образцов.

**Библиографический список**

1. Pintilie L., Pintilie I., Ferroelectrics: new wide-gap materials for UV detection // Mater. Sci. Eng. B. 2001. Vol. 80. P. 388-391.
2. Kaidashev E.M., Lorenz M., von Wenckstern H., Rahm A., Semmelhack H.C., Han K.H., Benndorf G., Bundesmann C., Hochmuth H. and Grundmann M. High electron mobility of epitaxial ZnO thin films on c-plane sapphire grown by multistep pulsed-laser deposition // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 82. P. 3901.
3. Ellmer K., Klein A., Rech B. Transparent conductive zinc oxide // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. P. 446.
4. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов: В 2 т. Т. 1 Пер. с англ. — М.: Мир, 1984. — 456 с.
5. 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.-P. 293–340.

## СЕКЦИЯ "ПРОМЫШЛЕННАЯ СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ"

УДК 621.31; ГРНТИ 42.29.39

### СТРАТЕГИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

А. Афонин\*, Е. Давыдкина\*\*

\*Филиал АО "СО ЕЭС", Рязанское РДУ,

Рязанский государственный радиотехнический университет /  
Российская Федерация, Рязань, [panas1999@mail.ru](mailto:panas1999@mail.ru);

\*\*ПАО МРСК Центра и Приволжья, филиал Рязаньэнерго /  
Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Российская Федерация, Рязань, [davydkina.ekaterina@gmail.com](mailto:davydkina.ekaterina@gmail.com)

*Аннотация.* В данной работе описаны основные стратегии эксплуатации и ремонта электрооборудования.

*Ключевые слова.* Планово – предупредительная, надежность электрооборудования, стратегии технического обслуживания, эксплуатации и ремонта) электрооборудования.

### STRATEGIES FOR MAINTENANCE AND REPAIR OF ELECTRICAL EQUIPMENT

A. Afonin\*, E. Davydkina\*\*

\*System Operator of the United Power System (JSC), Ryazan regional dispatch administration/  
Ryazan State Radio Engineering University,

Russian Federation, Ryazan, [panas1999@mail.ru](mailto:panas1999@mail.ru);

\*\*PJSC «MRSK Center and Volga Basin Region», Branch of Ryazanenergo»/  
Ryazan State Radio Engineering University,

Russian Federation, Ryazan, [davydkina.ekaterina@gmail.com](mailto:davydkina.ekaterina@gmail.com)

*Abstract.* In this paper, the main strategies for the operation and repair of electrical equipment are described.

*Keywords:* planned - preventive, reliability of electrical equipment, strategies for maintenance, operation and maintenance) of electrical equipment.

#### Введение

Вопросы надежности энергосистемы имеют большое значение. Это связано с ростом числа мощностей предприятий промышленного и сельскохозяйственного комплекса, предъявлению более высоких требований к качеству электроэнергии. Надежное электроснабжение может обеспечиваться только при безотказной работе электроэнергетического оборудования. Дальнейшее развитие энергосистемы затруднительно без введения в производство совершенной стратегии эксплуатации и ремонта электрооборудования. Торможение в данной отрасли, особенно в сложной экономической обстановке, может негативно отразиться на формировании отечественного конкурентоспособного промышленного рынка. Значительная часть основного электрооборудования электрических сетей выработала на настоящее время свой расчетный ресурс, однако еще не достигла предельного состояния и сохраняет достаточную работоспособность. Схемы их первичных электрических соединений выполнены, в основном, по проектам, ориентированным на оборудование с высокими показателями надежности – горячим резервом. На объектах электрических сетей используется морально и технически устаревшая аппаратура телемеханики. Устройства релейной защиты и автоматики выполнены в основном с применением электромеханических реле. Общее число технологических нарушений оборудования подстанций в 2016 году возросло по сравнению с предыдущим годом на 7% [1,2]. Основные причины – износ оборудования (29%) и дефекты изго-

товления (19%). На долю устройства релейной защиты и автоматики приходится до 35% всех нарушений. Анализ причин отключения воздушной линии показывает, что основная их часть произошла из-за ветровых нагрузок, на которые приходится более 35% от всех отключений линий с неуспешным автоматическим повторным включением [1,2]. Поддержание надежности такого оборудования на должном уровне возможно только при рациональной организации его технического обслуживания – диагностирования, текущего и капитального ремонта, модернизации отдельных его частей и др. Связано это с тем, что быстрая замена электрооборудования на новое требует больших капиталовложений.

### **Стратегии технического обслуживания электрооборудования**

Анализ научной литературы по вопросам надежности электрического оборудования и средств автоматизации (АСДУ и СДТУ) [1,2,3 и др.] показал, что можно выделить следующие виды стратегии эксплуатации и ремонта электрооборудования:

1. послеотказовая (вынужденная);
2. планоно – предупредительная по расписанию;
3. планоно – предупредительная по наработке;
4. планоно – предупредительная по состоянию.

Эксплуатация электрооборудования по послеотказовой (вынужденной) стратегии сводится лишь к замене или ремонту отказавшего оборудования; плановые профилактические мероприятия не проводят. Использование этой стратегии оправдывается только при эксплуатации сравнительно простого, высоконадежного, недорого оборудования, отказ которого не приводит к существенному ущербу. Для обслуживания такого, например, оборудования, как силовые трансформаторы, она вообще не применима, за исключением случаев внезапных внешних повреждений, таких как перекрытие изоляторов, грозовые и коммутационные перенапряжения.

Планоно – предупредительная стратегия технического обслуживания по графику - это стратегия обслуживания без учета возраста изделия. Особенность ее заключается в том, что через строго определенные, заранее установленные промежутки времени происходит принудительное обслуживание. Выбором периода проведения этого обслуживания достигается повышение эксплуатационной надежности оборудования и снижение затрат на его эксплуатацию. Стратегия эффективна и упрощает планирование работ по техническому обслуживанию и ремонту, поэтому она широко распространена в электроснабжении. Недостаток состоит в том, что применение ее приводит к более частому обслуживанию оборудования и устройств, еще относительно мало проработавших, поскольку обслуживание осуществляется в моменты времени, кратные периодичности обслуживаний, независимо от того, заменялось или ремонтировалось изделие в течение соответствующего периода. Положительным моментом, можно считать, выявление заводских дефектов, таких как недостатки в изоляции проводников, несовершенство изготовления магнитопровода и т.д.

При планоно – предупредительной стратегии ремонта и обслуживании по наработке восстановительные мероприятия осуществляют с учетом возраста, либо в заранее запланированный момент времени, либо в случае отказа, если он произошел раньше этого момента. Таким образом, профилактические мероприятия производятся с постоянной периодичностью в соответствии с утвержденным графиком. Отсчет времени осуществляют от проведенного восстановительного мероприятия (аварийного или профилактического). В этом случае моменты проведения плановых профилактических мероприятий случайные. Эта стратегия вы-

годно отличается от предыдущей тем, что исключает возможность обслуживания (ремонта) нового электрооборудования. Однако она более сложна в организационном плане, поскольку труднее заранее спланировать моменты проведения профилактических мероприятий и требуется учет наработки электрооборудования.

Стратегия обслуживания электрооборудования по состоянию, на сегодняшний день, наиболее перспективна, особенно для сложного и ответственного оборудования, разборка и сборка которого при обслуживании затруднены. Применение ее связано с необходимостью выявления определяющих технических параметров и их вероятных связей с надежностью оборудования. Например, для силовых трансформаторов она заключается в проведение комплексной оперативной диагностики (хроматографический анализ трансформаторного масла) и принятия решения по характеру выявленных внутренних повреждений.

Помимо снижения времени перерыва электроснабжения, совершенная стратегия обслуживания и ремонта может позволить отказаться от резервирования без ущерба надежности, что обуславливает значительный экономический эффект.

### **Выводы**

Рассмотренные выше стратегии эксплуатации и ремонта электрооборудования, требуют единовременных и значительных капиталовложений. Заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор, д.т.н., Платонов В.А. указывает [4] на нехватку средств на модернизацию отрасли и говорит, что в настоящее время эта цифра составляет 10% от необходимой. Проблемы финансирования, инвестиций в ремонтно – восстановительные работы и ввода нового оборудования в эксплуатацию в данных условиях возлагается на региональные компании (ОГК, ТГК, МРСК). По его мнению, единственным эффективным мероприятием остается система планово – предупредительных ремонтов, выполнение которых относится к группе организационно – технических мероприятий. Данное высказывание подтверждается работами многих авторов [3] и практикой.

Уровень развития технического прогресса сегодня требует создания энергоэффективных и надежных систем бесперебойного электроснабжения. Можно с уверенностью утверждать, что без совершенствования системы планово – предупредительных ремонтов невозможно решить проблему надежности электрооборудования и электрических сетей.

### **Библиографический список**

1. Магадеев Э.В. Анализ надежности электроснабжения с учетом модернизации оборудования подстанций, МЭСХ №1 – 2017.
2. Тихонов А.В., Тихонов П.В. Анализ отказов силовых трансформаторов 10/0,4 кВ. МЭСХ №2 – 2017.
3. Воробьев В.А. Эксплуатация и ремонт электрооборудования и средств автоматизации.- М.: КолосС, 2004.-336 с.: ил.
4. Платонов В.А. Некоторые итоги «реформирования» электроэнергетики Журнал «Золотой Лев» № 79-80 России – 2014.

УДК 620.9; ГРНТИ 44.31.33

## СПЕЦИФИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОЕМКОГО ПРОИЗВОДСТВА

А.В. Подольская<sup>1</sup>, И.В. Ушаков<sup>1,2</sup>

Тамбовский государственный технический университет,  
Россия, Тамбов, drozdowa.nastya@ya.ru

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,  
Россия, Москва, ushakoviv@mail.ru

*Аннотация.* В статье рассматривается использование геотермальной энергетики. Обсуждается вопрос модернизации энергосистемы завода за счет использования геотермальной энергетики. Показано, что использование геотермальной энергетики способствует повышению экономической эффективности и снижению экологических рисков.

*Ключевые слова.* Возобновляемая энергетика, геотермальная энергия, геотермальная вода, энергетика

## SPECIFICITY OF GEOTHERMAL ENERGY USE FOR ENERGY AND EFFICIENCY RESOURCING PRODUCTION

A.V. Podolskaya, I.V. Ushakov

Tambov State Technical University,

Russia, Tambov, drozdowa.nastya@ya.ru

National Research Technological University "MISIS",

Russia, Moscow, ushakoviv@mail.ru

*Abstract.* The article deals with the use of geothermal energy. The issue of modernization of the plant's power system is discussed through the use of geothermal energy. It is shown that the use of geothermal energy contributes to increasing economic efficiency and reducing environmental risks.

*Keywords.* Renewable energy, geothermal energy, geothermal water, energy.

По данным Всемирного геотермального конгресса, состоявшегося в 2010 г. на острове Бали в Индонезии, суммарная установленная мощность геотермальных систем теплоснабжения во всем мире составляет 50583 МВт с ежегодной выработкой тепловой энергии 121696 ГВт.ч (104,7 млн Гкал) [1].

В России геотермальные системы теплоснабжения в основном работают на Камчатке, Курилах, в Дагестане, Ставропольском и Краснодарском крае [2].

Значительное количество отечественных геотермальных систем строилось 20-30 лет назад, в советские годы. Степень их технического износа составляет около 70-80%. Эффективность использования геотермального теплового потенциала не превышает 30%, поэтому модернизация таких геотермальных систем в настоящее время является актуальной задачей.

Геотермальная энергия может использоваться по двум основным направлениям — получение электрической энергии и теплоснабжение. Разработан ряд технологий и эффективное оборудование для получения как отдельно тепловой и электрической энергии, так и для их комбинированного производства.

В настоящее время наиболее распространено использование геотермальной воды для отопления и горячего водоснабжения, а также использование пароводяных смесей для производства электроэнергии.

Ряд трудностей ограничивают широкое применение тепловой энергии Земли. Среди таких трудностей наиболее существенным является малый удельный тепловой поток - глубинный тепловой поток, отнесенный к единице поверхности Земли за единицу времени. Для использования геотермального потока разрабатываются методы и способы его concentra-

ции, а также передачи к местам применения. Проблематичной является унификация технологических схем и оборудования геотЭС, так как каждое геотермальное месторождение отличается от других рядом своих уникальных характеристик — тепловым потенциалом, химическим составом, геологическими свойствами и другим.

Разработку системы геотермального теплоснабжения рассмотрим на примере разрабатываемого проекта завода, находящегося в регионе с геотермальными ресурсами.

Геотермальное теплоснабжение завода обеспечивается от четырех геотермальных скважин. Стандартная система теплоснабжения является одноконтурной с непосредственной подачей геотермального теплоносителя в сети отопления и ГВС зданий. Из-за недостатка противокоррозионной защиты тепловые сети и внутренние трубопроводы зданий достаточно быстро корродируют и выходят из строя. На рисунке 1 показана принципиальная схема системы геотермального теплоснабжения. Для урегулирования гидравлического режима на расстоянии 30 м от скважины 4Г построен геотермальный насосный модуль. В модуле устанавливается бак разрыва струи объемом 6 м<sup>3</sup> и заглубленная автоматизированная насосная станция с частотным регулированием.

Теплопровод Ду протяженностью 800 м в пенополиуретановой изоляции и с системой оперативного дистанционного контроля от насосного модуля до построенного геотермального центрального теплового пункта проложен бесканально.

Для бесперебойной работы теплоснабжения завода к двум основным скважинам подсоединяют две дополнительные. В случае аварийного отказа работы основной скважины, выполнение всех функций принимает дополнительная скважина.

Система теплоснабжения зданий представляет собой двухтрубную открытую систему, подключенную к геотермальному теплоносителю по независимой схеме через пластинчатый теплообменник. Подпитка системы производится химочищенной водой. Расчетный температурный график геотермального теплоносителя - 100/70 °С, сетевой воды - 90/60 °С. Распределительные тепловые сети от геотермального центрального теплового пункта до каждого из зданий цехов также проложены бесканально с использованием труб в пенополиуретановой изоляции с системой оперативного дистанционного контроля.

В здании геотермального центрального теплового пункта устанавливаются сливные насосы. Для подключения зданий цехов к геотермальной системе теплоснабжения по независимой схеме уже установлен второй пластинчатый теплообменник, а также спроектирована общая автоматизированная сетевая насосная станция с частотным регулированием.

В зданиях цехов, которые подключены к геотермальному центральному тепловому пункту, запланированы узлы учета тепловой энергии и регулирования. В узлах учета системы отопления применены электромагнитные и вихревые расходомеры. Бесспорным достоинством электромагнитных расходомеров является отсутствие подвижных механических элементов, высокая точность, отсутствие гидродинамического сопротивления, быстрдействие. Именно поэтому они широко распространены.

Принципиальная схема системы геотермального теплоснабжения представлена на рисунке 1.

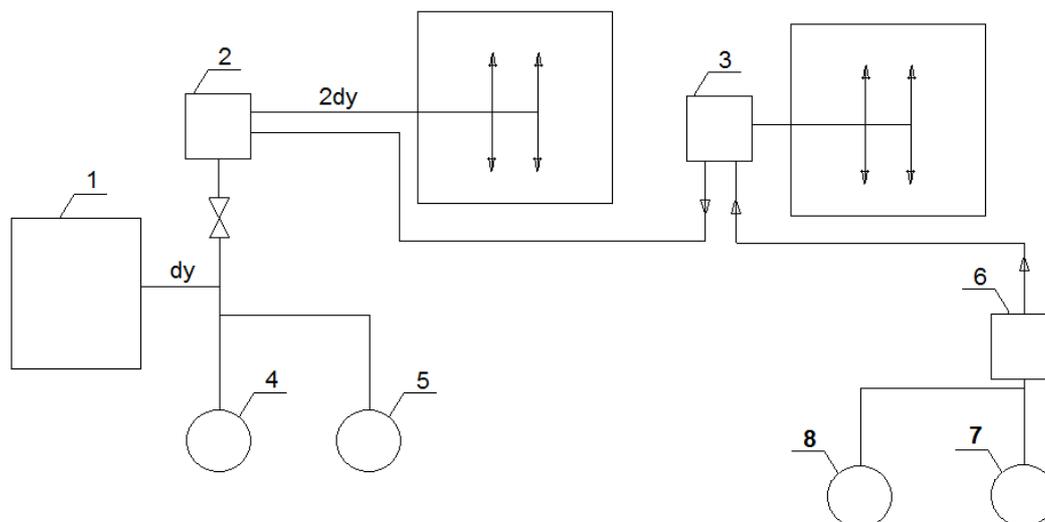


Рис. 1. Принципиальная схема системы геотермального теплоснабжения:

- 1 – теплицы; 2 – старый ЦТП; 3 – новый геотермальный центр тепловой пункт (ГЦТП);  
 4 – скважина 3Т; 5 – дополнительная скважина 3Т; 6 – геотермальный насосный модуль;  
 7 – скважина 4Т; 8 – дополнительная скважина 4Т

Вихревой расходомер является разновидностью расходомера, принцип действия которого основан на измерении частоты колебаний, возникающих в потоке в процессе вихреобразования. Тепловычислители имеют автономное электропитание. Для поддержания заданной температуры горячего водоснабжения применяются термостатические регуляторы.

Кроме того, общим проектом разработки системы теплоснабжения завода предусмотрена совместная работа гелиоустановки горячего водоснабжения и системы геотермального теплоснабжения.

Для реализации этой части проекта на крыше геотермального центрального теплового пункта устанавливается 70 солнечных коллекторов общей площадью 145 м<sup>2</sup>.

Солнечный коллектор представляет собой устройство для сбора энергии [Солнца](#) (гелиоустановка), которая переносится [видимым светом](#) и ближним [инфракрасным излучением](#). В отличие от [солнечных батарей](#), которые производят непосредственно [электричество](#), солнечный коллектор производит нагрев материала - [теплоносителя](#).

В течение отопительного сезона будет проводиться отработка тепловых и гидравлических режимов работы оборудования системы геотермального теплоснабжения в условиях переменных параметров работы скважины, а также наладка систем отопления и горячего водоснабжения отдельных зданий.

Технико-экономический анализ показывает, что разрабатываемая система при современной технологии изъятия внутриземного тепла являются экономически обоснованной. Предпочтительным является геотермальное теплоснабжение, в результате применения которого замещение органического топлива больше, чем при производстве электроэнергии [3].

Если активное промышленное освоение геотермальных источников рассматривать с точки зрения экологии, то здесь можно увидеть один отрицательный эффект. Геотермальная вода содержит много примесей, которые в небольшом количестве не являются угрозой (соли различных металлов, сероводород), а также вредные вещества, такие как мышьяк, бор, а также выделяются углекислый газ, метан, аммиак. Не смотря на то, что эти показатели значительно меньше, чем соответствующие показатели при эксплуатации традиционных энерге-

тических систем, их нельзя не учитывать. Кроме того, выход на поверхность значительных объемов воды может ухудшать состояние грунтов и грунтовых вод в зоне эксплуатации (заболоченность и засоление). Однако в настоящее время возможно эффективное применение новых технологий, позволяющих свести к минимуму неблагоприятное влияние на окружающую среду, а также получить дополнительный экономический эффект за счет добычи ценных минеральных элементов [4].

### Выводы

1. Предложенный проект является экономически обоснованным и обеспечивает возможность сохранения традиционных углеводородных источников энергии.
2. Геотермальная энергетика оказывает минимальное отрицательное влияние на окружающую среду за счет использования экологически-чистой возобновляемой энергии.
3. Ожидается высокая эффективность использования геотермальной энергии не только за счет реализации эффективной схемы энергоснабжения, но и за счет использования геотермальной воды непосредственно в технологическом процессе обогащения сырья.

### Библиографический список

1. Lund I., Freeston D., Boyd T. Direct Utilization of Geothermal Energy. 2010. Worldwide Review// Proc. WGC-2010. Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.
2. Шетов В. Х., Бутузов В. А. Геотермальная энергетика // Энергосбережение. – 2006 – № 4. – С.70–71.
3. Томаров Г.В., Никольский А.И., Семёнов В.Н., Шипков А.А. Геотермальная энергетика: Справ.-метод. изд. / Под ред. П.П. Безруких. — М.: ИнтерэнергоИздат, Теплоэнергетик, 2015. 304 с.
4. Поваров О.А., Лукашенко Ю.Л., Томаров Г.В., Циммерман С.Д. Геотермальные промышленность и технологии в России // Тяжёлое машиностроение, 2001. №1. С. 14–19.

УДК 621.31; ГРНТИ 42.29.39

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЛЬТОДОБАВОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ КАЧЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В СЕТИ 6-10 КВ

**С. Чернов**

*\*\*ПАО МРСК Центра и Приволжья, филиал Рязаньэнерго /  
Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Российская Федерация, Рязань, sergei\_chernov@indox.ru*

*Аннотация.* В данной работе описаны основные стратегии эксплуатации и ремонта электрооборудования.

*Ключевые слова.* Планово – предупредительная, надежность электрооборудования, стратегии технического обслуживания, эксплуатации и ремонта) электрооборудования.

## USING VOLTODOBAVOCHNY TRANSFORMERS FOR QUALITY ELECTRICAL SUPPLY IN 6-10 KV NETWORK

**S. Chernov**

*\*\*PJSC «MRSK Center and Volga Basin Region»,  
Branch of Ryzanenergo»/*

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Russian Federation, Ryazan, sergei\_chernov@indox.ru*

*Abstract.* In this paper, the principle of operation of voltage regulation points 6-10 kV on the basis of booster transformers is considered.

*Keywords.* Voltage regulation point, booster transformer, PRN, VDT, power quality.

## Введение

Современные промышленные потребители крайне чувствительны к отклонению напряжения от нормативных значений. Значительные изменения напряжения могут повлечь за собой брак продукции или её недоотпуск, и как следствие жалобы на качество электроснабжения и требования о компенсации понесенных убытков.

В соответствии с ГОСТ 32144-2013 положительные и отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать 10% номинального значения.

При существующих воздушных линиях электропередач (далее ВЛ), введенных в эксплуатацию 25-35 лет назад, распределительным сетевым компаниям обеспечение требуемых показателей качества электроэнергии в соответствии с ГОСТ 32144-2013 [1] становится одной из основной задач. Подключение новых потребителей ограничено пропускной способностью ВЛ. Распределительные сетевые компании вынуждены производить дорогостоящую реконструкцию сетей с заменой провода существующих ВЛ на провода большего сечения и строительство новых центров питания.

В соответствии с п. 6.1.12 Положения ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе» (далее Техническая политика) [2], одним из возможных решений задачи обеспечения показателей качества электроэнергии у потребителя, является использование Пунктов регулирования напряжения (ПРН) на базе вольтодобавочных трансформаторов (далее ВДТ).

## Принцип работы ВДТ

Работа ВДТ основана на принципе работы автотрансформатора с общей и последовательной обмотками [3] (рис. 1).

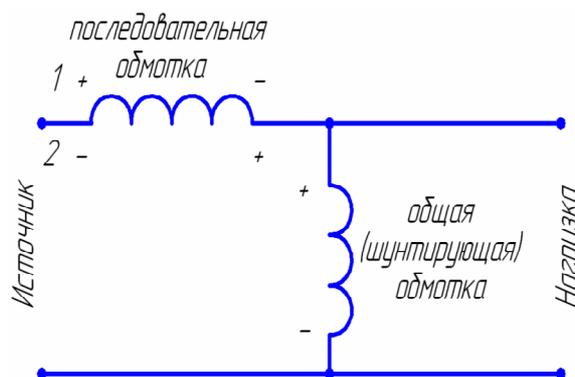


Рис. 1. Принцип работы ВДТ

Изменение уровня напряжения на нагрузке производится путем геометрического сложения напряжения последовательной и общей обмотки. Повышение или понижение напряжения автотрансформатором, зависит от направления включения обмоток - встречно или согласно. С помощью реверсивного переключателя меняется полярность на последовательной обмотке. Переключатель ответвлений ступенчато увеличивает или уменьшает напряжение. Контроль над переключателем ответвлений ведется с помощью микропроцессорного устройства контроля и управления, размещенном в отдельном металлическом шкафу (шкаф управления). Шкаф управления сравнивает измеренное значение напряжения со сто-

роны нагрузки с заданным напряжением. При расхождении фактических и заданных значений, подается команда на электропривод переключателя с целью перемещения на соответствующую ступень для повышения (или понижения) напряжения. Принципиальная электрическая схема ВДТ изображена на рисунке 2.

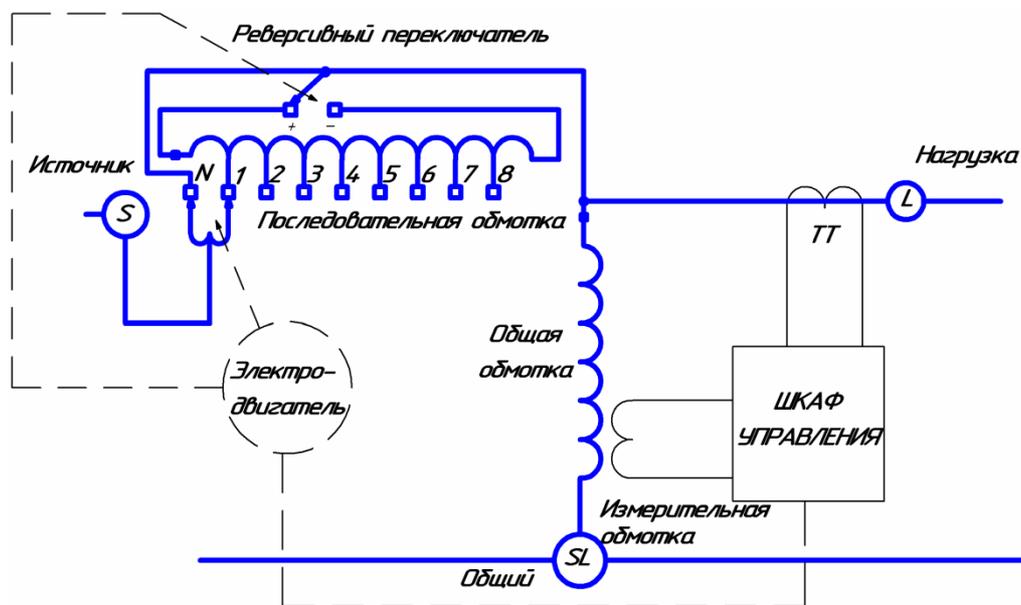


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема ВДТ

Диапазон регулирования уровня напряжения зависит от схемы включения ВДТ в трехфазную сеть [4]:

- если два ВДТ включены в сеть по схеме неполного треугольника, то диапазон регулирования напряжения во всех 3-х фазах составляет  $\pm 10\%$  (рис. 3)
- если три ВДТ включены в сеть по схеме полного треугольника, то диапазон регулирования напряжения во всех 3-х фазах составляет  $\pm 15\%$ . (рис. 4)

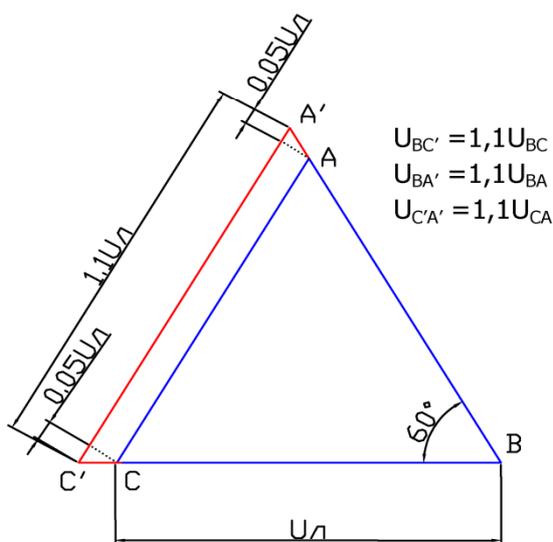
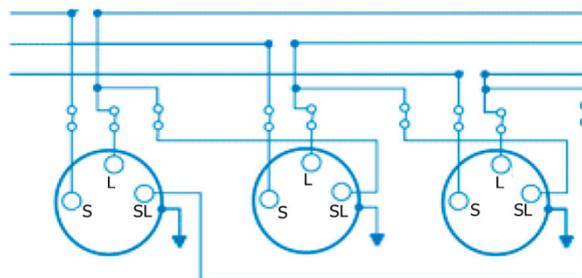
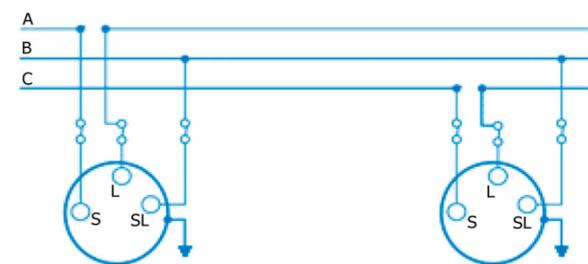


Рис. 3. Включение двух ВДТ по схеме неполного треугольника; изменение линейного напряжения после установки ВДТ (А'В'С')

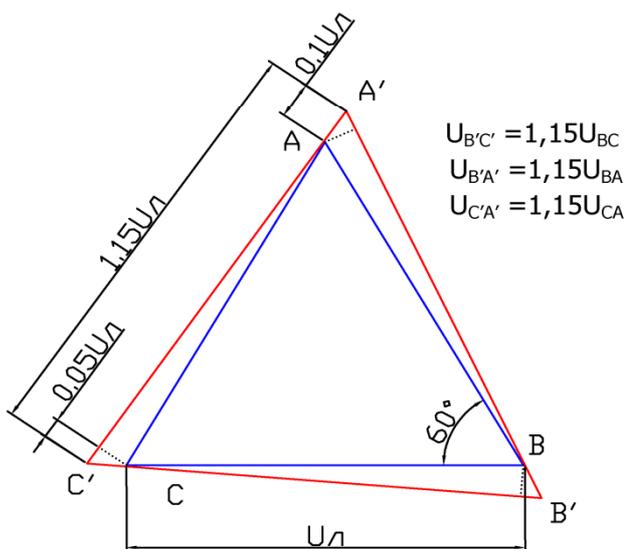


Рис. 4. Включение трех ВДТ по схеме полного треугольника; изменение линейного напряжения после установки ВДТ (А'В'С')

## Выводы

Применение вольтодобавочных трансформаторов позволяет обеспечить качественное электроснабжение путем постоянного контроля за уровнем напряжения в сети 6-10 кВ и его стабилизацией, а так же увеличивает пропускную способность ВЛ и не требует больших затрат в сравнении с реконструкцией ВЛ.

## Библиографический список

- ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения;
- Положения ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе», г. Москва, 2017 год;
- Т.В. Перинский, Увеличение пропускной способности ВЛ 6-10 кВ. Третья Российская с международным участием научно практическая конференция. Новосибирск. 2008;
- «Повышение пропускной способности ЛЭП среднего напряжения. Пункт регулирования напряжения 6-10 кВ». СКЭ Электро. Системы качества электроснабжения. [Электронный ресурс] — Режим доступа — URL: [https://ske-electro.ru/downloads/file\\_28.pdf](https://ske-electro.ru/downloads/file_28.pdf) (дата обращения 05.02.2018);

УДК 620.9

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕТЕЙ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

А.А. Шуваев, Д.Ю. Тарабрин

*Рязанский государственный радиотехнический университет  
Российская Федерация, г. Рязань*

*Аннотация.* В данной статье рассматриваются методы моделирования сетей с распределенной генерацией и методы анализа влияния источников распределенной генерации на распределительную сеть.

*Ключевые слова.* Распределенная генерация, расположение источников распределенной генерацией, детализация данных, вероятностное моделирование.

### Введение

В настоящее время в мире наблюдается устойчивая тенденция увеличения энергопотребления. Кроме того, проблема усугубляется старением существующих генерирующих мощностей. Для решения проблемы повышения надежности и безопасности электроснабжения, сохранения устойчивой работы электроэнергетических систем, а также оптимизации стоимости электроэнергии, в качестве одной из мер может быть применено размещение у потребителя источников генерации малой мощности – распределенной генерации (РГ) [1]. Согласно Федеральному закону от 26.03.2003 г. № 35-ФЗ «Об электроэнергетике», в России к распределенной энергетике относят источники электрической и (или) тепловой энергии, приближенные к местам потребления, мощностью менее 25 МВт [2]. Установки распределенной генерации размещаются непосредственно у потребителей и подключаются к распределительной электрической сети на напряжениях 0,4-35 кВ.

Очевидно, что источники распределенной генерации даже относительно небольшой мощности в большей или меньшей степени оказывают воздействие на условия работы распределительных сетей, в первую очередь, на такие характеристики как потери мощности и электрической энергии, режим напряжений, надежность электроснабжения. При этом, в общем случае, произвольно размещенные в электрических сетях генерирующие источники могут как улучшать, так и ухудшать все или некоторые из перечисленных показателей. Поскольку выходная мощность источников возобновляемой энергетики (солнечные батареи, ветрогенераторы) сильно зависят от внешних погодных условий, а профиль мощности нагрузки – от количества электроприемников включенных в сеть и их режимов работы, возникает необходимость проведения анализа системы с использованием вероятностного моделирования [3]. Исследования, касающиеся оптимального планирования сетей с РГ, часто основаны на приближенных данных, которые точно не отражают реальные изменения нагрузки и генерации в энергосистеме. В работе будет рассмотрено влияние качества исходных данных на оптимальность планирования сети с РГ [4].

### Выбор расположения источников РГ и влияние их на показатели распределительной сети

Проблема интеграции источников распределенной генерации (РГ) в последнее время становится все более актуальной. Для достижения максимального эффекта от внедрения в сеть РГ особое внимание следует уделить ее месторасположению и вырабатываемой мощности. Одним из методов оценки расположения источников РГ является метод сенсорных узлов [5]. Основная идея данного метода заключается в том, что в электроэнергетической системе есть элементы, параметры режима которых в среднем сильнее реагируют на внешние возмущения и больше изменяются при случайных изменениях в топологии схемы сети и нагрузок. Такие элементы называются сенсорными. Кроме того, в электрической сети существуют элементы, изменение параметров режима которых вызывает наиболее сильную реакцию электроэнергетических систем (на возмущения). Эти элементы называются слабыми местами. Для определения сенсорных и слабых узлов используем сингулярный анализ обратной мат-

рицы Якоби и рассчитываем коэффициент чувствительности. В узлы с наибольшим коэффициентом чувствительности устанавливаем источники РГ. Для каждого отдельного узла с увеличением мощности РГ происходит постепенное уменьшение потерь мощности, которое наблюдается до величины оптимального значения. При дальнейшем увеличении мощности источника РГ (сверх оптимального значения) происходит рост потерь. Определение оптимальной мощности источника РГ производим исходя из минимизации суммарных потерь в сети. В результате расчета для конкретной электрической сети может быть несколько сенсорных узлов. Поэтому следующий этап является уточнение мест расположения источников РГ, исходя из минимизации суммарных потерь мощности для этих сенсорных узлов.

Алгоритм выбора точки интерконнекции источника РГ, предложенный в [6] основан на выполнении следующих условий:

$$\begin{aligned} U_{\min} &\leq \partial U_y \leq U_{\max} \\ \Delta P_i &= \Delta P_{li} + \Delta P_{mi} \leq \Delta P_{l0} + \Delta P_{m0} \\ I_i &< I_{\max} \end{aligned}$$

где  $\partial U_y$  - отклонение установленного напряжения, кВ;

$\Delta P_0, \Delta P_i$  - сумма потерь активной мощности при отсутствии РГ и после добавления РГ в энергосистему, кВт;

$\Delta P_{l0}, \Delta P_{li}$  - потери ЛЭП при отсутствии РГ и после добавления РГ, кВт;

$\Delta P_{m0}, \Delta P_{mi}$  - потери в трансформаторах при отсутствии РГ и после добавления РГ, кВт;

$I_i$  - протекающий ток вдоль линии фидера, А;

$I_{\max}$  - максимальный допустимый ток проводника, А.

Применение предлагаемого алгоритма выбора точки интерконнекции максимизирует эффективность внедрение мощностей РГ в распределенной сети для оптимизации работы системы электроснабжения.

Для оценки размещения возобновляемых источников РГ, таких как солнечные батареи, можно использовать последовательный алгоритм размещения (Sequential PVDC Placement Algorithm), предложенный в [7]. Данный алгоритм вводит понятие индекса мощности нисходящего потока (Downstream Power Index - DPI). Это аналитический метод, который требует только профилей нагрузки, сопротивления линий, матрицы частоты сети и среднего профиля солнечной инсоляции для определения оптимальных местоположений. Оптимальным местом установки РГ является узел, который имеет наивысшее значение DPI, так как при установке в данный узел источника РГ мощность больше не будет перемещаться по этим линиям, а вместо этого будет вырабатываться локально.

Одной из проблем при интеграции источников РГ является обратный поток мощности, который может влиять на регуляторы напряжения и защитные устройства. Во время неисправности защитные устройства могут не обнаруживать токи повреждения, поскольку двунаправленный поток мощности от источника РГ может уменьшить ток повреждения и устройство защиты не сработает. Еще одной проблемой, вызванной широким проникновением источников РГ в распределительную сеть, являются проблемы с качеством напряжения из-за вероятностных характеристик источников возобновляемой энергетики. Поэтому при планировании сетей с РГ необходимо рассчитывать оптимальный уровень проникновения источников РГ в сеть [8].

### **Оценка влияния детализации входных данных на оптимальное планирование сети с РГ**

В последние годы все больше внимания уделяется «умным» электрическим системам, которые постоянно следят, сравнивают и контролируют потребление и производство электроэнергии для планирования и присоединения источников электроэнергии непосредственно у потребителей. При создании таких сетей возникает возможность сбора данных в реальном времени. Еще совсем недавно данные параметров электросети собирались с дневными и часовыми дискретными. Сегодня же такие данные не только собираются, но и используются в реальном времени. Так как нагрузка отдельных потребителей и генерируемая мощность источников возобновляемой энергии, установленных непосредственно у потребителей, изменяются во времени каждую минуту или секунду, то сбор данных с более меньшим дискретом даст более точную картину баланса нагрузки и генерируемой мощности. Однако увеличение точности данных напрямую зависит от стоимости вычислительного комплекса. Увеличение точности данных изменяющихся во времени в совокупности с вероятностным характером этих изменений требует создания достаточно сложных моделей. Возникает вопрос сравнения выгоды от планирования систем распределенной генерации на основании более точных данных и затрат на получение, хранение и обработку таких данных. Все зависит от того какая характеристика сети рассматривается. Для достоверности представления максимумов мощности, напряжения и потоков электроэнергии достаточно использовать временной шаг в 1 минуту, тогда как для оценки переходных процессов необходимы гораздо меньшие временные шаги. Для общего представления потоков электроэнергии достаточно более приближенных данных. Более того, часовые временные интервалы могут быть слишком грубыми для рассмотрения характеристик отдельного потребителя, то при рассмотрении группы потребителей большая часть краткосрочных колебаний характеристик уравнивается из-за объединения различных профилей нагрузок.

Использование данных с высокой детализацией приводит к усложнению оптимизационной модели системы. Увеличение детализации данных приводит к увеличению объема данных и приходится учитывать непредсказуемый характер краткосрочных изменений энергодобавки системы и в обязательном порядке использовать вероятностные выкладки.

В работе [4] авторы рассматривают влияние детализации данных на оптимизацию сети с РГ. Состав источников РГ выбирается с таким образом, чтобы ожидаемые потери были минимальны. Для вычисления значения ожидаемых потерь применяют методы интегрирования, что является достаточно сложным математическим механизмом. Поэтому применяется алгоритм, использующий приближения, полученные путем выборки из общего распределения случайных величин, а именно стохастическое разложение. Для источников РГ профили вырабатываемой мощности определяются с шагом в один час, 15 минут и одну минуту. Результаты показывают, что для целей оптимизации нет необходимости использовать данные с высоким разрешением. Учитывая вычислительную нагрузку и ограничения гибкости моделирования, которые неизбежны при использовании данных с высоким разрешением, рекомендуется не использовать данные с временными шагами менее одного часа.

### **Вероятностное моделирование сетей с РГ**

Прогнозирование потребления электроэнергии является принципиально неопределенным и зависит от многих переменных, таких как экономическая активность, погода, тарифы на электроэнергию и управление потреблением. Стохастичность загрузки сети, а также выработка электроэнергии из возобновляемых источников энергии (ВИЭ) создают особые проблемы для построения моделей энергосистем [9].

В [10] представлена новая гибридная (двухуровневая) схема для прогнозирования спроса на электроэнергию и генерации. Схема прогнозирования имеет два уровня: долго-

срочный, основанный на оценке максимального правдоподобия (MLE) и прогнозировании в реальном времени, который основан на модели ARIMA (Auto-Regressive Integrated Moving-Average). При долгосрочном прогнозировании используют статистические исторических данные потребления / генерации для построения оценки; в то время как в режиме реального времени прогнозирование осуществляется на основании обратной связи предыдущих значений потребления / генерации.

Управление потокораспределением в электрической сети энергосистемы имеет большое значение для обеспечения устойчивости и экономичности ее функционирования. В традиционной практике решение этой проблемы предполагает детерминистический характер изменчивости задаваемых величин мощности для нагрузок и источников. При принятых условиях детерминистичности исходных данных для определения потокораспределения в настоящее время предлагаются несколько методов расчета установившихся режимов. Хотя эти способы достаточно обоснованы и хорошо развиты, вместе с тем с помощью детерминистических методов можно получать оценку только для точечного состояния системы. Полученные результаты детерминистического потокораспределения (ДПР) не учитывают факторы неопределенности, вызывающие изменчивость состояния системы от случайной изменчивости генерации и нагрузки. Для исследования вероятностных режимов, имеющих место в реальной энергосистеме при учете стохастической изменчивости мощностей источников и нагрузок, следует применять вероятностные подходы, методы нечеткого множества и интервального анализа. В целях получения вероятностных характеристик для потоков активной и реактивной мощностей и напряжений в сети и их сравнительного анализа при разных уровнях флуктуаций нагрузки применяли метод Монте-Карло. Модель установившегося режима принимали в виде нелинейных уравнений [11].

Моделирование установившегося режима через нелинейные уравнения широко используется в программах ДПР. В численных методах вероятностного потокораспределения также применяется данная модель, при этом для проведения расчетов ВПР методом Монте-Карло уравнения должны решаться много раз в соответствии с объемом случайной выборки флуктуаций мощности нагрузки системы [12].

Увеличение уровней проникновения возобновляемых источников энергии также усугубляет неопределенность и изменчивость общего энергобаланса, а одним из важнейших требований к сетям с РГ является обеспечение надежности системы. Рассмотрим гибридный метод аналитического моделирования, предложенный в [13]. Данный метод вводит параметры оценки узлов сети такие как, средняя частота прерывания электроснабжения (SAIFI), средняя продолжительность прерывания электроснабжения (SAIDI), средней продолжительности прерывания электроснабжения потребителя (CAIDI), недопоставленной мощности (ENS) и усредненной недопоставленной мощности (AENS). Гибридный метод аналитического моделирования предусматривает следующие действия:

1. По статистическим данным получают кумулятивные функции потоков ветра и солнечной активности для заданного региона.
2. Используя полученные кумулятивные функции моделируют несколько образцов зависимостей скорости ветра и солнечного излучения.
3. Используя характеристики ветрогенераторов и солнечных батарей и полученные ранее образцы зависимостей скорости ветра и солнечного излучения получают профили мощности источников РГ.
4. Профили мощности всех источников РГ суммируются и сравниваются с профилем мощности нагрузки.
5. Расчеты по пункту 4 производят для каждого дня календарного года, а по итогам года рассчитывают вероятность обеспечения нагрузки мощностями источников РГ. Далее, используя вероятностные данные отказов и их длительности в общей распределительной

сети и отказов и их длительности элементов самих РГ, вычисляют частоту и длительность отказов по каждому энергоузлу.

6. Рассчитывают системные индексы SAIFI, SAIDI, CAIDI, ENS и AENS.

Увеличение количества установок РГ на основе возобновляемых источников вызывает обеспокоенность у операторов энергосистем, поскольку оно определяет повышение требований к резервированию мощности и может оказывать негативное воздействие на характеристики сети в часы пикового производства источниками РГ электроэнергии. Существует достаточно технических решений снижения негативного влияния РГ на сеть, но все они требуют проведение измерений выходных параметров источников РГ в реальном времени. Однако такое условие не всегда выполнимо в жизни в виду таких факторов как: проблемы конфиденциальности, различная балансовая принадлежность, отсутствие стандартов для мониторинга и агрегации измерений и связи. В качестве альтернативы прямому мониторингу источников РГ в можно использовать метод дезагрегирования генерации источников РГ из агрегированных показателей активной мощности элементов сети [13]. При этом оценивается количество установленной мощности РГ, моделируя генерацию электроэнергии как функцию глобального горизонтального облучения (GHI), которое известно из местных статистических показателей солнечной активности данного региона. В [13] предлагаются и сравниваются четыре алгоритма оценки: первый предполагает, что изменчивость в суммарном профиле мощности в основном определяется флуктуациями генерации источников РГ, вторая и третья основывается на модели профиля потребления, а четвертая предполагает, что существует определенный частотный диапазон, в котором агрегированное измерение расхода мощности в основном обусловлено компонентом из-за генерации PV. Как показывают результаты из [13] наиболее эффективным методом является четвертый.

### Выводы

Как показывает мировая практика развития сетей с РГ (в том числе и на основе возобновляемых источников электроэнергии) демонстрирует существенный потенциал повышения энергоэффективности. Установки РГ позволяют потребителям получить целый ряд положительных эффектов, таких как повышение надежности, эффективное использование собственных топливно-энергетических ресурсов и уменьшение затрат на энергообеспечение. Однако внедрение источников РГ может оказывать как положительное, так и отрицательное воздействие на общую распределительную сеть, поэтому при планировании сетей с РГ необходимо учитывать влияние источников РГ на показатели сети путем моделирования выбора их оптимального местоположения и мощности, используя методы вероятностного моделирования энергодобавки и потокораспределения. Также на этапе моделирования необходимо рассмотреть реакцию распределительной сети при аварийных ситуациях и обеспечение адекватного управления источниками РГ.

### Библиографический список

1. Марченко А. И., Фишов А. Г., Дронова Ю. В. «Моделирование и анализ системных эффектов от присоединения малой генерации к электрическим сетям», 2015.
2. Попова С. Н., Потехина Н. В. «Перспективы и ограничения развития распределенной энергетики на электроэнергетическом рынке России», 2016г.
3. Карабанов С.М., Суворов Д.В., Сливкин Е.В., Гололобов Г.П., Тарабрин Д.Ю. «Анализ эффективности автономных солнечных энергетических систем с использованием суперконденсаторов.» Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № S1. С. 39-44.
4. L. Kools, F. Phillipson. «Data granularity and the optimal planning of distributed generation», 2017.
5. Кирик В. В., Губатюк О. С. «Оптимизация метода поиска местоположения источников распределенной мощности», 2015 г.
6. Р. А. Нунумете «Алгоритм выбора точки интерконнекции распределенной генерации и ее интеграция в работу системы», 2016г.

7. Mir Hadi Athari, Charles Yang, Zhifang Wang «Sequential Optimal Placement of Distributed Photovoltaics using Downstream Power Index», 2017 г.
8. Mir Hadi Athari, Zhifang Wang†, Seyed Hamid Eylas «Time-Series Analysis of Photovoltaic Distributed Generation Impacts on a Local Distributed Network», 2017 г.
9. Swasti R. Khuntia, José L. Rueda, «Pathway for Multivariate Dependence Modeling in Long-Term Horizon of Electrical Power System», 2017 г.
10. Kianoosh G. Borojoni, Shekoufeh Mokhtari, M.H. Amini, S.S. Iyengar « Optimal Two-Tier Forecasting Power Generation Model in Smart Grids», 2015 г.
11. Г. Б. Гулиев, Н. Р. Рахманов «Вероятностное моделирование потокораспределения в энергосистеме с распределенной генерацией и возобновляемыми источниками», 2016 г.
12. А. М. Гашимов, Н. Р. Рахманов, Г. Б. Гулиев, Р. Н. Рахманов, А. А. Мустафаев «Вероятностное потокораспределение как реакция на стохастичность нагрузки в энергосистеме», 2016 г.
13. Fabrizio Sossan, Lorenzo Nespoli, Vasco Medici, and Mario Paolone «Unsupervised Disaggregation of Photovoltaic Production from Composite Power Flow Measurements of Heterogeneous Prosumers», 2017

УДК 621.3; ГРНТИ 45.53.99

## **ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА НАВЕДЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ**

**А.А. Васин, Т.Н. Васильева**

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Российская Федерация, Рязань, vasilyeva.t.n@rsreu.ru*

*Аннотация.* В данной работе описаны несоответствия, возникающие при расчете наведенного напряжения в сетях напряжением от 0,38 кВ и выше с помощью методики СТО 56947007-29.240.55.018-2009.

*Ключевые слова.* Наведенное напряжение, электрическая сеть, потенциал, опора ВЛ

## **FEATURES OF THE CALCULATION OF INDUCED VOLTAGE IN ELECTRIC GRIDS**

**A.A. Vasin, T.N. Vasylyeva**

*Ryazan State Radio Engineering University,*

*Russian Federation, Ryazan, vasilyeva.t.n@rsreu.ru*

*Abstract.* This paper describes the inconsistencies that may occur in the calculation of the induced voltage in electric grids with voltage 0,38 kV and higher using method STO 56947007-29.240.55.018-2009.

*Keywords.* Induced voltage, electric grid, electric potential, power transmission tower

### **Введение**

Наведенное напряжение – это разность потенциалов между проводящими частями электроустановок (воздушные линии (ВЛ) или оборудованием трансформаторных подстанций (ПС)) и точкой нулевого потенциала, возникающие вследствие влияния электромагнитного поля действующего электрооборудования на электроустановки, находящиеся в непосредственной близости [1].

Известно, что наведенные напряжения на отключенной ВЛ возникают в результате действия электромагнитных полей действующих ВЛ, проходящих вблизи отключенной ВЛ. Значение наведенного напряжения зависит от рабочего напряжения и тока влияющих ВЛ, сопротивления заземления отключенной ВЛ, протяженности параллельного следования линий, взаимного расположения проводов и ряда других факторов.

### **Составляющие наведенного напряжения**

Наведенное напряжение имеет 2 составляющие: электростатическую и электромагнитную [1].

Электростатическая составляющая может достигать значений до нескольких киловольт, но снизить её до безопасной величины возможно заземлением линии.

Электростатическая составляющая зависит от соотношения емкостей ВЛ, расстояния до влияющей ВЛ, рабочего напряжения влияющей ВЛ. Однако, электростатическая составляющая наведенного напряжения не зависит от тока нагрузки влияющей ВЛ и рассчитывается по формуле:

$$U_{\text{нав}} = U_{\text{раб}} \cdot \omega \cdot C \cdot L \cdot R_{\text{заз}},$$

где  $U_{\text{раб}}$  – напряжение влияющей линии, В;

$C$  – емкость отключенной ВЛ, Ф/км;

$L$  – длина отключенного участка ВЛ, км.

Значение тока, при прикосновении проходящего через человека, рассчитывается по формуле:

$$I = \frac{U_{\text{нав}}}{R_{\text{чел}}},$$

где  $R_{\text{чел}}$  – сопротивление человека, Ом;

$U_{\text{нав}}$  – электростатическая составляющая наведенного напряжения, В.

Установка заземления значительно снижает электростатическую составляющую, [2]. В таблице 1 приведены расчетные значения сопротивлений различных заземляющих устройств (ЗУ).

Таблица 1. Значения сопротивлений различных заземляющих устройств

Заземляющее устройство	Сопротивление ЗУ, Ом
подстанция 110 кВ	<0,5
подстанция 10/0,4 кВ	<4
подстанция 35 кВ	<10
опора ВЛ с оборудованием	<30
опора ВЛ без отдельного ЗУ	10-100
электрод 0,5 м в глине	50-200
электрод 0,5 м в суглинке	200-500
электрод 0,5 м в песке	500-5000

В таблице 2 приведена зависимость между сопротивлением заземляющего устройства и наведенным напряжением на ВЛ.

Таблица 2. Зависимость электростатической составляющей от сопротивления ЗУ

Сопротивление ЗУ, Ом	Наведенное напряжение на ВЛ, В
0,5	1
4	9
10	22
30	66
100	220
200	440
500	1000
5000	8500

Электромагнитная составляющая образуется при влиянии магнитного поля тока нагрузки на контур провод-земля отключенной и заземленной ВЛ (рис. 1).

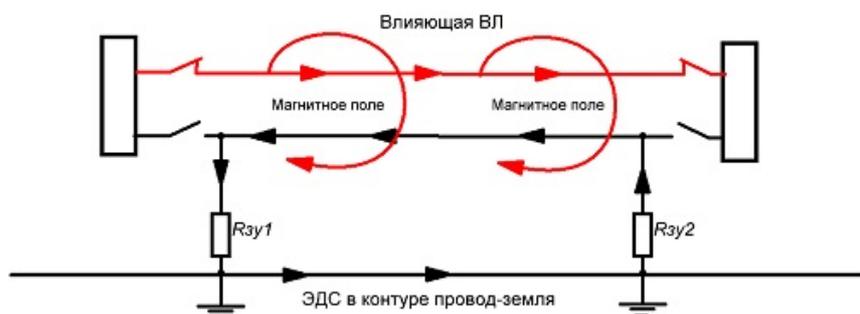


Рис. 1. Электромагнитная составляющая наведенного напряжения

При расчете и измерении электромагнитной составляющей наведенного напряжения в качестве основной используется схема замещения с двумя заземлениями по краям отключенного участка (рис. 2).

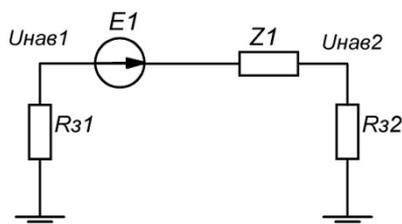


Рис. 2. Схема замещения для расчета и измерения наведенного напряжения

Согласно методике [4], ЭДС, наводимая в отключенной линии, рассчитывается по формуле:

$$E_1 = F(a) \cdot I_1 \cdot l_1,$$

где:  $F(a)$  – коэффициент индуктивной связи линий;

$I$  – ток во влияющей линии, кА;

$l$  – протяженность участка влияющей ВЛ, км.

Наведенные напряжения  $U_{нав1}$  и  $U_{нав2}$  определяются как:

$$U_{нав1} = \frac{E_1 R_{з1}}{\sqrt{(R_{з1} + R_{з2})^2 + Z_1^2}},$$

$$U_{нав2} = \frac{E_1 R_{з2}}{\sqrt{(R_{з1} + R_{з2})^2 + Z_1^2}}.$$

### Особенности определения величины наведенного напряжения для разных классов напряжения

Для точного расчета электромагнитной составляющей наведенного напряжения необходимо знать параметры исследуемых линий [3]. К геометрическим параметрам относятся:

- 1) Расстояние между заземлениями на отключенной линии;
- 2) Протяженность совместного следования влияющей и отключенной линий;
- 3) Угол между влияющей и отключенной линиями при их пересечении;

4) Расстояние между влияющей и отключенной линиями.

К энергетическим параметрам относятся:

- 1) Напряжение влияющей и отключенной линий;
- 2) Ток влияющей линии;
- 3) Коэффициент индуктивной связи линий  $F(a)$ ;
- 4) Сопротивление отключенного участка линии  $Z$ ;
- 5) Сопротивления заземляющих устройств.

Была проведена работа по установлению величин необходимых геометрических параметров линии (рис. 3). Выполнены измерения расстояния между опорами линии напряжением 0,38 кВ, находящейся под влиянием линии напряжением 110 кВ.

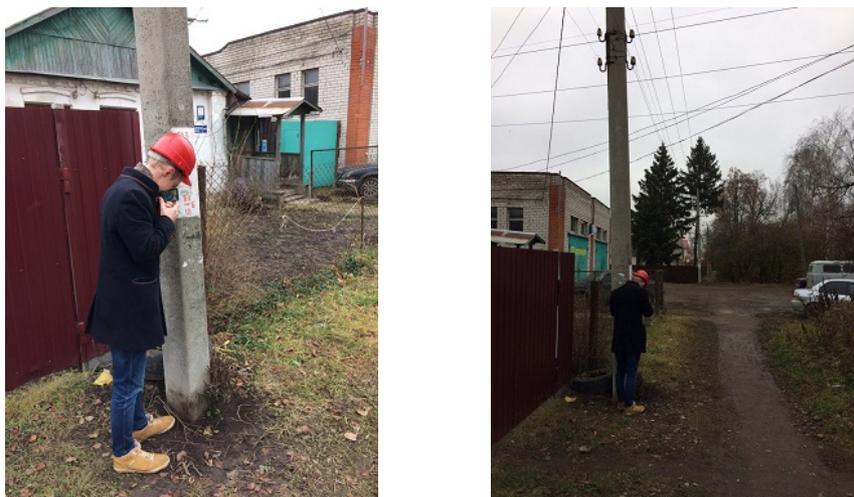
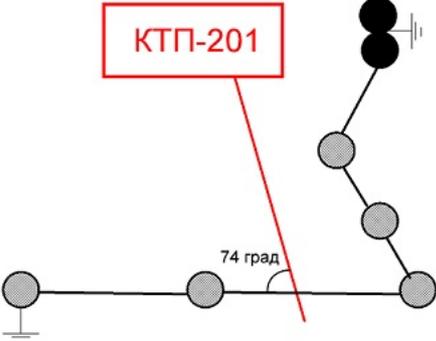
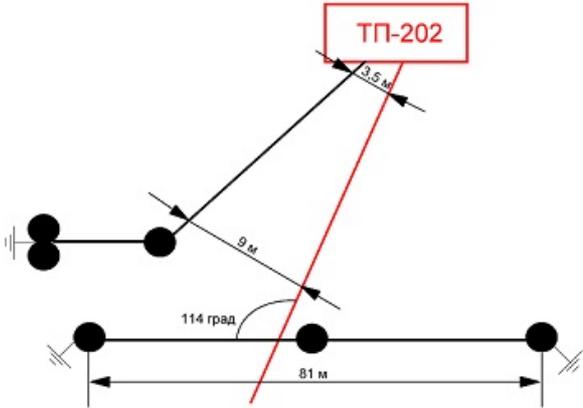
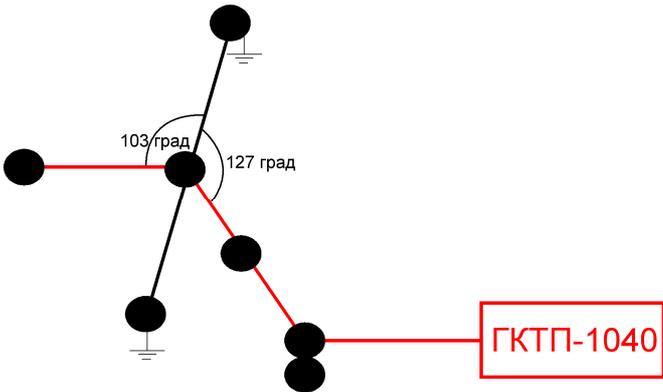


Рис. 3. Измерение расстояния между опорами с помощью дальномера

В процессе изучения и расчета величины наведенного напряжения был выявлен ряд недостатков существующей методики. В частности, методика не рассматривает наличие наведенного напряжения на линиях 0,38 кВ. В связи с этим отсутствуют табличные данные для коэффициента индуктивной связи линий  $F(a)$  для данного класса напряжения.

Таким образом, для расчета по существующей методике [4] было проведено математическое моделирование коэффициента индуктивной связи линий  $F(a)$  с использованием тренда его изменения. В результате работы, проведенной в Рязанском государственном радиотехническом университете по заказу электросетевой организации, было проанализировано 39 участков электрической сети в г.Рязани и Рязанской области, предположительно находящихся под наведенным напряжением. В качестве примера приведены схемы и результаты по трем позициям из списка (табл.3). В таблице 3 красным цветом выделены влияющие линии, черным цветом выделены линии под наведенным напряжением.

Таблица 3. Расчетные схемы

№	Схема линии под наведенным напряжением	Тип взаимодействия	Комментарий
1		пересечение под углом; сближение	ВЛ 10 кВ влияет на ВЛ 0,4 кВ. Расстояние между заземлениями 211 м. При пересечении расстояние между линиями 4,6 м.
2		сближение; пересечение под углом	ВЛ 10 кВ влияет на ВЛ 0,4 кВ. При пересечении расстояние между линиями 4 м.
...			
39		пересечение	ВЛ 10 кВ влияет на ВЛ 0,4 кВ. При пересечении расстояние между линиями 2,3 м.

В результате расчета получаем значения геометрических параметров рассматриваемых линий (табл. 4).

Таблица 4. Расчетные схемы

№	ВЛ под наведенным напряжением			Влияющая ВЛ		Значение наведенного напряжения, В
	Класс напряжения, кВ	Диспетчерское наименование	Участок вблизи влияющей ВЛ	Класс напряжения, кВ	Диспетчерское наименование	
1	0,4	КТП-201	1-2(сб.1,5м) 22-23(пер.4,6м)	10	Ф-3 ПС Песочня	0,052
2	0,4	ТП-202	9-10(пер.4м) 9-17(сб.3,5м)	10	Ф-3 ПС Песочня	0,14
...						
39	0,4	ТП-1040	122-123(пер.2,3м)	10	Ф-11 Мурмано	0,098

После теоретического расчета величины наведенного напряжения линии условно подразделены на 3 типа:

- 1) Линии со значением наведенного напряжения менее 25 В - считаются линиями без наведенного напряжения;
- 2) При величине наведенного напряжения от 25 В до 50 В требуется измерение наведенного напряжения специальным прибором;
- 3) При величине более 50 В линия однозначно находится под наведенным напряжением.

Согласно расчету, проведенному по методике [4], ни одна из 39 линий не находится под наведенным напряжением. Учитывая факт, что данная методика изначально не рассчитана на расчет наведенного напряжения в сетях с классами напряжения 0,38 кВ и 10 кВ, возможны грубые погрешности.

### Выводы

- 1) Составлен список схем для расчета наведенного напряжения. Максимальная протяженность совместного следования линий составляет 148 м. Максимальное расстояние между влияющей и отключенной линиями составляет 15 м при сближении линий, минимальное расстояние составляет 0,6 м при пересечении линий;
- 2) Расчет по рассматриваемой методике показал, что ни одна из 39 отключенных линий не находится под наведенным напряжением;
- 3) Возможной причиной отсутствия наведенного напряжения является малая протяженность совместного следования линий;
- 4) Методика [4] не подходит для линий с классами напряжения 0,38 кВ и 10 кВ. Необходима разработка более точной методики на основе теории магнитосвязанных цепей;
- 5) Выборочная проверка полученных результатов будет проводиться с помощью прибора КНН с ИНН-15.

### Библиографический список

1. Муссонов Г.П. Исследование наведенных напряжений на отключенных воздушных линиях электропередачи с двучепными опорами / Муссонов Г.П., Снопкова Н.Ю. // Вестник ИрГТУ – 2015. – №7 – с.187-193.
2. Андреев Д. И. Разработка способов уменьшения наведенного напряжения на воздушных линиях электропередачи, выведенных в ремонт / Андреев Д. И., Колобов В. В, Баранник М. Б., Яковлев В. И. // Энергетика – 2010. – №2 – с. 70-80.
3. Мисриханов М.Ш. Наведенные продольные напряжения в параллельных воздушных линиях электропередачи / Мисриханов М.Ш., Мурзин С.Г., Седунов В.Н., Токарский А.Ю. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, том 14 – 2012. – №5 – с.808-815.
4. 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 621.3; ГРНТИ 45.53.99

## МАЧТОВЫЕ КОНДЕНСАТОРНЫЕ УСТАНОВКИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6-10 КВ

С. Чернов\*, А. Афонин\*\*

\*ПАО МРСК Центра и Приволжья, филиал Рязаньэнерго /  
Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Российская Федерация, Рязань, [sergei\\_chernov@indox.ru](mailto:sergei_chernov@indox.ru)

\*\*Филиал АО "СО ЕЭС", Рязанское РДУ,  
Рязанский государственный радиотехнический университет /  
Российская Федерация, Рязань, [panas1999@mail.ru](mailto:panas1999@mail.ru)

*Аннотация.* В данной работе рассматривается конструкция и принцип работы мачтовой конденсаторной установки в распределительных сетях 6-10 кВ.

*Ключевые слова.* Компенсация реактивной мощности, мачтовая конденсаторная установка, конденсаторная батарея, КБ, БКМ.

## MAST CONDENSING UNITS IN DISTRIBUTION NETWORKS 6-10 KV

S. Chernov\*, A. Afonin\*\*

\*PJSC «MRSK Center and Volga Basin Region»,  
Branch of Ryzanenergo /  
Ryazan State Radio Engineering University,  
Russian Federation, Ryazan, [sergei\\_chernov@indox.ru](mailto:sergei_chernov@indox.ru)

\*\*System Operator of the United Power System (JSC),  
Ryazan regional dispatch administration /  
Ryazan State Radio Engineering University,  
Russian Federation, Ryazan, [panas1999@mail.ru](mailto:panas1999@mail.ru)

*Abstract.* In this paper, we consider the design and operation of a mast capacitor installation in 6-10 kV distribution networks.

*Keywords.* Reactive power compensation, mast capacitor installation, capacitor bank, KB, BKM.

### Введение

Компенсация реактивной мощности на предприятии позволяет существенно сократить расход электроэнергии, снизить нагрузку на кабельные сети и трансформаторы, продлив тем самым их ресурс.

Установка оборудования компенсации реактивной мощности позволяет сократить расход электроэнергии примерно на 10-20%, а при низких значениях  $\cos \varphi$  (0,5 и менее) потребность в электроэнергии может сократиться более чем на 30%.

Внедрение систем компенсации реактивной мощности актуально практически на любом предприятии. На крупных промышленных предприятиях потребителями реактивной мощности в основном являются недогруженные асинхронные двигатели. Такие двигатели входят состав станков, подъемно-транспортного оборудования, основного технологического оборудования предприятий химической промышленности, нефтепереработки и т.д. На небольших предприятиях, в офисных зданиях и торговых центрах реактивная мощность может генерироваться нелинейной нагрузкой, системами приточно-вытяжной вентиляции и кондиционирования, электроприводами насосов систем водоснабжения и теплоснабжения, источниками освещения с люминесцентными лампами [1].

По оценкам экспертов, за последние 15 лет из баланса ЕЭС России выпало огромное количество КУ (компенсирующих устройств) у потребителей — свыше 50 МВАР установленной мощности. Это привело к значительному росту потерь как в системообразующих, так и в распределительных сетях по всей территории России.

Одним из наиболее эффективных источников реактивной мощности в нагрузочных узлах являются конденсаторные батареи (КБ) поперечного включения. Однако только не-

большая часть этих КБ может быть постоянно подключена к электрической сети. Эта часть соответствует минимальному потреблению реактивной мощности электроприемниками и звеньями электропередачи. Остальная часть КБ должна отключаться при снижении потребления реактивной мощности с целью повышения экономичности работы сети. Регулируемые КБ при пофазном управлении выключателями, могут быть использованы как ступенчато регулируемые конденсаторные симметрирующие устройства.

При всех своих недостатках метод поперечной компенсации позволяет компенсировать и реактивную мощность нагрузки, и — при определенных условиях — реактивную мощность самой линии. Об этом свидетельствует и зарубежный опыт, где для этих целей широко применяются мачтовые конденсаторные батареи (далее БКМ).

Исходя из зарубежного опыта использования конденсаторных батарей в распределительных сетях потребителей, отечественными специалистами разработана конструкция БКМ для распределительных сетей 6–10 кВ [2].

### **Конструкция и принцип работы**

Конденсаторные установки высокого напряжения мачтовые предназначены для повышения коэффициента мощности электроустановок промышленных предприятий и распределительных сетей напряжением 6-10 кВ частотой 50 Гц в районах с умеренным и холодным климатом [3].

БКМ размещается на опорах высоковольтных линий. Общий вид БКМ представлен на рисунке 1. На несущей раме в одной плоскости располагается вакуумный выключатель, трансформатор, ограничители перенапряжения и конденсаторная батарея. Ограничители перенапряжения и конденсаторная батарея закреплены на кронштейнах. Установка снабжена микропроцессорным управляющим устройством. Управляющее устройство вынесено за пределы рамы. Компоновка устройства обеспечивает его надежную эксплуатацию в районах с умеренным и холодным климатом и обильными снегопадами. Кроме того, упрощается процесс обслуживания установки, поскольку все элементы расположены в пределах досягаемости и не создают препятствий доступу к рядом расположенному элементу.

Мощность БКМ — от 100 до 2700 кВАр. В БКМ в качестве коммутационного модуля, используются вакуумные выключатели ВВ/TEL Таврида-электрик (реклоузер вакуумный РВА/TEL). В дальнейшем предполагается использовать как импортные, так и отечественные вакуумные выключатели, специально предназначенные для коммутации емкостной нагрузки, а также адаптивные устройства управления, интегрированные со SCADA-системой.

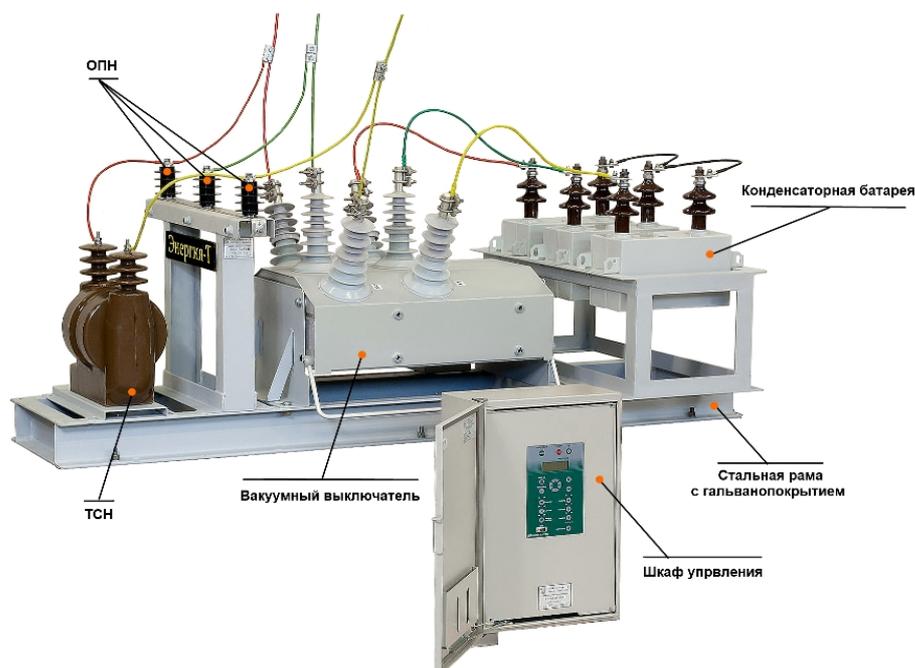


Рис. 1. Общий вид БКМ

В конденсаторной батарее используются три компенсационных однофазных конденсатора, соединенных в «звезду». Тип конденсаторов: однофазные КЭП1-6,6/ $\sqrt{3}$  УХЛ1, КЭП1-11/ $\sqrt{3}$  УХЛ1. Каждый конденсатор включает в себя корпус и токоведущие выводы. Верхние части корпусов конденсаторов конденсаторной батареи закреплены к двум уголкам кронштейна. К выводам коммутационного модуля выводы конденсаторов присоединены гибкими перемычками. Корпус каждого конденсатора заземлен с помощью медных проводников, присоединенных к уголку кронштейна.

Ограничители перенапряжения (ОПН) объединены в блок ОПН и конструктивно располагаются на отдельном кронштейне, между трансформатором и вакуумным выключателем. ОПН соединены в «звезду». Общая точка их соединения, выполненная медной шиной, подсоединена к сети заземления с помощью медного проводника.

Трансформатор (ТСН) располагается на шасси, закрепленном на несущих элементах рамы рядом с блоком ограничителей перенапряжения и соединяется с ними гибкими перемычками.

Установка снабжена микропроцессорным управляющим устройством, установленным в шкаф управления (ШУ), который вынесен за пределы рамы и для удобства обслуживания расположен в нижней части опоры. ШУ заземлен посредством присоединения к спуску защитного заземления. ШУ соединяется с коммутационным модулем и трансформатором, соответственно контрольным кабелем и кабелем питания.

Однолинейная схема установки представлена на рисунке 2.

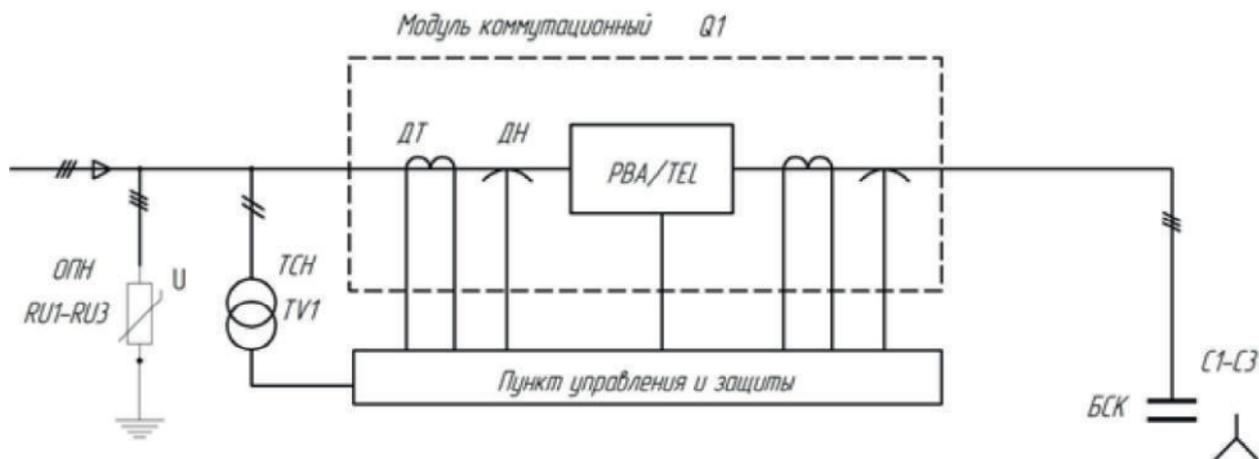


Рис. 2. Однолинейная схема установки

Работает мачтовая конденсаторная установка следующим образом.

В зависимости от величины параметра электрической сети, принятого в качестве регулируемого, и измеренного с помощью встроенных датчиков напряжения коммутационного модуля, управляющее устройство осуществляет включение или отключение конденсаторов, конденсаторной батареи через вакуумный выключатель. Питание управляющего устройства производится от трансформатора. При возникновении грозовых или коммутационных перенапряжений в линии, ОПН выполняют свою функцию, защищая установку от аварийных режимов [4].

### Выводы

Мачтовая конденсаторная установка по отношению к конденсаторным установкам модульного исполнения имеет ряд преимуществ:

- Обеспечивает эффективную коррекцию коэффициента мощности нагрузки потребителей;
- Может применяться, как компонент Smart Grid (интеллектуальной сети);
- Адаптивная система управления установки может быть интегрирована в SCADA-систему;
- Не требует дополнительного землеотвода, т.к. размещается на опорах воздушных линий электропередачи.

### Библиографический список

1. Матик-электро, «Компенсация реактивной мощности» [Электронный ресурс] — Режим доступа — URL: <http://www.matic.ru/reactive-power-compensation/> (дата обращения 11.02.2018);
2. Валерий Николаев, главный конструктор, Евгений Володин, конструктор, ООО «Энергия-Т», «Мачтовые конденсаторные установки в распределительных сетях 6-10 кВ» [Электронный ресурс] — Режим доступа — URL: <https://www.elec.ru/articles/machtovye-kondensatornye-ustanovki-v-raspredelitel/>, (дата обращения 11.02.2018);
3. ООО «Энергия-Т», «Каталог по компенсации реактивной мощности» [Электронный ресурс] — Режим доступа — URL: [http://www.energy-t.ru/assets/images/catalog\\_energy-t.pdf](http://www.energy-t.ru/assets/images/catalog_energy-t.pdf), (дата обращения 11.02.2018);
4. «Установка мачтовая конденсаторная» [Электронный ресурс] — Режим доступа — URL: [http://poleznayamodel.ru/img\\_show/1012098.html](http://poleznayamodel.ru/img_show/1012098.html), (дата обращения 11.02.2018);

УДК 621.311; ГРНТИ 45.03.03

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОТЕКАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В ПРОВОДНИКЕ С КОМПОЗИТНОЙ СТРУКТУРОЙ

Е.С. Жемчугов, С.Ю. Буваков, Г.П. Гололобов, Д.В. Суворов, Д.В. Будников

*Рязанский государственный радиотехнический университет,*

*Россия, Рязань. E-mail: [lilbuv@mail.ru](mailto:lilbuv@mail.ru), [dmitriy\\_suvorov@mail.ru](mailto:dmitriy_suvorov@mail.ru), [gololobov.gennady@yandex.ru](mailto:gololobov.gennady@yandex.ru),  
[ezchemchugov8@gmail.com](mailto:ezchemchugov8@gmail.com), [senior.budnikov@yandex.ru](mailto:senior.budnikov@yandex.ru)*

*Аннотация.* В работе содержится математическое моделирование прохождения тока через композитную структуру проводника при помощи пакета COMSOL Multiphysics 5.2. Представлены расчеты частотной зависимости электрического сопротивления для круглого композитного проводника с разными материалами резистивного покрытия и размерами. Приводятся сферы использования и реализации объекта исследования.

*Ключевые слова.* Скин-эффект, композитный проводник, силовая электроника, помехоподавляющий фильтр, математическое моделирование.

## MODELING THE FLOW OF ALTERNATING CURRENT IN A CONDUCTOR WITH A COMPOSITE STRUCTURE

E.S. Zhemchugov, S.Yu. Buvakov, G.P. Gololobov, D.V. Suvorov, D.V. Budnikov

*Ryazan State Radio Engineering University,*

*Russian Federation, Ryazan, E-mail: [lilbuv@mail.ru](mailto:lilbuv@mail.ru), [dmitriy\\_suvorov@mail.ru](mailto:dmitriy_suvorov@mail.ru),  
[gololobov.gennady@yandex.ru](mailto:gololobov.gennady@yandex.ru), [ezchemchugov8@gmail.com](mailto:ezchemchugov8@gmail.com), [senior.budnikov@yandex.ru](mailto:senior.budnikov@yandex.ru)*

*Abstract.* The work contains mathematical modeling of the current passing through the composite structure of the conductor using COMSOL Multiphysics 5.2. Calculations are given of the frequency dependence of the electrical resistance for a circular composite conductor with different resistive coating materials and dimensions. Areas of use and implementation of the object of research.

*Keywords.* Skin effect, composite conductor, power electronics, noise suppression filter, mathematical modeling.

### Введение

В связи с интенсивным развитием силовой электроники и импульсной техники изучение устройств, систем и технологий, основанных на частотной зависимости активного сопротивления, является актуальным [1].

Физическое явление скин-эффекта, заключающееся в неоднородном распределении плотности переменного тока по сечению проводника, нежелательно в большинстве задач радиотехники [2]. Однако остается перспективным направлением, изучение распространения электрического тока на высоких частотах в композитных проводниках, имеющих покрытие из материалов с более высоким удельным сопротивлением, чем центральная жила.

В таком проводнике на низких частотах ток будет течь преимущественно в области с низким удельным сопротивлением. С ростом частоты, вследствие скин-эффекта, электрический ток потечет преимущественно в области более высокого удельного сопротивления, смещаясь из сердцевины к краям. Сопротивление будет резко возрастать в области средних и высоких частот [4].

Композитные проводники в данном случае будут выполнять функции фильтра нижних частот (ФНЧ), использоваться для помехоподавления в устройствах от перенапряжения [5]. В связи с этим возникает необходимость изучения данного вопроса.

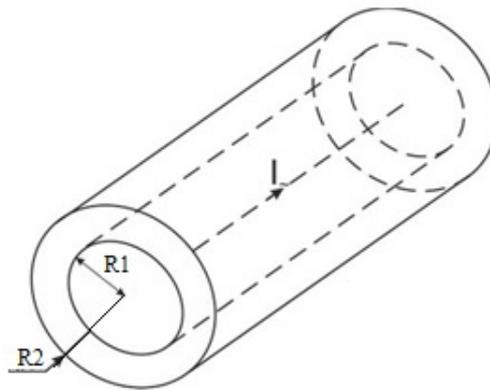


Рис. 1. Геометрия поперечного сечения композитного проводника

**Актуальность** данной работы заключается в создании фильтра низких частот на основе композитного проводника, имеющего область с низким (сердцевина) и высоким (резистивное покрытие) удельным сопротивлением, способного заменить более громоздкие устройства от перенапряжения.

**Целью** данной работы является моделирование прохождения переменного тока через композитный проводник с различными материалами резистивного покрытия и размерами проводника, а также анализ результатов.

#### Математическое моделирование

Для однородных проводников круглого сечения глубина скин-слоя определяется:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\gamma \mu \omega}}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – удельная электрическая проводимость;  
 $\mu$  – магнитная проницаемость вещества проводника;  
 $\omega$  – круговая частота переменного тока.

Но при расчете композитных проводников данное соотношение использовать нельзя. Вычислить электрическое сопротивление при переменном токе высокой частоты у проводника с композитной структурой невозможно. Нужно создать математическую модель.

При моделировании будем использовать проводник круглого сечения, состоящий из двух проводящих частей, со следующими параметрами:

- длина - 1 метр;
- выбраны наиболее интересные диапазоны частот с точки зрения практического применения в области перенапряжения – от 100 кГц до 100 МГц;
- сердцевина из материала с низким удельным сопротивлением (медь (Cu) – 0,01721 Ом·мм<sup>2</sup>/м);
- оболочка из материала с высоким удельным сопротивлением (нихром, хромель и константан).

Выбор обусловлен тем, что эти сплавы обладают высоким удельным сопротивлением, стойкостью к воздействию высоких температур, а также возможностью практического применения.

Модель проводника и расчетной сетки представлены на рисунке 2.

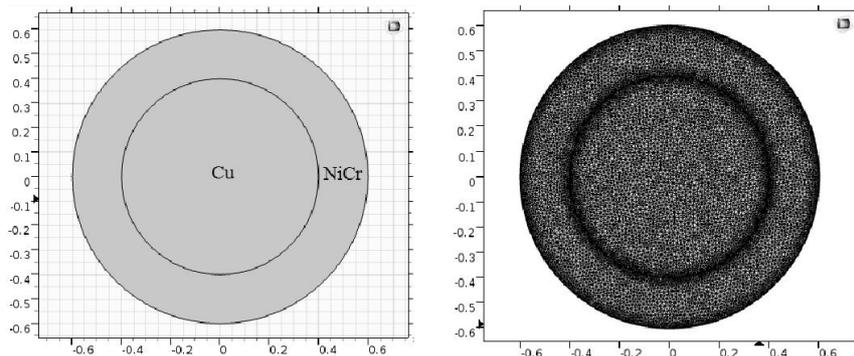


Рис. 2. Изображение модели композитного проводника и расчетной сетки в разрезе

Расчет композитного проводника проводится в специализированном программном обеспечении COMSOL Multiphysics методом конечных элементов [3].

Для выбора наиболее оптимального сечения провода было рассмотрено 2 параметра:

- Материалы покрытия медного проводника;
- Размеры проводника.

### Результаты моделирования

В результате моделирования определена зависимость электрического сопротивления проводника от частоты (рис. 3.) для 3 материалов с аналогичными параметрами и цельного медного проводника (радиус проводящей сердцевинки из меди  $R1=0.4$  мм и толщина проводящего покрытия  $R2=0.6$  мм).

Стоит заметить, что сопротивление проводника на средних и высоких частотах (от 300000 кГц до 100 МГц) с никромовым покрытием больше, чем у проводников покрытых константаном и хромелью, ввиду большего удельного сопротивления ( $1,4 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$  у никрома против  $0,5 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$  и  $0,7 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$  соответственно).

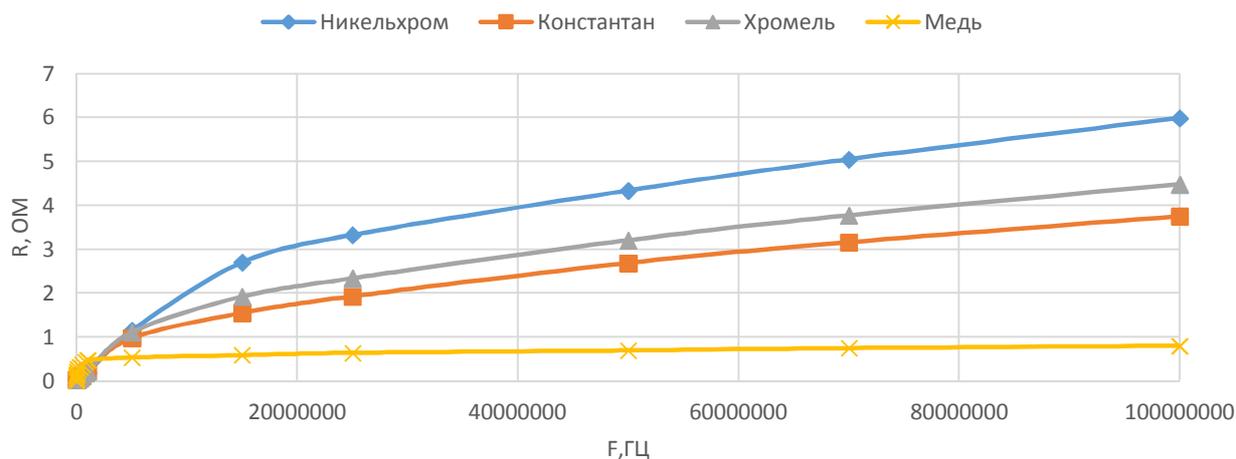


Рис. 3. Частотная зависимость сопротивления композитного проводника при различных материалах резистивного покрытия

Сравнение частотных зависимостей от сопротивления с разными радиусами резистивного покрытия из никрома при одинаковых радиусах проводящей медной части (рис. 4.) показывает:

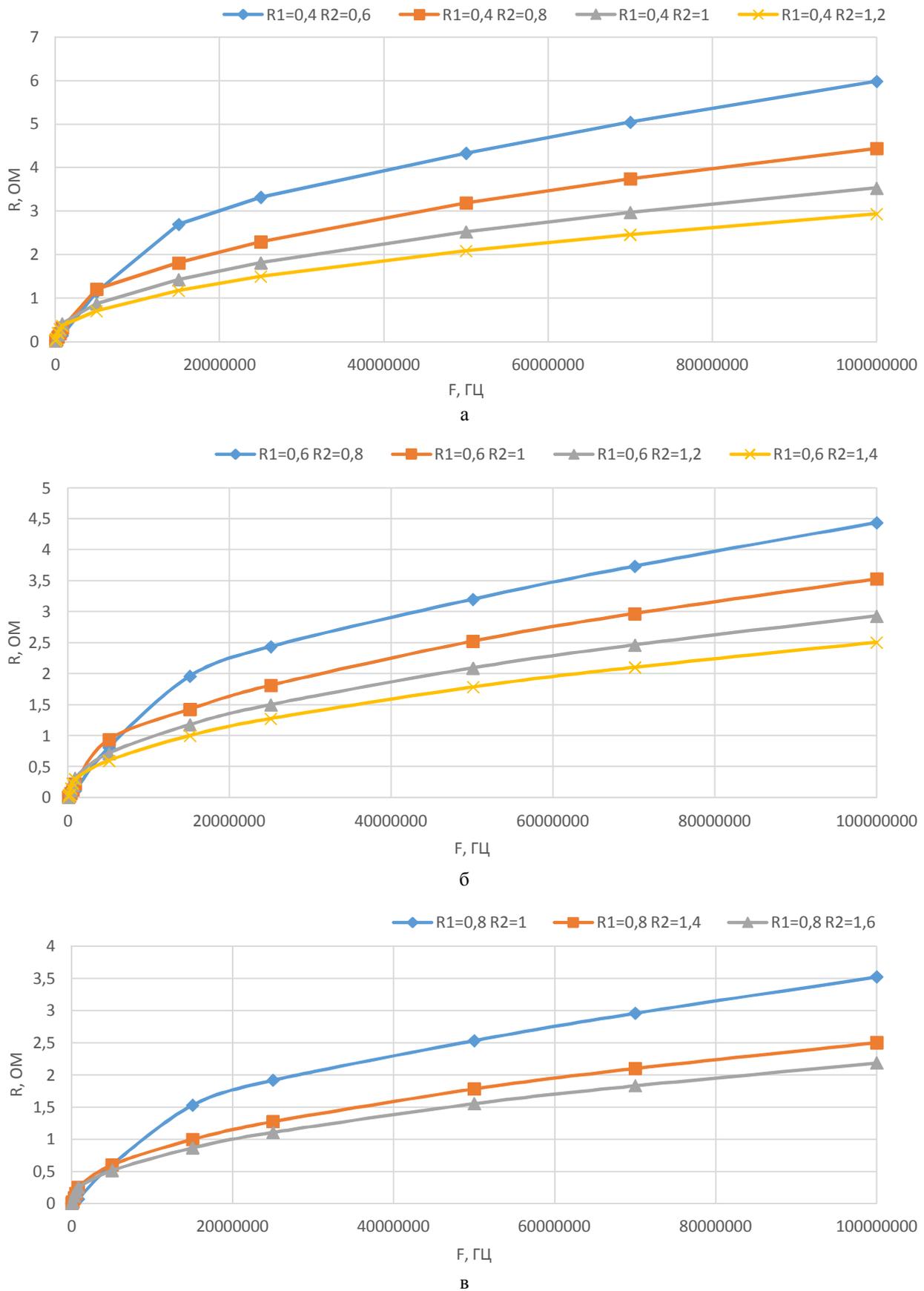


Рис. 4. Зависимость сопротивления от частоты композитного проводника при различных радиусах резистивного покрытия  $R_2$  и постоянного радиуса проводящей медной жилы: а –  $R_1=0,4\text{мм}$ ; б –  $R_1=0,6\text{мм}$ ; в –  $R_1=0,8\text{мм}$ .

- на высоких частотах (3...10 МГц и более) при одинаковых радиусах проводника электрическое сопротивление образца покрытым нихромом в 4–8 раз больше чем у образца без покрытия;
- при увеличении толщины покрытия сопротивление на высоких частотах (3 МГц и более) уменьшается по сравнению с проводником, покрытым меньшим слоем нихрома;
- в области низких частот (до 50 кГц) сопротивление практически не зависит от толщины резистивного покрытия.

### Выводы

В результате моделирования исследована частотная зависимость электрического сопротивления композитного проводника, состоящего из медной сердцевины и нескольких вариантов покрытий. Исследована физико-математическая модель процесса прохождения тока через структуру композита. В процессе численного моделирования было установлено:

- на высоких частотах (3...100 МГц) при одинаковых радиусах проводника электрическое сопротивление образца покрытым нихромом в 4–8 раз больше чем у образца без покрытия, а лучшие резистивные свойства показал нихром;
- в области низких частот (до 50 кГц) сопротивление практически не зависит от толщины резистивного покрытия, и токи протекают в проводящей сердцевине;
- значение электрического сопротивления определяется в основном от толщины резистивного покрытия, и большее значение сопротивления показал образец с радиусом медной сердцевины 0,4 мм и толщиной покрытия 0,2мм.

Полученные данные могут быть использованы при разработке силовых помехоподавляющих фильтров и устройств защиты от перенапряжений.

### Библиографический список

1. Электропитание устройств и систем телекоммуникаций: Учебное пособие для вузов / В. М. Бушуев, В. А. Демянский, Л. Ф. Захаров и др. — М.: Горячая линия—Телеком, 2009. —384 с.: ил.
2. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. –М.: Высшая школа, 1983. – 463с.
3. Овчинникова Е.В., Фатькин В.А. Особенности моделирования процесса получения диэлектрических покрытий // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2008. – № 25. – С. 71–76
5. Буваков С.Ю., Суворов Д.В., Гололобов Г.П. Исследование частотной зависимости электрического сопротивления проводников с композитной структурой // Научный вестник НГТУ том 66, № 1, 2017, с. 147–158
5. Patent US 4510468. RF Absorptive line with controlled low pass cut-off frequency /F. Mayer. – N 06/429,032; appl. date 30.09.1982; publ. date 09.04.1985.

УДК 621.3; ГРНТИ 45.53.99

## РЕЛЕЙНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА

**В.М. Зайцев**

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, город Рязань, vitally.z95@yandex.ru*

*Аннотация.* В данной работе рассматриваются основные токовые защиты применяемые в электроустановках.

*Ключевые слова.* Токовая защита, реле, микропроцессорные устройства, надежность, быстрдействие, селективность.

## RELAY CURRENT PROTECTION

**V. M. Zaitsev**

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Russia, city of Ryazan, vitally.z95@yandex.ru*

*Annotation.* In this work the main current protections applied in electroinstallations are considered.

*Keywords.* Current protection, relays, microprocessor devices, reliability, performance, selectivity.

### Введение

Для обеспечения надежного электроснабжения приемников и сохранения оборудования электроустановок необходимо при тех или иных авариях как можно быстрее отключать поврежденный участок, а также плавно управлять возникающим режимом, который является опасным для устройств и оборудования. Характерным случаем такого режима является перегрузка и короткое замыкание.

Для таких целей служат автоматические устройства релейной защиты, защищающие сети и ее элементы от опасных последствий повреждений. Если повреждение не представляет для установки опасности, то релейная защита должна сигнализировать об ненормальном режиме работы, не отключая установку. Задача таких устройств состоит в ограничении объемов повреждений и их влияния на работу приемников, а также в предупреждении повреждений оборудования. Большинство повреждений связано с разрушением изоляции.

Релейная защита предназначена для автоматического отключения поврежденных элементов электрической сети и сигнализации о тех нарушениях нормального режима, которые не требуют непосредственного отключения. Релейная защита должна обеспечить быстроту действия, селективность действия, надежность работы и чувствительность. Кроме того, стоимость релейной защиты должна быть по возможности небольшой.

### Максимальная токовая защита (МТЗ)

Один из самых распространенных видов токовых защит, который применяется практически во всех электроустановках напряжением 6-10 кВ. Принцип действия данной защиты заключается в том, что при превышении заданного значения тока протекающего в цепи, включается защита. В отличие от токовой отсечки (о которой поговорим позже) максимальная токовая защита действует не мгновенно, то есть при превышении тока сигнал на отключение поступает с определенной выдержкой по времени. В зависимости от того где расположен защищаемый участок время срабатывания может различаться. Минимальная выдержка по времени устанавливается на более удаленном от источника участке, соответственно на более близком расстоянии время будет больше, отличающееся на величины называемую степень селективности.

Степень селективности определяется временем срабатывания защиты. В случае короткого замыкания на участке цепи срабатывает его токовая защита. Если защита по каким либо причинам не сработала, то через определенное время (равное ступени селективности) после начала короткого замыкания сработает МТЗ более близкого к источнику участка и отключит как поврежденный, так и свой участок. Поэтому необходимо, чтобы степень селек-

тивности была больше времени срабатывания защиты, иначе защита соседнего участка отключит как повреждённый, так и рабочий участок до того, как собственная защита повреждённого участка успеет сработать. При этом необходимо сделать ступень селективности достаточной для того, чтобы защита успела отработать до того, как ток короткого замыкания нанесёт огромный ущерб электрической сети.

Реализуется максимальная токовая защита на базе различных устройств, простейшие из них - это токовые реле РТ-40 и РТ-80, а для обеспечения ступени селективности (выдержки времени) могут использоваться, к примеру, реле времени серии РВ-100 или РВ-200. Токовые реле подключаются к трансформаторам тока расположенные на защищаемом участке цепи.

В последнее время для реализации максимальной токовой защиты используются микропроцессорные устройства, которые выполняют множество различных функций.

МП устройства такие как «Сириус-2» совмещают в себе множество различных функций, таких как: несколько ступеней МТЗ, токовая отсечка и защиты от замыканий на землю. Микропроцессорные устройства отличаются высокой точностью, быстродействием и тем, что заменяют собой множество различных устройств, что естественно является преимуществом. К недостаткам можно отнести высокую стоимость данных устройств а также небольшой диапазон рабочих температур.

### **Токовая отсечка**

Принцип действия токовой отсечки очень схож с МТЗ, отличается лишь тем, что токовая отсечка рассчитана на большие токи срабатывания (обычно это 3-10 крат от номинального значения тока) а также выдержка по времени гораздо меньше вследствие больших токов. Токовая отсечка основана на резком повышении тока в цепи, причиной этому может служить междуфазные короткие замыкания в кабельных линиях, на секциях шин и т.д.

При коротком замыкании в сети происходит значительное возрастание силы тока. Обычно, это приводит к разогреву и вследствие возгорания, разрушениям и т.д. Производить устройства и различные элементы пригодными к длительному воздействию больших токов экономически невыгодно.

Человек просто не сможет отреагировать на резкое возрастание тока вследствие короткого замыкания, так как этот процесс длится от нескольких секунд до долей секунды. Поэтому функцию защиты выполняет автоматика, в том числе и токовая отсечка. С помощью нее осуществляется контроль величины тока на участке цепи. Если сила тока возрастает и начинает превышать номинальное значение, происходит срабатывание защиты и отключение участка. Величина тока, при которой происходит срабатывание защит, называется уставка. Ее значение должно обеспечивать отключение цепи до того момента, когда начнутся серьезные разрушения. Для создания токовой отсечки применяются различные способы. Чаще всего эта процедура осуществляется с использованием электромагнитных реле. Замыкание контактов в этих устройствах происходит под влиянием электромагнитной силы вследствие протекания электрического тока. Таким образом, прибор подает сигнал, отключающий защищаемый объект. Этот же метод применяется в различных конструкциях автоматических выключателей.

Для защиты сетей высокого напряжения применяются различные токовые реле, микропроцессорные устройства и т.д. В качестве защиты в сетях низкого напряжения применяются автоматические выключатели.

Рассмотрим принцип работы токовой отсечки на примере автоматического выключателя серии 47-29. Токовая отсечка обеспечивается с помощью электромагнитного расцепителя, представляющего собой соленоид, подвижный сердечник которого приводит в действие механизм расцепления (рис. 1).



Рис. 1. Электромагнитный расцепитель [1]

Ток, проходящий через выключатель, идет по обмотке небольшого соленоида и вызывает втягивание сердечника при превышении заданного порога тока. Электромагнитный расцепитель, в отличие от теплового, срабатывает очень быстро (доли секунды), но при значительно большем превышении тока: в  $3\div 10$  раз от номинала, в зависимости от типа (автоматические выключатели делятся на типы (классы) А, В, С и D в зависимости от чувствительности электромагнитного расцепителя).

К примеру у автоматического выключателя ВА 47-29 6С, номинальный ток составляет 6 А, характеристика С, токовая отсечка будет составлять от  $6I_n$  до  $10I_n$ , следовательно ток срабатывания электромагнитного расцепителя будет равняться 36-60 А.

Кроме электромагнитных расцепителей применяются полупроводниковые, они нашли свое применение, к примеру в выключателях типа ВА 55-43, в данных выключателях есть возможность регулирования уставки номинального значения тока, выставление значения тока по перегрузу и токовой отсечки. Такие выключатели применяются в качестве вводных и секционных выключателей.[2]

### Защита от замыканий на землю

Защиту от однофазных замыканий на землю можно реализовать с помощью трансформатора нулевой последовательности, во вторичную обмотку которого включается реле тока, в качестве реле может использоваться РТ-40/0.2 рассчитанное на малые токи срабатывания (рис. 2).

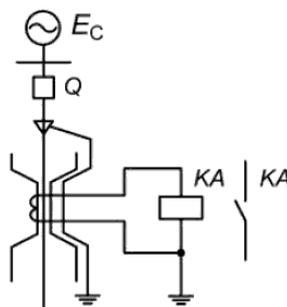


Рис. 2. Схема контроля тока нулевой последовательности [3]

Ток срабатывания защиты выбирается в зависимости от емкостного тока замыкания на землю контролируемого присоединения. Другими словами, ток срабатывания защиты должен быть больше собственного емкостного тока присоединения во всех нормальных режимах работы контролируемого присоединения и при повреждениях на смежных присоединениях.

Защита может действовать как на отключение так и на сигнал, все зависит от режима работы и типа сети, а также от того какой является нагрузка.

## Выводы

Релейная токовая защита является основным видом защит в электроэнергетике, благодаря возможности простейшей реализации на основе токовых реле или микропроцессорных устройств. В данной работе были рассмотрены одни из основных защит (МТЗ, токовая отсечка и защита от замыканий на землю). Данные защиты применяются повсеместно, поэтому тема данной статьи является актуальной.

## Библиографический список

1. Электромагнитный расцепитель [Электронный ресурс],
2. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Автоматический выключатель](https://ru.wikipedia.org/wiki/Автоматический_выключатель) (дата обращения: 10.02.2018)
3. Андреев В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. «Высшая школа» 2007
4. Контроля тока нулевой последовательности [Электронный ресурс], URL: <http://energy-ua.com/releynaya-zashch/zashchita-ot-odn.html>

УДК 004.932; ГРНТИ 89.57.35

## РЕКОНСТРУКЦИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 1 ЭТАЖА ПРЕДПРИЯТИЯ АО «НПК «АЛЬФА-М»

А.В. Буданцов, Е.В. Сливкин

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, Sgerrard0000008@gmail.com*

*Аннотация.* В данной статье дан обзор системы электроснабжения предприятия «Альфа-М» и выявлены проблемы, решение которых реализуется путем реконструкции.

*Ключевые слова.* АО «НПК «АЛЬФА-М», система электроснабжения, износ, реконструкция

## ELECTROSUPPLY SYSTEM RECONSTRUCTION OF THE GROUND FLOOR OF STOCK COMPANY "NPK "ALPHA-M»

A.V. Budantsov, E.V. Slivkin

*Ryazan state radio engineering University,  
Russia, Ryazan, Sgerrard0000008@gmail.com*

*Annotation.* This article provides an overview of the electricity system of the enterprise "Alfa-M" and identified problems, the solution of which is implemented by means of reconstruction.

*Keywords.* JSC "NPK "ALPHA-M", power supply system, wear and tear, reconstruction

## Введение

АО «НПК «Альфа-М» производитель сложной радиоэлектронной техники. Мощная производственно-техническая база, постоянная модернизация производства, внедрение новейших технологий и оборудования, высокий уровень квалификации персонала позволяют предприятию выпускать инновационную технику военной приемки.

Для повышения эффективности производства такого вида продукции необходимо решить ряд проблем связанных с бесперебойным и стабильным, безопасным потреблением электроэнергии. Причина таких проблем заключается в том, что данное предприятие располагается в административном здании, которое было построено в 1969 году, а куплено в 2013 году. За такой долгий система электроснабжения имеет значительный износ, который необходим в реконструкции.

Основные проблемы, которые будут решаться при реконструкции системы [1]:

- 1) Выбор защитного оборудования.
- 2) Замена электропроводки

### Выбор защитного оборудования

На предприятии АО «НПК «Альфа-М», для того чтобы обезопасить электрооборудование от перебоев и короткого замыкания необходимо применение автоматических выключателей, так как они являются современным защитным устройством, применение которых рассчитано на быстрое повторное включение.

Для того, чтобы выбрать выключатель, необходимо, чтобы он соответствовал двум главным условиям по току [2]:

$$\begin{cases} I_{ном.а} \geq I_p \\ I_{н.р.} \geq I_p \end{cases}, \quad (1)$$

где  $I_{ном.а}$  – номинальный ток автоматических выключателей, А;

$I_{н.р.}$  – номинальный ток расцепителя, А;

$I_p$  – расчетный ток защищаемой цепи, А.

Рассчитаем номинал тока, которые необходимы для выбора выключателя сушильного шкафа:  $I_{ном}$ (номинальный ток) и  $I_{пик}$ (пиковый ток цепи):

$$I_{ном} = \frac{P_{ном}}{\sqrt{3} * U_{ном} * \eta * \cos(\varphi)}, \quad (2)$$

где  $P_{ном}$  – номинальная мощность, Вт;

$\cos(\varphi)$  – номинальный коэффициент приемника мощности;

$\eta$  – номинальный КПД электроприемника;

$U_{ном}$  – номинальное напряжение, В.

Рассчитаем данное значение тока для сушильного шкафа питание которого осуществляется от сети 380 В.

$$I_{ном} = \frac{10,54}{\sqrt{3} * 0,38 * 0,85 * 0,889} = 21,5 \text{ А.}$$

По данному значению тока определяется автоматический выключатель: модель ВА51-25. Характеристики данного выключателя указаны в таблице 1.

Таблица 1. Основные характеристика автоматического выключателя ВА51-25

$U_{ном}, В$	$I_{ном}, А$	Номинальная наибольшая отключающая способность при 380В, кА	Масса.,кг.,не более	Мощность.,потребляемая одним полюсом выключателя.,Вт.,не более	Габаритные размеры, мм
До 380	25	До 3,8	0,38	4	52,5x100x70

Далее найдем коэффициент кратности токовой отсечки, который находится по формуле (4), но для начала находим  $I_{пик}$ (ток кратковременной перегрузки) по формуле (3).

$$I_{пик} = I_{ном} * K_{п} \quad (3)$$

где  $I_{ном}$  - номинальный ток двигателя, А;

$K_{п}$  -кратность пускового тока.

$$Kn = 1.25 \frac{I_{пик}}{I_{ном}} ; \quad (4)$$

и рассчитаем ток срабатывания расцепителя по формуле (5).

$$I_p = 1,25 \cdot I_{пик} , \quad (5)$$

$I_p = 21,5 \cdot 7,5 = 161,25$  А;  $Kп=9,375$ ; зная кратности пускового тока найдем ток срабатывания расцепителя (округлим значение  $Kп$  до 10):

$$I_p = 25 \cdot 10 = 250 \text{ А} .$$

Условие выбора выключателя при невозможности срабатывания при пуске находится по выражению (6) [2]:

$$I_{ср.п} \geq 1,25 \cdot I_{пик} . \quad (6)$$

Проверим наше условие выбора (6) выключателя при невозможности срабатывания при пуске по:

$$I_{ср.п} \geq 1,25 \cdot 161,25 = 201,6 \text{ А}$$

$250,0 > 201,6$  А. Условие выполняется.

Данная серия автоматического выключателя ВА51-25 (рис. 1) была выбрана с тем условием, чтобы заменить более старые выключатели ВА5139, так как они имеют меньшие размеры, более надежные элементы и совершенные конструктивные узлы.



Рис. 1. Автоматический выключатель ВА51-25

Для оставшихся электроприемников выбор автоматических выключателей выполнен по тому же самому способу, и занесены в таблицу 2.

Таблица 2. Автоматические выключатели каждого электроприемника

Наименование				Автомат
	Рном, кВт	Іном, А	Іпик, А	ВА51-25
Термобарокамера	3,2	6,24	46,8	ВА51-25
Фрезеровочный станок	2,2	5,03	37,7	ВА51-25
Вибростенд	3,3	6,14	46,0	ВА51-25
Паяльная станция	2,0	4,89	36,7	ВА51-25
Кондиционер	3,0	5,92	44,4	ВА51-25
Серверный шкаф	2,2	5,03	37,7	ВА51-25
3-D принтер	3,2	6,15	46,1	ВА51-25
Станок с ЧПУ	3,2	6,20	46,5	ВА51-25

### Замена электропроводки

Проводка в зданиях, которые были построены более 30 лет назад, как правило выполнена из алюминиевых проводов, сечением  $2,5 \text{ мм}^2$ , что не позволяет использовать мощное оборудование для разработки радиоэлектронной техники. В процессе долгой эксплуатации произошел значительный износ этой электропроводки и как следствие уменьшилось сопротивление изоляции, которая создает риск утечки тока, пробоя или короткого замыкания. Минимальное сечение жил проводов и кабелей принимаем с учетом их механической прочности, но не менее указанной в документации на электротехнические изделия, к которым должны быть присоединены проводники [3].

Прокладывать проводники, на данном предприятии, необходимо как в скрытой, так и в открытой проводке.

В закрытой проводке:

- за подвесными натяжными потолками
- по стенам ( под штукатуркой, в кабельных каналах)

В открытой проводке:

- в пластиковых коробах
- в технических плинтусах

Для выбора сечения нужных нам ответвлений по условию нагрева, необходимо, чтобы они удовлетворяли 2-ум условиям:

$$I_{\text{доп}} \geq \frac{I_p}{K_{\text{пр}}}, \quad (7)$$

$$I_{\text{доп}} \geq I_3 \frac{K_3}{K_{\text{пр}}}, \quad (8)$$

где  $K_3$  – кратность  $I_{\text{доп}}$  по отношению к  $I_3$  (защитного аппарата),  $I_{\text{доп}}$  – длительно допустимый ток,  $I_p$  – расчетный ток линии,  $K_{\text{пр}}$  - поправочный коэффициент на фактические условия прокладки.

Рассчитаем сечение провода которое необходимо подвести к сушильному шкафу

$$I_{\text{доп}} = \frac{38,5}{1} = 38,5 \text{ А}; \quad I_{\text{доп}} = \frac{39 \cdot 1,25}{1} = 48,75 \text{ А}$$

Выбираем кабель марки АВВГ 5х10 с  $I_{\text{доп}}=60 \text{ А}$ . Для оставшихся электроприемников выбор сечения проводов осуществлен по тому же методу, и занесен в таблицу 3.

Таблица 3. Выбор сечения электропроводки

Наименование	$K_{\text{пр}}$	$I_{\text{ном}}, \text{ А}$	$I_3,$	Марка и сечение
Термобарокамера	1	6,24	7,2	АВВГ 5х2,5
Фрезеровочный станок	1	5,03	6,3	АВВГ 5х2,5
Вибростенд	1	6,14	7,6	АВВГ 5х2,5
Паяльная станция	1	4,89	6,1	АВВГ 5х2,5
Кондиционер	1	5,92	6,8	АВВГ 5х2,5
Серверный шкаф	1	5,03	6,3	АВВГ 5х2,5
3-D принтер	1	6,15	7,6	АВВГ 5х2,5
Станок с ЧПУ	1	6,20	7,7	АВВГ 5х2,5

## Вывод

В данной статье был рассмотрен случай реконструкции предприятия АО «НПК «Альфа-М», которая необходима для надежной работы электрической сети. Проводя данную реконструкцию, была проанализирована документация, выданная на данном предприятии. Все электрические устанавливаемые аппараты проверены по условиям термической и электродинамической стойкости. При этом электрические аппараты в системе электроснабжения надежно работают как в нормальном длительном режиме, так и в условиях аварийного кратковременного режима, простоты и компактны в конструкции, удобны и безопасны в эксплуатации.

## Библиографический список

1. Барыбина Ю.Г., Федоров Х.Е. Справочник по проектированию электроснабжения. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
2. Электроснабжение промышленных предприятий / Н.П. Постников, Рубашов Г.М. – Ленинград: Стройиздат, 1989. – 352 с.
3. Правила устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 640

УДК 621.3, ГРНТИ 44.37

## СОЛНЕЧНЫЙ КОЛЛЕКТОР НА ОСНОВЕ АРТЕРИАЛЬНОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ

**С.М. Асотов, В.В. Климаков**

*Рязанский государственный радиотехнический университет  
Российская Федерация, Рязань, asotov.stas@mail.ru*

*Аннотация.* В данной работе предложена конструкция вакуумного солнечного коллектора на основе артериальной тепловой трубы. Осуществлен выбор геометрических параметров тепловой трубы и анализ применения артериальной капиллярной структуры.

*Ключевые слова.* Солнечная энергия, солнечный коллектор, артерии, капиллярная структура

## SOLAR COLLECTOR BASED ON ARTERIAL HEAT PIPE

**S.M. Asotov, V.V. Klimakov**

*Ryazan state radioengineering university,  
Russian Federation, Ryazan, asotov.stas@mail.ru*

*Abstract.* This paper proposed the construction of a vacuum solar collector based on arterial heat pipes. The choice of the geometrical parameters of the heat pipe and the analysis of the use of the arterial capillary structure was implemented.

*Keywords.* Solar energy, solar collector, arteries, capillary structure

## Введение

Современный подход к эффективному использованию солнечного излучения для обогрева помещений и горячего водоснабжения заключается в применении различного вида коллекторов, в которых происходит преобразование поглощенной энергии в тепловую с последующим нагревом теплоносителя.

Существует большое разнообразие их вариантов конструкций. Широкое распространение получили плоские и вакуумные коллекторы. Плоские солнечные коллекторы производят и применяют главным образом в европейских странах, а вакуумные трубчатые коллекторы в Китае и остальной Азии. В России применяются плоские (Краснодарский край, Бурятия) и вакуумные трубчатые коллекторы (Дальний Восток). [1]

Плоские солнечные коллекторы [2] разработаны для использования в солнечных и теплых климатических условиях. Их преимущества, значительно снижается, когда дни стано-

вятся неблагоприятными: холодными, пасмурными и ветреными. Кроме того, погодные воздействия, такие как конденсация и влага вызывают раннее ухудшение внутренних свойств материалов, приводя к снижению производительности, росту сбоев и снижению общего ресурса эксплуатации. [3]

Вакуумные солнечные коллекторы [2] работают иначе. Их конструкция представляет собой простое устройство, состоящее из прозрачной вакуумной колбы, с нанесенным адсорбирующим и отражающим слоем на ее внутренней стенке. Они могут собирать как прямое, так и рассеянное излучение и обеспечивают более высокую температуру нагрева. Для обеспечения связи с баком напорной сети, контура водоснабжения, в конструкцию вводят тепловую трубу термосифонного типа. Поскольку температура испарения и конденсации теплоносителя тепловой трубы не выше температуры фазового перехода, то обеспечивается защита от замерзания и перегрева. Это ограничение по контролю температуры является уникальной особенностью такой конструкции вакуумного коллектора.

Однако у всех конструкций солнечных коллекторов есть общий недостаток – это ограничение на угол их установки (типичный угол установки  $20^\circ$ ) [4]. На величину значений угла установки с одной стороны влияет угол падения солнечных лучей, а с другой сама конструкция коллектора. Поэтому солнечные коллекторы могут устанавливаться не на все формы крыш, что существенно сужает область их применения.

Анализ различных видов солнечных коллекторов, позволил предложить конструкцию, главным элементом которой будет являться артериальная тепловая труба. Такое решение является дальнейшим развитием вакуумных солнечных коллекторов, которое расширит диапазон угла их установки и позволит эффективней и быстрее передавать тепловую мощность.

### Конструкция солнечного коллектора с артериальной тепловой трубой

Предлагаемая конструкция солнечного коллектора с тепловой трубой на основе артериальной капиллярной структуры приведена на рисунке 1.

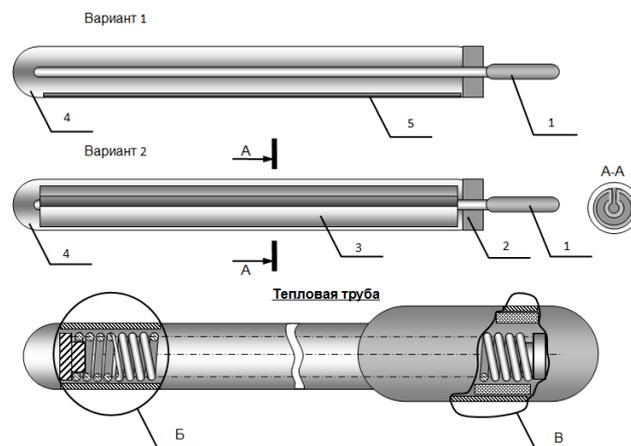


Рис. 1. Конструкция вакуумного солнечного коллектора с артериальной тепловой трубой:  
1 – тепловая труба, 2 – заглушка, 3 – пластина поглотителя,  
4 – стеклянная колба, 5 – адсорбционный слой

Максимальная мощность, передаваемая тепловой трубой с артериальной капиллярной структурой может быть рассчитана по соотношению [5]:

$$Q(d) = \frac{(4 \cdot \sigma(T) \cdot d^3 \cdot \cos(\theta) + \rho(T) \cdot g \cdot l \cdot d^4 \cdot \sin(\phi)) \cdot (\pi \cdot \rho(T) \cdot L(T) \cdot N)}{128 \cdot \mu(T) \cdot l}, \quad (1)$$

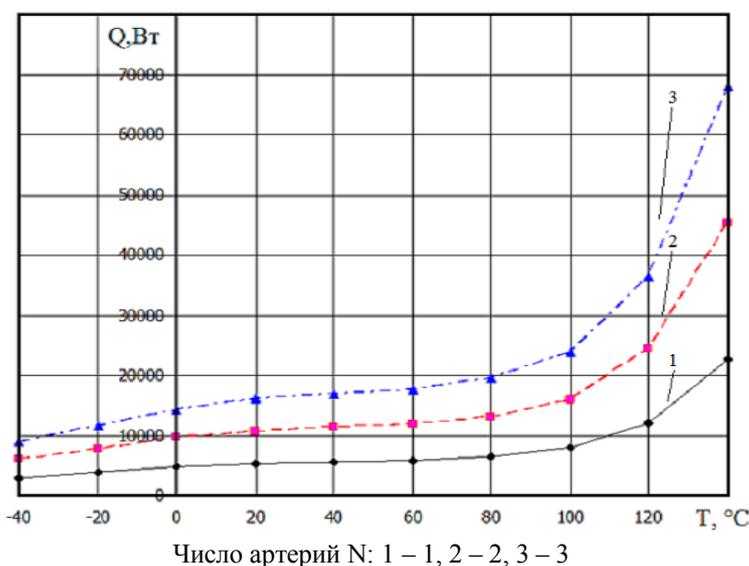
где  $\mu(T)$ ,  $\rho(T)$ ,  $L(T)$ ,  $\sigma(T)$  – теплофизические параметры легкокипящей жидкости;

$d$  – диаметр артерий;  
 $l$  – длина тепловой трубы;  
 $N$  – количество артерий.

Теоретическая зависимость, отражающая свойства спиральной артериальной капиллярной структуры тепловой трубы [6], рассчитанная по соотношению (1) для теплоносителя ацетон, приведена на рисунке 2. Характер полученного графика отражает монотонность зависимости мощности в рабочем диапазоне температур  $-40$  до  $+140$  °С.

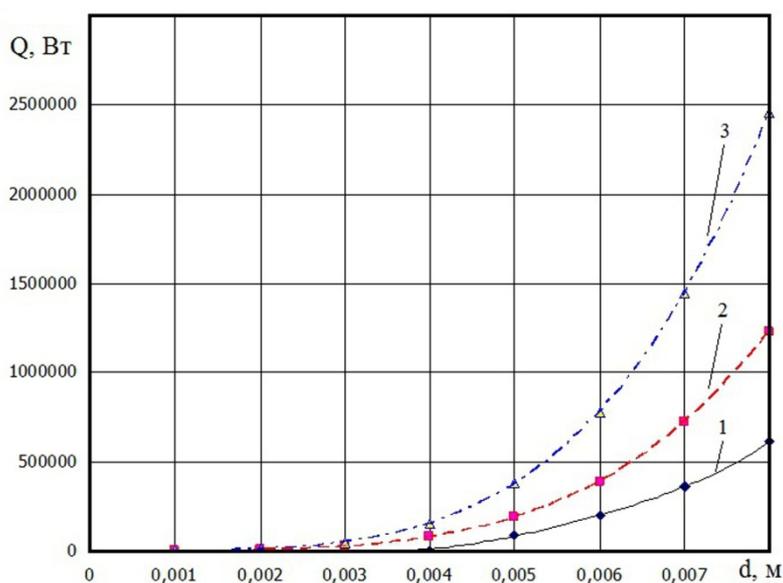
Обоснован выбор геометрических параметров тепловой трубы на основе соответствующих инженерных расчетов. Проведен анализ применения артерий и гомогенных капиллярных структур.

Графики, отражающие зависимость передаваемой мощности от угла наклона тепловой трубы, от температуры теплоносителя, от количества артерий, от диаметра артерий. приведены на рисунках 2-4.



Число артерий  $N$ : 1 – 1, 2 – 2, 3 – 3

Рис.2. Зависимость передаваемой мощности  $Q$  от температуры  $T$  при разном количестве артерий и с фиксированным значением диаметра артерий  $d=2.5 \cdot 10^{-3}$  м (теплоноситель - ацетон)



Число артерий  $N$ : 1 – 1, 2 – 2, 3 – 4

Рис. 3. Зависимость передаваемой мощности  $Q$  от диаметра артерии  $d$  при разном количестве артерий (теплоноситель – ацетон)

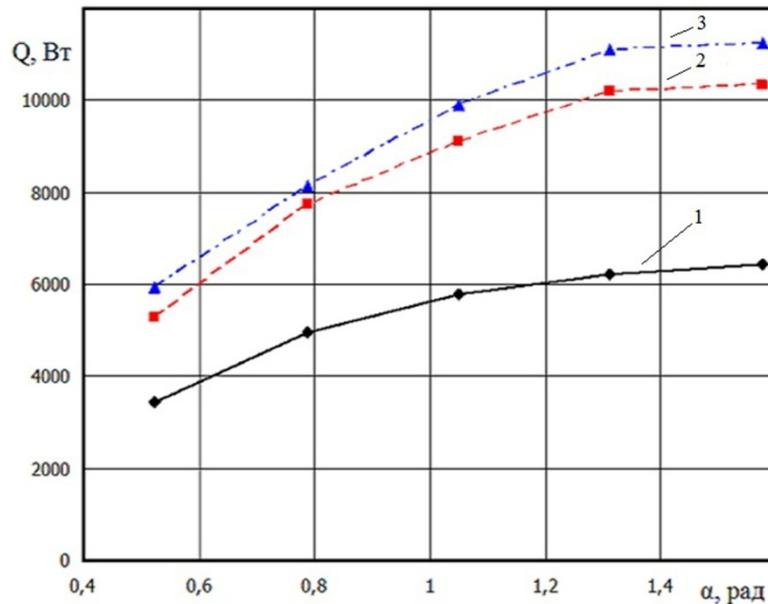


Рис. 4. Зависимость передаваемой мощности от угла установки теплового коллектора  $\alpha$  при различных значениях температуры  $T$ , °С: 1 – -30 , 2 – 30 , 3 – 60 (теплоноситель – ацетон)

## Выводы

На основании полученных данных предложена конструкция теплового коллектора и способ размещения капиллярной структуры в корпусе тепловой трубы. Комплекс проведенных исследований позволяет сделать следующие выводы:

1. Установлена зависимость мощности, падающей на поверхность теплообмена от угла установки коллектора, зависящая от дневного часа и даты.
2. В случае применения в качестве капиллярной структуры сетки для тепловой трубы длиной 0.75 м оптимальным диаметром проволоки и ячейки сетки является  $7.5 \cdot 10^{-4}$  м.
3. Капиллярная структура на основе артерии расширит возможность установки коллектора (угол  $\alpha$ ) и позволит эффективней и быстрее передавать тепловую мощность в основной контур системы водоснабжения.

## Библиографический список

1. Бутузов В.А., Брянцева Е.В., Бутузов В.В., Гнатюк И.С. Солнечные коллекторы. – Академия энергетики. – 2010. – №3(35). – С.50-56.
2. S.A.Kalogirou. Solar thermal collectors and applications. – Progress in Energy and Combustion Science. – 2004. – pp. 231-295.
3. Алмаев А.Ю., Лушкин И.А. Преимущества и недостатки плоских и вакуумных коллекторов солнечной энергии. – Вестник НГИЭИ. – 2015. – №6(49). – С.16-20.
4. Преимущества и недостатки плоских и вакуумных коллекторов [Электронный ресурс], URL: [http://solar-collector.ru/solnechnye\\_kollektor/sravnenie](http://solar-collector.ru/solnechnye_kollektor/sravnenie) (дата обращения 15.02.18).
5. D.A.Reay, P.A.Keaw, R.J.McGlen. Heat Pipes: Theory, Design and applications. 6<sup>th</sup> Edition. – Butterworth-Heinemann. – 2013. – 265 p. – ISBN:978-0-08-098266-3.
6. V.V. Klimakov, A.I. Ulitenko, M.V. Chirkin, A.V. Molchanov. Serpentine loop heat pipe meant for heat rejection from moving objects // Proceedings of Second International Conference “Heat Pipes for Space Application” (2HPSA), Moscow, September 15-19, 2014, R1.7, pp.1-6.
7. Патент на полезную модель №137356, Российская Федерация, МПК F28D 15/02. Гибкая контурная тепловая труба / Климаков В.В., Молчанов А.В., Улитенко А.И., Чиркин М.В.; патентообладатель ФГБОУ ВО «РГРТУ» (RU). – заявка №2013134710; заявлено 23.07.2013; опубликовано 10.02.2014, Бюл.№4.

УДК 621.311.42; ГРНТИ 44.29.33

## **РЕКОНСТРУКЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ ТП-805 И ТП-812 ПРЕДПРИЯТИЯ ЗАО "РЯЗАНСКИЙ КИРПИЧНЫЙ ЗАВОД"**

**Д.С. Кобельков, Е.В. Сливкин**

*Рязанский государственный радиотехнический университет*

*Россия, Рязань, dmitriy-kobelkov@mail.ru, e.slivkin@mail.ru*

*Аннотация.* В данной статье представлены обоснование и общий план реконструкции трансформаторных подстанций ТП-805 и ТП-812 предприятия ЗАО "Рязанский кирпичный завод". Произведен расчет и выбор силовых трансформаторов и конденсаторных установок.

*Ключевые слова.* Реконструкция, трансформаторная подстанция, качество и надежность электроснабжения.

## **RECONSTRUCTION OF TRANSFORMER SUBSTATIONS TP-805 AND TP-812 OF THE ENTERPRISE OF JSC "RYAZAN BRICK FACTORY"**

**D.S. Kobelkov, E.V. Slivkin**

*Ryazan State Radio Engineering University*

*Russia, Ryazan, dmitriy-kobelkov@mail.ru, e.slivkin@mail.ru*

*Annotation.* This article presents the justification and general plan for the reconstruction of transformer substations TP-805 and TP-812 of the enterprise of the Ryazan brick factory. The calculation and selection of power transformers and capacitor installations are presented.

*Keywords.* Reconstruction, transformer substation, quality and reliability of power supply.

### **Введение**

Электроснабжение - это процесс производства, преобразования и распределения электрической энергии среди потребителей. Электроэнергия внедрилась во все сферы жизнедеятельности человека, начиная от удовлетворения его естественных потребностей до освоения космоса. Поддержание высокого уровня надежности и качества электроснабжения всегда являлись центральными задачами электроэнергетики [1].

Надежность - это способность оборудования сохранять работоспособное состояние, в течение заданного периода времени, обеспечивая, при этом, все необходимые эксплуатационные характеристики. Качество электрической энергии - это совокупность ее характеристик, определяющих воздействие электроэнергии на электрооборудование, подключенное к электрической сети.

Любое промышленное предприятие стремится повысить качество своей продукции и понизить ее себестоимость. Немаловажное значение в этом вопросе занимает обеспечение предприятия качественной и бесперебойной электроэнергией, ведь необходимая кондиция продукции зависит, как от применения высокотехнологичного оборудования, требующего стабильного уровня напряжения в сети, так и от исключения простоев в процессе производства.

### **Обоснование реконструкции трансформаторных подстанций ТП-805 и ТП-812**

Параметры режима работы электрической сети в суровых реалиях имеют большой диапазон изменений, возникающих из-за неоднородности нагрузки, плановых и аварийных включений и отключений отдельных групп электроприемников. Для обеспечения предприятия ЗАО «Рязанский кирпичный завод» качественной и бесперебойной электроэнергией, требуется произвести реконструкцию трансформаторных подстанций, а именно, заменить существующее оборудование на более современное и надежное.

Трансформаторные подстанции ТП-805 и ТП-812 расположены в закрытых, отдельно стоящих зданиях, предназначены для приема электроэнергии на стороне высокого напряжения 6 кВ трансформации и распределения электроэнергии со стороны низкого напряжения 0,4 кВ ТП-805 (рисунок 1) и ТП-812 (рисунок 2) ко всем электроприемникам предприятия.

Характер нагрузки ЗАО «Рязанский кирпичный завод» неоднороден. На территории организации находятся несколько зданий административного и производственного значения, в связи с этим нагрузка носит как производственный, так и коммунально-бытовой характер. При этом, каждая подстанция имеет по два взаиморезервируемых трансформатора, мощностью 630кВА каждый, что объясняется требованиями к надежности электроснабжения предприятия. В ячейках распределительных устройств низкого напряжения (РУ-0,4кВ) находятся разъединители на номинальный ток 100, 250А, автоматические выключатели номиналом 400, 630А, предохранители номиналом 100, 250А.

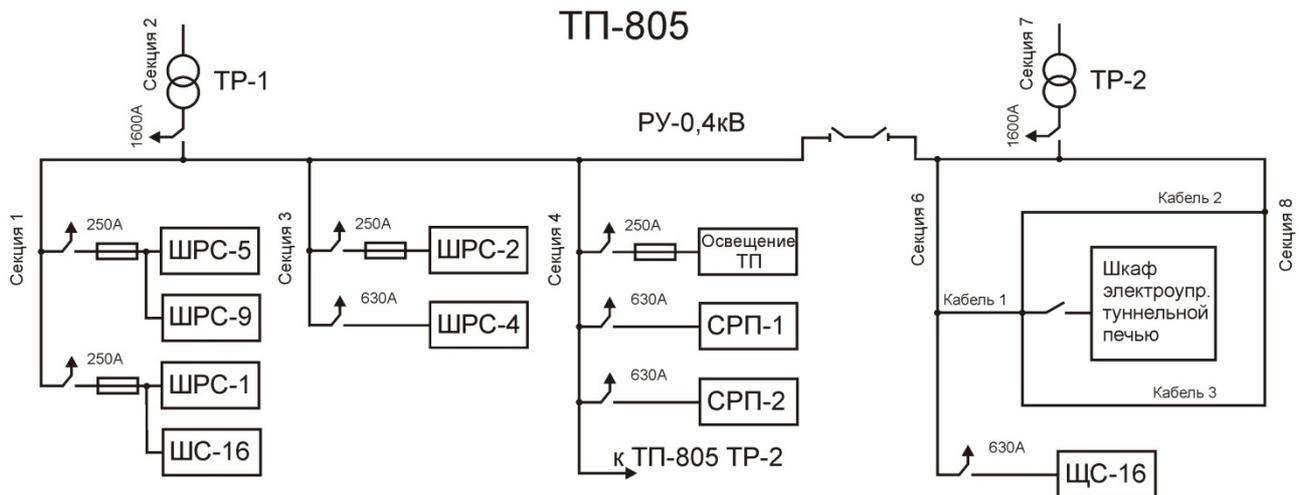


Рис. 1. Схема электроснабжения предприятия ЗАО «РКЗ» на стороне низкого напряжения 0,4 кВ ТП-805

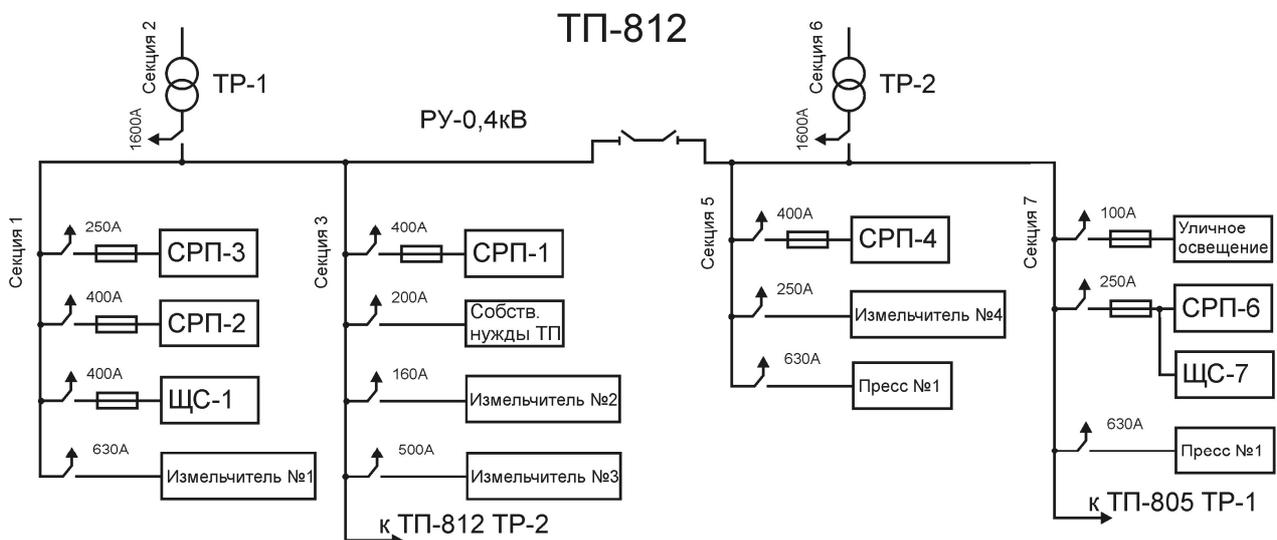


Рис. 2. Схема электроснабжения предприятия ЗАО «РКЗ» на стороне низкого напряжения 0,4 кВ ТП-805.

Пояснения к рисункам 1 и 2:

ТР – трансформатор;

РУ - распределительное устройство;

СРП - силовой распределительный пункт;

ШРС - шкаф силовой распределительный;

ШС - шкаф силовой;

ЩС - щит силовой.

### План реконструкции трансформаторных подстанций ТП-805 и ТП-812

Реконструкция - процесс обновления устаревшего, изношенного оборудования, с преимущественным изменением основных технико-экономических показателей, для обеспечения требуемого уровня условий эксплуатации.

В связи с планируемым повышением степени автоматизации на производстве, резко возрастет потребляемая мощность предприятия, следовательно, первым шагом, необходимо произвести замену трансформаторов на более мощные.

Наибольшая полная расчетная мощность нагрузки ( $S_{н.нагр.}$ ) высчитывается по формуле:

$$S_{р.нагр.} = \sqrt{P_{р.нагр.}^2 + Q_{р.нагр.}^2}, \quad (1)$$

где  $P_{р.нагр.}$  - наибольшая расчетная активная мощность нагрузки;

$Q_{р.нагр.}$  - наибольшая расчетная реактивная мощность нагрузки.

Результаты вычислений сводим в таблицу 1 для каждого трансформатора.

Таблица 1. Полная расчетная мощность нагрузки на шинах низкого напряжения ТП-805 и ТП-812

Подстанция	Трансформатор	Наибольшая активная расчетная мощность нагрузки на шинах 0,4 кВ, кВА	Наибольшая реактивная расчетная мощность нагрузки на шинах 0,4 кВ, кВА	Наибольшая полная расчетная мощность нагрузки на шинах 0,4 кВ, кВА
ТП-805	1	356	332	486
	2	402	387	558
ТП-812	3	380	368	528
	4	446	425	616

Номинальную мощность каждого трансформатора на подстанции ( $S_{н.т.}$ ) рассчитывается по формуле (2), затем из стандартных мощностей трансформаторов выбирается ближайшее большее значение, причем учитывая двойной запас мощности на случай аварийных ситуациях. При отключении одного трансформатора, другой должен обеспечить резерв питания нагрузки отключенного.

$$S_{н.т.} = \frac{S_{р.нагр.}}{N \cdot K_3}, \quad (2)$$

где  $S_{р.нагр.}$  - наибольшая расчетная активная мощность нагрузки;

$N$  - число трансформаторов;

$K_3$  - коэффициент загрузки трансформатора рекомендуется принимать равным 0,65...0,7, при преобладании нагрузок первой и второй категории по надежности электропитания на двух трансформаторной подстанции [2].

Для ТП-805:

$$S_{н.т.} = \frac{558}{2 \cdot 0,65} = 429 \text{ кВА};$$

Для ТП-812:

$$S_{н.т.} = \frac{616}{2 \cdot 0,65} = 474 \text{ кВА}.$$

Учитывая двойной запас мощности, для установки на подстанциях следует выбрать масляный трансформатор ТМ-1000/6/0,4. Выбор такого трансформатора обусловлен рациональностью соотношения технико-экономических характеристик.

Автоматизация производства, на рассматриваемом предприятии "Рязанский кирпичный завод", достигается за счет использования большого количества преобразователей частоты и асинхронных двигателей. Такое оборудование вносит негативный оттенок в качество электроэнергии сети, а именно увеличивает реактивную мощность. По статистическим данным, известно, что асинхронные двигатели в среднем повышают долю реактивной составляющей на 40%, а преобразователи на 10%. Рассмотренная реактивная мощность имеет индуктивный характер, поэтому для ее компенсации применяют конденсаторные установки. Кроме того, при низком значении коэффициента мощности, находящимся в зависимости от реактивной мощности (формула 3), трехфазные счетчики электроэнергии выдают погрешность в показаниях до 15% [3]. Обобщая вышесказанное, подчеркнем, что на реконструируемых трансформаторных подстанциях необходимо установить конденсаторные установки, которые уменьшат потери электроэнергии, а следовательно, и расходы предприятия на ее закупку.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P}, \quad (3)$$

где  $P$  - активная мощность;

$Q$  - реактивная мощность;

$\operatorname{tg} \varphi$  - коэффициент мощности.

Коэффициент мощности нагрузки до компенсации ( $\operatorname{tg} \varphi_1$ ):

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{Q_{p.нагр.}}{P_{p.нагр.}} \quad (4)$$

Для ТП-805 ТР-1:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{332}{356} = 0,93$$

что соответствует коэффициенту мощности  $\cos \varphi_1 = 0,73$

Аналогичным образом рассчитываются коэффициенты мощности для остальных трансформаторов, результаты записываются в таблицу 2.

Таблица 2. Расчет реактивной мощности конденсаторных установок

Подстанция	Трансформатор	$\operatorname{tg} \varphi_1$	$\cos \varphi_1$	$Q_c$ , кВАр	Конденсаторная установка
ТП-805	1	0,93	0,73	214	УКМ58-0,4-210-30 К
	2	0,96	0,72	253	УКМ58-0,4-250-25 К
ТП-812	3	0,97	0,71	243	УКМ58-0,4-250-25 К
	4	0,95	0,72	277	УКМ58-0,4-280-40 К

Для значительной компенсации реактивной мощности необходимо повысить коэффициент мощности  $\cos \varphi_2$  хотя бы до значения 0,95, что соответствует значению  $\operatorname{tg} \varphi_2 = 0,33$ .

Расчет реактивной мощности необходимой для конденсаторной установки осуществляется по формуле:

$$Q_c = P \cdot (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) \quad (5)$$

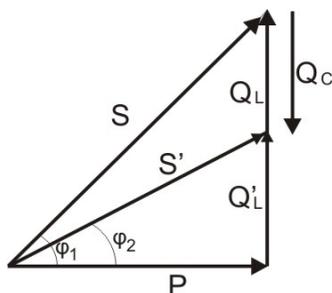


Рис. 3. Графическая зависимость активной, реактивной и полной мощности от коэффициента мощности

Пояснения к рисунку 3:

P - потребляемая активная мощность;

S и S' - полная мощность до и после компенсации;

Q<sub>C</sub> - требуемая емкостная мощность;

Q<sub>L</sub> и Q<sub>L</sub>' - индуктивная составляющая реактивной мощности до и после компенсации

[4].

Для ТП-805 ТР-1:

$$Q_c = 356 \cdot (0,93 - 0,33) = 214 \text{ кВАр}.$$

Аналогично рассчитываются результаты для остальных трансформаторов, которые сводятся в таблицу 2. Из каталога завода-изготовителя конденсаторных компенсирующих установок выбирается тип конденсаторной установки.

Произведем расчёт годового расхода электроэнергии предприятием до и после установки конденсаторных установок. С учетом работы завода в 2 смены время максимального использования нагрузки  $T_{\max} \approx 6000 \text{ час}$

Расход электроэнергии до установки конденсаторных установок:

$$\begin{aligned} \Sigma P_{p.нагр.} &= 1584 \text{ кВт} & \Sigma Q_{p.нагр.} &= 1512 \text{ кВАр} \\ W_{акт} &= \Sigma P_{p.нагр.} \cdot T_{\max} = 1584 \cdot 6000 = 9504000 \text{ кВтч} \\ W_{реакт} &= \Sigma Q_{p.нагр.} \cdot T_{\max} = 1512 \cdot 6000 = 9072000 \text{ кВАрч} \end{aligned}$$

где  $W_{акт}$ ,  $W_{реакт}$  - годовой расход активной и реактивной энергии соответственно.

Расход электроэнергии после установки конденсаторных установок:

$$\begin{aligned} \Sigma P_{p.нагр.} &= 1584 \text{ кВт} & \Sigma Q_{p.нагр.} &= 522 \text{ кВАр} \\ W_{акт} &= \Sigma P_{p.нагр.} \cdot T_{\max} = 1584 \cdot 6000 = 9504000 \text{ кВтч} \\ W_{реакт} &= \Sigma Q_{p.нагр.} \cdot T_{\max} = 522 \cdot 6000 = 3132000 \text{ кВАрч} \end{aligned}$$

Установка конденсаторных установок позволит сократить расходы предприятия на электроэнергию, а так же повысит общий коэффициент мощности, что разгрузит трансформаторы, питающие линии, подавит сетевые помехи и снизит несимметрию фаз.

Следующим шагом, необходимо произвести замену устаревших распределительных устройств на современные комплектные распределительные устройства (КРУ), которые позволяют сократить сроки реконструкции подстанций, а так же обеспечат должный уровень удобной и безопасной эксплуатации. КРУ должны быть оснащены современными устройствами коммутации, защиты, автоматики, сигнализации и измерения.

### Заключение

При реконструкции трансформаторных подстанций подбирают наиболее целесообразную совокупность оборудования, т.е. с лучшими технико-экономическими показателями. При реконструкции трансформаторных подстанций ТП-805 и ТП-812 были подобраны трансформаторы серии ТМ-1000/6/0,4 более высокой мощности, конденсаторные установки УКМ58-0,4-210-30 К, УКМ58-0,4-250-25 К, УКМ58-0,4-280-40 К, позволяющие повысить не только качество электроэнергии, но и сократить расходы на ее закупку. Актуальность данной проблемы заключается в повышении качества используемой электроэнергии и обеспечении надежности электроснабжения на данном предприятии, а соответственно и в повышении качества выпускаемой продукции.

### Библиографический список

1. Методические рекомендации по проектированию развития энергосистем. «Энергосетьпроект». -М. 2003.- 41с.
2. Пилипенко О.И. Выбор силовых трансформаторов: Методические указания к расчетно-графическому заданию. - Оренбург: ГОУ ОГУ, 2003.- 15 с.
3. Беляевский, Р. В. Анализ влияния коэффициента загрузки асинхронных двигателей на потребление реактивной мощности // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2010. - № 6. - С. 66 - 69.
4. Приказ Министерства промышленности и энергетики РФ от 22 февраля 2007 г. № 49 «О порядке расчёта значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон в договорах об оказании услуг по передаче электрической энергии (договорах энергоснабжения)».

УДК 621.314; ГРНТИ 45.37

## СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ МОСТОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Л.Г. Башта

*Рязанский государственный радиотехнический университет,*

*Рязанская область, Рязань, [bashta.elreg@gmail.com](mailto:bashta.elreg@gmail.com)*

*Аннотация.* В данной работе описан способ управления мостовым преобразователем при помощи аппаратно-программируемого модуля Arduino для получения синусоидального напряжения на выходе трансформатора. Представлена первая версия программы управления.

*Ключевые слова.* Мостовой преобразователь, аппаратно-программируемый модуль Arduino.

## METHOD FOR MANAGING A BRIDGE CONVERTER FOR PRODUCING SINUSOIDAL VOLTAGE

L.G. Bashta

*Ryazan State Radio Engineering University,*

*Ryazan Region, Ryazan, [bashta.elreg@gmail.com](mailto:bashta.elreg@gmail.com)*

*Annotation.* In this paper, we describe a method for controlling a bridge converter using a hardware-programmable Arduino module to obtain a sinusoidal voltage at the output of a transformer. The first version of the management program is presented.

*Keywords.* Bridge converter, hardware-programmable module Arduino.

### Введение

С современной силовой электронике часто используются мостовые преобразователи на IGBT транзисторах, которые обладают высокими частотными характеристиками. Благодаря этому вместо громоздких силовых трансформаторов используются малогабаритные высокочастотные трансформаторы. Для управления такой схемой можно использовать различные контроллеры, включая контроллеры аппаратно-программируемых средств Arduino. Но

обычное управление импульсами не позволяет генерировать различные формы напряжения. Для формирования таких форм напряжения нужно генерировать импульсы управления разной длительности.

### Принцип работы схемы

На рисунке 1 представлена схема мостового преобразователя с управляющим контроллером. Она состоит из: транзисторов VT1, VT2, VT3, VT4, диодов VD1, VD2, VD3, VD4, трансформатора Т и контроллера.

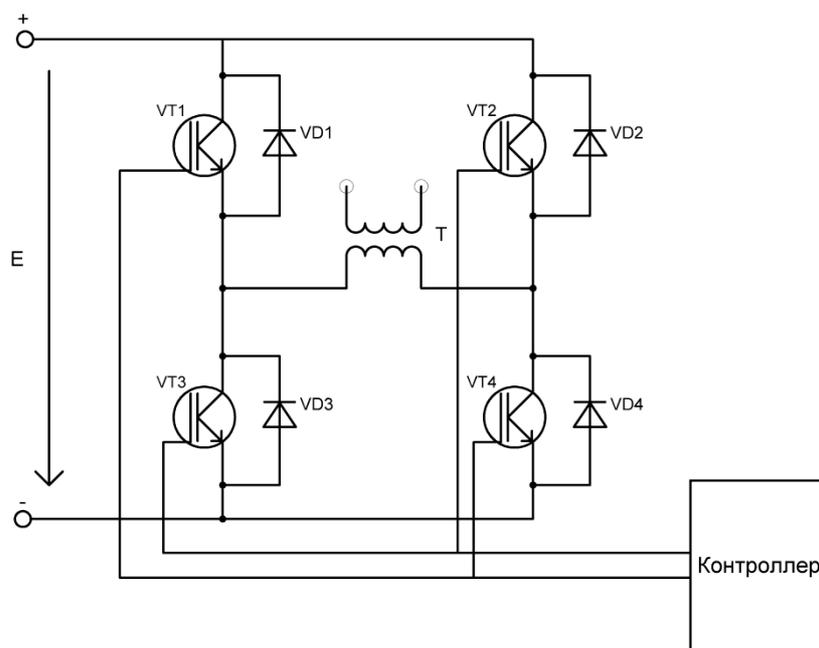


Рис. 1. Мостовой преобразователь и управляющий контроллер

Принцип работы данной схемы следующий: к преобразователю прикладывается постоянное напряжение  $E$ . В первый момент времени на управляющие электроды транзисторов VT1 и VT4 подаются управляющие импульсы с контроллера (рисунок 2), в течение импульса ток течет от «+» -VT1 -Т -VT2- «-». В течении протекания тока через трансформатор его сердечник намагничивается. В момент пауз между импульсами ток течет «-» -VD3 - Т – VB2 - «+», за счет размагничивания сердечника. Во второй момент времени контроллер подает управляющие импульсы на транзисторы VT2 и VT3 (обозначены красным цветом), ток течет от «+» -VT2 -Т -VT3- «-», тем самым меняется направление тока через трансформатор, а размагничивание сердечника происходит аналогично с первым моментом времени «-» -VD4 - Т - VD1 - «+».

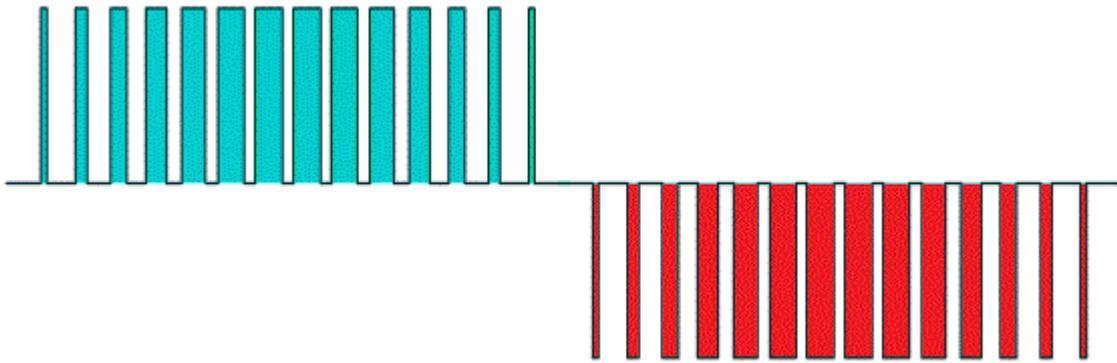


Рис. 2. Управляющие импульсы

Для наглядности смены направления тока управляющие сигналы с выходов контроллера обозначены в разной полярности. На выходе трансформатора должна получиться следующая форма напряжения:

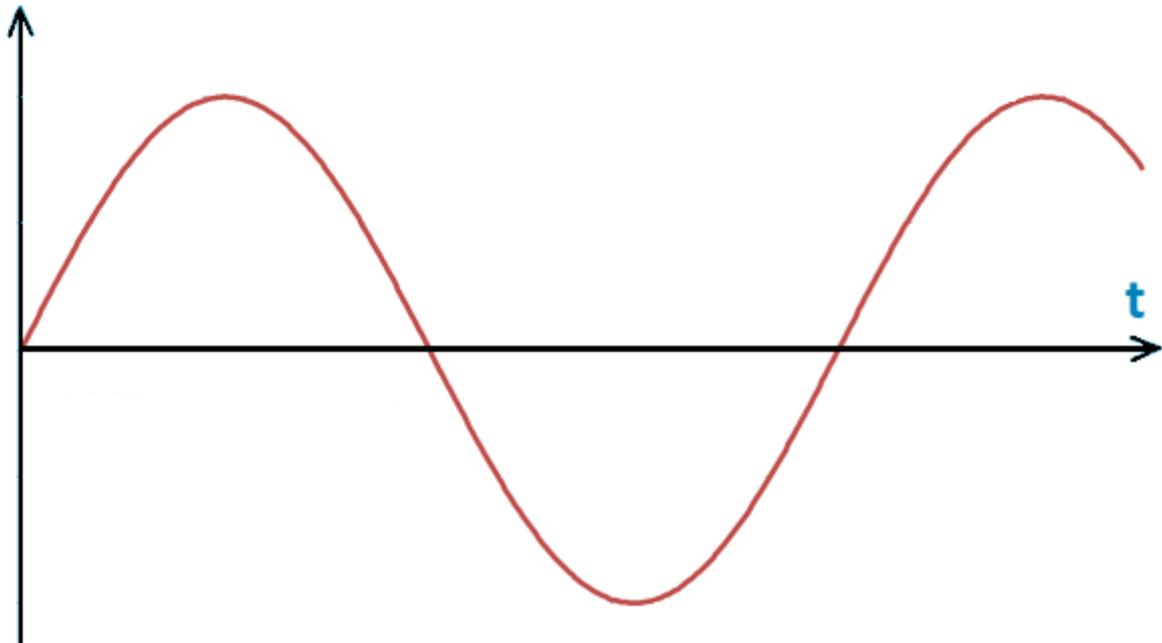


Рис. 3. Форма напряжения на выходе трансформатора

### Реализация метода на аппаратно-программируемом модуле Arduino

Для реализации этого метода необходимо написать программный код описывающий следующий закон:

$$x(n) = k \times \sin \frac{2\pi n}{N};$$

где:  $x(n)$  – время импульса;  
 $k$  – амплитуда (0 – 100%);  
 $n$  – номер точки в полу периоде;  
 $N$  – количество точек.

Первая версия программы выглядит следующим образом:

```
float x=0;
float y=0;
const float pi=3.14;
int z=0;
float v=0;
boolean OK=true;
void setup() {
  pinMode(5, OUTPUT);
  pinMode(6, OUTPUT);
}
void loop() {
  v=x*pi/180;      //перевод градусов в радианы
  y=sin(v);       //вычисление синуса
  z=y*500;        //пересчет действующего значения для analogWrite
  if(OK==true){
    x=x+0.689;    //увеличение угла
  }
  if(x>90){
    OK=false;
  }
  if(OK==false){
    x=x-0.689;    //уменьшение угла
  }
  if(z > 250) {
    analogWrite(5, z/2);    //вывод синуса на A0
  } else {
    analogWrite(6, z*2);    //вывод синуса на A1
  }
  delayMicroseconds(4);    //задержка между изменениями параметров ШИМ
}
```

При запуске аппаратно-программируемого модуля с загруженной программой на выходе была получена осциллограмма сигнала (рисунок 4).

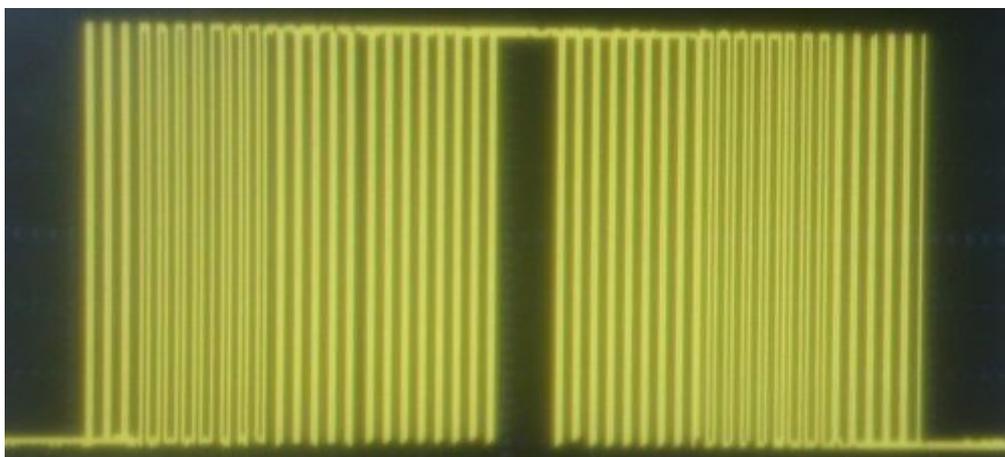


Рис.4. Осциллограмма импульсов на выходе контроллера

На основе этого примера предполагается дальнейшая доработка программного кода с добавлением коэффициента заполнения.

### Выводы

Благодаря аппаратно-программируемым средствам можно получать различные формы напряжений. Данный метод реализуем на изменении длительности управляющего импульса и свойствах трансформатора. Также различные формы напряжения можно получить и без мостового преобразователя, используя только контроллер, подключив к его выходам RC-фильтр, но тогда амплитуда напряжения будет выходным напряжением на выходах контроллера.

### Библиографический список

1. Б.Ю. Семенов. Силовая электроника: от простого к сложному. – 2-е изд., испр. – М.: СОЛОН-Пресс, 2015. – 416 с.: ил.
2. <http://electricalschool.info/electronica/1759-shirotno-impulsnaja-moduljacija.html>
3. <http://radioparty.ru/device-avr/443-power-supply-atmega8>
4. <http://catethysis.ru/stm32-tim-dma-pwm-sin>

УДК 621.314; ГРНТИ 44.29.29

## ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ И ТИПЫ СОВРЕМЕННЫХ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

М. Буцких

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, bunbonch5@mail.ru*

*Аннотация.* Проанализированы основные этапы развития современной ветровой энергетики. Рассмотрены общее устройство ВЭУ, турбина ветрогенератора и принцип ее действия. Приведена классификация типов современных ветрогенераторов, а так же рассмотрены их основные преимущества и недостатки.

*Ключевые слова.* Ветроэнергетика, ВЭУ, КИЭВ

## MAIN TRENDS OF DEVELOPMENT AND TYPES OF MODERN WIND TURBINE SYSTEMS

M. Butskikh

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Russian Federation, Ryazan, bunbonch5@mail.ru*

*Abstract.* The main stages of development of the modern wind power engineering are analysed. The common structure of WTS, turbine of the wind generator and the principle of its action are considered. Classification of types of the modern wind generators is given, and their main advantages and disadvantages are also considered.

*Keywords.* Wind power grid system, WTS, CUWE

### Введение

**Ветроэнергетикой** называют отрасль энергетики, основанную на трансформации кинетической энергии воздушных потоков в электрическую энергию путем преобразования в генераторе. Осуществление преобразования энергии, как правило, происходит различными конструкциями ветрогенераторов. По разным данным доля ветровой энергетики в общемировом производстве электроэнергии может достигать 3%. В некоторых странах Европы (Германия) ветрогенераторами добывается более 40% от всей вырабатываемой энергии в стране.

Основное условие работы ветрогенератора – это перемещение воздушных масс, движущихся со скоростью более 2 м/с, поэтому принято располагать данные установки в прибрежных зонах, возвышенностях, холмах, и т.д. Современные ветрогенераторы достигают высоты 150 м, а диаметр лопастей нескольких десятков метров. Выходная мощность при номинальных режимах работы (скорость ветра около 10 м/с) составляет до 10 МВт. Причем, стоимость электроэнергии, полученной при помощи традиционной энергетики практически равна себестоимости электроэнергии, полученной при работе ветрогенераторов в таком режиме (1,5-2 р./кВт\*ч) [1].

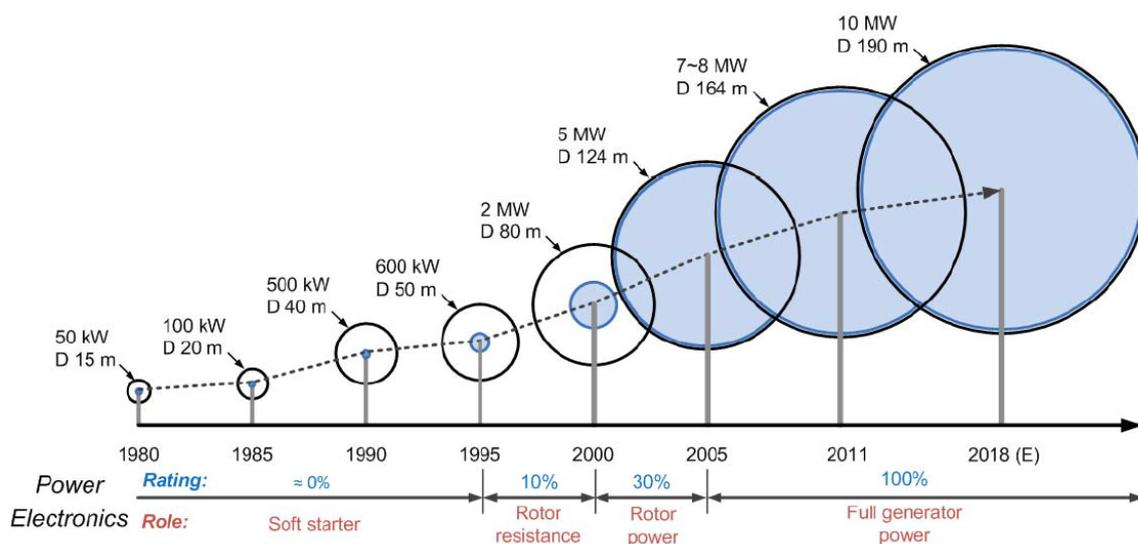


Рис. 1. Эволюция размера ветрогенератора и вырабатываемой мощности с 1980г. по 2018г. Синий цвет – основная рабочая площадь

Использовать ветровую энергию человечество начало издавна. Но наибольшее развитие ветроэнергетика получила в прошлом веке, когда был построен первый ветрогенератор. Именно в это время должным образом совершенствуются ветровые установки для производства электроэнергии. В дополнение к быстрому росту общей установленной мощности размер отдельного ветряного двигателя также существенно увеличивается, чтобы достигнуть снижения цены выработанного 1кВт энергии. В 2005г. средний размер ветровой турбины составлял порядка 80м (1,8 МВт), но при этом средняя турбина офшорных ветропарков достигла размера 124 м (4 МВт). Развитие такой тенденции отражено на рисунке 1. Стоит отметить, что ультрасовременные ветряные двигатели на 8 МВт с диаметром 164 м уже нашли свое применение еще в 2012. Прямо сейчас большинство производителей турбин развивает свою продукцию в диапазоне мощности 4.5-8 МВт, и ожидается, что более производительные ветряные двигатели с уровнем мощности до 10 МВт войдут в производство к 2018 г. Все это преследует лишь одну цель – уменьшение стоимости электроэнергии [2].

Для нашей страны ветроустановки не являются чем то новым. Возле Новогрудка и Держинска с 2013 года электроэнергия вырабатывается на ветрогенераторах. Для нас же интерес представляют именно современные решения в области конструкции и принципа работы данных установок.

### Общий принцип работы ветряной турбины

**Ветроэлектрическая установка** (Ветрогенератор или сокращенно ВЭУ) — это устройство, которое преобразует энергию ветрового потока в энергию вращения подвижных частей ротора и затем преобразует ее в электричество.

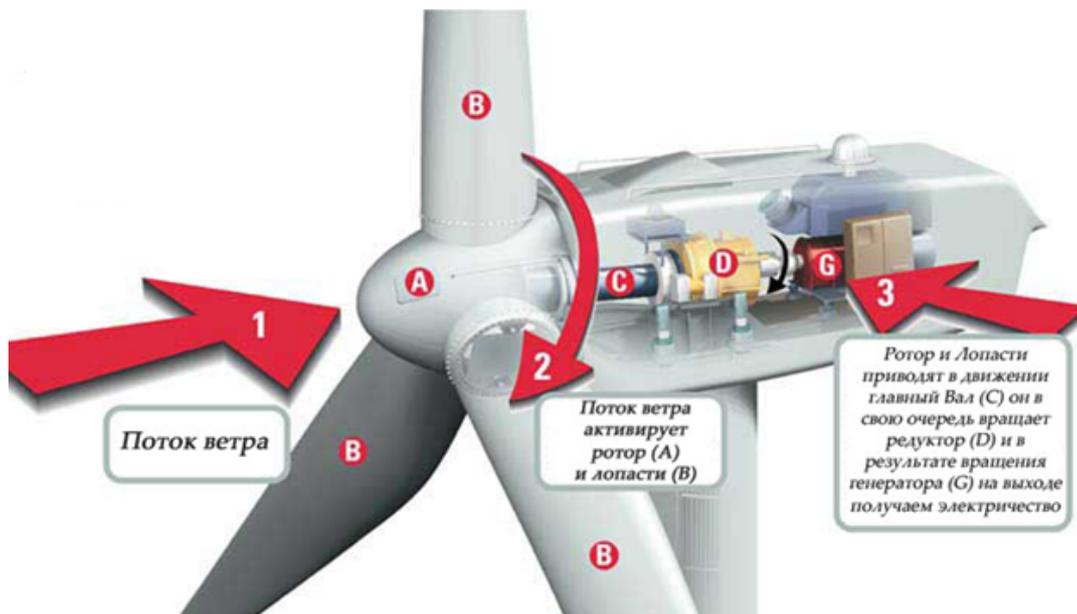


Рис. 2. Общий принцип работы ВЭУ

Принцип работы (рис. 2):

1. Ветер воздействует на лопасти ветрогенератора, что приводит их в движение.
2. Вращение лопастей, через вал и редукторную установку воздействует на генератор, который (двигатель постоянного тока низкого напряжения). Затем с генераторов снимается постоянное напряжение в 12 В, 24 В или 48 Вольт.
3. Это напряжение поступает на зарядное устройство, заряжающее систему аккумуляторных батарей нужной мощности.
4. Блоки батарей в свою очередь подключаются к повышающим преобразователям напряжения переменного тока, которые преобразуют низковольтное постоянное напряжение аккумуляторных батарей (12В, 24В, 48В) в высоковольтное переменное напряжение (однофазное 220 В, 50 Гц или трехфазное 380 В, 50 Гц и др.) [3].

Именно это напряжение и является конечным продуктом генерации ветрогенератора.

### Типы ветрогенераторных установок

Ветрогенераторы возможно классифицировать по ряду параметров.

Классифицируем ветроэлектрические установки по мощности, диаметру ветроколеса и скорости вращения ветроколеса (табл. 1).

Таблица 1. Классификация ВЭУ по физическим характеристикам

Класс ВЭУ	Диапазон мощностей, кВт		Диапазон параметров ветроколеса, м		Диапазон скоростей вращения ветроколеса, об/мин	
	min	max	min	max	min	max
Очень малые	0,025	1	0,5	2,5	2000	500
	1,5	10	3,0	9,0	500	200
Малые	20	60	10	15	140	92
	75	150	18	24	60	40
Средние	200	400	30	35	40	
	500	600	40	50	35	30
Большие	1500	3000	70	90	20	
	4000	5000	105	124	15	13
Очень большие	7000	8000	124	164	13	12
	8000	10000	164	190	12	10

Так же классифицировать ВЭУ можно по особенностям конструктивных решений (табл. 2).

Таблица 2. Классификация ВЭУ по типу конструкции

Принцип классификации	Классы ВЭУ		
	Оси вращения	Горизонтальные	
Количество лопастей	Двухлопастные	Трехлопастные	Многолопастные
Материал лопастей	С жесткими лопастями		Парусные
Шаг винта	С фиксированным шагом винта		С изменяемым шагом винта

Ветрогенераторы так же делятся на три категории: промышленные, бытовые и коммерческие.

Существует два основных типа конструктивного исполнения ВЭУ: с горизонтальной и вертикальной осями вращения. Осью машины называют расположение ведущего вала ротора (части турбины соединяющей лопасти с генератором) в пространстве. Типы ВЭУ схематично изображены на рисунке 3 [4].

Самыми востребованными в современном мире стали горизонтальные ветрогенераторы. Их ось вращения турбины расположена параллельно земле. Этот тип также называют «ветряной мельницей», из-за того, что лопасти вращаются строго против ветра. В устройстве этих ветрогенераторов предусмотрен автоматический поворот головной части (в поиске ветра) и также поворот лопастей, для использования его небольшой силы. Мощность на выходе горизонтально-осевого ветрогенератора пропорциональна размерам конструктивных элементов, формам и размерам лопастей. Чем больше диаметр ветроколеса, тем больший воздушный поток работает над выработкой электроэнергии.

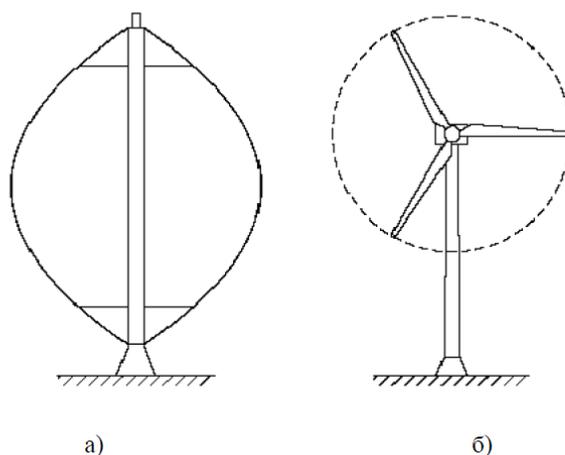


Рис. 3. ВЭУ  
(а – вертикально-осевые; б – горизонтально-осевые)

Вертикальные ветрогенераторы гораздо менее эффективны. Вращение лопастей такой турбины происходит параллельно поверхности земли и не учитывает направление и силу ветра. Но при этом наблюдается один очень важный минус – вращение половины лопастей ветроколеса происходит против ветра (при любом его направлении), за счет чего снижается энергоэффективность и теряется половина выработанной мощности. Однако установка и обслуживание такого ВЭУ гораздо проще и менее затратная, так как основные рабочие элементы (редуктор и генератор) находятся у поверхности земли.

### Преимущества и недостатки ВЭУ

Критерием эффективности ВЭУ являются коэффициент полезного действия (КПД) и коэффициент использования энергии ветра (КИЭВ – максимальный аэродинамический коэффициент). КИЭВ – коэффициент, численно отображающий количество воздушного потока используемого ветроустановкой. Однако чаще пользуются другим критерием эффективности – КПД, так как большая часть энергии теряется на трении в подшипниках при неудачном монтаже установки и т.д.

90 % всех ветроустановок являются крыльчатыми (горизонтально-осевыми). Их коэффициент КИЭВ составляет 43%. Наиболее эффективной работы в них достигают при воздействии потоком воздуха перпендикулярно к плоскости вращения лопастей. Недостатком данных ВЭУ является сложность и стоимость их создания [5].

К преимуществам горизонтально-осевых ВЭУ относится высокая скорость вращения. Кроме того, они оснащены тормозным устройством и системой управления. Тормозное устройство используется для защиты от поломок при сильных порывах ветра и ураганах. Почти все ВЭУ большой мощности автоматически останавливаются, если скорость ветра превышает предельную величину (25 м/с). ВЭУ данного типа в неработающем режиме способна выдерживать силу ветра до 50 м/с.

Преимуществом вертикально-осевых установок (карусельных ВЭУ, ветроустановки Дарье и т.д.) является отсутствие чувствительности к направлению ветра и возможность значительного упрощения конструкции установки (отсутствие поворотных устройств и систем). Установки данного типа характеризуются более низкими уровнями аэродинамических и инфрашумов, создают меньшие радиопомехи и имеют более высокую надежность.

Немаловажной проблемой также является наличие производимого шума и инфракрасного излучения, губительного для живых организмов. Также на основании приведенных фактов можно сделать вывод, что при работе ВЭУ наблюдаются вибрации, колебания узлов, элементов, которые могут приводить к поломкам и преждевременному износу.

Для эффективной борьбы с вибрацией применяются виброизоляционные прокладки из упругих материалов. Они размещаются между ветроагрегатом и основанием башни.

### Заключение

Средний показатель роста доли ветроэнергетики в мировом балансе вырабатываемой энергии превышает 26 %, что говорит о том, что она является наиболее разрабатываемой и развивающейся отраслью. Однако, проблемы с конструктивными элементами ВЭУ, приводят к появлению аварийных ситуаций: отрыву лопастей, возгоранию и т.д.. Последнее происходит из-за погодных условий (гроза, молнии) или технических неисправностей. Оба случая приводят к горению смазочных материалов, масла и оболочки установки [5].

Повышение надежности эксплуатации ВЭУ можно достигнуть на этапе проектирования и доводки конструкции. Создание новых математических и расчетных моделей, отражающих реальное поведение всех элементов ВЭУ как единой механической системы, позволит снизить уровень вибраций, повысить динамическую устойчивость системы и достигнуть большего КПД при наименьших затратах.

Как известно, перемещение воздушных масс (ветер) происходит повсеместно на всей планете. Это делает ветроэнергетическую установку универсальным источником энергии. Человеку для повседневной жизни в быту нужно не так уж много электроэнергии. Зачем тратить большие силы, чтобы доставить малое количество энергии в самый дальний уголок страны?! Ведь можно поставить малый источник и тем самым значительно снизить потери и улучшить экологию!

**Библиографический список**

1. Саликеева С.Н., Галеева Ф.Т. Обзор методов получения альтернативной энергии / С.Н. Саликеева, Ф.Т. Галеева // Вестник Казанского национального исследовательского технического университета. - 2012. - №5 - С. 57-59.
2. Frede Blaabjerg, Ke Ma. Future on Power Electronics for Wind // IEEE - journal of emerging and selected topics in power electronics, VOL. 1, NO. 3, SEPTEMBER 2013, p.139 – 152.
3. Позняк Б. А., Юршо Е. Л. Обзор современных ветровых установок – Минск: Белорусский национальный технический университет. Энергетический факультет., 2016. – СНТК72 - С. 227 – 230.
4. П.В. Яцынин, Р.А. Дьяченко, Д.Н. Бессалый, К.Ю. Капустин, Д.А. Батура. Обзор ветряных электроустановок / Научные чтения имени профессора Н.Е. Жуковского // Министерство обороны Российской Федерации, КВВАУЛ им. А.К. Серова. – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2016. – 246 с., с. 112 – 116.
5. Мартыненко Г. Ю. Анализ состояния развития ветроэнергетических установок и вопросы динамики и прочности, связанные с ними / Г. Ю. Мартыненко, Ю. В. Соляникова // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Динамика и прочность машин. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2009. – № 42. – С. 99-110.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ИНФОРМАЦИЯ О МЕЖДУНАРОДНОМ ФОРУМЕ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» СТНО-2018».....</b>	<b>3</b>
<b>МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ. РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА».....</b>	<b>5</b>
<b>Секция «МИКРОВОЛНОВАЯ И ОПТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА».....</b>	<b>5</b>
<b>Асташов С.Г., Пугнин В.И., Мельников С.А., Арефьев А.С., Юнаков А.Н.</b> Разработка конструкции выходной системы мощного многолучевого клистрона.....	5
<b>Воробьев М.Д., Юдаев Д.Н.</b> Разработка и практическое использование метода структурно-шумового анализа эмитирующих поверхностей твердых тел.....	8
<b>Бобровников С.М., Жарков В.И., Метлин В.О.</b> Дистанционное определение температуры мезосферы на основе эффекта резонансной флуоресценции в парах натрия.....	13
<b>Чижиков А.Е., Дуюнов В.В.</b> Исследование временных характеристик излучения газоразрядных источников.....	16
<b>Кижаяев О.В., Серебряков А.Е., Мишин В.Ю., Климаков В.В.</b> Микропроцессорная система измерения порога синхронизации встречных волн в кольцевом лазерном гироскопе.....	21
<b>Коротцов П.В., Логин И.В.</b> Фурье-фильтрация изображения рельефа поверхности, полученного с помощью АСМ.....	25
<b>Рязанова Л.А.</b> Исследование влияния геометрических параметров чувствительного элемента твердотельного волнового гироскопа на его масштабный коэффициент.....	28
<b>Огнев Б.И., Хромченко Н.С., Чуляева Е.Г.</b> Анализ эффективности конструктивных решений в лазерном модуле устройства атмосферной линии связи.....	33
<b>Вердеш В.Ю., Климаков В.В., Маюров Н.А., Мишин В.Ю., Серебряков А.Е.</b> Беспроводная система мониторинга состояний конструкций.....	37
<b>Титов М.А.</b> Разработка альтернативных источников питания для измерительного модуля системы контроля зданий и сооружений на основе солнечных элементов.....	41
<b>Бурмистров Д.А., Лисовецкий Н.А., Мишин В.Ю., Серебряков А.Е., Климаков В.В.</b> Моделирование характеристик чувствительного элемента гироскопа на эффекте Брайана.....	44
<b>Видергольд К.А., Сивоконь А.А.</b> Исследование распределения температуры на поверхности рНЕМТ транзистора.....	50
<b>Зоркин В.С., Чуляева Е.Г., Степура А.В.</b> Исследование влияния магнитных полей на двухчастотный активный элемент He – Ne лазера.....	54
<b>Пахомов В.</b> Цифровое проектирование электронно-оптической системы малошумящей ЛБВ.....	59

<b>Парамонов Ю.Н., Сурков С.В., Шульгин Б.А.</b> Разработка двухсекционной замедляющей системы для мощной лампы бегущей волны X-диапазона.....	65
<b>Титов Н.А.</b> Методика расчёта КПД генераторного СВЧ диода энергетическим методом.....	71
<b>Дао Н.Х., Серебряков А.Е., Чиркин М.В., Мишин М.В., Климаков В.В.</b> Анализ механизмов медленных флуктуаций в лазерном гироскопе.....	76
<b>Секция «ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА»..</b>	80
<b>Серпова М.А., Гололобов Г.П., Суворов Д.В., Будников Д.В.</b> Электрохимический синтез градиентных покрытий на основе сплава Ni-W.....	80
<b>Пирюгин А.В., Мишустин В.Г.</b> Моделирование вольт-амперных характеристик двухкаскадного солнечного элемента на основе a-Si:H И a-SiC:H.....	84
<b>Трусов Е.П., Литвинов В.Г.</b> Фотоприемное устройство для исследования спектров люминесценции полупроводниковых материалов и структур.....	90
<b>Сапельников А.С., Вишняков Н.В.</b> Разработка измерительного макета на основе спектрофотометра СФ-26 для исследования спектральной зависимости квантовой эффективности фотоэлектрического преобразователя.....	94
<b>Шубаркин В., Литвинов В.</b> Измерительный комплекс для экспресс-диагностики фотоэлектрических преобразователей.....	99
<b>Логвин А.В., Зубков М.В.</b> Моделирование релаксационных процессов в микро- и наноструктурах.....	103
<b>Маслов А.Д., Безуглая Е.В.</b> Применение специализированной научной программной среды для исследования характеристик солнечных элементов AFORS-HET в образовательном процессе.....	105
<b>Алпатов А.В., Рыбина Н.В., Трынов Д.Ю.</b> Применение методики SCALE-SPACE к исследованию корреляционных свойств поверхностей.....	109
<b>Кошкин И.О., Рыбин Н.Б.</b> Методика исследования структуры поверхности материалов солнечной энергетики с помощью растровой электронной микроскопии.....	114
<b>Гудзев В.В., Краснов К.Н.</b> Установка емкостной спектроскопии глубоких уровней.....	118
<b>Логинов Д.С., Холомина Т.А., Кельн Э.Э.</b> Разработка системы управления блоком установки спектроскопии НЧ шума для исследования низкоомных объектов.....	123
<b>Кострюков С.А., Липатова С.В., Мишустин В.Г.</b> Разработка электронного блока для управления технологическим оборудованием.....	127
<b>Мишустин В.Г., Романов А.Г.</b> Модернизированная измерительная ячейка для исследования полупроводниковых барьерных структур.....	133

<b>Голованова М.В., Громов Д.Г., Холомина Т.А., Литвинов В.Г., Ермачихин А.В., Рыбин Н.Б</b>	
Исследование морфологии поверхности пленок ZnO и электрофизических свойств гетероструктур на их основе.....	138
<b>Степанов Д.В., Рыбин Н.Б.</b>	
Анализ электрофизических характеристик мемристорных структур на основе оксида алюминия.....	143
<b>Ефимова О.В., Стукова Е.В.</b>	
Диэлектрические свойства триглицинсульфата, внедренного в матрицу SBA-15.....	146
<b>Бухенский К.В., Дюбуа А.Б., Кучерявый С.И., Машнина С.Н., Сафошкин А.С., Иванова А.А., Куликова Е.С., Потапова В.В.</b>	
Кинетические процессы в легированном полупроводниковом гетеропереходе.....	150
<b>Бухенский К.В., Дюбуа А.Б., Кучерявый С.И., Машнина С.Н., Сафошкин А.С., Зенков Д.А., Крючков Д.С., Лачугин А.С., Стрельников А.А.</b>	
Процесс дифракции электромагнитной волны на полупроводниковой наноструктуре.....	155
<b>Филяревич В.С., Алпатов А.В.</b>	
Анализ шероховатости поверхностей.....	158
<b>А.С. Тюшин, В.В. Гудзев</b>	
Исследование энергетического спектра глубоких уровней в барьерных структурах Al/n-Si.....	163
<b>А.Р. Семенов, Д.Г. Громов, В.Г. Литвинов, Т.А. Холомина, С.П. Олейник, А.В. Ермачихин</b>	
Моделирование вольт-фарадных характеристик гетероструктур на основе оксида цинка...	167
<b>Секция "ПРОМЫШЛЕННАЯ СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ"</b>	174
<b>Афонин А., Давыдкина Е.</b>	
Стратегии технического обслуживания и ремонта электрооборудования.....	174
<b>Подольская А.В., Ушаков И.В.</b>	
Специфика использования геотермальной энергетики для повышения эффективности энерго- и ресурсоемкого производства.....	177
<b>Чернов С.</b>	
Использование вольтдобавочных трансформаторов для качественного электроснабжения в сети 6-10 кВ.....	180
<b>Шуваев А.А., Тарабрин Д.Ю.</b>	
Моделирование сетей с распределенной генерацией.....	184
<b>Васин А.А., Васильева Т.Н.</b>	
Особенности расчета наведенного напряжения в электрических сетях.....	189
<b>Чернов С., Афонин А.</b>	
Мачтовые конденсаторные установки в распределительных сетях 6-10 кВ.....	195
<b>Жемчугов Е.С., Буваков С.Ю., Гололобов Г.П., Суворов Д.В., Будников Д.В.</b>	
Моделирование протекания переменного тока в проводнике с композитной структурой...	199
<b>Зайцев В.М.</b>	
Релейная токовая защита.....	204

<b>Буданцов А.В., Сливкин Е.В.</b> Реконструкция системы электроснабжения 1 этажа предприятия АО «НПК «АЛЬФА-М».....	207
<b>Асотов С.М., Климаков В.В.</b> Солнечный коллектор на основе артериальной тепловой трубы.....	211
<b>Кобельков Д.С., Сливкин Е.В.</b> Реконструкция трансформаторных подстанций ТП-805 и ТП-812 предприятия ЗАО "Рязанский кирпичный завод".....	215
<b>Башта Л.Г.</b> Способ управления мостовым преобразователем для получения синусоидального напряжения.....	220
<b>Буцких М.</b> Основные тенденции развития и типы современных ветроэлектрических установок.....	224

## **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ**

**Научное издание**

**В 10 томах**

**Том 2**

Под общей редакцией О.В. Миловзорова.

Подписано в печать 15.06.18. Формат 60x84 1/8.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л. 18.

Тираж 100 экз. Заказ № 3334.

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