

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  
ИМЕНИ В.Ф. УТКИНА

# **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ**

## **СТНО-2023**

**VI МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-  
ТЕХНИЧЕСКИЙ ФОРУМ**

**Сборник трудов**

**Том 2**

Рязань  
2023

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

Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2023 [текст]: сб. тр. VI международ. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.2./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2023.

**ISBN 978-5-7722-0373-6**

Т.2: – 160 с.,: ил.

**ISBN 978-5-7722-0375-0**

Сборник включает труды участников VI Международного научно-технического форума «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2023.

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 978-5-7722-0373-6**

**ISBN 978-5-7722-0375-0**

© Рязанский государственный  
радиотехнический университет, 2023

## **ИНФОРМАЦИЯ О VI МЕЖДУНАРОДНОМ ФОРУМЕ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» СТНО-2023**

VI Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2023 состоялся 01.03.2022-03.03.2022 в г. Рязань в Рязанском государственном радиотехническом университете имени В.Ф. Уткина.

В рамках форума «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2023 состоялась работа четырех Международных научно-технических конференций:

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

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

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

- Алгоритмическое и программное обеспечение вычислительных систем и сетей;
- ЭВМ и системы;
- Информационные технологии в конструировании электронных средств;
- Модели искусственного интеллекта в САПР;
- Информационные системы и защита информации;
- Математические методы в научных исследованиях;
- Обработка данных, изображений и управление в технических системах;
- Геоинформационные и космические технологии;
- Автоматизация производственно-технологических процессов в приборо- и машиностроении;
- Информационно-измерительные устройства и системы в технике и медицине.
- Стандартизация и управление качеством;
- Информационные системы и технологии;

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

- Современные технологии государственного и муниципального управления;
- Экономика, менеджмент и организация производства;
- Бухгалтерский учет, анализ и аудит;
- Экономическая безопасность;
- Внешнеэкономическая деятельность;

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

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

### **Организационный комитет Форума:**

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

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

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

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

Мионов В.В., ответственный редактор сборника трудов Форума;

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., зав. кафедрой автоматике и информационных технологий в управлении, к.т.н., доц.;

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

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

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

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

Евдокимова Е.Н., зав. кафедрой экономики, менеджмента и организации производства, д.э.н., проф.;

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

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

Жулев В.И., зав. кафедрой информационно-измерительной и биомедицинской техники, д.т.н., проф.;

Карпунина Е.В., доцент кафедры экономической безопасности, анализа и учета, к.э.н., доц.;

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

Ключко В.К., профессор кафедры автоматике и информационных технологий в управлении, д.т.н., проф.;

Коваленко В.В., зав. кафедрой химической технологии, к.т.н., доц.;

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

Костров Б.В., зав. кафедрой электронных вычислительных машин, д.т.н., проф.;

Кошелев В.И., зав. кафедрой радиотехнических систем, д.т.н., проф.;

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Паршин Ю.Н., зав. кафедрой радиотехнических устройств, д.т.н., проф.;

Перфильев С.В., зав. кафедрой государственного, муниципального и корпоративного управления, д.э.н., проф.;

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Холопов С.И., декан ф-та автоматизации и информационных технологий в управлении, зав. кафедрой автоматизированных систем управления, к.т.н., доц.;

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

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

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

### СЕКЦИЯ «МИКРОВОЛНОВАЯ, ОПТИЧЕСКАЯ И КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»

УДК 621.385.6; ГРНТИ 47.29.37

#### ОСОБЕННОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КОЛЬЦЕВОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА В СПЛОШНОЙ ПОТОК ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКОЙ С НИЗКОВОЛЬТНЫМ БЕССЕТОЧНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

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

*АО «НПП «Исток» им. Шокина»,*

*Российская Федерация, Фрязино, filyur54@gmail.com*

*Аннотация.* В статье представлены результаты исследований формирования электронного потока в ЭОС с кольцевым катодом и низковольтным бессеточным управлением током пучка. Найдена конфигурация электродов электронной пушки, обеспечивающая формирование электронного потока с малым разбросом скоростей электронов в плоскости электростатического кроссовера. Показано, что сформированный электронный поток может транспортироваться в протяженном пролетном канале при повышенных значениях тока пучка и параметра магнитного поля.

*Ключевые слова:* электронно-оптическая система (ЭОС), низковольтное бессеточное управление, магнитная периодическая фокусирующая система (МПФС)

#### FEATURES OF THE CONVERSION OF AN ANNULAR ELECTRON BEAM INTO A CONTINUOUS STREAM BY AN ELECTRON GUN WITH A LOW-VOLTAGE GRIDLESS CONTROL

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

*JSC "RPC "Istok" named after Shokin",*

*Russian Federation, Fryazino, filyur54@gmail.com*

*Annotation.* The article presents the results of studies of the formation of fluxes in an EOS with an annular cathode and low-voltage gridless control of the beam current. The sensor of the electron gun sensor is found, which provides the formation of a flow with a small spread of electron velocities in the direction of the electrostatic crossover. It is shown that the generated electron beam can be transported in an extended transient channel at increased values of the current beam and the magnetic field parameter.

*Keywords:* electro-optical system (EOS), low-voltage gridless control, magnetic periodic focusing system (MPFS)

В работе [1] были представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований переходных процессов в ЭОС с кольцевым катодом и низковольтным бессеточным управлением током пучка, параметры которой представлены в таблицах 1,2.

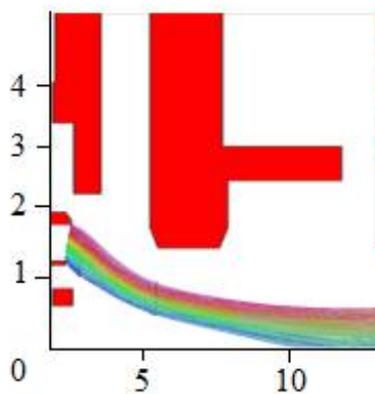
В этой ЭОС низковольтное управление током пучка осуществлено соосно расположенными вблизи катода фокусирующим электродом и штырем, за счет чего в электронной пушке был сформирован кольцевой электронный поток, сходящийся в области пролетного канала в сплошной. Дополнительная регулировка тока пучка обеспечивалась потенциалом первого анода  $U_{a1}$ , который меньше потенциала спиральной замедляющей системой (ЗС)  $U_{зс}$ . Для транспортировки электронного пучка в ЭОС применена МПФС с несинусоидальным распределением осевой компоненты индукции магнитного поля и значимой величиной третьей гармоники [2], позволившая обеспечить устойчивую транспортировку потока при пониженных потенциалах ЗС. Расчеты показали, что в рабочем

Таблица 1. Параметры ЭОС

Ток пучка, мА	380,0
Ускоряющее напряжение, В	9000
Микропервееанс, мкА/В <sup>3/2</sup>	0,445
Диаметр катода, мм	3,7
Диаметр канала, мм	2,0
Тип катода	Импрегни- рованный
Плотность тока на катоде, А/см <sup>2</sup>	6,7
Плотность тока в пучке, А/см <sup>2</sup>	41,6
Компрессия пучка по площади (бриллюэновская)	22,4
Компрессия пучка по площади (реальная)	10

режиме транспортировка пучка происходила без оседания тока на пролетный канал (рис. 1).

R, мм

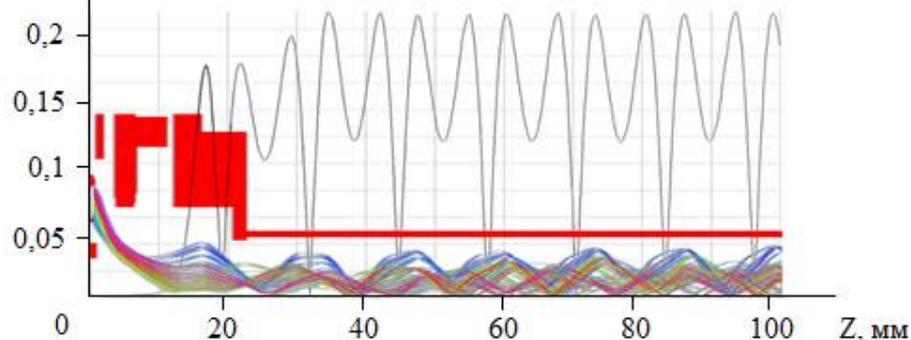


а)

Таблица 2. Параметры МПФС

Амплитуда поля на оси, Гс	2100
Период МПФС, мм	25,7
Параметр магнитного поля	0,9
Бриллюэновский радиус пучка в МФС, мм	0,354
Заполнение канала пучком (без учета поперечных скоростей)	0,354
Средний радиус пучка (с учетом поперечных скоростей), мм	0,539
Реальное заполнение канала пучком (с учетом поперечных скоростей)	0,539

Bz, мТл



б)

Рис. 1. Траектории электронного потока в электронной пушке (а) и транспортировка

электронного потока в рабочем режиме (б).

Как следует из анализа рисунка 1а, из-за отсутствия пространственного заряда потока под внутренней границей кольцевого потока, отсутствия магнитного поля на катоде, а также за счет распределения потенциала в области электронной пушки, крайняя траектория внутренней границы потока пересекает ось и, отразившись, увеличивает угол расходимости потока в отсутствие магнитного поля. При наличии магнитного поля (рисунок 1б) происходит перехлест внутренней и внешней границы электронного потока, эффективный фазовый объем пучка увеличивается, что приводит к увеличению среднего радиуса потока в магнитном поле, повышенному уровню пульсаций в пролетном канале, не позволяя наращивать ток пучка, формируемого электронной пушкой.

Целью работы является модернизация ЭОС данной ЛБВ с целью увеличения катодного тока, а также поиск конфигурации электродов, обеспечивающих транспортировку электронного потока до пролетного канала того же диаметра, что и в представленной ЛБВ, без токооседания. Для получения требуемой ЭОС необходимо снизить угловой разброс электронов в кроссовере, а также уменьшить период МПФС.

После проведения цикла расчетов была найдена конфигурация электродов электронной пушки с увеличенным током пучка и уменьшенным угловым разбросом (рисунок 2а), которая позволила обеспечить транспортировку электронного потока в том же пролетном канале (рисунок 2б) при небольшом увеличении магнитного поля МПФС с уменьшенным периодом магнитного поля так, чтобы параметр магнитного поля остался на прежнем уровне.

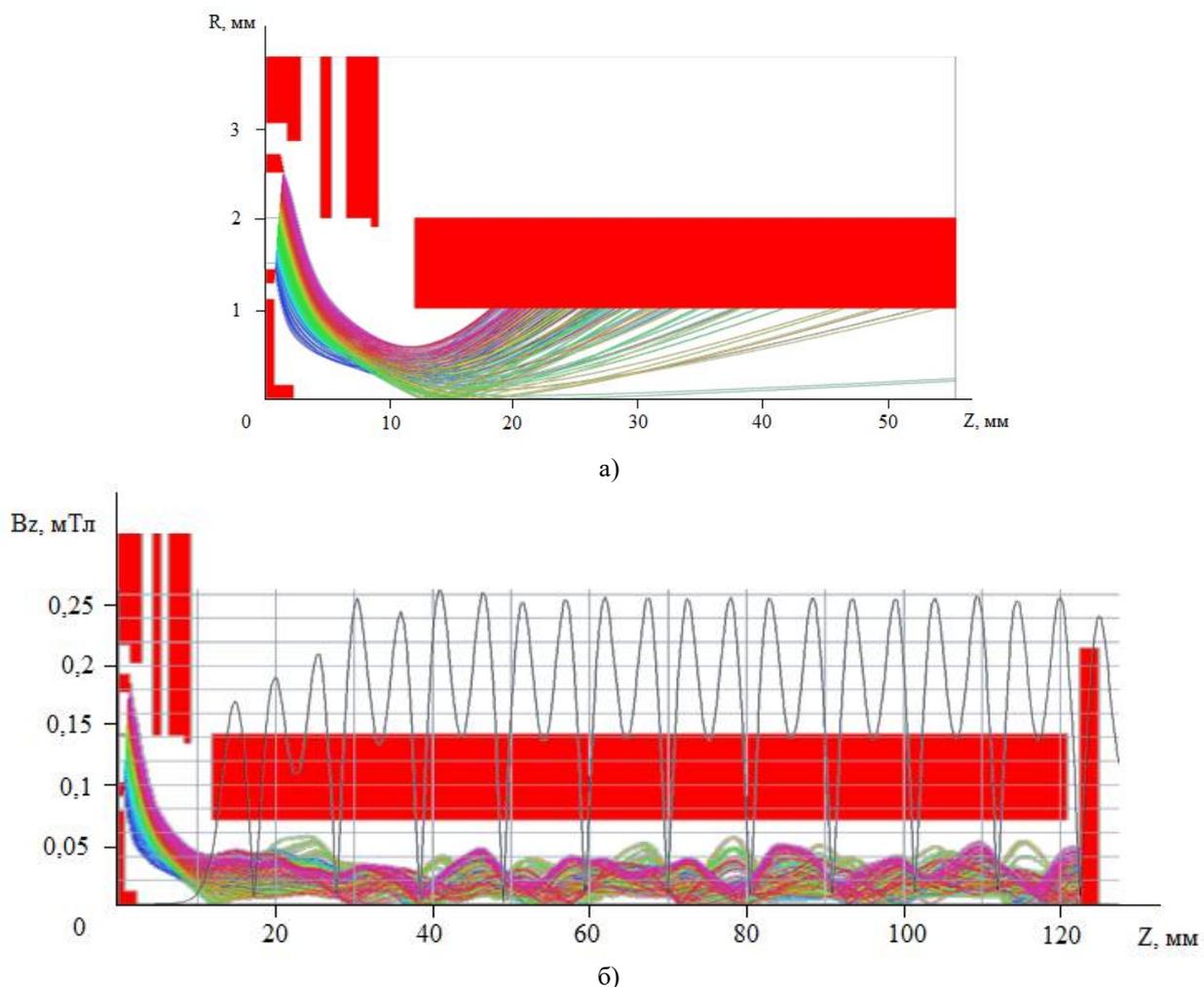


Рис. 2. Траектории электронного потока в электронной пушке с увеличенным током  $I_0=0.8$  А (а) и транспортировка электронного потока в МПФС с уменьшенным периодом  $L=22.0$  мм (б)

При напряжении  $U_f = -1500$  В пушка полностью закрывается. Параметры полученной ЭОС и МПФС представлены в таблицах 3 и 4 соответственно

Таблица 3. Параметры модернизированной ЭОС

Ток пучка, мА	800,0
Ускоряющее напряжение, В	9000
Микропервеанс, мкА/В <sup>3/2</sup>	0,94
Диаметр катода, мм	5
Диаметр канала, мм	2,0
Тип катода	Импрегни- рованный
Плотность тока на катоде, А/см <sup>2</sup>	3,6
Плотность тока в пучке, А/см <sup>2</sup>	125,8
Компрессия пучка по площади (бриллюэновская)	36,34
Компрессия пучка по площади (реальная)	31

Таблица 4. Параметры модернизированной МПФС

Амплитуда поля на оси, Гс	2600	
Период МПФС, мм	22	
Параметр магнитного поля	1.0	
Бриллюэновский радиус пучка в МФС, мм	0,415	
Заполнение канала пучком (без учета поперечных скоростей)	0,415	
Средний радиус пучка (с учетом поперечных скоростей), мм	0,449	
Реальное заполнение канала пучком (с учетом поперечных скоростей)	0,449	

## Выводы

В результате расчетов была определена геометрия электродов, размеры катода, конфигурация магнитной системы с требуемой амплитудой магнитного пол на оси. Данная конфигурация позволяет транспортировать электронный пучок с током 0.8 А в канале 2 мм без токооседания.

## Библиографический список

1. Филин Ю.Ю., Морев С.П., Коломийцева Н.М., Арион О.А., Комраков П.А., Соляников А.В. Использование коллиматора специальной формы в ЛБВ с кольцевым катодом и низковольтным бессеточным управлением в переходных режимах работы ЭОС. XI Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроволновая СВЧ». Сборник докладов. СПб, с.128-132.
2. Дармаев А.Н., Морев С.П. Повышение параметра магнитного поля в фокусирующих системах с негармоническим распределением магнитного поля / Актуальные проблемы электронного приборостроения. Материалы международной научно-технической конференции // Саратов. 2006. с. 382-3

УДК 621.385.6; ГРНТИ 47.29.37

## **МОДЕРНИЗАЦИЯ МАГНИТНОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ФОКУСИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА ПРИ ВЫСОКИХ ЗНАЧЕНИЯХ ПАРАМЕТРА МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

С.П. Морев, Ю.Ю. Филлин, Н.М. Коломийцева, П.А. Комраков, А.А. Ачкинадзе

*АО «НПП «Исток» им. Шокина»,*

*Российская Федерация, Фрязино, filyur54@gmail.com*

*Аннотация.* В статье представлены результаты разработки магнитной периодической фокусирующей системы (МПФС) со значимой величиной третьей пространственной гармоники магнитного поля и большим периодом, предназначенной для транспортировки электронного потока в протяженном канале, диаметром 2,0 мм. Найдена конфигурация полюсных наконечников и вставок из магнитомягкого материала, обеспечивающая транспортировку электронного потока с током 0,8 А при напряжении менее 10000 В. малым разбросом скоростей электронов в плоскости электростатического кроссовера.

*Ключевые слова:* электронно-оптическая система (ЭОС), магнитная периодическая фокусирующая система (МПФС), высшие гармонические составляющие, параметрический резонанс.

## **MODERNIZATION OF THE MAGNETIC PERIODIC FOCUSING SYSTEM, DESIGNED TO TRANSPORT THE ELECTRON FLOW AT HIGH VALUES OF THE MAGNETIC FIELD PARAMETER**

S.P. Morev, Yu.Yu. Filin, N.M. Kolomiitseva., P.A. Komrakov, A.A. Achkinadze

*АО «НПП «Исток» им. Шокина», Российская Федерация, Фрязино, spmor@yandex.ru*

*Annotation.* The article presents the results of the development of a magnetic periodic focusing system (MPFS) with a significant value of the third spatial harmonic of the magnetic field and a large period, designed to transport an electron beam in an extended channel with a diameter of 2 mm. A configuration of pole pieces and inserts made of soft magnetic material was found, which ensures the transport of an electron beam with a current of 0.8 A at a voltage of less than 10000 V and a small spread of electron velocities in the plane of the electrostatic crossover.

*Keywords:* electro-optical system (EOS), magnetic periodic focusing system (MPFS), higher harmonic components, parametric resonance.

В работе [1] были представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований транспортировки в МПФС электронного потока во время переходных процессов работы ЭОС с кольцевым катодом и низковольтным бессеточным управлением током пучка, параметры которой представлены в таблицах 1,2.

В этой ЭОС для транспортировки электронного пучка в ЭОС применена МПФС с несинусоидальным распределением осевой компоненты индукции магнитного поля и значимой величиной третьей пространственной гармоники [2], позволившая обеспечить устойчивую транспортировку потока при повышенных параметрах магнитного поля  $\alpha$ , больших чем критическое значение, равное 0,67.

В процессе проведения расчетов ЭОС было выявлено, что используемая МПФС (рис. 1) позволяет обеспечивать повышение амплитуд магнитного поля при увеличении размеров магнитов. Однако при заданном периоде МПФС, обусловленным ее конструктивным исполнением, величина параметра магнитного поля  $\alpha$ , равного

$$\alpha = \frac{\eta B_a^2 L^2}{64\pi^2 U_0},$$

где  $B_a$  – амплитуда магнитного поля;

$L$  – период МПФС;

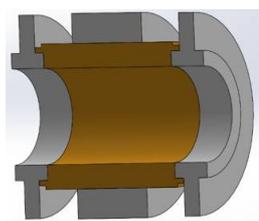
$U_0$  – ускоряющее напряжение,

Таблица 1. Параметры ЭОС

Ток пучка, мА	380,0
Ускоряющее напряжение, В	9000
Микроперванс, мкА/В <sup>3/2</sup>	0,445
Диаметр катода, мм	3,7
Диаметр канала, мм	2,0
Тип катода	Импрегни- рованный
Плотность тока на катоде, А/см <sup>2</sup>	6,7
Плотность тока в пучке, А/см <sup>2</sup>	41,6
Компрессия пучка по площади (бриллюэновская)	22,4
Компрессия пучка по площади (реальная)	10

Таблица 2. Параметры МФС

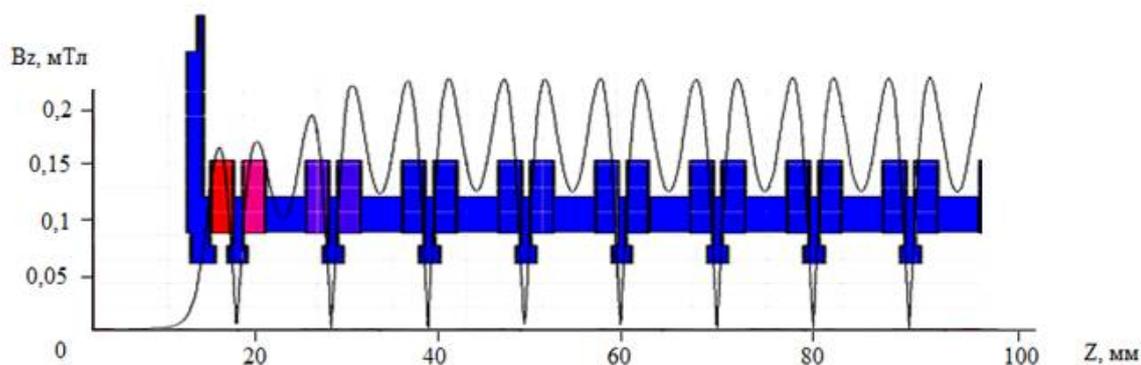
Амплитуда поля на оси, Гс	2100
Период МПФС, мм	25,7
Параметр магнитного поля	0,9
Бриллюэновский радиус пучка в МФС, мм	0,354
Заполнение канала пучком (без учета поперечных скоростей)	0,354
Средний радиус пучка (с учетом поперечных скоростей), мм	0,539
Реальное заполнение канала пучком (с учетом поперечных скоростей)	0,539



(а)



(б)

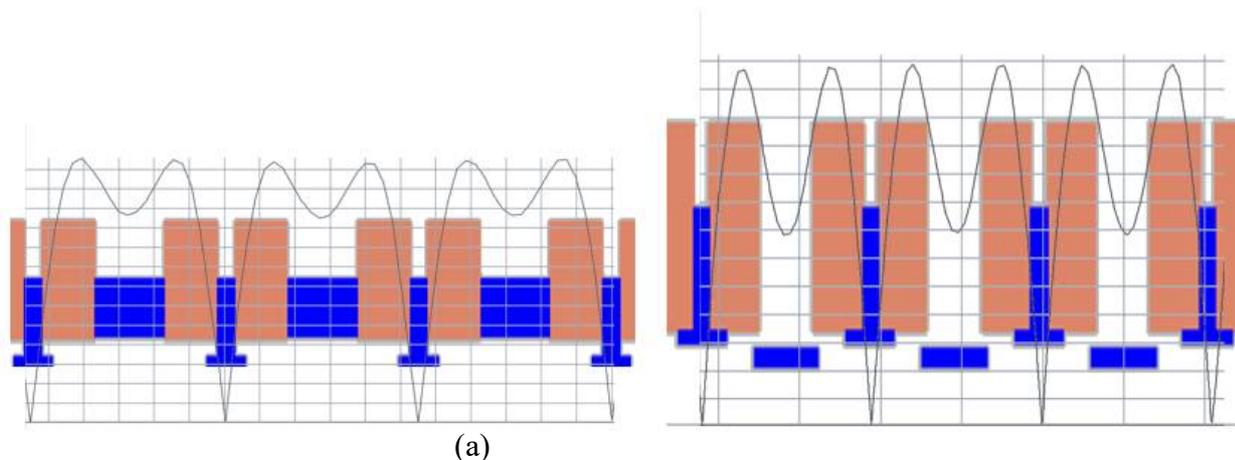


(в)

становится существенно больше, что приводит к рискам попадания электронного потока в область параметрического резонанса.

Рис. 1. Полюсные наконечники и кольцевая вставка ячейки МПФС с высоким значением амплитуды третьей гармоники (а), эскиз МПФС (б) и распределение модуля осевой компоненты индукции магнитного поля в МПФС (в).

При попытках уменьшить период МПФС, оставляя внутренний диаметр трубки, на которой размещены вставки неизменным, происходило уменьшение величины амплитуды



третьей гармоники магнитного поля (рис.2а), вследствие чего зона параметрического резонанса смещалась в сторону меньших величин параметра магнитного поля  $a$ .

Рис. 2. Распределение модуля осевой компоненты индукции магнитного поля в исходной конструкции МПФС с уменьшенным периодом (а) и в модернизированной МПФС (б).  $L=22.0$  мм.

Была рассмотрена МПФС, где втулки и наконечники поменяли местами, втулки опустили на радиус наконечников, а наконечники подняли на радиус втулок. Как следует из анализа рис.2б, в этом случае удалось обеспечить требуемое значение амплитуды третьей гармоники магнитного поля при уменьшенном периоде МПФС, а также требуемое значение модуля осевой компоненты индукции магнитного поля для обеспечения транспортировки электронного потока с увеличенной величиной тока пучка (рис. 3).

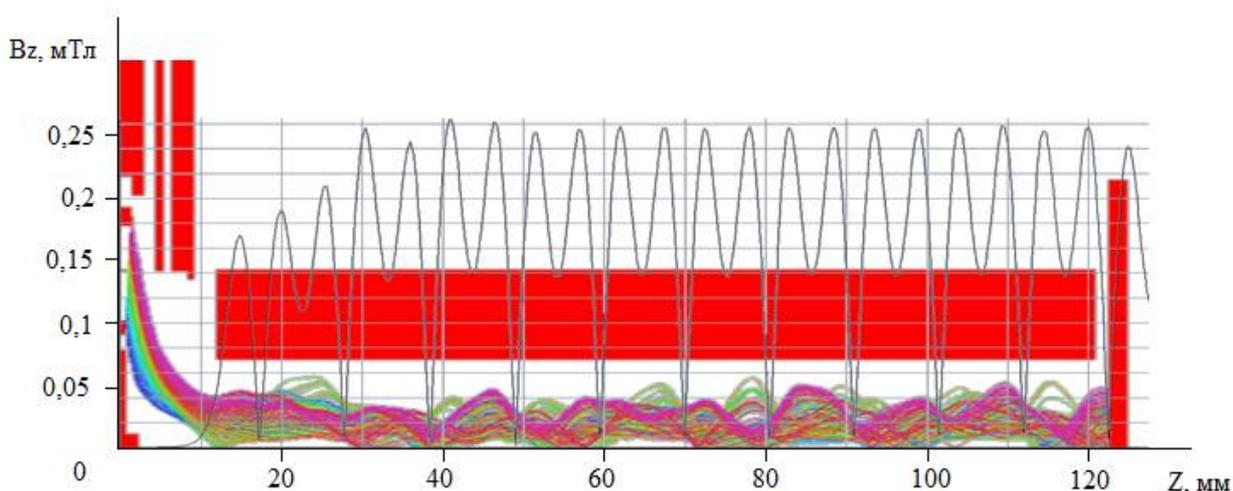


Рис. 3. Траектории электронного потока в электронной пушке с увеличенным током  $I_0=0.8$ А (а) и транспортировка электронного потока в МПФС с уменьшенным периодом  $L=22.0$  мм (б).

В результате расчетов была определена конструкция МПФС с уменьшенным периодом и с требуемым набором высших гармонических составляющих магнитного поля. Найденная конструкция обеспечивает транспортировку электронного потока с величиной тока  $0.8$  А с параметром магнитного поля равном  $1.0$ .

Таблица 3. Параметры модернизированной ЭОС

Ток пучка, мА	800,0
Ускоряющее напряжение, В	9000
Микропервеанс, мкА/В <sup>3/2</sup>	0,94
Диаметр катода, мм	5
Диаметр канала, мм	2,0
Тип катода	Импрегни- рованный
Плотность тока на катоде, А/см <sup>2</sup>	3,6
Плотность тока в пучке, А/см <sup>2</sup>	125,8
Компрессия пучка по площади (бриллюэновская)	36,34
Компрессия пучка по площади (реальная)	31

Таблица 4. Параметры модернизированной МПФС

Амплитуда поля на оси, Гс	2600
Период МПФС, мм	22
Параметр магнитного поля	1.0
Бриллюэновский радиус пучка в МФС, мм	0,415
Заполнение канала пучком (без учета поперечных скоростей)	0,415
Средний радиус пучка (с учетом поперечных скоростей), мм	0,449
Реальное заполнение канала пучком (с учетом поперечных скоростей)	0,449

### Библиографический список

1. Филин Ю.Ю., Морев С.П., Коломийцева Н.М., Арион О.А., Комраков П.А., Соляников А.В. Использование коллиматора специальной формы в ЛБВ с кольцевым катодом и низковольтным бессеточным управлением в переходных режимах работы ЭОС. XI Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Сборник докладов. СПб, с.128-132.
2. Дармаев А.Н., Морев С.П. Повышение параметра магнитного поля в фокусирующих системах с негармоническим распределением магнитного поля / Актуальные проблемы электронного приборостроения. Материалы международной научно-технической конференции // Саратов. 2006. с. 382-3

УДК 537.533; ГРНТИ 47.29.33

## О РЕШЕНИИ УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ РТУТНОЙ ПЛАЗМЕ

В.П. Будак, И.И. Железнов\*

*Национальный исследовательский университет «Московский Энергетический институт»,  
Россия, Москва, \*zheleznov96y@gmail.com*

*Аннотация.* В работе рассматривается алгоритм решения уравнения переноса излучения в низкотемпературной ртутной плазме

*Ключевые слова:* перенос излучения, ртутная плазма

## ON THE SOLUTION OF THE RADIATION TRANSFER EQUATION IN A LOW-TEMPERATURE MERCURY PLASMA

V.P. Boudak, I.I. Zheleznov\*

*National Research University "Moscow Power Engineering Institute",  
Russia, Moscow, \*zheleznov96y@gmail.com*

*The summary.* The paper considers an algorithm for solving the radiation transfer equation in a low-temperature mercury plasma

*Keywords:* radiation transfer, mercury plasma.

В низкотемпературной плазме газовых разрядов протекают различные радиационные процессы, в частности излучение в спектральных линиях и полосах при переходах между возбужденными состояниями атома или молекулы. Распространение излучения в плазме приводит к переносу энергии, а также к соответствующим процессам возбуждения, ионизации, диссоциации и др. В спектральных линиях с малыми коэффициентами поглощения процесс переноса излучения принято называть самопоглощением или реабсорбцией. В неравновесной плазме излучение является одним из основных механизмов разрушения возбужденных атомов. Особый интерес представляют метастабильные и резонансные состояния. Через них идут многочисленные процессы возбуждения и ионизации. Время жизни данных атомов играет ключевую роль в протекании импульсных, ВЧ и микроволновых СВЧ разрядов [1]. Несмотря на значительную роль переноса излучения, во многих полномасштабных и самосогласованных моделях разрядов, чаще всего этот процесс описывается с помощью введения дополнительных сложных для вычислений коэффициентов, учитывающих процесс самопоглощения в некоторой локальной точке. Тем не менее, в последние годы стали рассматриваться новые подходы к решению уравнения переноса излучения [2] на довольно высоком уровне точности, к примеру, что и дифференциальное уравнение диффузии, без особой разницы какие вычислительные ресурсы мы будем использовать. Настоящая работа посвящена определению нового подхода к расчету интегрального уравнения переноса излучения в низкотемпературной ртутной плазме.

### Механизм переноса излучения

Образование и разрушение атомов на некотором излучающем уровне  $s$  в некоторой области плазмы происходит в результате соударений I и II рода с электронами, оптических переходов, оканчивающихся или начинающихся на рассматриваемом уровне, а также диффузии атомов к стенкам колбы [3]. В соответствии с этим, для излучающего уровня  $s$  запишем уравнение, описывающее динамику заселения данного уровня:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_s}{\partial t} - \nabla(D_s \nabla n_s) = n_e \sum_{h=0}^{s-1} \alpha'_{hs} n_h + n_e \sum_{\epsilon=s+1}^{ion-1} \beta'_{\epsilon s} n_\epsilon + \sum_{h=0}^{s-1} \Delta N_{hs} + \sum_{\epsilon=s+1}^{ion-1} n_\epsilon A_{\epsilon s} - \\ - n_e \sum_{\epsilon=s+1}^{ion} \alpha'_{s\epsilon} n_s - n_e \sum_{h=0}^{s-1} \beta'_{sh} n_s - \sum_{\epsilon=s+1}^{ion-1} \Delta N_{s\epsilon} - \sum_{h=0}^{s-1} n_s A_{sh} \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $n_s$  – концентрация атомов на уровне  $s$ ;

$D_s$  – коэффициент диффузии атомов сорта  $s$ ;

$n_e$  – концентрация электронов;

$\alpha'_{ij}$  – число соударений атомов с электронами, приводящих к переходу с уровня  $i$  на уровень  $j$  в результате ударов I рода в единице объема в единицу времени в расчете на один электрон;  $ion$  – номер уровня ионизации;

$\beta'_{ji}$  – число соударений атомов с электронами, приводящих к переходу с уровня  $j$  на уровень  $i$  в результате ударов II рода в единице объема в единицу времени в расчете на один электрон;

$\Delta N_{ij}$  – число переходов с уровня  $i$  на уровень  $j$  в результате поглощения фотонов в единице объема в единицу времени;

$A_{ji}$  – вероятность спонтанного излучения с уровня  $j$  на уровень  $i$ .

Индекс «н» соответствует уровню, лежащему ниже  $s$ , «в» – выше.

Рассмотрим механизм переноса излучения резонансных линий ртути. Для этого перепишем уравнение баланса образования и гибели резонансного уровня  $s$  (1) в следующем виде:

$$\frac{\partial n_s}{\partial t} - \nabla(D_s \nabla n_s) + \text{div} \vec{Q}_{p,s} = n_e \sum_{h=0}^{s-1} \alpha'_{hs} n_h + n_e \sum_{\epsilon=s+1}^{ion-1} \beta'_{\epsilon s} n_\epsilon + \sum_{\epsilon=s+1}^{ion-1} n_\epsilon A_{\epsilon s} - \frac{n_s}{\tau_s}, \quad (2)$$

$$\text{div} \vec{Q}_{p,s}(\vec{r}) = A_{s0} n_s(\vec{r}) - \frac{A_{s0}}{4\pi} \iint_V \frac{n_s(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2} P(\nu) k(\nu) \exp[-k(\nu)|\vec{r} - \vec{r}'|] d\nu dV. \quad (3)$$

Здесь  $\text{div} \vec{Q}_{p,s}$  – дивергенция вектора плотности потока резонансных фотонов;

$\tau_s$  – время жизни уровня, обусловленное ударами II рода с электронами;

$A_{s0}$  – вероятность спонтанного излучения для резонансного уровня  $s$ ;

$P(\nu)$  и  $k(\nu)$  – контур излучения резонансной линии и ее показатель поглощения.

### Алгоритм решения

Запишем в цилиндрической системе координат выражения для  $\text{div} \vec{Q}_{p,s}$ :

$$\text{div} \vec{Q}_{p,s}(r) = A_{s0} n_s(r) [\text{som}(r) + \text{sim}(r, n_s)], \quad (4)$$

$$\text{где } \text{som}(r) = \frac{1}{\pi} \int_{\nu} P(\nu) \int_0^{\pi} G_1(k(\nu) \Delta r(\varphi)) d\varphi d\nu; \quad (5)$$

$$\text{sim}(r, n_s) = \frac{1}{\pi} \int_v P(v) \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} \left[ 1 - \frac{n_s(\rho)}{n_s(r)} \right] k(v) G_0(k(v) \Delta \rho) d\Delta \rho d\varphi dv ; \quad (6)$$

$$G_n(x) = \int_0^{\pi/2} \sin^n \gamma \exp(-x / \sin \gamma) d\gamma ; \quad (7)$$

$$\Delta r(\varphi) = r \cos \varphi + \sqrt{r^2 \cos^2 \varphi + R^2 - r^2} ; \quad (8)$$

$$\rho = \sqrt{r^2 + \Delta \rho^2 - 2r\Delta \rho \cos \varphi} . \quad (9)$$

Стоит отметить, что при расчете  $\text{div} \vec{Q}_{p,s}$  по (4-6) для увеличения скорости вычислений применялись аналитические аппроксимации для функции (7)

В соответствии с известной схемой энергетических уровней атома ртути (рис. 1), система уравнений баланса образования и разрушения возбужденных состояний атома ртути будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{array}{l} \mathbf{1:} \\ 6^3 P_0 \end{array} \quad n_e \alpha'_{01} n_0 + n_e \sum_{\sigma=2}^6 \beta'_{\sigma 1} n_{\sigma} + n_5 A_{51} + c_1 n_6 A_{6(1)1} = n_e \sum_{\sigma=2}^i \alpha'_{1\sigma} n_1 + n_e \beta'_{10} n_1 - \nabla(D\nabla n_1), \quad (10)$$

$$\begin{array}{l} \mathbf{2:} \\ 6^3 P_1 \end{array} \quad \begin{array}{l} n_e \sum_{h=0}^1 \alpha'_{h2} n_h + n_e \sum_{\sigma=3}^6 \beta'_{\sigma 2} n_{\sigma} + n_5 A_{52} + c_1 n_6 A_{6(1)2} + c_2 n_6 A_{6(2)2} = \\ = \text{div} \vec{Q}_{p,254} + n_e \sum_{\sigma=3}^i \alpha'_{2\sigma} n_2 + n_e \sum_{h=0}^1 \beta'_{2h} n_2 - \nabla(D\nabla n_2) \end{array}, \quad (11)$$

$$\begin{array}{l} \mathbf{3:} \\ 6^3 P_2 \end{array} \quad \begin{array}{l} n_e \sum_{h=0}^2 \alpha'_{h3} n_h + n_e \sum_{\sigma=4}^6 \beta'_{\sigma 3} n_{\sigma} + n_5 A_{53} + c_1 n_6 A_{6(1)3} + c_2 n_6 A_{6(2)3} + c_3 n_6 A_{6(3)3} = \\ = n_e \sum_{\sigma=4}^i \alpha'_{3\sigma} n_3 + n_e \sum_{h=0}^2 \beta'_{3h} n_3 - \nabla(D\nabla n_3) \end{array}, \quad (12)$$

$$\begin{array}{l} \mathbf{4:} \\ 6^1 P_1 \end{array} \quad \begin{array}{l} n_e \sum_{h=0}^3 \alpha'_{h4} n_h + n_e \sum_{\sigma=5}^6 \beta'_{\sigma 4} n_{\sigma} + c_1 n_6 A_{6(1)4} + c_2 n_6 A_{6(2)4} = \\ = \text{div} \vec{Q}_{p,185} + n_e \sum_{\sigma=5}^i \alpha'_{4\sigma} n_4 + n_e \sum_{h=0}^3 \beta'_{4h} n_4 - \nabla(D\nabla n_4) \end{array}, \quad (13)$$

$$\begin{array}{l} \mathbf{5:} \\ 7^3 S_1 \end{array} \quad n_e \sum_{h=0}^4 \alpha'_{h5} n_h + n_e \beta'_{65} n_6 = \frac{n_5}{\tau_5} + n_e \sum_{\sigma=6}^i \alpha'_{5\sigma} n_5 + n_e \sum_{h=0}^4 \beta'_{5h} n_5 - \nabla(D\nabla n_5), \quad (14)$$

$$\begin{array}{l} \mathbf{6:} \\ 6^3 D \end{array} \quad n_e \sum_{h=0}^5 \alpha'_{h6} n_h = \frac{n_6}{\tau_6} + n_e \alpha'_{6i} n_6 + n_e \sum_{h=0}^5 \beta'_{6h} n_6 - \nabla(D\nabla n_6). \quad (15)$$

Здесь  $c_1 = \frac{n_{6^3D_1}}{n_{6^3D_1} + n_{6^3D_2} + n_{6^3D_3}}$ ,  $c_2 = \frac{n_{6^3D_2}}{n_{6^3D_1} + n_{6^3D_2} + n_{6^3D_3}}$ ,  $c_3 = \frac{n_{6^3D_3}}{n_{6^3D_1} + n_{6^3D_2} + n_{6^3D_3}}$  (16)

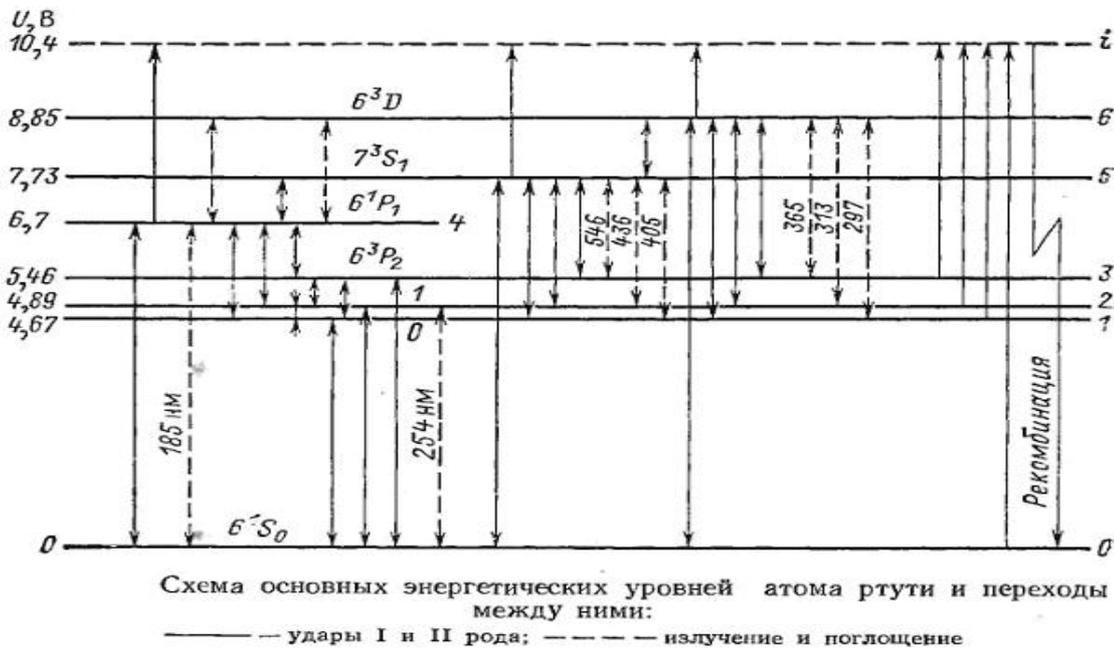


Рис. 1. Схема основных уровней атома ртути.

Тогда можно переписать уравнение переноса излучения [4] для резонансного уровня *s* следующим образом:

$$\text{div} \vec{Q}_{p,s} - D \frac{1}{r} \frac{d}{dr} r \frac{dn_s}{dr} = F(r) - \frac{n_s}{\tau_s} \quad (17)$$

где *D* – коэффициент диффузии атомов ртути к стенкам цилиндрической колбы;  
*F(r)* – скорость образования резонансных атомов ртути за счет возбуждения электронным ударом и оптических переходов с вышележащих уровней;  
 $\tau_s$  – время жизни состояния *s*, обусловленное тушащими соударениями атомов ртути с электронами.

Так, для уровня 6<sup>3</sup>P<sub>1</sub>, в соответствии с (11), можно записать:

$$F_{253.7}(r) = n_e \sum_{n=0}^1 \alpha'_{n2} n_n + n_e \sum_{\nu=3}^6 \beta'_{\nu 2} n_\nu + n_5 A_{52} + c_1 n_6 A_{6(1)2} + c_2 n_6 A_{6(2)2}, \quad (18)$$

$$\tau_{253.7}(r) = \left[ n_e \sum_{\nu=3}^i \alpha'_{\nu 2} + n_e \sum_{n=0}^1 \beta'_{2n} \right]^{-1} \quad (19)$$

Подставив в (17)  $\text{div} \vec{Q}_{p,s}(r)$  из (4-6), получим:

$$\begin{aligned} & \frac{A_{s0}n_s(r)}{\pi} \int_{\nu} P(\nu) \int_0^{\pi} G_1(k(\nu)\Delta r) d\varphi d\nu + \\ & + \frac{A_{s0}}{\pi} \int_{\nu} P(\nu) \int_0^{\pi} \int_0^{\Delta r(\varphi)} [n_s(r) - n_s(\rho)] k(\nu) G_0(k(\nu)\Delta\rho) d\Delta\rho d\varphi d\nu - D \frac{1}{r} \frac{d}{dr} r \frac{dn_s}{dr} = F(r) - \frac{n_s}{\tau_s}. \end{aligned} \quad (20)$$

Для того чтобы решить полученное интегральное уравнение и определить  $n_s(r)$ , считая, что  $F(r)$  и  $\tau_s(r)$  известны, использован метод поточечной коллокации. Для этого  $n_s(r)$  представляется как

$$n_s(r) = \sum_k C_k (1 - (r/R)^2)^k \quad \text{где } k > 1. \quad (21)$$

Уравнение (21) удовлетворяет граничным условиям  $\left. \frac{dn_s}{dr} \right|_{r=0} = 0$  и  $n_s(R) = 0$ . Подставим (21) в (20):

$$\begin{aligned} & \frac{A_{s0}}{\pi} \int_{\nu} \int_0^{\pi} \int_0^{\Delta r(\varphi)} [n_s(r) - n_s(\rho)] P(\nu) k(\nu) G_0(k(\nu)\Delta\rho) d\Delta\rho d\varphi d\nu = \\ & = \frac{A_{s0}}{\pi} \int [n_s(r) - n_s(\rho)] \Psi d\xi, \end{aligned} \quad (22)$$

В результате:

$$\begin{aligned} & \sum_k C_k A_{s0} \left( \text{som}(r) (1 - r^2 R^{-2})^k + \frac{1}{\pi} \int [(1 - r^2 R^{-2})^k - (1 - \rho^2 R^{-2})^k] \Psi d\xi \right) + \\ & + \sum_k C_k \frac{4kD}{R^2} (1 - r^2 R^{-2})^{k-1} \left[ 1 - \frac{(k-1)r^2}{R^2} (1 - r^2 R^{-2})^{-1} \right] + \frac{\sum_k C_k (1 - r^2 R^{-2})^k}{\tau_s(r)} = F(r). \end{aligned} \quad (23)$$

Соответственно, при известных  $F(r)$  и  $\tau_s(r)$  возможно рассчитать концентрацию  $n_s(r)$  атомов ртути в состоянии  $6^3P_1$ . Однако при этом  $n_s(r)$ ,  $F(r)$  и  $\tau_s(r)$  должны быть самосогласованны. Подчеркнем, что эффективную вероятность  $\theta_{184.9}(r)$  выхода фотона из плазмы для линии ртути 184.9 нм можно также определить, используя выражение (5).

### Библиографический список

1. Zhelezov I.I., Konovalov S.V., Vanin I.D. Electrodeless microwave source of bactericidal ultraviolet radiation// Proc. of the 13th Asia lighting conf. (Beijing, China), pp. 789 – 791
2. Будак В.П., Методы решения уравнения переноса излучения. Москва, Издательский дом МЭИ, 2007. 52 с. - ISBN 978-5-383-00138-7
3. Решенов С.П., Влияние сверхтонкой структуры линий на перенос резонансного излучения в ртутном разряде низкого давления // Светотехника, 2008, №4, С.34-38.
4. Радиационный теплоперенос в высокотемпературных газах. Под ред. Р.И.Солоухина // М.: Энергоатомиздат, 1984, 256с.

УДК 623.624; ГРНТИ 47.09.53

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ТОНКИХ ЛАВСАНОВЫХ ПЛЕНОК

В.С. Самойлов

*Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых,  
Российская Федерация, Владимир, insertend175@gmail.com*

*Аннотация.* В работе определены отражающие свойства радиопоглощающих покрытий из тонких пленок, выполненных на основе лавсана с напыленными микрочастицами алюминия. В диапазоне частот от 8,9 до 10,0 ГГц такие покрытия снижают энергию отражаемого от металлических объектов радиосигнала в среднем на 9 дБ.

*Ключевые слова:* радиопоглощающие покрытия, поглощение волн, интерференция, пленочные материалы, отражение сигналов, коэффициент отражения.

## RESEARCH OF RADIO ABSORBING COATINGS FROM THIN LAVSANS FILMS

V. S. Samoylov

*Vladimir State University  
named after Alexander Grigorievich and Nikolay Grigorievich Stoletovs,  
Russian Federation, Vladimir, insertend175@gmail.com*

*The summary.* The paper defines the reflective properties of radio-absorbing coatings made of thin films based on lavsan with sputtered aluminum microparticles. In the frequency range from 8.9 to 10.0 GHz, such coatings reduce the energy of the radio signal reflected from metal objects by an average of 9 dB.

*Keywords:* radio absorbing coatings, wave absorption, interference, film materials, signal reflection, reflection coefficient.

Одной из проблем объектов военного назначения является их радиолокационная заметность. Однако проблеме радиолокационной маскировки пока уделяется недостаточное внимание. Причиной этого являются значительные сложности при создании радиопоглощающих материалов (РПМ), обладающих необходимыми и часто противоречивыми свойствами. Радиопоглощающие покрытия (РПП), выполняемые из РПМ и маскирующие объекты от радиолокационного обнаружения, должны быть не дорогими, легкими, гибкими, влаго и термостойкими, легко трансформироваться в сложные по форме покрытия, обладать вибро и ударостойкостью и, главное, иметь необходимый коэффициент отражения радиоволн в различных частотных диапазонах [1].

В качестве РПМ удобно использовать тонкие матированные пленки из полиэтилентерефталата (лавсана) с напыленным слоем микрочастиц электропроводящего материала [2]. Лавсановые пленки недорогие при производстве, механически прочные, влагостойкие, гибкие, легкие, морозостойкие, имеют температуру плавления 260 °С и их можно использовать для создания сплошных и сетчатых маскирующих и поглощающих покрытий [3]. Определим характеристики отражения радиоволн от РПП, изготовленных из лавсановых пленок с напыленным слоем микрочастиц алюминия. Технологически проще напылять электропроводящий материал на лавсановую пленку, закрепляя напыленные частицы от осыпания и защищая их от окисления, путем приваривания или приклеивания второго слоя лавсановой пленки, как показано на рис. 1.

Падающая на пленку радиоволна  $P_{\text{пад}}$  на границе раздела двух сред преломляется, образуя отраженную  $P_{\text{отр}}$  и проходящую  $P_{\text{пр}}$  волны, как показано на рис. 1. Коэффициент отражения характеризует величину ослабления энергии радиосигнала при отражении от объекта. Его можно определить путем сравнения величин отраженной мощности радиосигнала от защищаемого объекта и отраженной мощности радиосигнала от этого же объекта, но закрытого покрытием из РПМ, что определяется следующим выражением:

$$K_{отр} = -10 \lg \frac{P_o}{P_{отр}}, \text{ дБ},$$

где:  $P_o$  - мощность радиосигнала, отраженного от защищаемого объекта;

$P_{отр}$  - мощность радиосигнала, отраженного от защищаемого объекта, закрытого РПП.

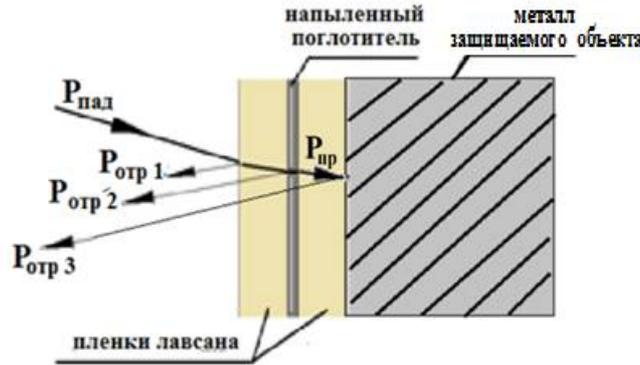


Рис. 1. Схема защиты объекта от радиолокационного обнаружения пленочным композиционным поглощающим покрытием.

Для повышения защитной способности РПП требуется уменьшать величину  $P_{отр}$ , что можно сделать двумя способами:

- увеличивая способность РПП поглощать падающее на материал радиоизлучение;
- добиваясь увеличения рассеивающей способности РПП, то есть отводя отраженный радиосигнал в сторону от источника облучения.

Для пленочных РПП более удобен второй способ уменьшения величины  $P_{отр}$ , поскольку из легкого и гибкого материала не сложно сделать неровную рассеивающую поверхность от которой радиоволны будут минимально отражаться в сторону облучателя.

Падающая радиоволна вызывает вынужденные колебания связанных зарядов вещества и отраженная радиоволна возникает из-за раскачивания свободных электронов вещества под воздействием падающего излучения. Рассеяние радиоволн в диэлектрике лавсана практически отсутствует из-за пренебрежимо малых размеров неоднородностей среды по сравнению с длиной падающей волны и поглощение определяется интерференцией отраженных волн и трансформацией энергии проходящих волн в тепло при столкновении свободных электронов с ионами кристаллической решетки вещества [4].

Известно, что показатель преломления радиоволны является функцией от комплексного значения диэлектрической проницаемости среды

$$\dot{n} = \sqrt{\dot{\epsilon}} = n + j\gamma,$$

где  $\dot{\epsilon}$  - комплексная диэлектрическая проницаемость среды.

При падении радиоволны на диэлектрик действительная часть показателя преломления определяет отражение радиоволны, а мнимая часть определяет поглощение при прохождении волны через среду [5]. Интенсивность поглощения волны пропорциональна квадрату амплитуды напряженности поля и в поглощающей среде убывает вдоль направления волны  $x$  по закону Бугера [6]

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-2\gamma \frac{w}{c} x},$$

где  $w$  - частота падающей волны,  $c$  - скорость света.

Определим как зависит коэффициент отражения радиоволн от поглощающей способности РПП экспериментальным путем. В качестве защищаемого объекта примем окрашенный стальной лист и выполним измерения в соответствии со схемой, показанной на рис. 3, измеряя поочередно уровень отражения СВЧ сигнала от стального листа, а затем от этого же листа, но закрытого РПП.

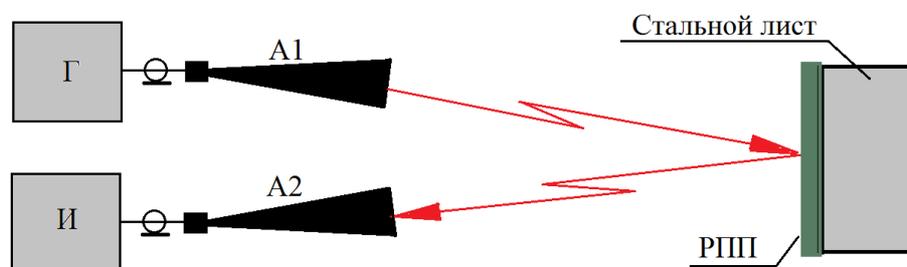


Рис. 3. Схема измерений коэффициента отражения радиоволн (Г - СВЧ генератор, И - измеритель, А1, А2 - широкополосные антенны)

Для исключения влияния отражений от местных предметов все измерения будем выполнять на измерительной установке с широкодиапазонными антеннами в безэховом помещении Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, как показано на рисунке 4.

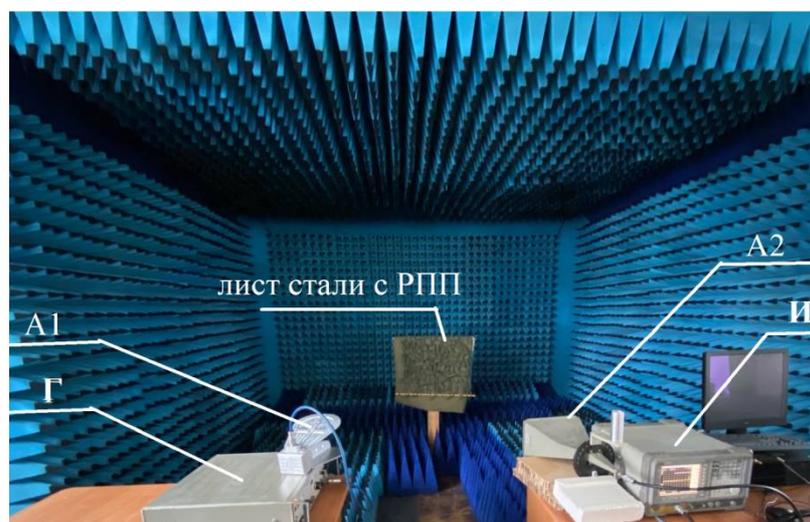


Рис. 4. Выполнение измерений в безэховой комнате

Перед проведением измерений проверим отсутствие прямого прохождения сигнала между антеннами А1 и А2. Для этого, не устанавливая в безэховой комнате объектов, измеряем уровень принимаемого сигнала, отраженного от стен, пола и потолка юезэховой комнаты. Он составил  $-50,5$  дБм. Установив между антеннами А1 и А2 металлический экран [7], снова измеряем принимаемый сигнал. Он также составил  $-50,5$  дБм. Изменяя расстояние между антеннами А1 и А2 до двух метров убеждаемся в том, что это не влияет на измеряемый уровень сигнала. Апроведенные измерения говорят о том, что антенны А1 и А2 имеют глубокую развязку и прямого прохождения СВЧ сигнала между ними не наблюдается.

Эксперименты выполним на частотах от  $8,9$  ГГц до  $10,0$  ГГц с шагом в  $1,0$  ГГц для двух случаев - при закрытии стального листа (защищаемого объекта) пленкой РПП с ровной

поверхностью и при закрытии стального листа крупноячеистой сеткой из РПП. В качестве РПП используем пленки из полиэтилентерефталата с напыленными частицами алюминия и приклеенным вторым слоем пленки. В качестве сетки используем плетение из ленточек листового пленочного РПП на основе лавсана шириной до 10 мм с напылением микрочастиц нержавеющей стали. Для создания дополнительного рассеяния радиоволн на ленточках завязываем узлы с шагом между ними в 5 см. Для снижения погрешности на каждой частоте будем выполнять по пяти измерений и определять результат как среднее арифметическое. В качестве генератора Г используем стандартный СВЧ генератор, а в качестве измерителя И используем анализатор спектра фирмы Agilent Technologies. Коэффициент отражения, характеризующий уменьшение отраженной энергии, определим как разницу измеренных в децибелах уровней отражения от стального листа и этого листа, закрытого измеряемым РПП. Результаты измерений приведены на рисунке 5.

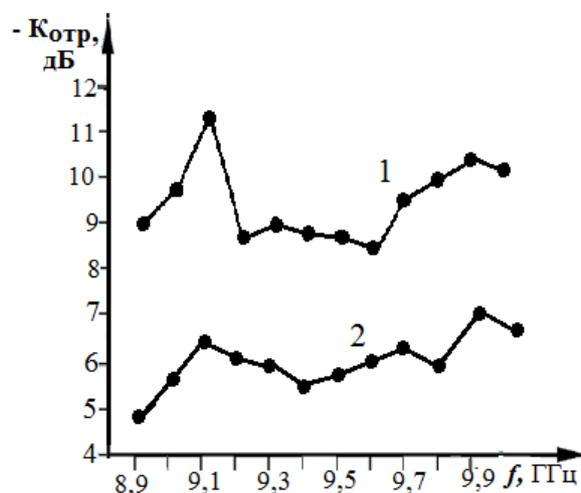


Рис. 5. Коэффициенты отражения радиоволн от объекта, укрытого РПП:  
1 - из пленок лавсана с напыленным поглотителем из микрочастиц алюминия;  
2 - сетка из РПП с ячейками 50X60 мм;

Анализ экспериментальных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- у защищенного РПП объекта частотная характеристика коэффициента отражения нелинейна, с выбросами из-за интерференции волн, отраженных от разных границ раздела сред;
- РПП из матированных лавсановых пленок с поглотителем из микрочастиц алюминия ослабляют отраженный радиосигнал в диапазоне частот от 9 до 10 ГГц в среднем на 9 дБ;
- крупноячеистые сетки из РПП по защитным свойствам уступают сплошному РПП в среднем на 3 дБ;
- для равномерного ослабления отражения в полосе частот необходимо использовать комбинированные поглотители с различным процентным содержанием разных микрочастиц.

### Библиографический список

1. Макаревич, А. В. Радиопоглощающие полимерные композиционные материалы в технике СВЧ / А. В. Макаревич, В. А. Банный. // *Материалы, технологии, инструменты*. - 1999, Т.4, №3. - С. 24-32.
2. Казанцева, Н. Е. Перспективные материалы для поглотителей электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона / Н. Е. Казанцева, Н. Г. Рывкина, И. А. Чмутин. // *Радиотехника и электроника*. - 2003.- Т. 48, №2. - С.196-209.
3. Лушина, М. В. Современные экранирующие и радио-поглощающие материалы / М. В. Лушина, С. Г. Паршин, А. А. Ржевский // *Системы управления и обработка информации*. - 2011, №22. - С. 208–214.
4. Samoylov A. G., Friedman J. A. Measuring setup for determining the parameters of materials that absorb radio waves. 2022 *J. Phys.: Conf. Ser.* 2373 022023. DOI 10.1088/1742-6596/2373/2/022023.

5. Балханов, В. К. Коэффициенты прохождения и отражения электромагнитной волны для градиентного диэлектрического слоя. / В. К. Балханов, Л. Х. Ангархаева, Ю. Б. Башкуев, А. Г. Гантимуров // Радиотехника и электроника. - 2012, т. 57, № 11. - С.1170–1176.

6. Латыпова, А. Ф. Анализ перспективных радиопоглощающих материалов / А. Ф. Латыпова, Ю. Е. Калинин Ю. Е // Вестник ВГТУ. Воронеж. - 2012. №6. - С. 70–76.

7. Панюшкин, А. Н. Эффективная толщина плоского экрана / А. Н. Панюшкин, Н. Н. Панюшкин, А. Г. Самойлов А.Г. // Проектирование и технология электронных средств. - 2019, № 4. - С.38-41.

УДК 53.082.1; ГРНТИ 59.45.71

## СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЙ КОНСТРУКЦИЙ

Д.С Буянов, В.Ю. Мишин, А.Е. Серебряков

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, buyanov14@icloud.com*

*Аннотация.* В докладе рассматривается электронная система сбора данных для контроля состояний зданий и сооружений. Она позволяет обеспечить мониторинг состояния конструкций за счёт применения инерциальных измерительных модулей. Система предназначена для определения угловых отклонений, ускорений, горизонтального смещения верхней части здания и ветровой нагрузки, а также автоматического извещения о возникновении опасных и критических состояний путём отображения на мониторе соответствующих сообщений. В основе разработки использован микроконтроллер ESP8266 с интерфейсом Wi-Fi. К основным модулям системы относятся распределитель напряжения; блок питания; блок цифрового управления; модуль анализа, хранения и передачи данных в управляющий компьютер, а также все необходимые датчики. Эта система будет полезной при вводе в действие новых объектов строительства, а также при мониторинге состояния памятников архитектуры и уже имеющихся зданий, мостов и прочих сооружений.

*Ключевые слова:* микроконтроллер, ESP8266, сбор данных, беспроводная инерционная система контроля, 3-х осевой акселерометр, 3-х осевой магнетометр, 3-х осевой гироскоп.

## DATA ACQUISITION SYSTEM FOR MONITORING THE STATE OF STRUCTURES

D.S. Buyanov, V.Yu. Mishin, A.E. Serebryakov

*Ryazan state radioengineering university,  
Russia, Ryazan, buyanov14@icloud.com*

*Abstract.* The report discusses an electronic data collection system for monitoring the conditions of buildings and structures. It allows monitoring the state of structures through the use of inertial measuring modules. The system is designed to determine angular deviations, accelerations, horizontal displacement of the upper part of the building and wind load, as well as automatic notification of the occurrence of dangerous and critical conditions by displaying appropriate messages on the monitor. The development is based on the ESP8266 microcontroller with a Wi-Fi interface. The main modules of the system include a voltage distributor; power unit; digital control unit; a module for analyzing, storing and transmitting data to the control computer, as well as all the necessary sensors. This system will be useful when commissioning new construction projects, as well as monitoring the state of architectural monuments and existing buildings, bridges and other structures.

*Keywords:* microcontroller, ESP8266, data acquisition, wireless inertial control system, 3-axis accelerometer, 3-axis magnetometer, 3-axis gyroscope.

### Введение

Обеспечение надежности и безопасности зданий всегда имело огромное значение. Возникновение различных аварийных ситуаций может нанести вред жизни и здоровью граждан, имуществу и окружающей среде. Особому контролю подвергаются общественные зда-

ния, предназначенные для пребывания большого количества людей, например, административные, спортивные и торговые здания, здания для проведения культурно-массовых мероприятий. Также важно уделять большое внимание уникальным сооружениям, наиболее ответственным сооружениям с большепролетными конструкциями. Часто обычный мониторинг таких сооружений затруднен в связи с большой трудоемкостью и длительностью его проведения во времени. Объединение новейших достижений в технологии позволяет вести непрерывный автоматизированный контроль состояния как новых, так и старых зданий.

Для технического контроля сложного оборудования создаются распределенные системы сбора и анализа информации [4]. Основные элементы таких систем: первичные датчики, системы сбора и обработки информации, системы хранения собранных данных и программные интерфейсы, удобные для работы конечных пользователей [1].

Использование измерительных датчиков приводит к увеличению межремонтных сроков на основе периодического обследования состояний сооружений. Реконструкция проводится не по определенному плану, а из результатов оценки объектов, используя контрольные показатели в виде собственных частот колебаний, прогиба, осадки, наклона и предела прочности материала, которые находятся с использованием автоматически работающих измерительных устройств [2, 3].

### **Цель и постановка задач**

Целью работы является разработка макета беспроводной системы контроля состояний конструкций. Для достижения этой цели необходимо выполнить следующие задачи:

- 1) Провести обзор литературы, и рассмотреть существующие виды систем контроля;
- 2) Изучить принципы построения систем контроля состояний конструкций;
- 3) Осуществить схемотехническую связь между основными элементами;
- 4) Реализовать с помощью необходимых элементов беспроводной системы контроля состояний конструкций, принципиальную схему на отладочном макете;
- 5) Отладка основных элементов, беспроводной системы контроля состояний конструкций;
- 6) Отладка беспроводной системы контроля состояний конструкций в целом;

### **Структура**

Система представляет собой комплекс инерциальных измерительных блоков, с помощью которых можно фиксировать ориентацию их в пространстве относительно земли, а именно: отклонение относительно оси, определение степени подъема относительно земли, направление сторон света.

Измерительный модуль изображен на рисунке 1. В него входят: модуль приема-передачи данных, источник питания, управляющий микроконтроллер и набор датчиков (трехосный акселерометр, трехосный магнетометр и датчик давления, датчик температуры).

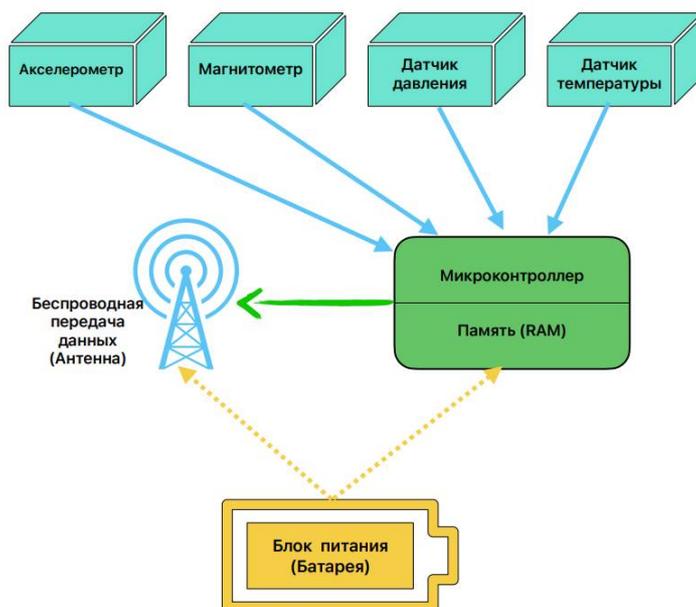


Рис. 1. Структурная схема измерительного модуля

В разрабатываемой системе основным элементом будет микроконтроллер ESP8266. Схема подключения ESP8266 изображена на рисунке 2. Его главным преимуществом является низкая цена, а также его универсальность [5]. Все это позволяет использовать этот микроконтроллер в любой области, где необходим контроль связи по интернету. Запрограммировать модуль ESP8266 на работу в разрабатываемой системе доступно в интегрированной среде Arduino IDE со всеми ее библиотеками [5]. В данном случае программирование микроконтроллера нацелено на сбор данных с датчиков, накопление этих сведений в память и далее отправку их по единому каналу связи на приемное устройство. В качестве приемника можно использовать персональный компьютер (ПК). ПК собирает сведения с модулей, сохраняет и осуществляет их анализ с эталонным значением. Если показатели неудовлетворительные, то генерируется сообщение пользователю о превышении порогового значения.

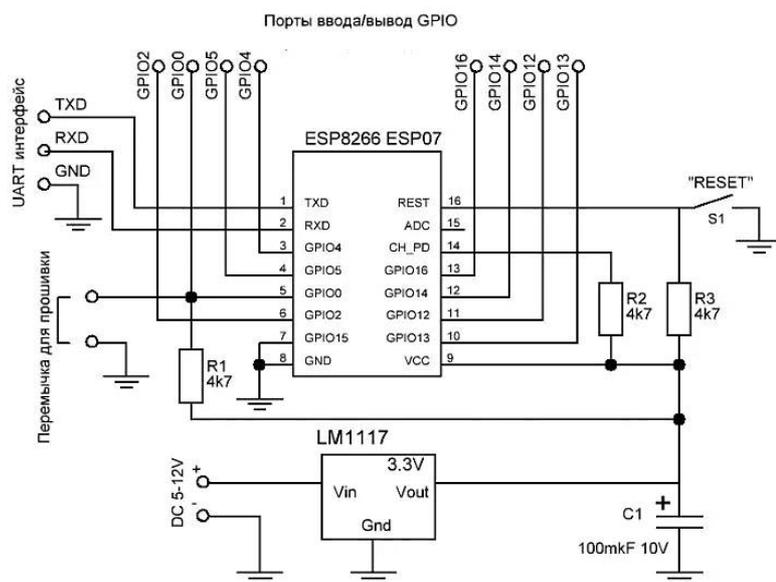


Рис. 2. Схема подключения ESP8266 ESP007

Каждый инерционный измерительный датчик выполняет определенные функции и измеряет соответствующие показатели, необходимые для контроля состояний конструкций. Эти датчики подключаются по цифровому интерфейсу I<sup>2</sup>C. Минимальный набор датчиков, с помощью которых можно следить за состоянием различных сооружений, состоит из: датчика давления, датчика температуры и датчика пространства [8].

В качестве модуля для определения пространственных характеристик предполагается использовать GY-9250 на микросхеме MPU-9250, так как он обладает низкой стоимостью, высокой производительностью, а также небольшим энергопотреблением [6]. В этот измерительный блок входят 3-х осевой гироскоп, 3-х осевой акселерометр и 3-х осевой магнитометр (магниторезистивный компас). В MPU-9250 объединены два кристалла: на одном размещён трехосевой гироскоп и трехосевой сенсор, а на втором – трехосевой магнитометр AK8963. Сведения, получаемые с сенсоров, оцифровываются АЦП, обрабатываются и передаются внешнему микроконтроллеру по шине I<sup>2</sup>C/SPI. С помощью трехосевого акселерометра можно получать информацию об углах крена и деформации сооружения в трехмерном пространстве. Трехосевой магнетометр служит для регистрации азимутальных угловых смещений.

Для определения просадки конструкции используется датчик атмосферного давления BMP280. Кроме того BMP280 способен измерять температуру. Управление возможно через интерфейсы I<sup>2</sup>C/SPI. Датчик имеет высокую точность, малые габариты, малое энергопотребление. Из показаний давления и температуры можно определить высоту, на которой находится датчик [7]. Следовательно, BMP280 также можно использовать как высотомер.

Питание измерительного макета осуществляется с помощью внешнего аккумулятора.

### Принцип работы

В данной работе программирование микроконтроллера нацелено на сбор данных с датчиков, накопление этих сведений в память и далее отправку их по единому каналу связи на приемное устройство. В качестве приемника можно использовать персональный компьютер (ПК). ПК собирает сведения с модулей, сохраняет и осуществляет их анализ с эталонным значением. Если показатели неудовлетворительные, то генерируется сообщение пользователю о превышении порогового значения [9].

Однако, ток потребления ESP8266 достаточно большой: 300 мА при запуске и передаче данных, 35 мА во время работы, 80 мА в режиме точки доступа [5]. А это в свою очередь сказывается на продолжительности работы системы в целом. Поэтому необходимо периодически уходить в режим сна и потом «проснуться» и так через определенные промежутки времени. Режим сна – это режим, при котором потребление микроконтроллера резко снижается и составляет порядка нескольких десятков микроампер. В этом режиме основная часть программы останавливает свою работу и потом через заданное время происходит «пробуждение» микроконтроллера, и выполнение программы продолжается.

Следовательно, используя этот режим ESP8266 можно довольно сильно экономить емкость источника питания.

### Выводы

В работе предлагается система сбора данных для контроля состояний конструкций. В представленной статье проведен анализ структуры макета, выделены основные технологические модули и описано их назначение.

К основным функциям системы можно отнести: регистрация угловых характеристик, измерение линейных движений, сбор, анализ и хранение данных, воспроизведение полученных сведений о состоянии конструкции, предупреждение о превышении пороговых значений.

Эта система будет полезной при вводе в действие новых объектов строительства, а также при мониторинге состояния сооружений архитектуры и уже имеющихся зданий, мостов и т.д. Ее использование приведёт к увеличению межремонтных сроков на основе периодического обследования состояний сооружений.

### 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).
4. Grosse C.U., Glaser S.D., Krüger M. Condition monitoring of concrete structures using wireless sensor networks and MEMS // Proceedings of SPIE, Simposium on Smart Structures & Materials, San Diego, California, March 2006.
5. ESP8266EX Datasheet [Электронный ресурс], URL: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf) (дата обращения 02.02.2023)
6. MPU-9250 DATASHEET [Электронный ресурс], URL: <http://datasheet.su/datasheet/InvenSense/mpu-9250> (дата обращения 04.02.2023)
7. BMP280 DATASHEET [Электронный ресурс], URL: <https://amperkot.ru/static/3236/uploads/datasheets/BST-BMP280> (дата обращения 05.02.2023)
8. Дж. Фрайден / Современные датчики / Справочник / Москва: Техносфера, 2005. - 592 с. ISBN 5 94836-050-4
9. Датчики и системы: методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации / тр. Междунар. науч.-техн. конф. с элементами научной школы для молодых ученых (г. Пенза, 22–26 октября 2012 г.) / под ред. Е. А. Ломтева, А. Г. Дмитриенко. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2012. – 330 с. ISBN 978-5-94170-494-1

УДК 62-933.2:62-932.4:533.9; ГРНТИ 49.01.81

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО СТОЛБА В КОЛЬЦЕВОМ ГЕЛИЙ-НЕОНОВОМ ЛАЗЕРЕ

М.В. Чиркин, А.Д. Крюков, В.Ю. Мишин, С.В. Устинов

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань*

*Аннотация.* Выполнена регистрация частотной зависимости комплексного сопротивления положительного столба в кольцевом гелий-неоновом лазере. Синтезирована эквивалентная схема замещения положительного столба.

*Ключевые слова:* лазерный гироскоп, положительный столб, комплексное сопротивление, двухлучевой разряд

## STUDY OF THE RESISTANCE OF A POSITIVE COLUMN IN A HELIUM-NEON RING LASER

M.V. Chirkin, A.D. Krykov, V.Yu. Mishin, S.V. Ustinov

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

*The summary.* The frequency dependence of the complex resistance of the positive column in a ring helium-neon laser has been recorded. An equivalent circuit for the positive column has been synthesized.

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

### Введение

В качестве датчиков угловых скоростей в бесплатформенных инерциальных навигационных системах (БИНС) летательных аппаратов широко используются лазерные гироскопы. Основным элементом лазерного гироскопа является кольцевой гелий-неоновый лазер (рисунок 1). Возбуждение активной среды кольцевого гелий-неонового лазера – осуществляется с помощью симметричного двухплечевого разряда постоянного тока [1].

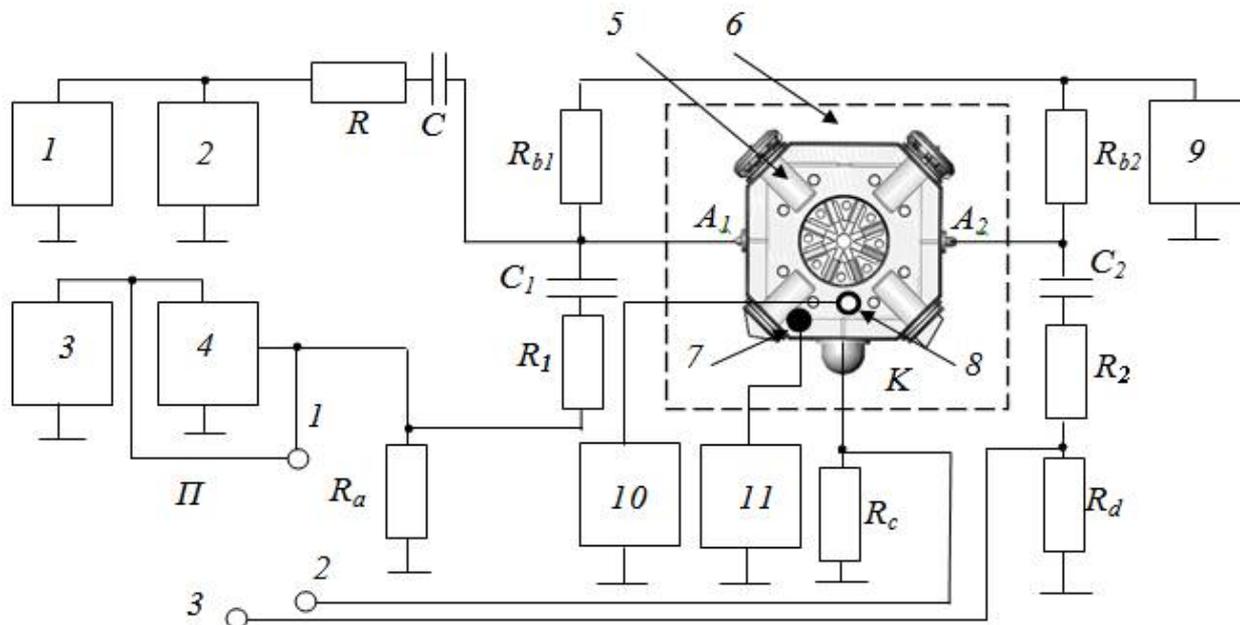


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – генератор ГЗ-111, 2 – частотомер, 3 – милливольтметр В7-27А/1, 4 – измеритель разности фаз Ф2-16, 5 – кольцевой лазер, 6 – теплоизолированный объем, 7 и 8 – термодатчики ТА-300S (установлены около катода на ситалловом моноблоке лазера), 9 – источник высокого напряжения, 10 и 11 – мультиметры цифровые АРРА-207, А1 и А2 – аноды, К – катод, П – трехпозиционный переключатель

В кольцевых лазерах должна быть обеспечена стабильность разряда в условиях длительной эксплуатации при минимально возможном токе в широком диапазоне измерения температуры окружающей среды. Прогресс в области производства высококачественных зеркал, формирующих резонатор кольцевого лазера, создает условия для значительного уменьшения тока разряда, что позволяет снизить рассеиваемую тепловую мощность и увеличить ресурс непрерывной работы лазера до 100 тысяч часов.

Практической реализации появившейся возможности препятствует неустойчивость стационарного состояния электрической цепи разряда [2,3], который включает два протяженных участка положительного столба, обладающих падающей вольт-амперной характеристикой. Отрицательное динамическое сопротивление плазмы, сохраняющееся до частот в сотни кГц, приводит к самовозбуждению реактивных колебаний, если ток разряда меньше пороговой величины [4].

Необходимую информацию для анализа устойчивости электрической цепи разряда способна предоставить частотная зависимость комплексного сопротивления разряда [1,2], которая отражает вклады различных процессов в отрицательное дифференциальное сопротивление.

Авторами [5] разработана экспериментальная методика регистрации температурной зависимости для линейной реакции симметричного двухплечевого разряда постоянного тока в кольцевом гелий-неоновом лазере на возмущения внешним гармоническим сигналом. Раз-

вита техника разделения комплексных сопротивлений положительного столба и прикатодных областей тлеющего разряда.

Цель работы – измерения частотной зависимости комплексного сопротивления положительного столба и синтез эквивалентной схемы замещения положительного столба.

### Экспериментальная установка и методика измерений

В качестве объекта исследований использован кольцевой гелий-неоновый лазер (рисунок 1), описанный в работе [1]. Прибор изготовлен на основе ситаллового моноблока и наполнен смесью гелия и неона в соотношении 16:1 до давления 750 Па. Разрядные промежутки ограничены медными катодами А1 и А2 и холодным катодом К из алюминия.

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

Таблица. Номиналы элементов измерительной цепи

Элемент	Номинал
R, кОм	$232,0 \pm 0,5$
$R_a$ , Ом	$449,5 \pm 0,5$
$R_d$ , Ом	$544,4 \pm 0,5$
$R_c$ , Ом	$558,4 \pm 0,5$
$R_1$ , кОм	$246,5 \pm 0,5$
$R_2$ , кОм	$174,8 \pm 0,5$
$R_{b1,2}$ , кОм	$1329 \pm 5$
C, нФ	$4,190 \pm 0,025$
$C_1$ , нФ	$5,062 \pm 0,025$
$C_2$ , нФ	$5,257 \pm 0,025$

Высокое напряжение подается на аноды от стабилизированного источника 9 через балластные резисторы  $R_{b1}$  и  $R_{b2}$ . Частотные зависимости комплексных сопротивлений  $Z$  и  $Z_c$  измерены в диапазоне частот 0,2 – 70 кГц. Для этого модулирующий гармонический сигнал с выхода генератора 1 подается на одно из плеч симметричного двухплечевого разряда через RC-цепочку; его частота контролируется с помощью частотомера 2. Делители анодных напряжений образованы цепочками  $R_a$ ,  $R_1$ ,  $C_1$  и  $R_d$ ,  $R_2$ ,  $C_2$ . Номиналы элементов измерительной цепи выбраны, с одной стороны, исходя из условий сохранения устойчивости разряда при установленном постоянном токе и, с другой стороны, для обеспечения амплитуд у регистрируемых гармонических напряжений, достаточных для измерения разностей фаз. Действующих значения переменных напряжений на резисторах  $R_{a,d,c} - U_1, U_2, U_3$  и разности фаз  $\varphi_2, \varphi_3$  зарегистрированы с помощью милливольтметра 3 и фазометра 4. Переключатель  $\Pi$  предназначен для поочередного соединения фазометра и милливольтметра с измерительными резисторами. В положении “1” на оба входа фазометра подаются одинаковые сигналы, что позволяет производить установку нуля на каждой частоте модуляции. Амплитуда гармонического напряжения на выходе генератора 1 выбиралась так, чтобы гарантировать линейность измеряемого отклика разряда на возмущение внешним сигналом.

На рисунке 2 приведена схема замещения по переменному току электрической цепи разряда, которая включает два комплексных сопротивления плеч положительного столба  $Z$  и

комплексное сопротивление  $Z_c$  прикатодной области, общей для обоих разрядных промежутков.

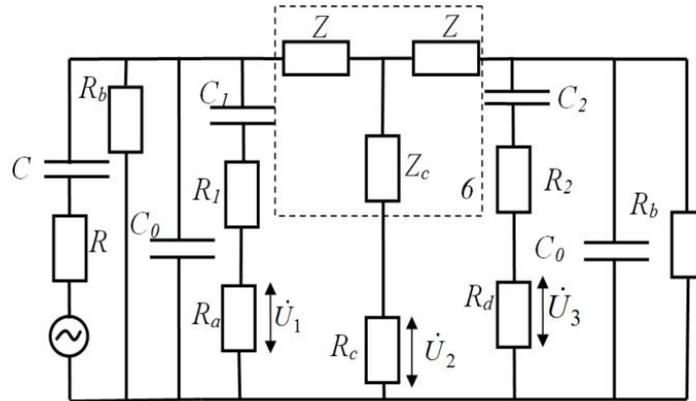


Рис. 2. Схема замещения экспериментальной установки по переменному току [5]

$\dot{U}_1$ ,  $\dot{U}_2$  и  $\dot{U}_3$  - комплексные амплитуды переменных составляющих регистрируемых напряжений

Анализ схемы замещения (рисунок 2), которая включает паразитные монтажные емкости  $C_0$  между анодами и экраном, позволяет связать комплексные сопротивления  $Z_c$  и  $Z$  с непосредственно измеряемыми величинами:

$$Z = \frac{R_c}{R_a} \cdot \frac{U_1 Z_1 R_d - \dot{U}_3 Z_2 R_a}{\dot{U}_2 R_d + 2 \cdot \dot{U}_3 \cdot R_c (1 + Z_2 Y)}, \quad (1)$$

где  $\omega = 2\pi f$  – циклическая частота модулирующего напряжения,

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

Измерения величины монтажной емкости с помощью прибора Е7-20 при выключенном разряде и отсоединенной цепочке  $C_2$ - $R_2$ - $R_d$  привели к результату  $C_0 = 3 \pm 0,2$  пФ.

Выражение (1) не учитывает токи смещения, текущие к экрану от модулированного разряда через ситалловый моноблок. Расчет линии передачи, образованной положительным столбом разряда с комплексным сопротивлением единицы длины  $Z/l$  и распределенной емкостью  $c$ , позволяет в первом приближении определить поправку  $\Delta Z$  для комплексного сопротивления  $Z$ , рассчитанного по формуле (1) [5]:

$$\Delta Z = -2i\omega c l Z \dot{U}_3 R_c \cdot \frac{Z_2 + Z + Z_2 Z Y}{\dot{U}_2 R_d + 2 \dot{U}_3 R_c \cdot (1 + Z_2 Y)}. \quad (4)$$

### Результаты измерений

На рисунке 3 приведена экспериментально зарегистрированная частотная зависимость комплексного сопротивления положительного столба при температуре моноблока 36 °С. Данные прямых измерений обрабатывались с помощью соотношений (1) – (4). Результаты представлены в виде годографа на комплексной плоскости ( $ReZ$ ,  $ImZ$ ).

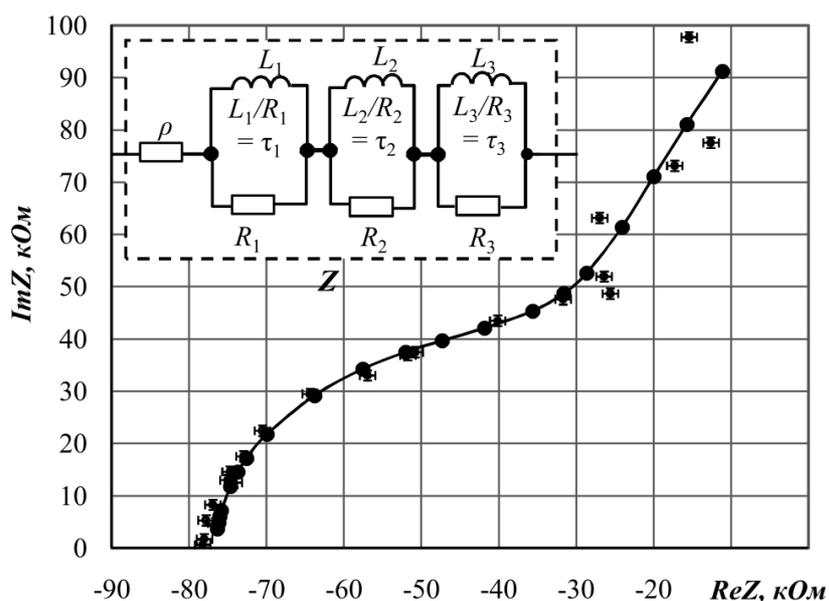


Рис. 3. Частотная зависимость комплексного сопротивления положительного столба в одном из плеч кольцевого лазера и её схема замещения. Сплошная кривая – аппроксимация экспериментальных данных теоретической зависимостью. Постоянная составляющая тока в разряде 0,75 мА

Комплексное сопротивление положительного столба разряда  $Z$  можно описать с помощью эквивалентной схемы замещения, содержащей несколько последовательно включенных  $RL$ -цепочек. В работе [21] показано, что наилучшую аппроксимацию обеспечивает эквивалентная схема, содержащая три последовательно включенные  $RL$  цепочки (рисунок 3). Параметры эквивалентной схемы замещения определяются, с помощью нескольких этапов последовательной аппроксимации методом наименьших квадратов частотных зависимостей мнимой и действительной частей комплексного сопротивления положительного столба. На рисунке 3 приведена частотная зависимость комплексного сопротивления для синтезированной схемы замещения положительного столба (сплошная кривая).

Синтезированная схема замещения положительного столба далее может быть использована для анализа устойчивости электрической цепи газового разряда.

### 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. Александров Л.С., Перебякин В.А., Степанов В.А., Чиркин М.В. Динамика пространственно однородной плазмы разряда в инертных газах // Физика плазмы. 1989. Т. 15. № 4. с. 467-4734.
3. Морозов Д.А., Степанов В.А., Чиркин М.В. Распространение возмущений в экранированном канале ионизированного газа // Известия академии наук. Серия физическая. 2000. Т. 64, № 7. с. 1423-1430.
4. Удальцов Б.В., Царьков В.А. Исследование реактивных колебаний в разряде симметричного двуханодного неон-гелиевого лазера // Радиотехника и электроника. 1986. Т. 31, № 5. с. 938-944
5. Молчанов А.В., Морозов Д.А., Устинов С.В., Чиркин М.В. Модуляционные исследования газоразрядной плазмы в кольцевом гелий-неоновом лазере // Вестник РГРТУ. 2015. №54, с. 115 – 120

УДК 004.021; ГРНТИ 59.31.31

## МОДЕРНИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА РЕВЕРСИВНОГО СЧЕТА ИМПУЛЬСОВ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ КОЛЬЦЕВОГО ЛАЗЕРА

А.Е. Серебряков, Д.Б. Тепцов, С.В. Витязев

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, sea89s@yandex.ru, daniil.teptsow@yandex.ru*

*Аннотация.* В работе рассматривается проблема регистрации больших угловых скоростей при цифровой реализации метода реверсивного счета импульсов, сформированных на основе квадратурных сигналов лазерного гироскопа. Предложен модифицированный метод реверсивного счета импульсов не имеющий такой проблемы.

*Ключевые слова:* лазерный гироскоп, метод реверсивного счета, клиппирование, интерполяция.

## MODERNIZATION OF THE ALGORITHM FOR REVERSE INFORMATION PULSES COUNTING OF A RING LASER

A.E. Serebryakov, D.B. Teptsov, S.V. Vityazev

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, sea89s@yandex.ru, daniil.teptsow@yandex.ru*

*Annotation.* The paper considers the problem of registering large angular velocities in the digital implementation of the method of reverse counting of pulses generated on the basis of quadrature signals of a laser gyroscope. A modified method of reverse pulse counting is proposed that does not have such a problem.

*Keywords:* laser gyroscope, reverse counting method, clipping, interpolation.

На данный момент технологические параметры лазерных гироскопов (ЛГ) практически достигли теоретического предела, что говорит о необходимости повышения точности данных устройств с помощью новых методов. С другой стороны, в развитии микропроцессорной техники в последние годы наблюдается существенный скачок, что создает повышенный интерес разработчиков к современным алгоритмам цифровой обработки выходных сигналов ЛГ.

Классическая система съема информации (рис. 1, а) об угловых перемещениях и режимах работы кольцевого лазера включает в себя три фоточувствительных элемента – пару мощностных фотодиодов и один вдвоенный - сигнальный. Мощностные фотодиоды используются для регистрации мощности лазерного излучения для настройки на центр кривой усиления кольцевого лазера, сигнальный фотодиод предназначен для регистрации квадратурных сигналов, которые несут информацию о угловых перемещениях. Данная конструкция требует два полупрозрачных зеркала, а так же громоздкую схему для обработки сигналов: информация с сигнального фотодиода обрабатывается с использованием реверсивного счетчика, осуществляющего подсчет переход синусного сигнала через ноль, знак счета определяется фазой между квадратурными сигналами. Данные со счетчика оцифровываются и поступают на схему обработки, рассчитывающую угол поворота. Данные с мощностных фотодиодов так же оцифровываются и поступают на схему управления периметром кольцевого лазера.

Развитии микропроцессорной техники позволило упростить вышеуказанную схему и исключить из нее мощностные фотодиоды. В данной конструкции отсутствуют два мощностных фотодиода – информация о мощности излучения в кольцевом лазере рассчитывается по величине амплитуды или постоянной составляющей квадратурных сигналов [1,2].

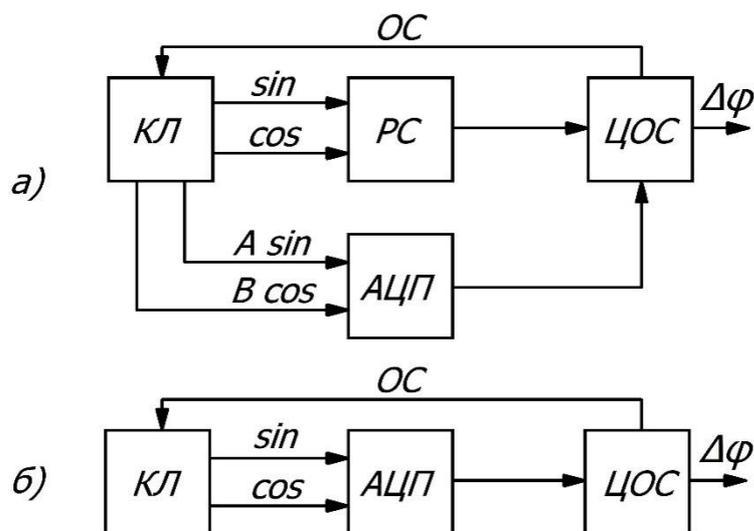


Рис. 1 Функциональные схемы систем обработки информационных сигналов с КЛ:

а) с использованием реверсивного счетчика и сигналов с мощных фотодиодов;

б) с использованием только информационных сигналов КЛ.

КЛ – кольцевой лазер, РС- реверсивный счетчик, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ЦОС – блок цифровой обработки сигналов, ОС – система обратной связи,  $\sin$ ,  $\cos$  – квадратурные сигналы,  $A \sin$ ,  $B \cos$  – сигналы с мощных фотодиодов

### Метод реверсивного счета импульсов

Основной подход, используемый в настоящее время при расчете угловых перемещений лазерного гироскопа, заключается в процедуре реверсивного счета импульсов, сформированных на основе квадратурных сигналов (рис. 2) [3].

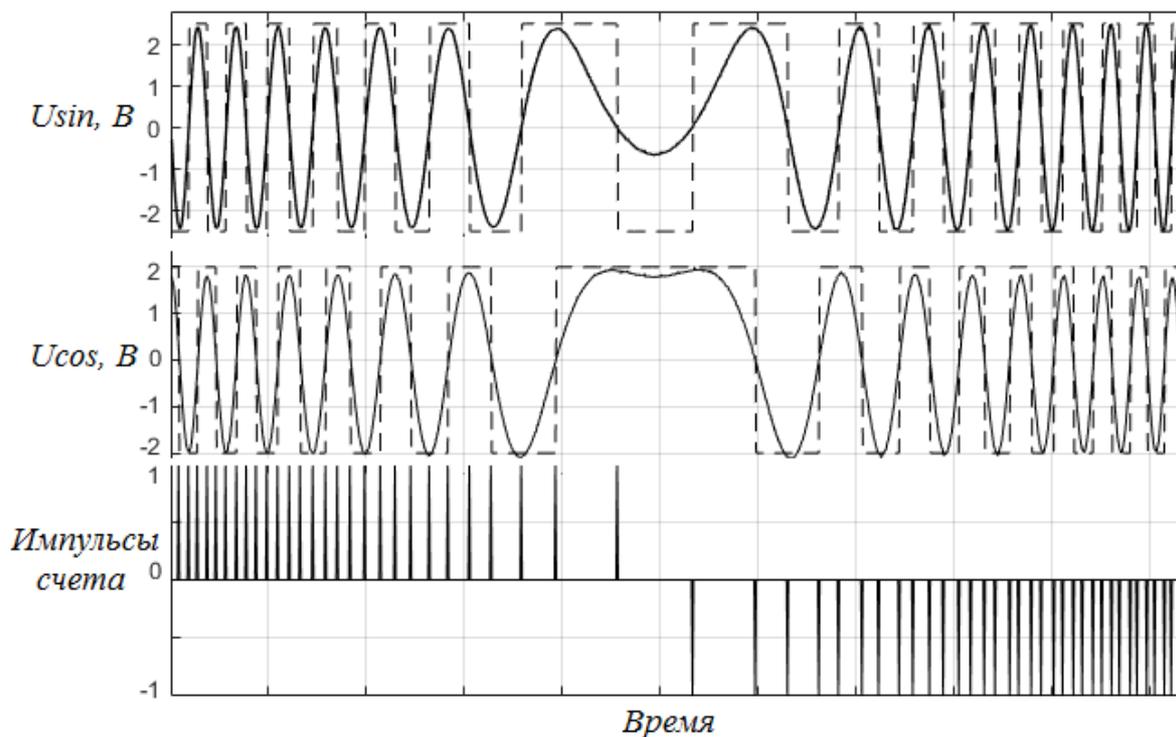


Рис. 2. Выделение импульсов счета из квадратурных сигналов лазерного гироскопа.

$U_{\sin}$ ,  $U_{\cos}$  – квадратурные сигналы лазерного гироскопа. Пунктирная кривая - сигнал на выходе компаратора.

Процедура реверсивного счета импульсов (РСИ) включает следующие стадии:

- преобразование квадратурных сигналов в сигнал прямоугольной формы с помощью компаратора (клиппирование);
- преобразование спадающих и возрастающих участков клиппированных сигналов в импульсы счета;
- реверсивный счет импульсов в зависимости от фазового соотношения между квадратурными сигналами
- подавление с помощью режекторного фильтра составляющей выходного сигнала, связанной с колебаниями кольцевого лазера (вибрационной подставкой).

Данный метод не требует больших вычислительных мощностей и наиболее прост в практической реализации.

Для проверки работы метода РСИ была использована математическая модель лазерного гироскопа:

$$U_{\cos}(t) = U_{\cos,0} + U_{\cos,m} \cos(\psi + \varphi_c), \quad U_{\sin}(t) = U_{\sin,0} + U_{\sin,m} \sin(\psi + \varphi_s).$$

При слабой связи встречных волн в кольцевом лазерном гироскопе изменения фазы Саньяка описывает дифференциальное уравнение [2]:

$$\frac{1}{K} \frac{d\psi}{dt} = \Omega - \omega_L \sin(\psi + \rho), \quad (1)$$

где  $\Omega$  – постоянная угловая скорость корпуса лазерного гироскопа;

$\omega_L$  и  $\rho$  – параметры статического порога захвата;

$K$  – масштабный коэффициент.

Второе слагаемое в уравнении (1) отражает слабую связь встречных волн.

Дифференциальное уравнение (1) решалось численно методом Рунге-Кутты 4-го порядка. Были выбраны следующие параметры:

- периметр резонатора 28 см;
- параметры захвата  $\omega_L = 0,01$  °/с,  $\rho = 0,15$  рад;
- заданная угловая скорость вращения  $\Omega$  изменялась по синусоидальному закону с амплитудным значением 160 °/с ;
- частота дискретизации 2,5 МГц.

На рисунке 3 представлен график зависимости восстановленной с помощью метода РСИ угловой скорости. При угловых скоростях выше 130 °/с возникает шумовой сигнал с амплитудой до 15 °/с.

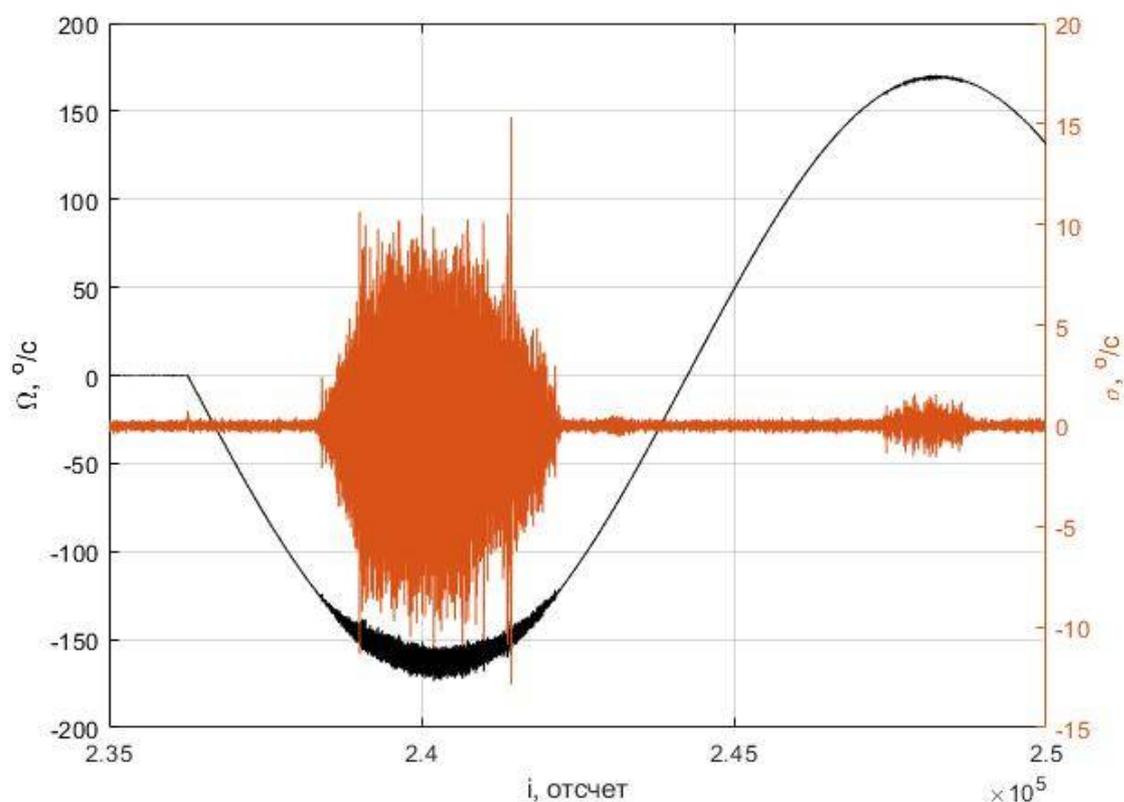


Рис. 3. Восстановленная угловая скорость  $\Omega$  и шум  $\sigma$ , связанный с неверным определением фазы квадратурных сигналов

Детальный анализ процесса работы метода РСИ показал, что наблюдаются ошибки счета импульсов, связанные с невозможностью учета фазы квадратурных сигналов (рис. 4). Это явление возникает когда на период квадратурных сигналов попадает не более 4 оцифрованных отсчетов.

Указанную проблему легко исправить повышением частоты дискретизации аналого-цифрового устройства в схеме регистрации квадратурных сигналов. Но это приведет к повышению требований к микропроцессору и электромагнитной совместимости при трассировке проводящего рисунка на печатной плате.

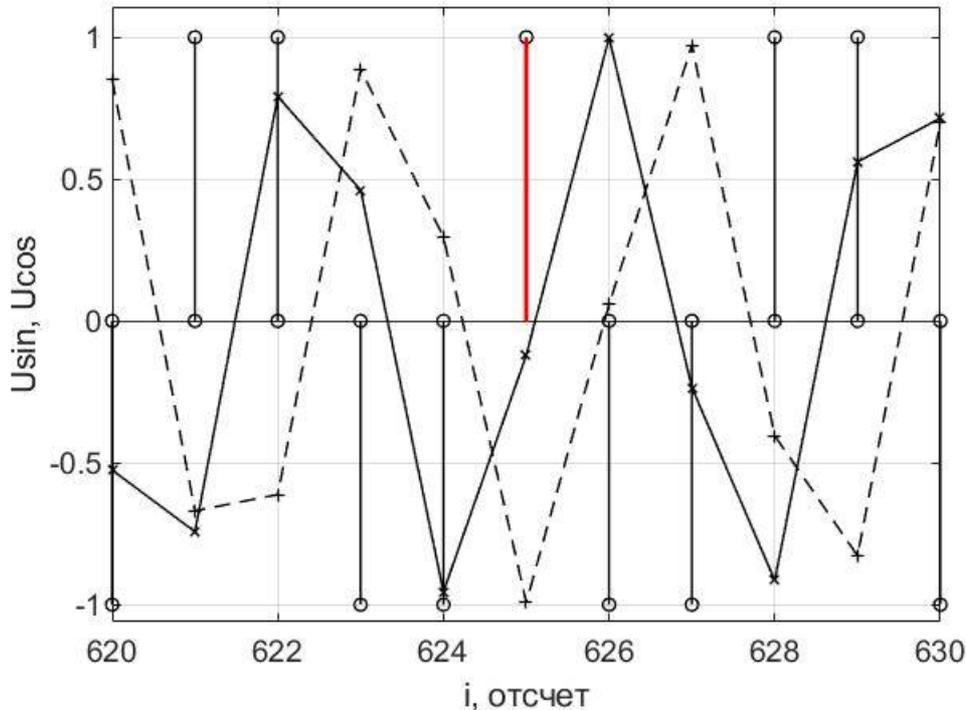


Рис. 4. Неверный счет импульсов в классическом методе РСИ.  
Красной линией обозначен неправильно определенный импульс счета.  
Черная сплошная и прерывистые линии – квадратурные сигналы ЛГ.  
Вертикальные линии – импульсы счета.

### Модернизированный метод реверсивного счета импульсов

Альтернативный подход – поиск по оси времени точного места перехода квадратурных сигналов через ноль с использованием линейной интерполяции по значениям соседних отсчетов, имеющих противоположенные знаки.

Для вычисления точного места перехода через ноль по оси времени предложена следующая функция:

$$t = 1 - U_i / (U_{i+1} - U_i) \quad (2)$$

Для вычисления значений квадратурных сигналов в междуузлии в найденный момент времени  $t$  использовалась следующая формула:

$$U = (U_{i+1} - U_i) * t + U_i * (U_{i+1} - U_i). \quad (3)$$

Таким образом, модернизированная процедура реверсивного счета импульсов (РСИ) включает следующие стадии:

- поиск отсчетов квадратурных сигналов, где изменяется их знак;
- нахождение по формуле (2) точного момента времени перехода квадратурных сигналов через 0 в междуузлии найденных отсчетов;
- определение фазового соотношения между квадратурными сигналами с помощью соотношения (3) в момент времени, найденный на предыдущей стадии;
- подсчет числа перехода квадратурных сигналов через 0 с учетом их фазового соотношения;
- подавление с помощью режекторного фильтра составляющей выходного сигнала, связанной с колебаниями кольцевого лазера (вибрационной подставкой).

Реализация приведенного метода показала высокую эффективность при незначительном увеличении требований к производительности микропроцессора. Регистрируемая без дополнительных шумов угловая скорость при частоте дискретизации квадратурных сигналов 2,5 МГц составила 400 %/с. Регистрации больших угловых скоростей невозможно из-за ограничений Котельникова для оцифрованных сигналов.

### Библиографический список

1. С.В. Витязев, Д.В. Валуйский, В.Ю. Мишин, А.В. Молчанов, А.Е. Серебряков, М.В. Чиркин Определение фазы Саньяка в цифровом лазерном гироскопе при применении DSP процессора // Навигация и управление летательными аппаратами №32, 2021, с.22-37
2. A.V. Molchanov, V.A. Belokurov, M.V. Chirkin, M.B. Kagalenko, V.I. Koshelev, V.Yu. Mishin, D.A. Morozov The application of advanced processing technique to the triad of precision laser gyroscopes // XXIII ICINS 2016 – Proceeding, SPb May 2016, p.p. 120-122
3. Д.П. Лукьянов, В.Я. Распопов, Ю.В. Филатов Прикладная теория гироскопов – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2015. – 316с.

УДК 621.37

## МИКРОВОЛНОВАЯ ТЕРАПИЯ В СТОМАТОЛОГИИ

О.А. Милованова\*, Т.Г. Авачева\*\*, Ю.М. Тимошкина\*\*\*

*Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова,  
Российская Федерация, г. Рязань,*

*\*o.a.milovanova@mail.ru, \*\*t.avacheva@rzgmu.ru, \*\*\*julla.timo@yandex.ru*

*Аннотация.* В работе рассматриваются особенности и применение в стоматологии таких физиотерапевтических методов как ДМВ-терапия и СМВ-терапия. Приводятся их основные особенности, достоинства и противопоказания.

*Ключевые слова:* микроволновая терапия, ДМВ-терапия и СМВ-терапия, стоматология.

## MICROWAVE THERAPY IN DENTISTRY

O.A. Milovanova\*, T.G. Avacheva\*\*, Yu.M. Timoshkina\*\*\*

*Ryazan State Medical University named after Academician I.P. Pavlova,  
Russian Federation, Ryazan,*

*\*o.a.milovanova@mail.ru, \*\*t.avacheva@rzgmu.ru, \*\*\*julla.timo@yandex.ru*

*The summary.* The paper discusses the features and application in dentistry of such physiotherapeutic methods as DMV therapy and CMV therapy. Their main features, advantages and contraindications are given.

*Keywords:* microwave therapy, DMV therapy and CMV therapy, dentistry.

Микроволновая терапия – легкий и надежный способ электролечения, с помощью которого можно за относительно небольшой промежуток времени достигнуть хороших терапевтических результатов (эффектов). Второе название микроволновой терапии – это СВЧ-терапия, или сверхвысокочастотная терапия. В основе СВЧ-терапии лежит метод воздействия на больного электромагнитными колебаниями, длина волны которых колеблется в промежутке от 1 мм до 1 м, а частота – от 300 до 3000 МГц. В настоящее время в микроволновой терапии используют волны двух диапазонов: дециметровые (от 10 см до 1 м) и сантиметровые (от 1 до 10 см). Учитывая диапазон волн, выделяют 2 типа СВЧ-терапии: дециметроволновая, или ДМВ-терапия, и сантиметроволновая, или СМВ-терапия.

Микроволновая терапия является одним из видов лечения и профилактики стоматологических заболеваний, а также болезней и травм ротовой полости и структур, окружающих её. Микроволны применяют в лечебных целях. Они в значительном количестве отражаются от кожи и границы раздела двух различных сред организма, но всё-таки большое количество

волн проникает внутрь тела, а именно в ткани и клетки. Волны сантиметрового диапазона проникают на глубину 5-6 см, а дециметрового – на 7-10 см и глубже. Микроволны представляют собой электромагнитные колебания, которые поглощаются тканями и равномерно распространяются в них. Поглощение волн приводит к образованию внутреннего (эндогенного) тепла. Наиболее подвержены прогреванию среды и ткани, имеющие в своем составе большое количество воды, например, кровь, лимфа или слизистые оболочки, в то время как кожа и подкожная жировая клетчатка практически не поглощают микроволны и не нагреваются. Это связано с изменением положения относительно своей оси молекул воды, которые представляют собой диполи. Волны дециметрового диапазона раздражают ткани меньше, чем сантиметрового.

Показаниями для СВЧ-терапии являются: воспалительные заболевания периодонта (периодонтит), воспалительные заболевания пародонта (пародонтит), воспалительные заболевания дёсен (гингивит), воспалительные заболевания полости рта (стоматит), воспалительные заболевания лимфатических сосудов (лимфаденит), воспалительные заболевания слюнных желёз (сиалоденит), воспалительные заболевания альвеол (альвеолит), воспалительные заболевания тканей, которые окружают коронку зуба, при затрудненном его прорезывании (перикоронарит), воспалительные заболевания челюсти (остеомиелит). Также микроволны используют для ускорения восстановления после переломов челюстей, при повреждении височнонижнечелюстного сустава и против болей после операций на зубы или после их удаления.

Также микроволновая терапия имеет большое количество противопоказаний, наличие которых исключает возможность проводить её. СВЧ-терапию нельзя проводить при присутствии металла в зоне воздействия и в проекции зоны, на которое идёт воздействие, например, наличие коронок, неснимаемых металлических пластинок или протезов, брекет-системы, ретейнеров, а также пирсинга или других металлических украшений, наличие у пациента вживленных электродов, имплантатов. Серьезным противопоказанием к проведению микроволнового лечения является наличие у пациента установленного кардиостимулятора. Недопустимо проведение СВЧ-терапии при присутствующих у пациента системных болезнях крови таких, как снижение уровня гемоглобина – анемии, и опухолевые заболевания – гемобластозы, а также при склонности к кровотечениям. Нарушение кровоснабжения облучаемого участка, потеря болевой или температурной чувствительности кожи (в т.ч. и в результате анестезии) также является противопоказанием к проведению СВЧ-терапии. При гнойных процессах, происходящих в придаточных пазухах носа (верхнечелюстная, или гайморова, пазуха, лобная пазуха, клиновидная, или основная, пазуха, а также решетчатые лабиринты решетчатой кости) нельзя применять микроволновую терапию. Также СВЧ-терапия противопоказана при наличии у пациента злокачественных онкологических заболеваний, диабетической ретинопатии 4 степени, эпилепсии, лихорадки воспалительных заболеваний височнонижнечелюстного сустава (артрит), заболеваний щитовидной железы (различные виды зоба, аутоиммунный и подострый тиреоидиты, гипотиреоз, тиреотоксикоз) при воздействии на ее проекцию. Также проведение любого вида СВЧ-терапии строго противопоказано при беременности.

Рассмотрим конкретнее особенности и применение ДМВ-терапии и СМВ-терапии. ДМВ-терапия представляет собой использование электромагнитных колебаний дециметрового диапазона с частотой от 300 до 3000 МГц для проведения лечения или профилактических процедур. Для проведения ДМВ-терапии используют такие приборы, как «Ранет», «Волна-2», «Солнышко». Прибор «Ранет» относительно небольшого размера (41,5\*39,5\*20 (длина\*ширина\*высота, в см)) и среднего веса (15 кг), имеет 4 излучателя – 2 внутрисполостных и 2 керамических цилиндрических. Преимущества его заключаются в том, что с помощью него проводится бесконтактная процедура: излучатели находятся на расстоянии примерно равном 0,5 см от излучаемого участка тела, это обеспечивает дополнительную безо-

пасность пациента. При использовании прибора «Ранет» не наблюдается осложнений или отрицательных эффектов от процедур, наоборот, при систематическом проведении лечебных мероприятий (курсов лечения) наблюдается снижение сроков лечения примерно в 2-2,5 раза по сравнению с использованием только медикаментозного лечения. Также ускорение лечения происходит при сочетании ДМВ-терапии с использованием «Ранета» с медикаментозными препаратами. «Ранет» воздействует даже на структурно-функциональные единицы клетки, тем самым усиливая терапевтический эффект и оказывая воздействие на весь организм, исправляя нарушения, вызванные болезнями или патологическими процессами. Вторым прибором – это «Волна-2», он имеет достаточно большие размеры по сравнению с «Ранетом» и «Солнышком» (53,5\*63,5\*120 (длина\*ширина\*высота, в см)) и большой вес (80 кг), но снабжен самоориентирующимися колёсами, что способствует удобному управлению, транспортировке и перемещению прибора и позволяет установить прибор в любом удобном месте, учитывая индивидуальные особенности лечения пациента. «Волна-2» обладает рядом преимуществ: действуя дозированным электромагнитным излучением дециметрового диапазона и электромагнитным полем, образующимся в результате действия электромагнитного излучения, на пораженные или воспаленные участки, мы наблюдаем быстрый положительный эффект от процедур, который заметен уже после первых применений. Вследствие теплового эффекта и нагревания пораженных участков, наблюдается улучшение химических и биологических процессов, происходящих в тканях, органах, отдельных клетках и средах между ними, это приводит к снятию болезненных ощущений и ускорению процесса регенерации. Отличительной особенностью данного прибора является то, что его используют для проведения физиотерапевтических процедур для людей с ограниченными возможностями (инвалидов), маленьких детей и людей пожилого возраста, а также его применяют в том случае, если процедура физиотерапии будет являться первой медицинской помощью. Третий аппарат – «Солнышко» – отличается малыми размерами и компактностью (23\*23\*9 (длина\*ширина\*высота, в см)) и небольшим весом (не более 1 кг), имеет 5 излучателей – 2 круглых, 2 плоских и 1 стержневой. Отличительной особенностью этого аппарата является то, что он воздействует высокочастотным электромагнитным полем дециметрового диапазона на отдельные участки тела и внутренних частей или полостей человеческого организма (точечное воздействие). Так же, как и прибор «Волна-2», «Солнышко» может использоваться для лечения и профилактики различных заболеваний у детей. Это возможно благодаря тому, что прибор имеет встроенный индикатор мощности, который можно настраивать на нужную силу, а также есть специальный режим пониженной мощности, рекомендуемый для использования при лечении детей [1,2].

Рассмотрим конкретный случай использования ДМВ-терапии. ДМВ-терапию применяют для воздействия на области верхнечелюстной (гайморовой) пазухи. Керамический цилиндрический излучатель диаметром 40 мм от аппарата «Ранет» накладывают на расстоянии около 5 мм на пораженную область гайморовой пазухи или в область проекции данной пазухи. Прибор включают в сеть, задают мощность от 5 до 7 Вт и начинают процедуру, продолжительность которой составляет 8-10 минут (в некоторых случаях максимальное время составляет 12 минут). Данную процедуру можно проводить как на одну часть пазухи (правую или левую), так и на всю пазуху сразу, процедуры проводят каждый день или через день, курс лечения составляет от 10 до 12 дней в зависимости от частоты проведения процедур и их продолжительности по времени. Также для проведения ДМВ-терапии на область гайморовой пазухи можно использовать аппарат «Ромашка». Излучатель от данного аппарата накладывают в область проекции верхнечелюстной пазухи, включают аппарат, задают мощность от 3 до 6 Вт и начинают процедуру, продолжительность которой составляет 6-8 минут. Так же, как и в случае с использованием аппарата «Ранет», данную процедуру можно проводить как на одну часть пазухи (правую или левую), так и на всю пазуху сразу, процедуры

проводят каждый день или через день, курс лечения составляет от 10 до 12 дней в зависимости от частоты проведения процедур и их продолжительности по времени.

Эффект после проведения ДМВ-терапии наблюдается практически сразу после проведения нескольких процедур. Электромагнитные дециметровые волны, проникая в органы и ткани на глубину около 10 см, способствуют образованию магнитного поля, которое в свою очередь оказывает тепловой эффект, происходит прогревание тканей и органов в целом, их температура равномерно увеличивается на 4-6°. Это приводит к расширению капилляров, повышению их проницаемости и усилению микроциркуляции кровотока, вследствие этого улучшается метаболизм и трофические процессы в тканях и отдельных клетках, происходит устранение застойных процессов и отечности. Также наблюдается стимуляция барьерных функций соединительной ткани и организма в целом, повышается работа иммунной системы, повышается содержание Т-лимфоцитов, В-лимфоцитов и некоторых видов иммуноглобулинов, повышается регенерационная способность клеток и тканей, снижается уровень воспалительных процессов в тканях и органах, оказывается обезболивающее действие.

Стоит отметить, что ДМВ-терапия имеет частные противопоказания такие, как: повышенное артериальное давление (выше 160 мм рт.ст.) – гипертония, тиреотоксикоз (заболевание, связанное с повышением содержания гормонов щитовидной железы в крови), эпилепсия (заболевание головного мозга, проявляющееся в повторяющихся приступах, судорогах и сопровождающееся потерей сознания), нарушение свертываемости крови, наличие кардиостимулятора. Также ДМВ-терапия противопоказана детям до 2 лет.

Перейдем к СМВ-терапии. СМВ-терапия – это воздействие электромагнитными колебаниями сверхвысокой частоты (в России используется частота 2375 МГц, эта частота соответствует длине волны, равной 12,6 см) сантиметрового диапазона на определенные (конкретные) участки тела человека, ткани или органы, применяемое в качестве лечения или профилактики заболеваний. Для проведения СМВ-терапии используют такие приборы, как «Луч-4», «Луч-11» и «Луч-58». Прибор «Луч-4» среднего размера (80\*60\*25 (длина\*ширина\*высота, в см)) и среднего веса (23 кг), имеет 6 излучателей – 3 наружных различного диаметра (диаметр первого – 20 мм, второго – 35 мм, третьего – 110 мм) и 3 внутриполостных (ректальный, вагинальный и ушной). Особенность данного аппарата в том, что создает направленный поток электромагнитных колебаний и электромагнитного поля (возникает вследствие электромагнитных колебаний), обладающих энергией, которая воздействует только на пораженные участки тканей, органов (точечное действие). Благодаря точечному направленному действию колебаний и поля появляется возможность проводить СМВ-терапию в щадящем режиме, без воздействия на здоровые ткани и органы, находящиеся рядом с пораженными. Это свойство данного прибора позволяет применять его для лечения и профилактики заболеваний у детей. Также при воздействии прибором «Луч-4» происходит образование и выделение тепла. Особенность заключается в том, что тепло выделяется не в жировые ткани, а непосредственно в мышечные. Это способствует ускорению выздоровления, а в сочетании СМВ-терапии, проводимой аппаратом «Луч-4», и медикаментозных препаратов ускоряет процесс выздоровления практически в 2-2,5 раза. Второй прибор – «Луч-11» – так же имеет средние размеры (55\*25\*53 (длина\*ширина\*высота, в см)), как и «Луч-4», и среднюю массу (25 кг), содержит 5 излучателей разной формы и назначения. Устройство отличается относительно небольшими габаритами, способствует удобному управлению, транспортировке и перемещению прибора и позволяет установить прибор в любом удобном месте, учитывая индивидуальные особенности лечения пациента. Стоит учитывать, что волны, испускаемые данным прибором, стимулируют деятельность эндокринной системы, поэтому данный прибор следует с осторожностью применять при облучении органов, находящихся вблизи щитовидной и паращитовидных желез, а также их проекции. Данный прибор обладает широким спектром действия и чаще остальных применяется для лечения и профилактики стоматологических заболеваний. Также данный прибор применяется в восстановле-

нии после операций, проводимых на челюстно-лицевой области, благодаря «Луч-11» происходит более быстрое заживление ран и уменьшение воспалений на лице. Третий аппарат – «Луч-58» – отличается от всех остальных большими размерами (168\*61\*51 (длина\*ширина\*высота, в см)) и большим весом (около 90 кг), имеет 4 излучателя – три цилиндрической формы различных диаметров (диаметр первого 9 см, второго – 11 см, третьего – 14 см) и один прямоугольной формы, прибор может быть, как стационарным, так и передвижным (зависит от наличия специальных колес для передвижения прибора). Наличие самоориентирующихся колес способствует удобному управлению, транспортировке и перемещению прибора и позволяет установить прибор в любом удобном месте, учитывая индивидуальные особенности лечения пациента. Процедуру с данным прибором проводят сидя или лежа (стоя нельзя), предварительно сняв все металлические предметы со всего тела во избежание получения ожога вследствие их нагрева и одежду. Также излучатель не накладывают напрямую на тело, его располагают на расстоянии примерно равном 7-8 см от поверхности тела. Больной до процедуры принимает удобное положение, в котором он будет находиться все время процедуры (желательно вообще не изменять исходного положения тела), а после проведения процедуры пациент обязательно должен отдыхать как минимум 20-25 минут [3,4].

Рассмотрим конкретные случаи использования СМВ-терапии. СМВ-терапию применяют для воздействия на периодонт зуба, пародонт, на область верхнечелюстных (гайморовых) пазух и при переломах челюстей. При воздействии на периодонт зуба, который предварительно прошел трепанацию (вскрытие) и очистку корневых каналов, излучатель диаметром 1,5 см накладывают на кожу в области проекции пораженного зуба. Прибор включают в сеть, задают мощность от 1 до 3 Вт и начинают процедуру, продолжительность которой составляет около 6 минут. Данную процедуру проводят отдельно на каждый зуб (желательно последовательно проводить процедуру на каждый зуб, не совмещая несколько зубов за один сеанс), процедуры проводят строго каждый день, курс лечения составляет от 2 до 5 дней (2-5 процедур) в зависимости от продолжительности процедур по времени. При воздействии на пародонт зуба излучатель диаметром 3,5 см накладывают на кожу правой и левой щек поочередно. Прибор включают в сеть, задают мощность от 3 до 5 Вт и начинают процедуру, продолжительность которой составляет около 5 минут на каждую из щек (в сумме время воздействия на обе щеки за один сеанс не должно превышать 10 минут). Данную процедуру проводят каждый день или через день, курс лечения составляет от 10 до 12 дней (10-12 процедур) в зависимости от частоты проведения процедур и их продолжительности по времени. При воздействии на область верхнечелюстных (гайморовых) пазух излучатель диаметром 3,5 см от аппарата «Луч-3» накладывают контактно (без воздушного зазора) на область пораженной верхнечелюстной (гайморовой) пазухи. Прибор включают в сеть, задают мощность от 1 до 4 Вт (при этой мощности оказывается тепловой эффект) или от 3 до 6 Вт (при этой мощности оказывается слаботепловой эффект) и начинают процедуру, продолжительность которой составляет около 5-8 минут на каждую из зон пазухи поочередно, в сумме время воздействия за один сеанс не должно превышать 20 минут. Данную процедуру проводят строго ежедневно, курс лечения составляет от 12 до 14 дней (12-14 процедур) в зависимости от продолжительности процедур по времени. При воздействии на область челюстей при переломе излучатель диаметром 3,5 см аппарата «Луч-2» накладывают на кожу в области проекции переломленной кости. Прибор включают в сеть, задают мощность от 2 до 6 Вт и начинают процедуру, продолжительность которой составляет около 5-6 минут. Стоит помнить, что при двусторонних переломах верхних или нижней челюстей, происходит воздействие на две области (два поля), это воздействие проводится поочередно на обе области, и суммарное время воздействия строго не должно превышать 10 минут. Данную процедуру проводят каждый день или через день, курс лечения составляет от 10 до 12 дней (10-12 процедур) в зависимости от частоты проведения процедур и их продолжительности по времени.

Эффект после проведения СМВ-терапии наблюдается практически сразу после проведения нескольких процедур. Электромагнитные сантиметровые волны, проникая в органы и ткани на глубину около 3-5 см, способствуют образованию магнитного поля, которое в свою очередь оказывает тепловой эффект, происходит прогревание тканей, их температура равномерно увеличивается. Это приводит к расширению капилляров, повышению их проницаемости и усилению микроциркуляции кровотока, вследствие этого улучшается метаболизм и трофические процессы в тканях и отдельных клетках, происходит устранение застойных процессов и отечности. Также наблюдается снижение уровня воспалительных процессов в тканях и органах, оказывается обезболивающее и бактериостатическое действие, происходит стимуляция репаративных процессов и иммуномодулирующих эффектов, наблюдается рассасывание фиброзной ткани и размягчение рубца, при слаботепловых дозах СМВ-терапия оказывает гипотензивное действие [5].

Перечисленные методики микроволновой терапии эффективно применяются в стоматологии. Вышеуказанный обзор используемых в стоматологии физиопроцедур демонстрирует высокую результативность физиолечения.

### Библиографический список

1. Козлова Л.В. Основы реабилитации для медицинских колледжей: учеб. пособие / Л. В. Козлова, С. А. Козлов, Л. А. Семенов; под общ. ред. Б. В. Кабарухина. – Изд. 7-е. – Ростов н/Д: Феникс, 2012. – 475 с.
2. Милованова, О. А. Изучение физических основ физиотерапии студентами педиатрами / О. А. Милованова // Российский вестник перинатологии и педиатрии. – 2022. – Т. 67, № 4. – С. 331.
3. Виды реабилитации: физиотерапия, лечебная физкультура, массаж: учеб. пособие / Т.Ю. Быковская, А.Б. Кабарухин, Л.А. Семенов, Л.В. Козлова, С.А. Козлов, Т.В. Бесараб; под общ. ред. Б.В. Кабарухина. - Ростов н/Д: Феникс, 2010. – 557 с.
4. Моделирование излучательных переходов в квантово-размерных структурах ZnCdS/ZnSSe с зонной диаграммой второго типа / В. Г. Литвинов, В. И. Козловский, О. А. Милованова, Н. Б. Рыбин // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2011. – № 37. – С. 80-87.
5. Щербакова А.В. Вопросы физиотерапии / А.В. Щербакова// М.: Высокочастотные токи и поля. – 2013. – 27 с.

УДК 621.396; ГРНТИ 47.45.99

## ПЕЧАТНАЯ СКРУТКА НА ОСНОВЕ ИНТЕГРИРОВАННОГО В ПОДЛОЖКУ ВОЛНОВОДА

И.А. Сикорская\*, В.В. Демшевский

МИРЭА – Российский технологический университет, филиал Фрязино,  
Российская Федерация, г.Фрязино, \*iasikorskaya@istokmw.ru

*Аннотация.* Работа проводилась с целью исследования волноводных скруток в печатном исполнении с применением технологии интегрированного в подложку волновода для использования в двухдиапазонных антенных решётках с различной поляризацией каналов.

*Ключевые слова:* волноводная скрутка, волновод, интегрированного в подложку волновода (ИПВ).

## PRINTED TWISTING BASED ON A WAVEGUIDE INTEGRATED INTO THE SUBSTRATE

I.A. Sikorskaya\*, V.V. Demshevsky

MIREA – Russian Technological University Fryazino,  
Fryazino, Russian Federation, \*iasikorskaya@istokmw.ru

*Abstract.* The work was carried out in order to study waveguide twists in printed form using the technology of a waveguide integrated into the substrate for use in dual-band antenna arrays with different channel polarization.

*Keywords:* waveguide twist, waveguide integrated into the substrate waveguide (SIW).

В процессе разработки радиотехнических систем и устройств в применяемых линиях передачи СВЧ может возникнуть необходимость использования различного вида изгибов и скруток. Эти элементы могут быть источником недопустимых отражений. Зачастую в качестве линий передачи в радиотехнических системах используются волноводы в классическом их исполнении.

На сегодняшний день волноводные скрутки реализуются исключительно в классическом металлическом исполнении. При этом системных исследований поведения скруток на основе волноводов в печатном исполнении нет, что даёт широкое поле для деятельности. Несмотря на такие преимущества металлических волноводов, как высокая энергетическая эффективность; сохранение работоспособности на высоком уровне мощности; технологичность и многое другое, имеются существенные недостатки – большие массогабаритные параметры и стоимость изготовления. Учитывая, что в разработке радиотехнических устройств особое внимание уделяют минимизации габаритных характеристик, то использование плоских структур является одним из вариантов решения таких задач, поэтому в качестве аналога применяются волноводы в печатном исполнении, интегрированные в подложку волноводы. Такие волноводы сохраняют все преимущества классических объемных волноводов.

Волноводная скрутка предназначена для изменения плоскости поляризации, распространяющейся по волноводу волны на требуемый угол. Как правило, для минимизации возможных искажений, отражений и улучшения согласования скрутки её длину выбирают кратной  $\lambda_v/2$ . Исследование волноводных скруток в печатном исполнении с применением технологии интегрированного в подложку волновода для использования в двухдиапазонных антенных решётках с различной поляризацией каналов является основной целью научной работы.

Волноводы, интегрированные в диэлектрическую подложку, имеют ряд преимуществ перед классическими волноводами: ширину в  $\sqrt{\epsilon}$  раз меньше, толщину равную толщине диэлектрической подложки печатной платы (поскольку изготавливаются по технологии печатных плат), малый вес. Уровень передаваемой мощности электромагнитной волны определяется свойствами материала диэлектрической подложки.

В связи с тем, что в настоящее время широкое применение нашли двухдиапазонные РЛС, которые зачастую разнесены не только по частоте, но и по поляризации. Упрощение конструкции позволит уйти от многослойной технологии и создать двухдиапазонную антенную решётку. Как показала практика, при производства многослойных печатных плат возникают большие технологические трудности вплоть до невозможности изготовления того или иного устройства. Поэтому предлагается упрощенная конструкция волноводной скрутки, в которой будет применена однослойная печатная плата.

Конструкция компактной 90-градусной скрутки в прямоугольном волноводе состоит из входного волновода с горизонтальной поляризацией, выходного волновода с вертикальной поляризацией и размещаемого между ними преобразователя поляризации, представляющего собой комбинацию двух перпендикулярных прямоугольных окон, стороны которых параллельны стенкам входного волновода с горизонтальной поляризацией и выходного волновода с вертикальной поляризацией, волноводы интегрированы в диэлектрическую подложку и расположены несоосно, на электрической длине волноводы выполнены со скруглением.

Несоосное расположение волноводов, интегрированных в диэлектрическую подложку, позволяет уменьшить не только габаритные размеры за счет уменьшения ширины волноводов и длины преобразователя поляризации, но и получить значительное расширение полосы частот при используемой толщине печатной платы за счет расположения преобразователя поляризации в области минимального электрического поля.

Скругленная часть интегрированного волновода со позволяет плавно поворачивать плоскость поляризации и получить оптимальные по критериям ширину рабочей полосы частот и минимальный коэффициент отражения.

На рисунке 1 представлен общий вид компактной 90-градусной волноводной скрутки, где 1 - входной волновод с горизонтальной поляризацией, 2 - выходной волновод с вертикальной поляризацией, 3- диэлектрическая подложка.

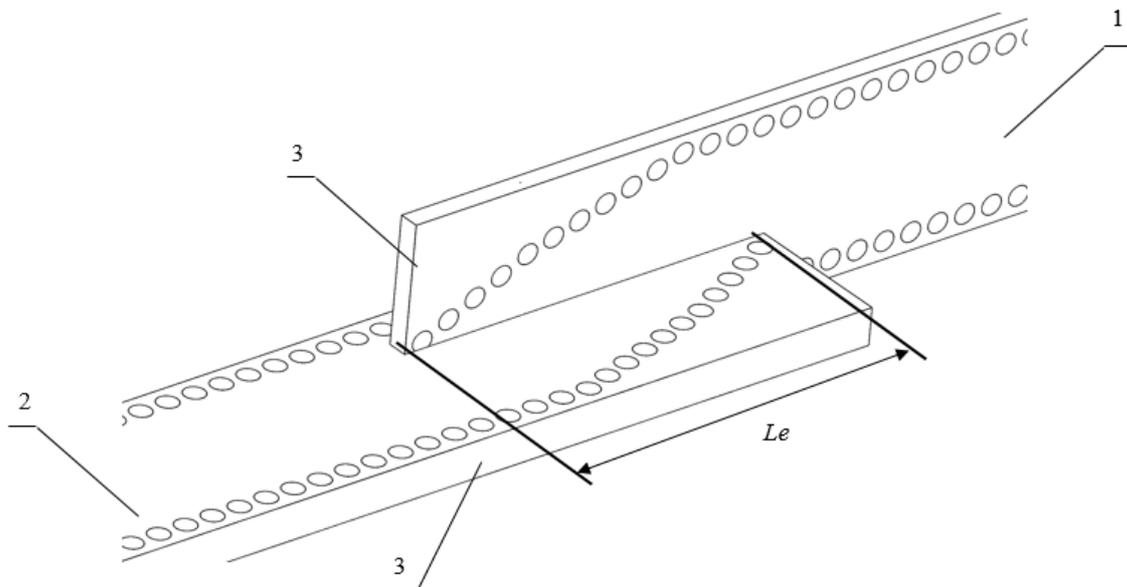


Рис. 1. Общий вид компактной 90-градусной волноводной скрутки

Электромагнитная волна поступает на вход входного волновода с горизонтальной поляризацией, интегрированного в диэлектрическую подложку, подается через него на преобразователь поляризации (в виде скругленной части интегрированного волновода). Далее, проходя через преобразователь поляризации, силовые линии напряженности электрического

поля плавно поворачивают волну в прямоугольные окна и ориентируют ее в волну с вертикальной плоскостью поляризации, которая выходит из выходного волновода.

На рисунке 2 представлен график зависимости коэффициента прохождения  $S_{2,1}$  от относительной ширины полосы рабочих частот для предлагаемой компактной 90-градусной волноводной скрутки.

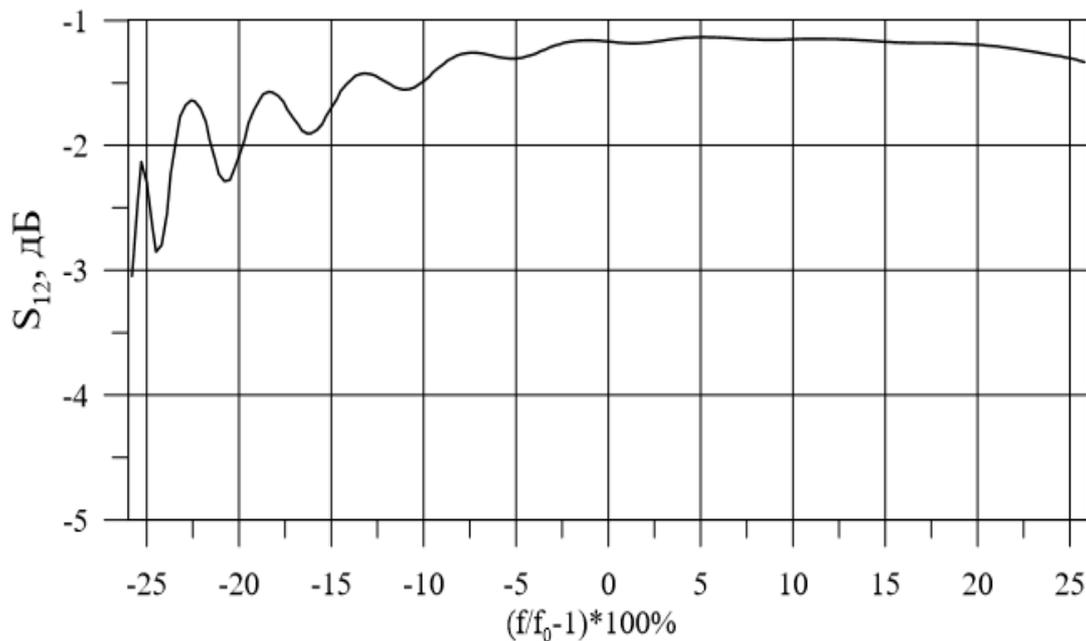


Рис. 2. Зависимость коэффициента прохождения  $S_{2,1}$  от относительной ширины полосы рабочих частот для предлагаемой конструкции скрутки

Предлагаемая конструкция компактной 90-градусной скрутки при разработке антенной техники позволяет использовать волноводы с площадью сечения около  $4.5 \text{ мм}^2$  в диапазоне частот 14-24 ГГц в отличие от классических волноводных скруток с площадью стандартного сечения волноводов  $84.5 \text{ мм}^2$  в диапазоне 14-21 ГГц.

Предложенное техническое решение охраняется патентом РФ.

### Библиографический список

1. Y. Yao, F. Zhang and F. Zhang, "A New Approach to Design Circularly Polarized Beam-Steering Antenna Arrays Without Phase Shift Circuits," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 66, no. 5, pp. 2354-2364, May 2018, doi: 10.1109/TAP.2018.2811839.
2. W.T. Sethi, et al., "Demonstration of Millimeter Wave 5G Setup Employing High-Gain Vivaldi Array", International Journal of Antennas and Propagation, vol. 2018, Article ID 3927153, 12 pages, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/3927153>
3. I. Şişman, K. Yeğin, "Reconfigurable Antenna for Jamming Mitigation of Legacy GPS Receivers", International Journal of Antennas and Propagation, vol. 2017, Article ID 4563571, 7 pages, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/4563571>
4. Патент РФ на изобретение № 2787553 «Компактная 90-градусная волноводная скрутка». Авторы: Демшевский В.В., Богомолова Е.А., Богачев И.А., Сикорская И.А./приоритет 29.07.2022, МПК Н01Р 1/02.

УДК 62-933.2:62-932.4:533.9; ГРНТИ 49.01.81

## СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ПОРОГА ЗАХВАТА ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА

Н.Д. Корнеев, А.Е.Серебряков, О.В.Кизжаев, В.Ю. Мишин

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

*Аннотация.* В данной работе рассматривается создание системы для регистрации зоны захвата лазерного гироскопа, выполненного на базе микроконтроллера STM32F407, даётся краткое описание функционала, основных блоков, а также особенности настройки этих блоков.

*Ключевые слова:* лазерный гироскоп, зона захвата, порог синхронизации, АЦП, цифровая обработка сигнала.

## LAZER GYROSCOPE LOCK-IN REGISTRATION SYSTEM

N.D. Korneev, A.E. Serebryakov, O.V. Kizhaev, V.U. Mishin

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

*The summary.* The paper discusses the laser gyroscope lock-in registration system made by using microcontroller STM32F407 and gives a brief description of its functionality, main blocks and configuration features as well.

*Keywords:* laser gyroscope, lock-in area, synchronization threshold, ADC, digital signal processing

В современной технике для решения задач автономной навигации чаще всего используются бесплатформенные инерциальные навигационные системы, наиболее часто выполняемые на основе триады маятниковых акселерометров и лазерных гироскопов, помещённых в общий корпус и ориентированных по 3 ортогональным направлениям. В таком случае для обеспечения высококачественного результата определения местоположения необходима высокая стабильность систем [1]. В качестве наибольшего крайнего значения чаще всего выбирают величину погрешности измерения угловой скорости равную  $0.01$  °/час.

В основе лазерного гироскопа лежит кольцевой лазер, генерирующий встречные оптические волны. При наличии угловой скорости устройства, пропорционально ей меняется и частота этих волн. Данный эффект получил название эффекта Саньяка. Однако это явление наблюдается не на всём диапазоне возможных угловых скоростей: из-за наличия обратного рассеяния на зеркалах, и, как следствие, распространения малой доли излучения в направлении встречной волны, приводящей к повышению вероятности синхронизации, на характеристике лазерного гироскопа возникает диапазон нечувствительности (зона захвата), внутри которого отсутствует реакция на какое-либо вращение. Данная зона лежит в области малых угловых скоростей от 0 до порога синхронизации.

В качестве решения данной проблемы чаще всего используется вибрационная частотная подставка с зашумленной амплитудой. Эта модернизация позволяет значительно уменьшить порог синхронизации, переместив его в сторону 0, однако убрать его полностью она не позволяет. Кроме такого положительного момента, данное устройство даёт и отрицательный эффект в виде неопределённости зарегистрированного углового положения из-за наличия разброса, вносимого колебаниями.

Использование такого способа совместно с современными способами обработки зеркал приводят к технологическому пределу точности данных устройств. Но и этой точности часто оказывается недостаточно. Для дальнейшего её увеличения применяются различные методы цифровой обработки сигнала, реализующие сложные способы устранения погрешностей и приближения к истинному значению. Использование одного из таких способов и будет использоваться при определении порога синхронизации. Традиционно его измерение производится при помощи постепенного уменьшения скорости равномерного вращения вплоть до исчезновения сигнала (или же постепенного ускорения до появления сигнала). В

таким случае для улучшения качества результатов необходимо применение испытательного стенда с высокой равномерностью вращения [2].

Существует метод, отличный от традиционного, который позволяет исключить необходимость поддержания равномерного вращения, и, таким образом, упрощает измерение. Заключается он в цифровой обработке квадратурных сигналов [3].

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

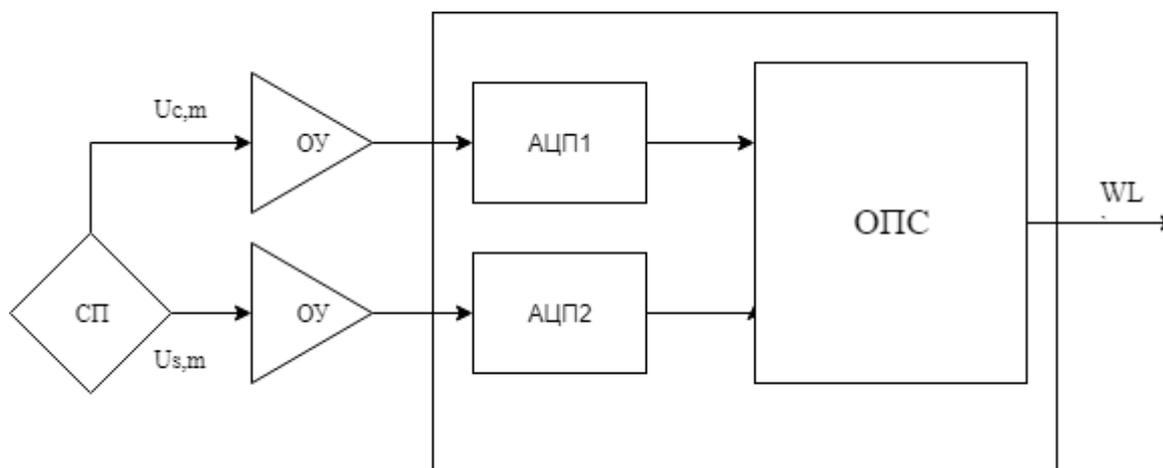


Рис. 1. Структурная схема разрабатываемой системы измерения порога синхронизации встречных волн в лазерном гироскопе:  
 СП – смесительная призма секционированного фотоприемника ЛГ,  
 ОУ – операционные усилители, АЦП – аналогово-цифровые преобразователи,  
 ОПС – блок обработки первичных сигналов ЛГ,  
 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 качестве устройства, реализующего систему регистрации зона захвата, будет применён микроконтроллер STM32F407, обладающий высоким быстродействием, надёжностью и возможностью работы со всеми необходимыми периферийными устройствами.

Работа алгоритма представляет собой несколько последовательных этапов. Первым этапом производится инициализация и настройка периферийных устройств. Основное из этих устройств это АЦП. В данной реализации используется сразу 2 АЦП, настроенных в режим независимой работы с выравниванием данных по правому краю. Для максимально быстрой работы программы АЦП работает без остановок в режиме ContinuousConversionMode с частотой дискретизации в 5.25 МГц и разрядностью 16 бит. Данная частота преднамеренно выбрана избыточной для увеличения точности измерения. Инициализация производится 1 раз в самом начале.

Основная часть программы должна производиться в бесконечном цикле. Для входа в него необходимо реализовать первый съём данных. Оцифрованные двумя АЦП значения передаются при помощи модуля прямого доступа к памяти DMA(Directmemoryaccess) в оперативную память микроконтроллера, где записываются в 2 массива, содержащие 16-битные данные. DMA настроен на передачу данных в формате полуслов по 2 потокам, забирающим значения из регистра данных DR каждого из АЦП.

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



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

В первом блоке производится инициализация и настройка периферийных устройств МК для сбора и записи серий отсчётов первичных сигналов ЛП. В последующих блоках выполняются необходимые математические операции для определения порога синхронизации  $WL$ , в соответствии с алгоритмом. Для удобства пользователя, вывод информации о значении порога синхронизации осуществляется на LCD дисплей устройства, после чего система начинает повторное выполнение программы.

При помощи специальной функции `HAL_DMA_IRQHandler` происходит проверка выставления флага о выполнении передачи, а также флага, сигнализирующего об ошибке. При отсутствии ошибок и полном выполнении операции передачи данных в оперативную память, микроконтроллер переходит в функцию обработки прерывания `HAL_ADC_ConvCpltCallback`, где и будет производить дальнейшую обработку при помощи специального алгоритма.

Сама обработка происходит в несколько этапов:

- Дискретизация входных сигналов.
- Аппроксимация множества точек  $U_c$  и  $U_s$  эллипсом.
- Определение параметров, отвечающих наилучше аппроксимации, а именно  $U_{c,0}$ ,  $U_{s,0}$ ,

$U_{c,m}$ ,  $U_{s,m}$ ,  $\psi_0$ .

– Из изменяющейся фазы квадратурных сигналов происходит восстановление ряда  $\psi(t)$ .

В результате решения данного алгоритма определяется правильность подбора исходных данных (в случае недостатка количества значений при аппроксимации вместо эллипса получается гипербола, что даёт ложные результаты), а также получается значение фазы Саньяка, которое выводится на стандартное устройство вывода (в нашем случае- LED дисплей).

После выполнения обработки значений происходит повторная перезапись данных в массивы и опять возвращение в функцию обработки прерывания. Таким способом мы получаем реализацию бесконечного цикла с каждой новой итерацией только после получения необходимого нам количества данных.

В случае непредвиденной ошибки программа уходит в функцию обработки ошибок, где осуществляет перезапуск АЦП, DMA и после возвращается назад к бесконечному циклу.

Таким образом, реализация системы определения порога захвата лазерного гироскопа на базе микроконтроллера STM32F407 позволяет упростить и удешевить определение порога синхронизации благодаря отходу от использования испытательного стенда с высокой равномерностью вращения.

В таблице 1 представлены результаты измерения порога синхронизации встречных волн при разных значениях угловой скорости вращения ЛГ.

Таблица 1

$\Omega_0, \text{ }^\circ/\text{с}$	0,998	2,014	3,02	4,075	5,095
$\omega_{\text{Лизм}}, \text{ }^\circ/\text{с}$	0,164	0,095	0,095	0,092	0,088

Найденные значения порога практически не зависят от постоянной составляющей угловой скорости, если ее величина превышает 2  $^\circ/\text{с}$ . Вращения с постоянной угловой скоростью менее 1  $^\circ/\text{с}$  приводит к недостоверным результатам.

### Библиографический список

1. Богданов А.Д. Гироскопы на лазерах. – Москва: Воениздат, 1973.
2. Курятов В.Н., Судаков В.Ф. Динамические зоны синхронизации кольцевого лазера при использовании периодической подставки – Москва: Квантовая электроника, 2008.
3. Чиркин М.В., Алексеев С.Ю., Борисов М.В., Захаров М.А., Мишин В.Ю., Морозов Д.А., Молчанов А.В. Определение порога синхронизации встречных волн в кольцевом лазере при обработке первичных квадратурных сигналов. Радиотехника. 2012. № 3. -С. 165-171.

УДК: 621.385.69; ГРНТИ 47.45.99

## ОСВОЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ЦЗУ «ММ» ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Е.Ю. Котляров, Д.Ю. Архипов

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

*Аннотация.* Рассматриваются циклотронные защитные устройства, предназначенные для защиты радиолокационных систем, которые переходят из режима пропускания сигнала в режим защиты и обратно без управляющего сигнала, в зависимости от уровня поступающей на вход СВЧ мощности. Обеспечить надёжную защиту приёмников РЛС от внешних источников СВЧ мощности, а, следовательно, от средств радиоэлектронного подавления способный лишь устройства подобного типа.

*Ключевые слова:* циклотронное защитное устройство, быстрая циклотронная волна, радиолокационные системы, магнитная фокусирующая система, циклотронный резонанс.

## MASTERING THE PRODUCTION OF CPD «MM» WAVELENGTH RANGE

E.Y. Kotlyarov, D.Y. Arhipov

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

*Abstract.* The report discusses cyclotron protection devices designed to protect radar systems that switch from signal transmission mode to protection mode and vice versa without a control signal, depending on the level of microwave power entering the input. Only devices of this type are capable of providing reliable protection of radar receivers from external sources of microwave power, and, consequently, from electronic countermeasures.

*Keywords:* cyclotron protection device, fast cyclotron wave, radar systems, magnetic focusing system, cyclotron resonance.

### Введение

Циклотронное защитное устройство (ЦЗУ) - это электровакуумный СВЧ прибор, работающий на быстрой циклотронной волне (БЦВ) электронного потока. Используется в РЛС для защиты приёмника и последующие каскады от воздействия сигналов высокой мощности. В ЦЗУ сочетается высокая чувствительность, амплитудная и фазовая линейность с надёжной защитой последующих каскадов приемника от СВЧ-мощности высокого уровня при сверхмалом времени восстановления параметров [1,3].

При работе РЛС (рис. 1) на антенну подаётся сигнал большой мощности от передатчика РЛС, такой сигнал вполне способен вывести собственный приёмник из строя. Для предотвращения таких ситуаций и применяется защитное устройство. При достижении некоторой пороговой мощности, в ЦЗУ электронный поток, схематично показанный на рисунке 2,б, полностью разрушается во входном резонаторе (рис.2,а), оседая на ламелях резонатора, при этом прекращается электронная связь с выходным резонатором, которая осуществляется электронным потоком. Использование ЦЗУ позволяет обеспечить защиту приемника от собственного сигнала передатчика и от сторонних источников [2].

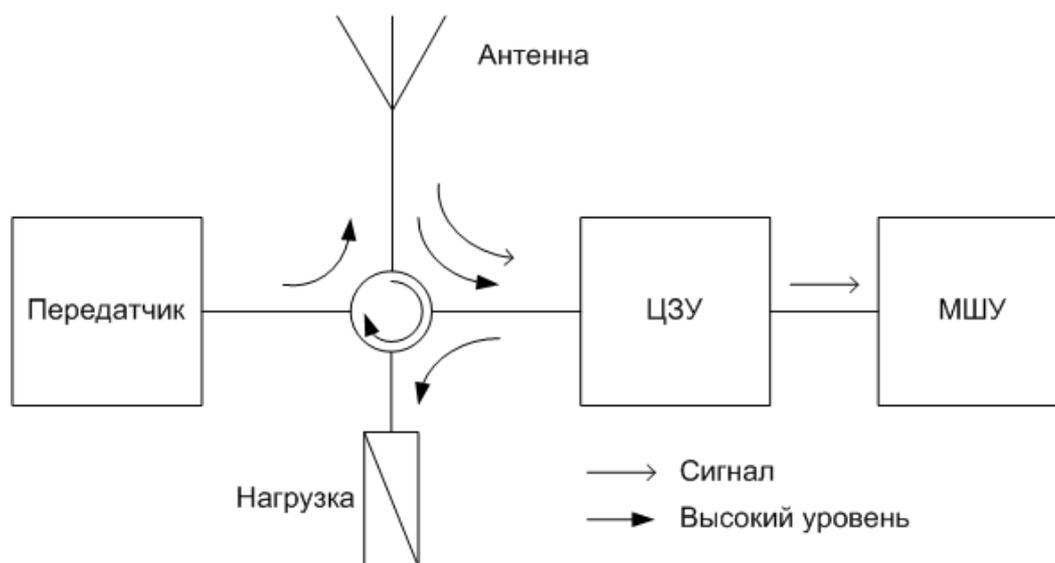


Рис. 1. Типичная схема включения ЦЗУ в СВЧ-тракт РЛС

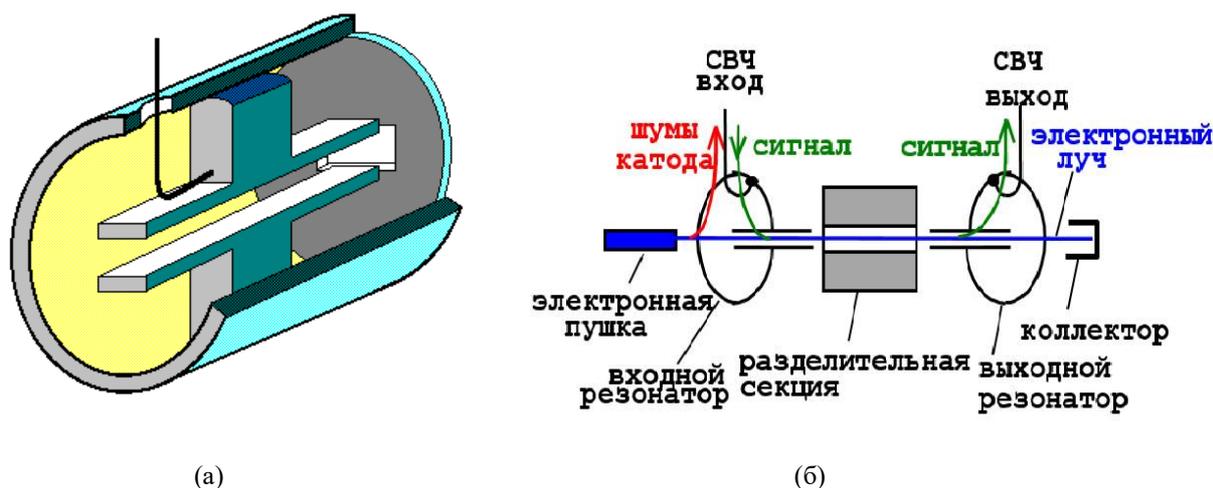


Рис. 2. Устройство связи с электронным потоком (а) и функциональная схема ЦЗУ (б)

ЦЗУ состоит из двух резонаторов с поперечными электрическими полями, в которых используется селективное взаимодействие электрического поля с БЦВ. Такой резонатор в случае циклотронного резонанса способен передать практически всю СВЧ энергию из внешней цепи в БЦВ луча, а также вывести энергию волны во внешнюю цепь.

Для распространённых в настоящее время газоразрядных и неуправляемых полупроводниковых ЗУ время включения режима защиты является важной характеристикой. За то время пока газоразрядное или полупроводниковое ЗУ переходит из режима пропускания в режим защиты, существенная часть входной СВЧ-энергии поступает на выход ЗУ, создавая пик просачивающейся мощности/энергии, способный вывести из строя или привести к перегрузке последующие чувствительные СВЧ-каскады приемника [4,5].

ЦЗУ по сравнению с другими современными защитными устройствами обладают высоким быстродействием, высокой устойчивостью ко входной мощности, при этом обеспечивая отсутствие просачивающейся мощности и развязку между входом и выходом в режиме защиты.

### Задачи

Направление циклотронных защитных устройств в настоящее время занимает весьма важное место в современной СВЧ вакуумной электронике, применяемой при разработке комплексов РЛС в России. Одна из основных актуальных задач развития этого направления: конструктивно-технологическая доработка в современных реалиях и освоение производства ЦЗУ «мм» диапазона длин волн. Разработка МФС для данного ЦЗУ и обеспечение термостабилизации магнитного поля.

### Конструктивные особенности

Переход из «см» в «мм» диапазон длин волн в вакуумной тематике довольно проблематичен. Создание прибора в «мм» диапазоне длин волн требует разработку новой конструкции и технологии производства изделия. Узлы и детали должны быть изготовлены из качественных материалов, предназначенных для вакуумного производства, иметь высокое качество поверхностей деталей для обеспечения минимальных потерь СВЧ сигнала (рис. 3).

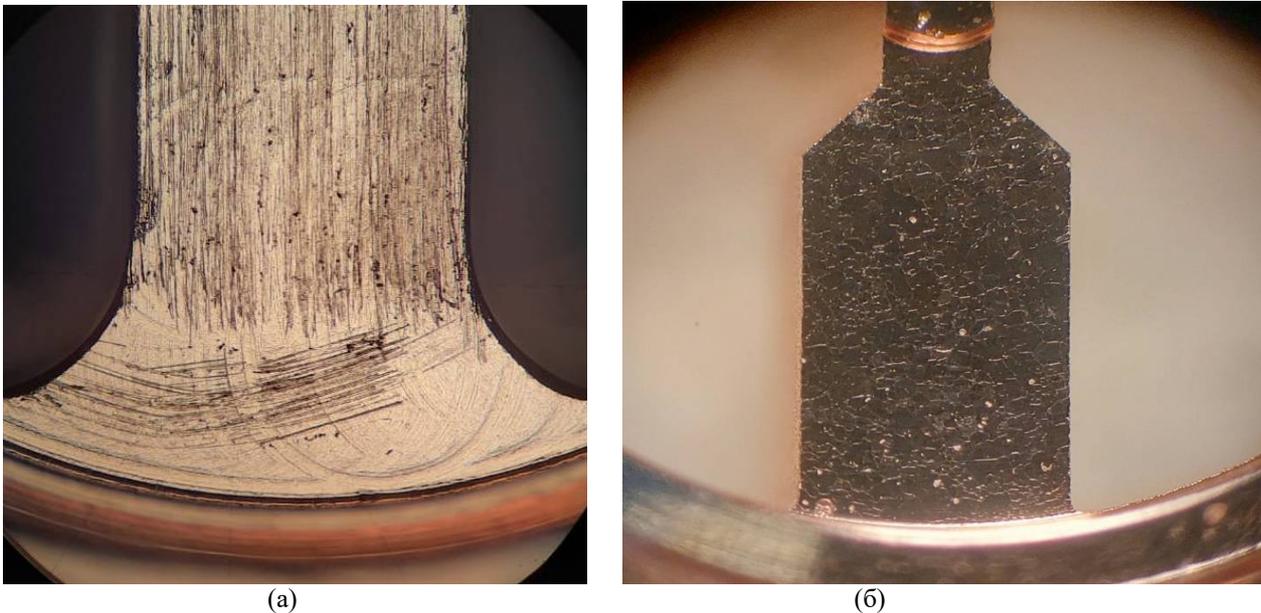


Рис. 3. Пример некачественной металлообработки и плохого качества материала (а), пример качественной металлообработки и хорошего качества материала (б).

Для изготовления ЦЗУ должно использоваться высокотехнологичное откачное оборудование для достижения высокого уровня вакуума ( $\sim 10^{-9} - 10^{-10}$  мм.рт.ст.). При недостаточно высоком уровне вакуума в объеме ЦЗУ некоторое количество электронов луча рассеивается на ионах, атомах и молекулах остаточных газов, присутствующих в вакуумном объеме устройства и создает «вакуумные шумовые пики» в рабочем диапазоне частот прибора.

В ЦЗУ продольное магнитное поле, помимо фокусировки луча, должно обеспечивать циклотронный резонанс электронов на средней частоте рабочей полосы частот. Должна обеспечиваться высокая стабильность индукции магнитного поля при всех дестабилизирующих факторах.

Обеспечение термостабилизации производится за счет применения термостабилизирующих элементов, выполненные из материала 32НХЗ, который имеет линейную зависимость магнитных свойств от температуры.

Разработанная новая магнитная фокусирующая система (МФС) показана на рисунке 4.

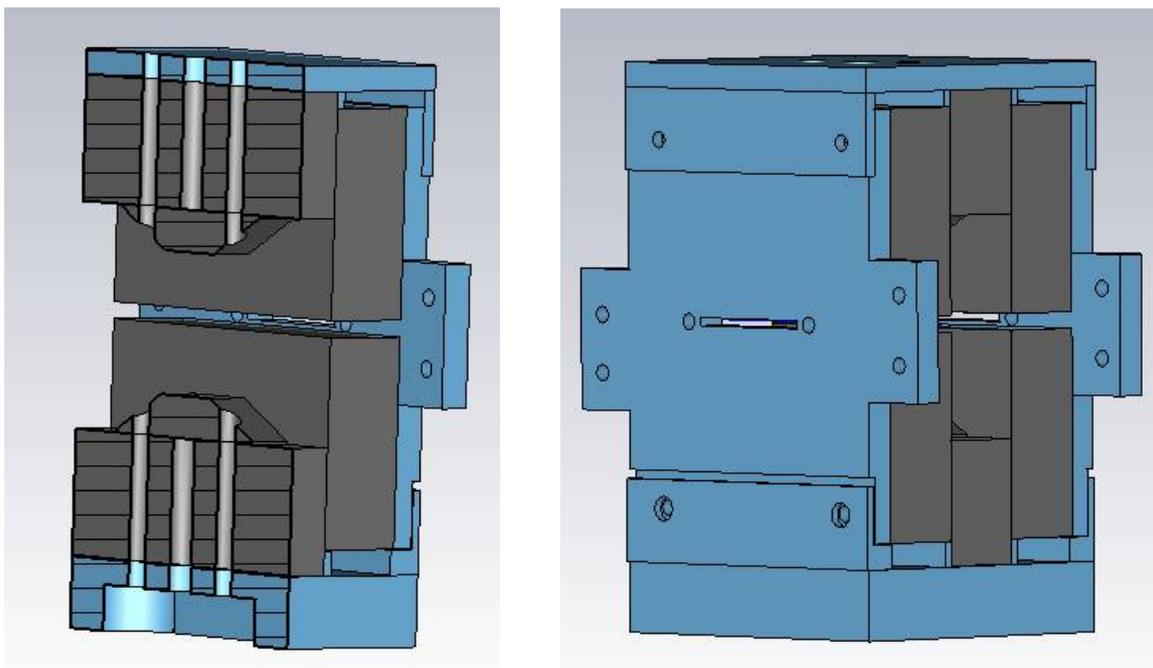


Рис. 4. МФС ЦЗУ 8 мм диапазона длин волн

При создании ЦЗУ «мм» диапазона длин волн необходим комплекс современного оборудования для измерения параметров ЦЗУ (частота, КСВН, шум, время восстановления, холодное затухание и т.д.).

### Заключение

На данный момент собран один приемник, состоящий из 3-х ЦЗУ «мм» диапазона длин волн. Требования заказчика удовлетворены и приемник соответствует техническому заданию. Данный приемник имеет параметры, превосходящие другие защитные устройства по времени восстановления (~1-10нс) по максимальному уровню чувствительности, по потерям (~ -1 дБ), по шумовым характеристикам (дБ). Развитие циклотронных защитных устройств в «мм» диапазоне длин волн позволит применить их в современные РЛС.

### Биографический список

1. Электронные приборы СВЧ на быстрой циклотронной волне электронного потока / Ю.А.Будзинский, С.В.Быковский, С.П.Кантюк, М.А.Мастрюков // Радиотехника.-1999.-№4.-С.32
2. Комплексованные усилители с циклотронной защитой для приемников РЛС/ Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, С.А. Вильданов, Д.Н. Грудцов, Н.В. Ильичев, О.А. Саврухин, И.А. Шмелев// СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: Материалы 11-й Международной конференции (КрыМик 2001). Севастополь, Крым, Украина. 10-14 сентября 2001г.-С.190-192
3. Быковский С.В. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук.- Фрязино: АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина», 2021г.
4. Алыбин В. Г. СВЧ-защитные устройства в радиолокации и связи / В.Г. Алыбин // Радиотехника. – 2002. - № 8. – С. 42 – 49.
5. Ропий А.И. Сверхвысокочастотного защитные устройства / А.И. Ропий, А. М. Старик, К.К. Шугов. – Радиос и связь , 1993.

УДК 537.86, 537.87, ГРНТИ 29.35.45

## О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ КОЛЛЕКТОРА ДЛЯ ЭВП С АЛМАЗНЫМ ТЕПЛОТВОДОМ

А.В. Галдецкий

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

*Аннотация.* Рассмотрены конструкции и проведено тепловое моделирование коллектора для ЛБВ с рекуперацией и алмазным изолятором. Коллектор удовлетворяет ряду противоречивых требований: высокой электропрочности, эффективного теплоотвода, минимизации перемещений и деформаций при нагреве.

*Ключевые слова:* ЛБВ, рекуперация, CVD, алмаз, электропрочность, термические напряжения

## ON COLLECTOR DESIGN FOR VACUUM TUBES BASED ON DIAMOND HEATSINK

A.V. Galdetskiy

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

*The summary.* Depressed collector designs with diamond heatsink are considered. Thermal simulation has demonstrated fulfillment of contradictory requirements: good electric strength, excellent heatsink, minimal thermal stress and displacement.

*Keywords:* TWT, depressed collector, CVD, diamond, electric strength, thermal stress.

### Введение

В настоящее время ЛБВ широко используются в радиолокации, спутниковой связи, телекоммуникациях. Спутниковые ЛБВ имеют непревзойденные характеристики по КПД и сроку службы [1]. Как правило, для повышения КПД используется одно- или многоступенчатая рекуперация энергии пучка в коллекторе. Рекуперация энергии необходима и в связанных клистродах, которые работают в линейном режиме, далеко от насыщения и, значит, с низким электронным КПД. Возможно использование рекуперации в радиолокационных клистродах и клистродах для ускорителей. При этом рассеиваемая в коллекторе средняя мощность может достигать десятков киловатт. В результате приходится охлаждать секции коллектора, находящиеся под высоким потенциалом, через изолятор. Отсюда возникает основное противоречие в конструкции: высокое напряжение требует увеличения толщины изолятора, а низкое тепловое сопротивление требует ее уменьшения. В приборах средней мощности эта проблема решается путем использования толстых керамических элементов с высокой теплопроводностью (BeO, BN, AlN). При этом возникают дополнительные трудности: окись бериллия токсична, пайка массивных керамических элементов к металлу недопустима из-за большой разницы в ТКЛР и опасности растрескивания, а прижатие металла к керамике с шероховатой поверхностью обеспечивает лишь точечный тепловой контакт. Проблема создания эффективного коллектора при повышенной мощности лампы остается нерешенной.

По этим причинам в данной работе рассматривается возможность применения CVD алмаза в качестве изолятора в коллекторе. Алмаз имеет рекордные показатели по теплопроводности 500-1500 Вт/м·К. В настоящее время имеются развитые технологии изготовления пластин алмаза толщиной 0.1-3 мм, их размерной обработки, металлизации и пайки. Стоимость невакуумноплотного алмаза не-SBC качества значительно ниже чем алмаза, применяемого сейчас для окон вывода энергии [2], и эта стоимость постоянно снижается.

На основании этих данных можно предложить новую базовую конструкцию паяного коллектора (рис. 1). Изолятор набирается из отдельных алмазных пластин, которые паяются к внутреннему телу коллектора и к корпусу прибора. Количество пластин и их толщина определяются требуемой мощностью тепловыделения. Длина пластин определяется напряже-

нием на коллекторе. Ширина пластин ограничена требованием паяемости без компенсатора. Наклон щелей в корпусе для пластин выбирается так, чтобы обеспечивался прижим пластин к центральному телу и его самоцентрирование. На основе базовой конструкции можно рассмотреть несколько вариантов реализации.

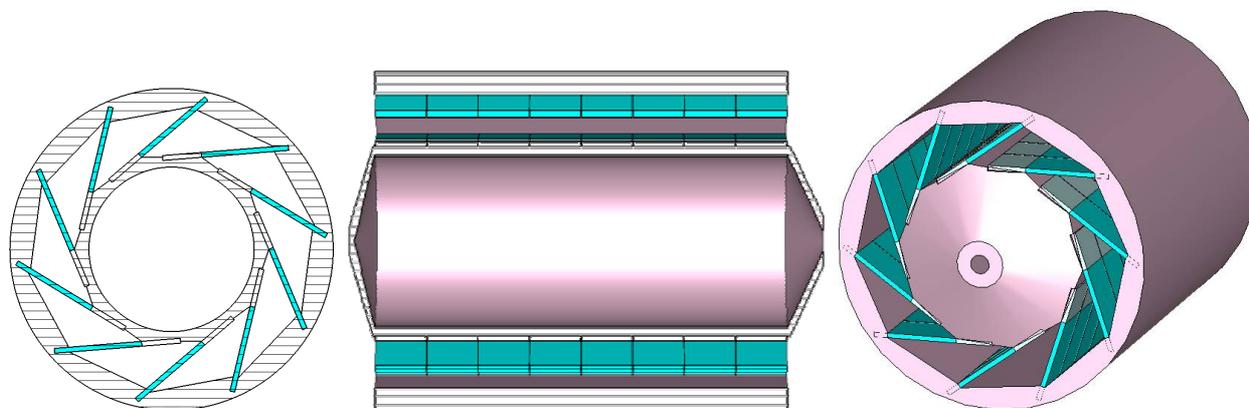


Рис. 1. Конструкция коллектора с теплоотводом на основе CVD алмаза

### Коллектор мощной ЛБВ с мощностью теплорассеяния 20 кВт

Длина однородной части коллектора 10 см (погонная мощность 2 кВт/см), диаметр теплопринимающей полости 36 мм ( $P = 200 \text{ Вт/см}^2$ ). Размеры пластины: 24x10x1 мм, длина ее контакта с центральным телом – 6.2 мм, длина изолятора – 15 мм (что гарантирует отсутствие пробоев). Количество пластин на 1 см – 20, на один коллектор требуется 200 пластин. Легко реализуется многоступенчатый коллектор.

Распределение температуры, напряжений и деформаций в конструкции моделируется с помощью программного обеспечения CST Studio [3]. Если считать тепловыделение однородным по длине коллектора, то при моделировании можно анализировать только его небольшую часть (1 см) (рис. 2а).

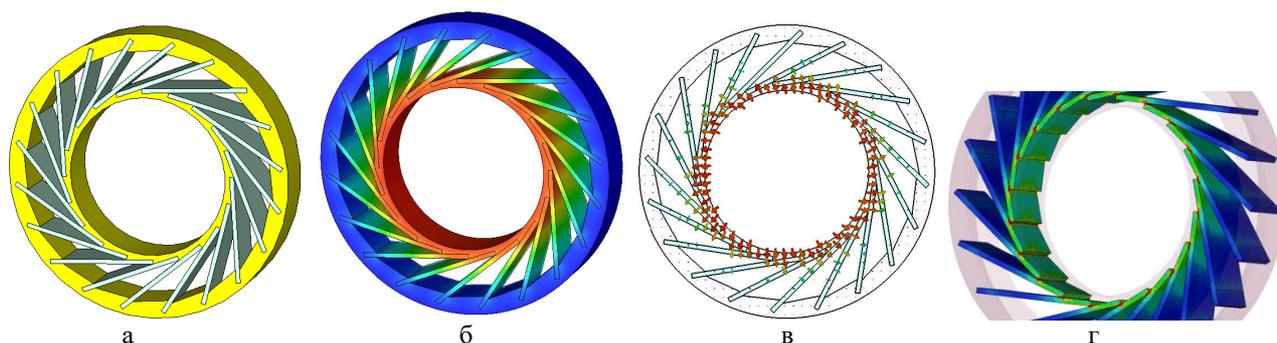


Рис. 2. а - элемент коллектора с мощностью тепловыделения 20 кВт, б - распределение температуры в коллекторе, в – распределение перемещений, г – распределение напряжения фон Мизеса

Если температура корпуса (с потоком охлаждающей жидкости) поддерживается на уровне 90 С, то при средней мощности теплорассеяния 20 кВт (2 кВт/см) максимальная температура на внутренней поверхности коллектора не превышает 191 С, при допустимом пределе 300 С (рис. 2б). При нагреве коллектора центральное тело поворачивается вокруг своей оси (рис. 2в), при этом у внешнего края центрального тела (на радиусе 18 мм) смещение составляет около 17 мкм, а отверстие канала остается неподвижным. Напряжения в алмазных

пластинах невелики и сосредоточены в области паек (до 0.2-0.4 ГПа). Напряжений на разрыв, на излом пластин практически нет.

### Коллектор ЛБВ с мощностью теплорассеяния 5 кВт

Длина однородной части коллектора 8 см (погонная мощность 0.5 кВт/см), диаметр теплопринимающей полости – 34 мм (рис. 3). Размеры пластин 26x10x1 мм, длина ее контакта с центральным телом – 8 мм, длина изолятора – 15 мм. Количество пластин на 1 см – 10, на один коллектор требуется 80 пластин. Анализируется полная модель коллектора (рис. 4).

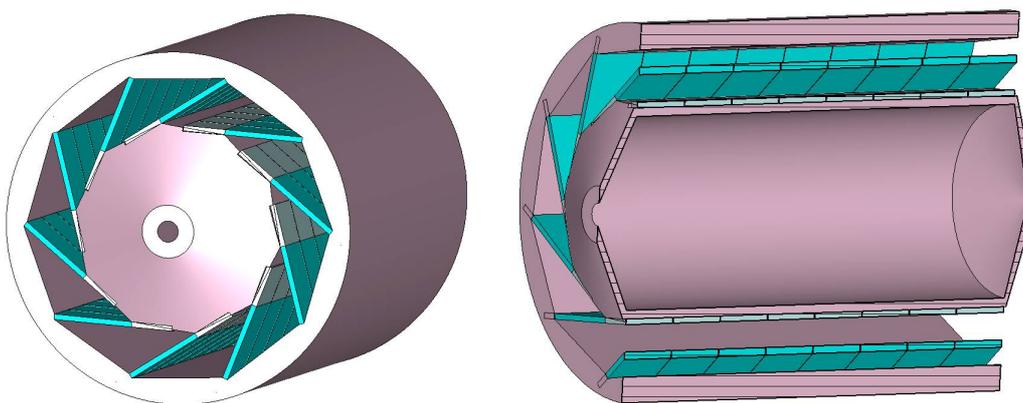


Рис. 3. Полная модель коллектора с мощностью тепловыделения 5 кВт

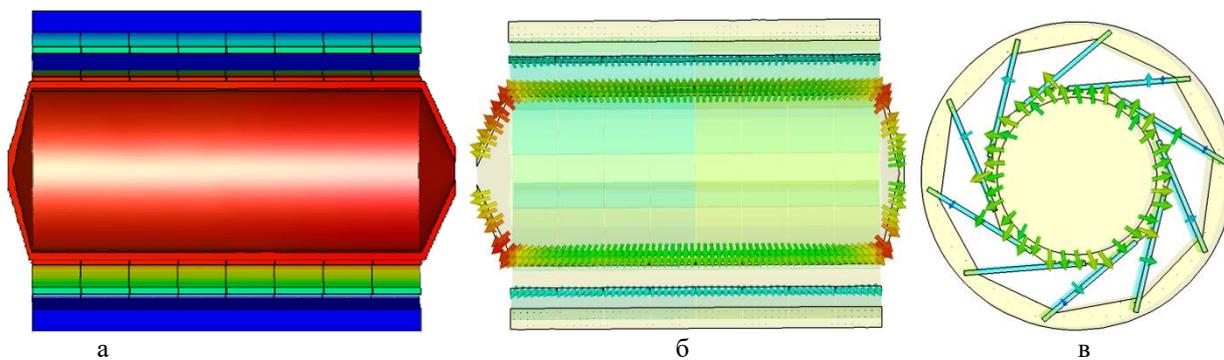


Рис. 4. а - распределение температуры в коллекторе, б, в – распределение перемещений

Если температура корпуса (с потоком воды) поддерживается на уровне 90 С, то при средней мощности теплорассеяния 5 кВт максимальная температура не превышает 259 С (рис. 4). У внешнего края центрального тела (на радиусе 17 мм) перемещение достигает 76 мкм. Напряжения в алмазных пластинах невелики (до 0.9 ГПа) и сосредоточены в области паек крайних пластин (рис. 5а). Напряжения можно еще заметно уменьшить (до 0.5 ГПа), если центральное тело сделать секционированным, состоящим из отдельных колец с зазорами, компенсирующими его удлинение.

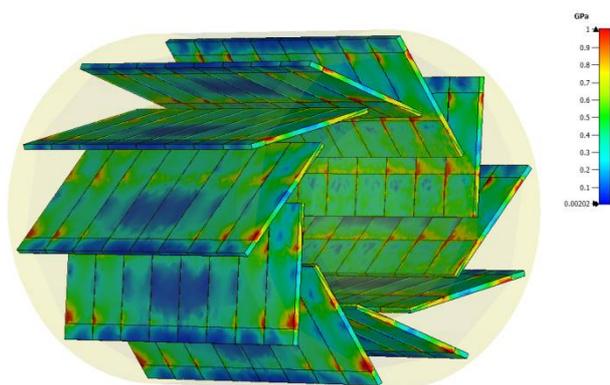


Рис. 5. Распределение напряжения фон Мизеса в алмазных пластинах

Возможно кардинально уменьшить механические напряжения в алмазных пластинах, если секционировать центральное тело не только по длине, но и по азимутальному углу. В результате можно полностью отказаться от центрального тела и осадить пучок на металлизированные участки алмазных пластин (возможно с напаянными индивидуальными металлическими пластинками для перекрытия зазоров) (рис. 6а,б).

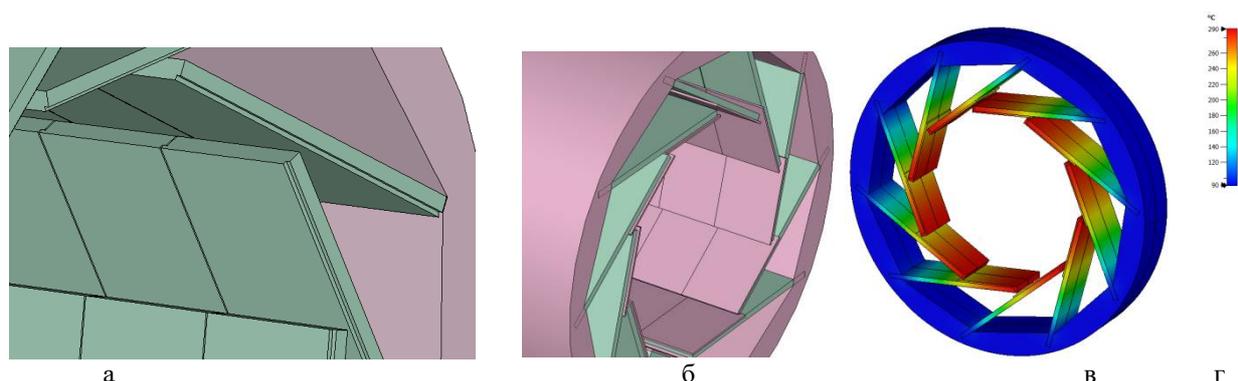


Рис. 6. Конструкция коллектора без центрального тела. а – с алмазными пластинами с металлизированными воспринимающими участками, б - с индивидуальными металлическими воспринимающими пластинами, в - - распределение температуры в коллекторе

В этом случае максимальная температура коллектора достигает 290 С, а механические напряжения фон Мизеса не превышают 0.15 ГПа.

### Заключение

Предложенные в работе конструкции коллектора на базе пластин из CVD-алмаза согласно расчету позволяют рассеивать мощность 20 кВт и более. Данные конструкции основаны на технологиях, освоенных в России. Варьируя в базовой конструкции количество пластин, их размеры, размеры центрального тела можно в широких пределах менять мощность и рабочие напряжения коллектора. Рассмотренные технические решения имеют ряд достоинств:

- Высокая электропрочность
- Высокая теплоотводящая способность паяной конструкции
- Низкие механические напряжения в пластинах, в том числе в областях спаев.

При этом остаются вопросы, требующие дополнительного анализа:

- Вопрос стоимости материала (технологии) остается открытым. Стоимость CVD-алмаза постоянно снижается. Невакуумноплотный алмаз не-СВЧ качества гораздо доступнее высококачественного алмаза для вакуумных окон. В любом случае технология предполагает серийный (массовый) выпуск алмазных пластин, что снизит цену.
- При технологических процессах при температуре  $\sim 800$  С возникает опасность графитизации алмазных пластин. Поэтому такой режим допускать нельзя, что и делается при изготовлении алмазных вакуумных окон.
- При случайных пробоях по поверхности пластин в принципе не исключена графитизация алмаза с появлением утечек. Вопрос требует дополнительных исследований.

Очевидна перспективность рассмотренных технических решений. Однако требуется технологическая проработка конструкции и технологии.

### Библиографический список

1. Gilmour A.S. Principles of Klystrons, Traveling Wave Tubes, Magnetrons, Cross-Field Amplifiers, and Gyrotrons / A.S. Gilmour // Artech House. - 2011. – 859 p.
2. Ding M.Q., Li L., Du Y., Hu Y., Cai J., Feng J. Progress in research and development of TWT diamond windows at BVERI / M.Q. Ding, L. Li, Y. Du, Y. Hu, J. Cai, J. Feng // Vacuum Electronics Conference (IVEC), - 2015. - p. 1-3.
3. CST Studio Suite. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>– Дата доступа: 09.04.2023.

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

УДК 621.382; ГРНТИ 29.19.31

### МЕТОДЫ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АМОРФНЫХ КРЕМНИЙ-УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК ПРИ ПОСТОЯННОМ ХИМИЧЕСКОМ СОСТАВЕ

А.И. Попов, А.Д. Баринов, В.М. Емец, И.Н. Мирошникова, Т.С. Чуканова

*Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»,  
Россия, Москва, popovai@mpei.ru*

*Аннотация.* Проведен анализ влияния различных параметров процесса плазмохимического осаждения кремний-углеродных пленок на их состав и физические свойства. Показано, что изменение частоты электрического поля при осаждении пленок является эффективным методом управления их механическими свойствами, при неизменных фазовом и химическом составех.

*Ключевые слова:* кремний-углеродные пленки, плазмохимическое осаждение, частота поля, микротвердость, модуль упругости.

### METHODS FOR VARIATIONS IN THE PHYSICAL PROPERTIES OF AMORPHOUS SILICON-CARBON FILMS AT A CONSTANT CHEMICAL COMPOSITION

A.I. Popov, A.D. Barinov, V.M. Emets, I.N. Miroshnikova, T.S. Chukanova

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

*Abstract.* The influence of parameters of the silicon-carbon film plasma-chemical deposition process on their composition and physical properties is analyzed. It is shown that changing the frequency of the electric field during film deposition is an effective method for controlling the mechanical properties of films, with unchanged phase and chemical compositions.

*Keywords:* silicon-carbon films, plasma-chemical deposition, field frequency, microhardness, modulus of elasticity.

Пленки алмазоподобного аморфного углерода нашли широкое применение в электронике, биомедицине, космической и других областях техники благодаря уникальному сочетанию свойств [1-5]. Вместе с тем, указанные материалы обладают рядом недостатков, ограничивающих их практическое применение. К таким недостаткам, в первую очередь, относятся невысокая термостабильность материала (благодаря процессам графитизации при температурах более 200°C), высокие механические напряжения в пленках, приводящие к проблемам с адгезией и ограничению их толщины, и другие [6]. Материалом, сохраняющим преимущества алмазоподобного аморфного углерода, но свободным от значительной части его недостатков являются кремний-углеродные аморфные пленки [7-8]. Введение в алмазоподобную пленку углерода 25 – 30 ат. % кремния и кислорода приводит к формированию более мягкой структурной сетки. Это, в свою очередь, снижает механические напряжения в материале и увеличивает стабильность аморфного состояния.

Вместе с тем, для всех полупроводниковых некристаллических материалов, включая пленки аморфного углерода и кремний-углеродные пленки, существует серьезная проблема, связанная с ограниченностью методов управления свойствами этих материалов. Ещё при открытии некристаллических полупроводников профессором Коломийцем Б. Т. была установлена неэффективность легирования этих материалов примесями замещения, как метода управления их свойствами. В связи с этим, для управления свойствами некристаллических полупроводников активно разрабатывались и разрабатываются методы химической, структурной и структурно-химической модификаций свойств [9-11]. Структурная модификация

заключается в направленном изменении структуры объекта в процессе его изготовления с целью получения материала с необходимыми свойствами при неизменном химическом составе.

Кремний-углеродные пленки, как правило, изготавливаются методом высокочастотного плазмохимического разложения кремнийорганического прекурсора. Для решения поставленных в работе задач (необходимо обеспечить возможность осаждения пленок при различных значениях технологических параметров. Используемая нами установка [12] позволяет при осаждении пленок изменять величину напряжения смещения подложкодержателя от минус 100 до минус 1000 В. В качестве другого технологического фактора использовалась бомбардировка растущей пленки ионами аргона при различном давлении последнего в рабочей камере. Результаты исследований этих факторов на свойства кремний-углеродных пленок, проведенных нами [13], представлены на рисунке 1.

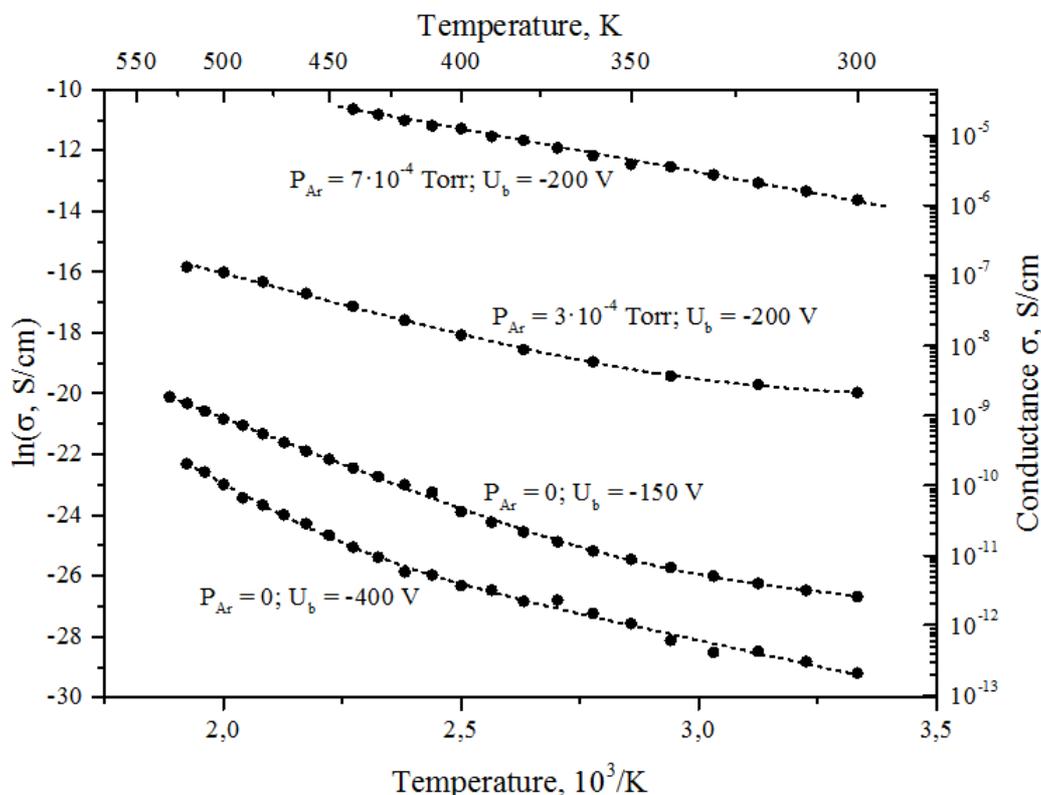


Рис. 1. Температурные зависимости электропроводности кремний-углеродных пленок, осажденных при разных напряжениях смещения ( $U_b$ ) и разном парциальном давлении аргона ( $P_{Ar}$ ) в рабочей камере.

Как видно из рисунка, увеличение абсолютных значений напряжения смещения на подложкодержателе от -150 до -400 В вызывает уменьшение электропроводности кремний-углеродных пленок на порядок величины. При этом, как было показано в [14], микротвердость пленок возрастает в два раза. К еще большим изменениям свойств приводит бомбардировка растущих пленок ионами аргона. Увеличение парциального давления аргона в рабочей камере от 0 до  $7 \cdot 10^{-4}$  Торр приводит к росту электропроводности на 6 порядков величины (рис. 1). В [15] также отмечено возрастание при этом микротвердости и модуля упругости пленок.

Следует отметить, что в методе плазмохимического разложения важным технологическим параметром является частота аксиального электрического поля в процессе осаждения пленок, так как она во многом определяет параметры плазмы. В подавляющем большинстве случаев разложение прекурсора проводится при высокой (1,76 МГц) частоте. Имеются от-

дельные работы по получению пленок  $a\text{-Si:H}$ ,  $a\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{H}$ ,  $\text{SiO}_x$  и  $\text{SiN}_x$  при пониженных, но фиксированных частотах [16-19]. В [20] аморфные кремний-углеродные пленки были получены при частоте поля 100 кГц. Во всех перечисленных случаях отмечалось существенное отличие свойств полученных образцов от пленок, осажденных при высоких частотах поля. Однако систематических исследований зависимостей свойств пленок от частоты электрического поля при плазмохимическом осаждении не проводилось. В связи с этим указанные исследования представляют существенный научный и практический интерес.

Ниже приведены результаты исследования влияния частоты электрического поля в процессе плазмохимического осаждения кремний-углеродных пленок на их механические свойства. Для осуществления этих исследований установка плазмохимического осаждения кремний-углеродных пленок [12] была модернизирована, что обеспечило возможность плавного изменения частоты аксиального электрического поля в диапазоне от 100 кГц до 2 МГц. В указанном диапазоне частот поля была изготовлена серия кремний-углеродных пленок. При этом в качестве кремнийсодержащего прекурсора использовался полифенилметилсилоксан  $((\text{CH}_3)_3\text{Si}[\text{CH}_2\text{C}_6\text{H}_4\text{SiO}]_n\text{OSi}(\text{CH}_3)_3)$ . Осаждение осуществлялось на подложки из монокристаллического кремния и ситалла. Напряжение смещения составляло минус 200 В. Аргон в рабочую камеру не добавлялся. Толщина пленок находилась в пределах 0,5-1,5 мкм.

Контроль химического и фазового состава полученных пленок проводился на растровом электронном микроскопе Vega II SBU с энергодисперсионным детектором Inca x-Act и просвечивающем электронном микроскопе Titan 80-300. Показано, что во всем исследованном диапазоне частот электрического поля в процессе осаждения пленок, образцы сохраняли аморфное состояние без включений кристаллической фазы. Химический состав пленок, осажденных при всех частотах, оставался постоянным в пределах погрешности эксперимента. Соотношение атомов углерода и кремния в пленках лежало в пределах 5,3-5,7.

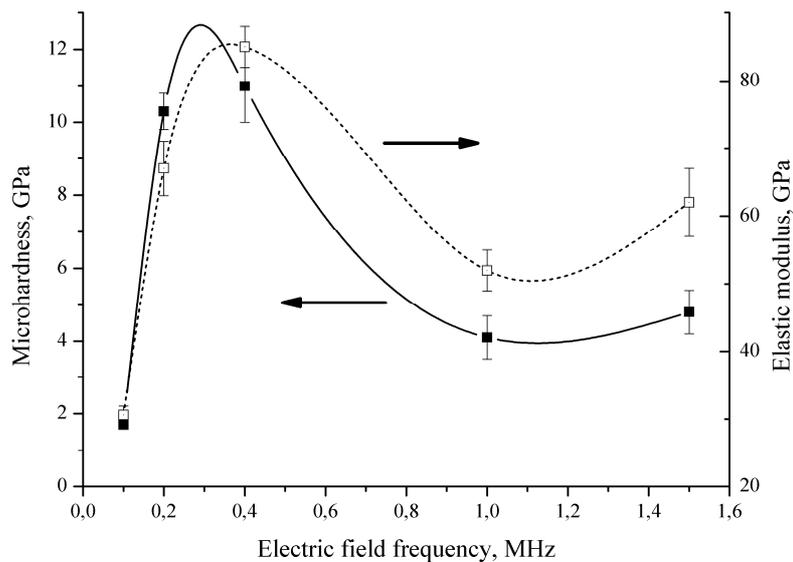
Исследования механических свойств пленок осуществлялось на нанотвердомере NHT<sup>2</sup>-TTX (CSM Instruments SA) с алмазной пирамидой Берковича в качестве индентора. Максимальная нагрузка составляла 5 мН. Значение характеристик для каждого образца рассчитывались как среднее из не менее, чем 5 испытаний. Результаты исследования пленок, осажденных при различных частотах электрического поля, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Механические свойства кремний-углеродных пленок, осажденных при различных частотах электрического поля

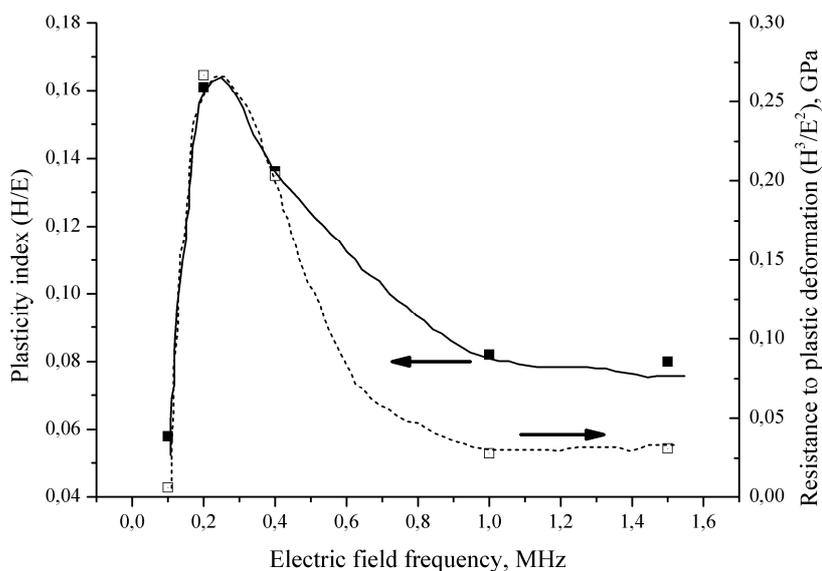
№ п/п	Характеристика	Частота электрического поля при осаждении пленок				
		0,1 МГц	0,2 МГц	0,4 МГц	1 МГц	1,5 МГц
1	Максимальная глубина индентирования $h_{max}$ , нм	408±6	178±5	160±5	258±12	231±14
2	Твердость индентирования $H_{IT}$ , ГПа	1,70±0,06	10,3±0,5	11,0±1,0	4,1±0,6	4,8±0,6
3	Модуль упругости при индентировании $E_{IT}$ , ГПа	29,4±1,2	64±3	81±3	50±3	60±5
4	Эффективный модуль упругости $E$ , ГПа	30,6±1,3	67±4	85±3	52±3	62±5
5	Доля работы упругой деформации при индентировании $\eta_{IT}$ , %	35,2±1,7	81,1±2,6	75±4	45±3	54±5
6	Индекс пластичности (H/E)	0,058	0,161	0,136	0,082	0,080
7	Сопротивление пластической деформации ( $H^3/E^2$ ), ГПа	0,006	0,267	0,203	0,028	0,031

На рисунке 2 приведены зависимости их механических свойств от частоты поля при их осаждении.

Из приведенных данных видно, что как электрофизические, так и механические свойства аморфных кремний-углеродных пленок в значительной степени зависят от таких технологических факторов при их изготовлении, как напряжение смещения на подложкодержателе, бомбардировка растущей пленки ионами аргона, частота электрического поля при плазмохимическом осаждении пленок.



а)



б)

Рис. 2. Зависимости микротвердости, модуля Юнга (а), индекса пластичности и сопротивления пластической деформации (б) кремний-углеродных пленок от частоты электрического поля при их осаждении

Анализ влияния различных факторов показал, что при изменении первых двух факторов наблюдаются монотонные изменения значений механических характеристик материала. В противоположность этому, варьирование частоты электрического поля при осаждении пленок приводит к немонотонной зависимости их механических свойств. Как видно из рис. 2, имеются две области частот с сильно отличающимся видом рассматриваемых зависимостей: область относительно низких частот (от 0,1 до 0,8 МГц), которая характеризуется резким изменением свойств и наличием на зависимостях экстремума при частотах 0,2 – 0,4 МГц, и область частот более 1 МГц, в которой механические свойства практически не меняются.

Таким образом, изменение частоты электрического поля при плазмохимическом осаждении кремний-углеродных аморфных пленок является эффективным методом управления их механическими свойствами при постоянном фазовом и химическом составе материала. Определен наиболее эффективный диапазон частот поля (0,1 – 0,4 МГц), в котором удается достичь максимальных изменений свойств. Напротив, для обеспечения более стабильного технологического процесса при осаждении пленок целесообразно использовать поля частотой более 1 МГц.

### Библиографический список

1. Fontaine, J. Towards the use of diamond-like carbon solid lubricant coatings in vacuum and space environments. - Proc. IME J. J. Eng. Tribol. 2008, v. 222 (8). - pp. 1015-1029.
2. Ferrari, A. C. Diamond-like carbon for magnetic storage disks. - Surface and Coatings Technology, 2004, v. 180. - pp. 190-206.
3. Zhmud, B. Developing energy-efficient lubricants and coatings for automotive applications. - Tribology and Lubrication Technology, 2011, v. 67. (9). - pp. 42-49.
4. Roy, R. K., Lee, K.-R. Biomedical application of diamond-like carbon coatings. - Journal of Biomedical Materials Research, part B: Applied Biomaterials, 2007, v. 83 (1). - pp. 72-84.
5. Neuville, S., Matthews, A. A perspective on the optimization of hard carbon and related coatings for engineering applications: review. - Thin Solid Films, 2007, v. 515 (17). - pp. 6619-6653.
6. Popov, A. Disordered Semiconductors: Physics and Applications (2<sup>nd</sup> Edition). Pan Stanford Publ. - 2018. - 328 p.
7. Meškiniš Š., Tamulevičienė A. Structure, Properties and Applications of Diamond Like Nanocomposite (SiO<sub>x</sub> Containing DLC) Films: A Review. - Mater. Sci. (Medžiagotyra), 2011, v. 17. - pp. 358-370.
8. Попов А.И., Шупегин М.Л. Диагностика структуры пленок кремний-углеродных нанокompозитов. - Труды V Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур». Рязань: РГРТУ. 2012, т. 2. С. 154-170.
9. Попов А. И., Воронцов В. А., Попов И. А. Уровни структурной модификации свойств некристаллических полупроводников и области их применимости. - Физика и техника полупроводников, 2001, т. 35, № 6. С. 665-670.
10. Popov, A. I. Structural characteristics and structural modification of non-crystalline semiconductors. - J. of Optoelectronics and Advanced Materials, 2002, v 4, pp. 347 – 351.
11. Popov A. I., Barinov A. D., Presniakov M. Y. Modification of properties of silicon-carbon nanocomposites. - Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics, 2014, v. 9, pp. 787-791.
12. Шупегин М. Л. Осаждение пленок металлсодержащих нанокompозитов с кремний-углеродной матрицей. - Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2013, т. 79, № 2. С.28-32.
13. Barinov A.D., Popov A.I. and Makarov A.A. Property control methods of diamond-like silicon-carbon films for micro- and nanoelectronics. Proceedings of the European Modeling and Simulation Symposium, 2019. ISBN 978-88-85741-25-6; Affenzeller, Bruzzone, Longo and Pereira Eds. pp. 42 – 46.
14. Zavedeev E.V., Zilova O.S., Barinov A.D. et al. Femtosecond laser microstructuring of diamondlike nanocomposite films. - Diamond & Related materials, 2017, v. 74, pp. 45-52.
15. Гренадеров А. С. Формирование a-C:H:SiO<sub>x</sub> плёнок методом плазмохимического осаждения. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Томск, 2018. 142 с.
16. Будагян Б.Г., Шерченков А.А., Бердников А.Е., Черномордик В.Д. Высокоскоростное нанесение аморфного кремния. - Микроэлектроника, 2000, т. 29. С. 391-397.

17. Шерченков А.А. Свойства сплава изготовленного высокоскоростным нанесением методом низкочастотного плазмохимического разложения. - Материалы электронной техники, 2003, № 1. С. 48-51.
18. Yamaguchi T., Sakamoto N., Tagashira H. Particle formation in SiO<sub>x</sub> film deposition by low frequency plasma enhanced chemical vapor deposition. - Journal of Applied Physics, 1998, v. 83, pp. 554-560.
19. Shimozuma M., Kitamori K., Ohno H., Hasegawa H., and Tagashira H., J. Room temperature deposition of silicon nitride films using very low frequency (50Hz) plasma CVD. - Electron. Mater. 1985, v. 14. - pp. 573-586.
20. Попов А.И., Баринов А.Д., Емец В.М., Чуканова Т.С., Шупегин М.Л. Управление свойствами алмазоподобных кремнийуглеродных пленок. - Физика твердого тела, 2020, т. 62. С. 1612 – 1617.

УДК 53.084.6, 53.084.872-876; ГРНТИ 29.19.31

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ AU-RU ПОКРЫТИЙ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫХ КОНТАКТОВ НА ПАРАМЕТРЫ СПЕКТРОВ НИЗКОЧАСТОТНОГО ШУМА

Д.С. Логинов, Н.Б. Рыбин, Т.А. Холомина, И.Ф. Шерова

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

*Аннотация.* Экспериментально изучено влияние покрытий Au-Ru магнитоуправляемых контактов на структуру поверхности и параметры спектров низкочастотного шума: спектральную плотность мощности и показатель формы спектра.

*Ключевые слова:* геркон, низкочастотный шум, спектральная плотность мощности шума.

## STUDY OF THE INFLUENCE OF COATINGS OF MAGNETO-CONTROLLED CONTACTS WITH AU-RU ON THE PARAMETERS OF LOW-FREQUENCY NOISE SPECTRA

D.S. Loginov, N.B. Rybin, T.A. Kholomina, I.F. Sherova

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

*Annotation.* The effect of Au-Ru coatings of magnetically controlled contacts on the surface structure and parameters of low-frequency noise spectra: spectral power density and spectrum shape index has been experimentally studied.

*Keywords:* reed switch, low-frequency noise, noise power spectral density.

### Введение

Несмотря на длительную историю изучения и широкую распространенность низкочастотного (НЧ) или фликкер-шума, исследователи признают, что природа его возникновения неизвестна в большинстве объектов, где он наблюдается. В каждом конкретном случае отмечается особая причина генерации НЧ шума как стационарного случайного процесса, описываемого зависимостью  $S \sim 1/f^\beta$ , где  $S$  – спектральная плотность мощности шума (СПМ),  $f$  – частота,  $\beta$  – показатель формы спектра. Анализ опубликованных работ позволяет сделать вывод о том, что наиболее общей причиной возникновения НЧ шума электронных компонентов являются скрытые дефекты [1-3].

Спектроскопия низкочастотных шумов является актуальным неразрушающим экспериментальным методом, позволяющим связать параметры спектров НЧ шума с особенностями физических свойств объектов исследования.

Во многих работах, посвященных диагностике и экспресс-прогнозированию надежности электронных компонентов на основе спектроскопии НЧ шума, указано на необходимость применения специальных экстремальных воздействий, позволяющих выявить области, наиболее уязвимые с точки зрения надежности. Такие исследования

проведены для резисторов, диодов, транзисторов, детекторов ядерных частиц и  $\gamma$ -излучения, интегральных микросхем и т.д. [2,3]. Установлено, что рост спектральной плотности мощности НЧ шума свидетельствует о повышении разупорядоченности системы, источник которой в каждом случае индивидуален.

В опубликованных по данной тематике работах отсутствуют сведения об исследовании низкочастотных шумов в объемных низкоомных объектах, а также принципах создания экспериментальных установок, позволяющих проводить такие исследования.

**Целью** настоящей работы явилось исследование влияния золото-рутениевого покрытия магнитоуправляемых контактов на параметры спектров низкочастотного шума с помощью разработанных автоматизированного измерительно-аналитического комплекса [4] и специального программного обеспечения.

### Методика эксперимента

В работе исследованы параметры спектров НЧ шума партии из 10 герконов МКА-14103, предназначенных для коммутации цепей постоянного и переменного токов. Контактные пластины герконов были изготовлены из низконикелевого пермаллоя - сплава железа и никеля, обладающего сильномагнитными свойствами. Часть образцов имела золото-рутениевое гальваническое покрытие контактных пластин, которое применяется с целью повышения надежности геркона и снижения значения переходного сопротивления за счет обеспечения химической инертности и стабильности во времени рабочей контактирующей поверхности [5].

Структуру, морфологию и химический состав поверхности исследуемых образцов после вскрытия изучали с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6610LV, оснащенного приставкой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа INCA X-Max20. Изучение морфологии образцов проводили в режиме вторичной электронной визуализации (SEI) с ускоряющим напряжением 30 кВ. Исследование химического состава проводилось при ускоряющем напряжении 15 кВ.

### Экспериментальные результаты

Спектры химического состава контактных пластин, полученные методом рентгеновского энергодисперсионного микроанализа, представлены на рисунках 1 и 2. Для каждого измеренного образца были исследованы поверхности анода и катода при помощи растрового электронного микроскопа (рисунки 3,4).

Анализ химического состава показал, что пермаллоевые пластины контактов содержат 51,4% Fe и 48,6% Ni (рисунки 1,2). Из спектров химического анализа, представленных на рисунке 1 следует, что на поверхность контактов нанесено покрытие из Ru с подслоем Au.

При проведении исследований источник электрического тока подключался положительным полюсом к контакту геркона, который является анодом, а отрицательным к контакту, который является катодом. При протекании электрического тока через замкнутый магнитоуправляемый контакт большую роль играет площадь контакта и однородность поверхности. Из рисунков 3 и 4 следует, что у пермаллоевых контактов поверхность более затронута контактной эрозией по сравнению с контактами, покрытыми Au-Ru. Контактная эрозия возникает как результат коммутации. Указанное обстоятельство влияет на площадь соприкосновения анода и катода и, следовательно, на важнейший параметр магнитоуправляемых контактов – контактное сопротивление  $R_{\text{к}}$ .

Кроме того, анализ РЭМ-изображения поверхностей контактов позволяет утверждать, что поликристаллы покрытия имеют меньшие размеры по сравнению с зернами сплава Fe-Ni.

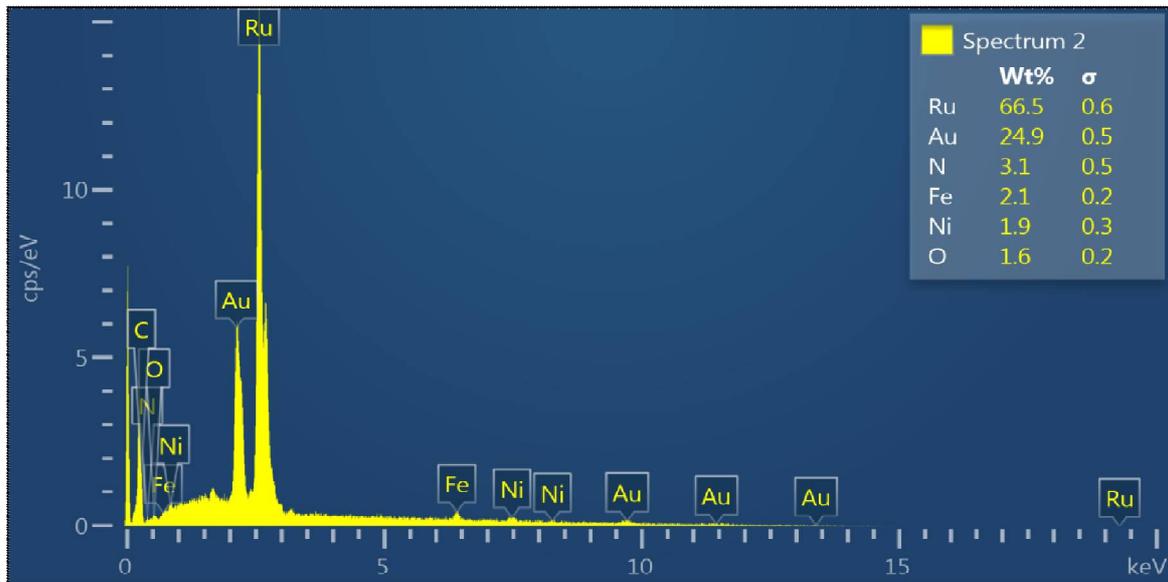


Рис. 1. Спектр химического состава образца с золото-рутением покрытием контактных пластин

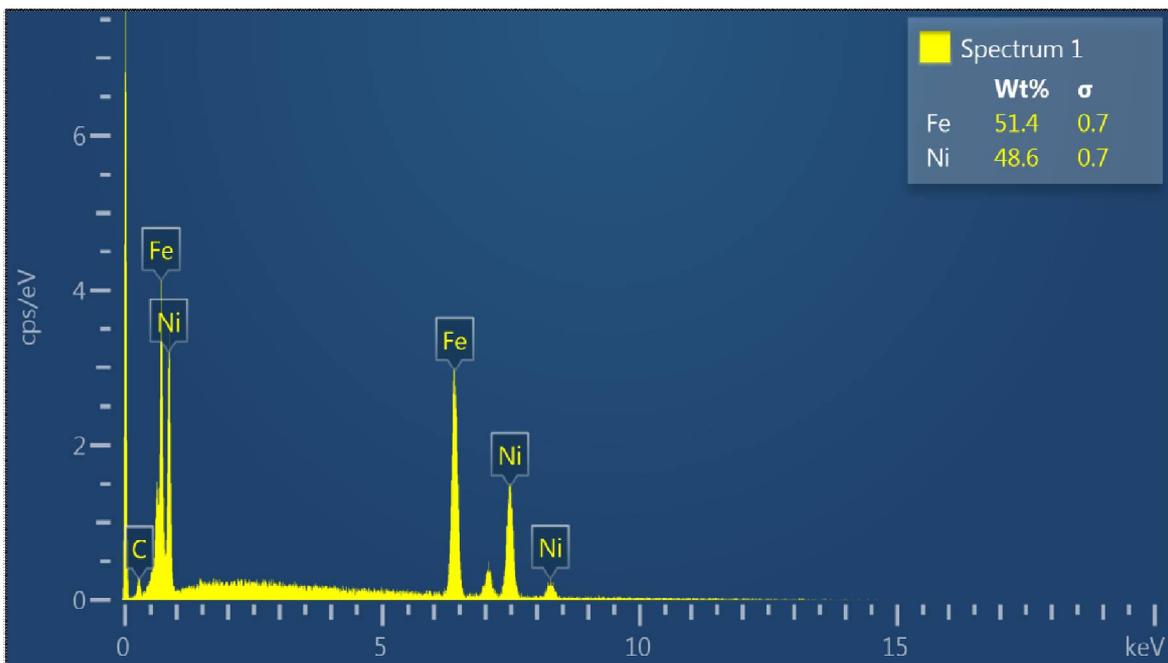


Рис. 2. Спектр химического состава образца без покрытия контактных пластин

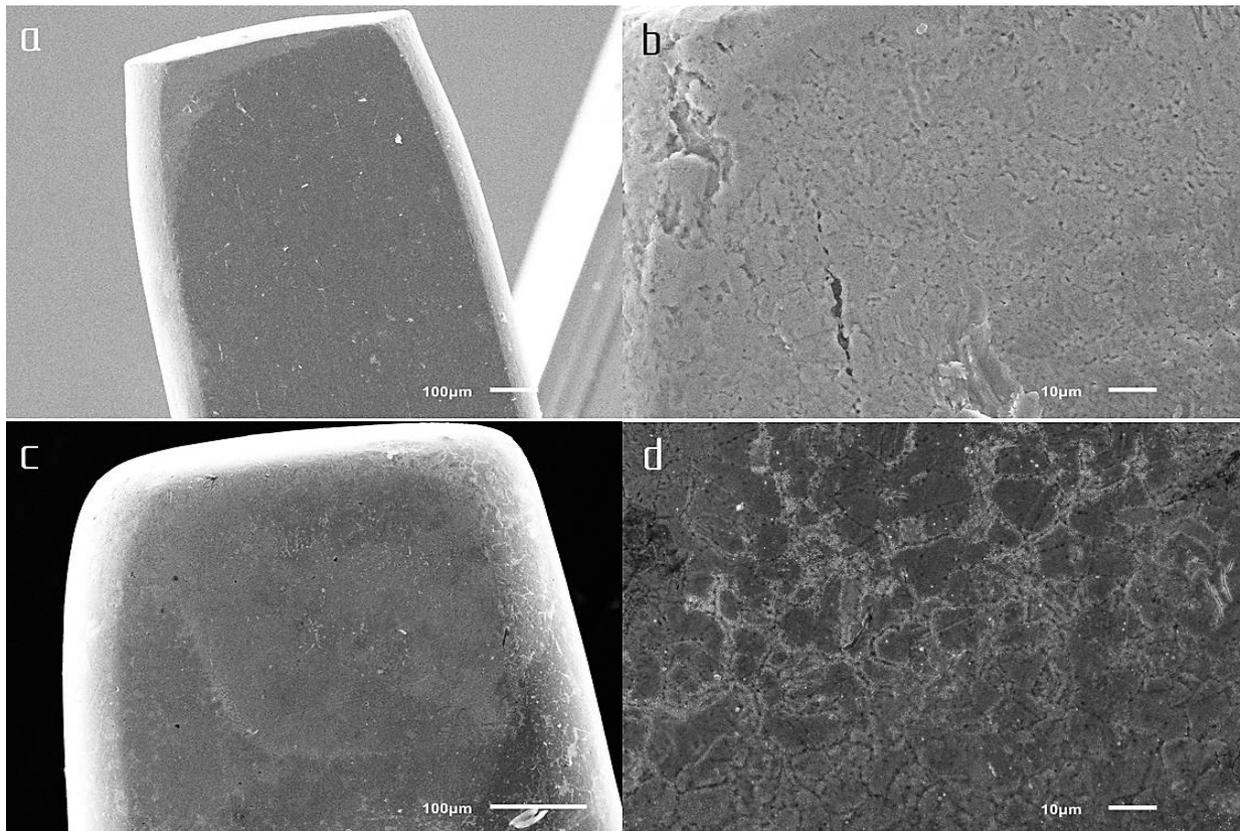


Рис. 3. РЭМ- изображение поверхности анода магнитоуправляемого контакта:  
а, b - из пермаллоя; с, d – из пермаллоя с покрытием Au-Ru

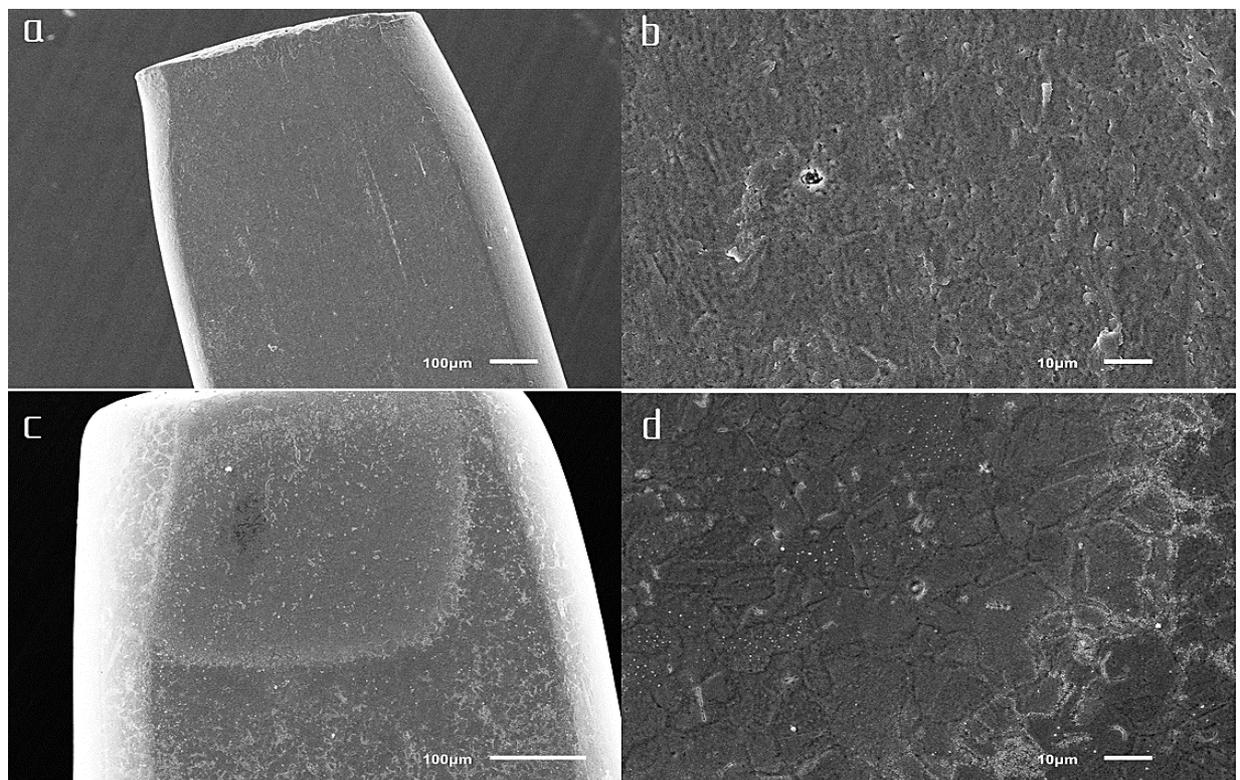


Рис. 4. РЭМ- изображение поверхности катода магнитоуправляемого контакта:  
а, b - из пермаллоя; с, d – из пермаллоя с покрытием Au-Ru

На рисунке 5 приведены типичные спектры НЧ шума герконов, контактные пластины которых были изготовлены из низкоконикелевого пермаллоя с покрытием и без золоторутениевого покрытия.

Известно, что спектральная плотность мощности НЧ шума является параметром, весьма чувствительным к дефектности объекта исследования [1-3]. Анализ показал, что нанесение покрытия Au-Ru снижает СПМ НЧ шума в среднем на 1-1,5 порядка, по-видимому, за счет повышения инертности поверхности контактных пластин, на которых без покрытия возможно образование диэлектрических пленок [5].

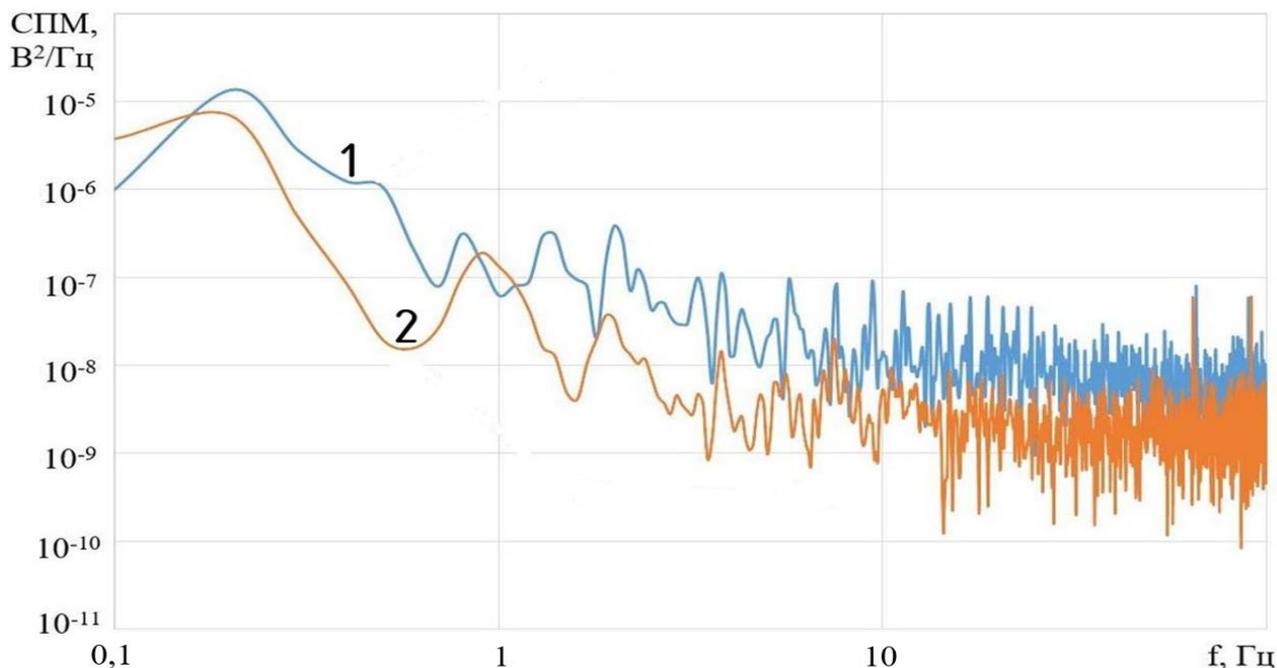


Рис. 5. Спектры НЧ шума герконов:  
1 – без покрытия;  
2 – с золоторутениевым покрытием контактных пластин

Значения одного из наиболее важных параметров герконов - контактного сопротивления  $R_{\text{к}}$  контролировались на всех этапах эксперимента. Величина контактного сопротивления определялась по результатам измерений по схеме четырехполюсника в соответствии с методикой, описанной в [6].

Результаты исследования значений контактного сопротивления и параметров спектров НЧ шума образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения контактного сопротивления и параметры спектров НЧ шума герконов МКА-14103 с покрытием Au-Ru и без покрытия пермалловых контактных пластин

№ образца	$R_n$ , Ом	$СПМ \cdot 10^{-9}$ , В <sup>2</sup> /Гц	$\beta$	Материал контактов
1	0,08	5,64	1,02	пермаллой с покрытием Au-Ru
2	0,08	178	0,65	пермаллой с покрытием Au-Ru
3	0,08	7,93	0,31	пермаллой с покрытием Au-Ru
4	0,08	32,1	1,21	пермаллой с покрытием Au-Ru
5	0,08	19,7	1,23	пермаллой с покрытием Au-Ru
6	0,11	32,7	0,54	пермаллой
7	0,11	2,93	2,02	пермаллой
8	0,16	5,64	1,83	пермаллой
9	0,12	6,52	1,04	пермаллой
10	0,15	12,8	1,58	пермаллой

### Заключение

Анализ экспериментальных результатов показал, что нанесение покрытия Au-Ru снижает величину контактного сопротивления герконов одной партии в среднем в 1,5-2 раза.

При исследовании характеристик спектров НЧ шума установлено, что в образцах с золото-рутениевым покрытием контактов СПМ снижалась в среднем на 1-1,5 порядка, а значение показателя формы спектра  $\beta$  – на 30-50% .

Таким образом, в случае золото-рутениевого покрытия контактных пластин герконов наблюдались более стабильные характеристики, позволяющие прогнозировать повышение ресурса их работы.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003) с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования РГРТУ.*

### Библиографический список

1. Жигальский Г.П., Холомина Т.А. Избыточные шумы и глубокие уровни в детекторах ядерных частиц и ионизирующего излучения на основе GaAs // Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60. № 6. С. 553–581.
2. Разуменко Д. Низкочастотные шумы электронных компонентов как инструмент для диагностики внутренних дефектов // Компоненты и технологии. 2008. № 9. С.168–176.
3. Якубович Б.И. Физические основы флуктуационного неразрушающего контроля твердых материалов и электронных приборов // Прикладная физика. 2016. № 1. С. 5-10.
4. Логинов Д.С., Холомина Т.А., Литвинов В.Г. Измерительно-аналитический комплекс для автоматизированных испытаний магнитоуправляемых контактов // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 3. С. 134–140.
5. Баскаков И.А., Карабанов С.М., Семин Е.В., Сиротина Т.А., Карбасов Б.Г., Устиненкова Л.Е. Контактное покрытие для магнитоуправляемых герметизированных контактов и способ нанесения контактного покрытия. Патент РФ МПК Н01Н1/02 Н01Н11/04. 12.10.2003.
6. Логинов Д.С., Холомина Т.А., Шерова И.Ф. Исследование влияния условий коммутации на измерение спектра низкочастотного шума магнитоуправляемых контактов // Вестник РГРТУ. 2022. № 82. С. 228-236.

УДК 53.084.6, 53.084.872-876; ГРНТИ 29.19.31

## АЛГОРИТМЫ РАБОТЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НЧ ШУМОВ НИЗКООМНЫХ ОБЪЕКТОВ

Д.С. Логинов

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

*Аннотация.* Разработаны и апробированы алгоритмы работы измерительно-аналитического комплекса для проведения исследований низкочастотного шума низкоомных объектов.

*Ключевые слова:* геркон, низкочастотный шум, низкочастотный усилитель, измерительно-аналитический комплекс, магнитоуправляемый контакт, спектральная плотность мощности шума.

## OPERATING ALGORITHMS OF THE MEASURING AND ANALYTICAL COMPLEX FOR INVESTIGATION OF LF NOISES OF LOW-RESISTANCE OBJECTS

D.S. Loginov

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

*Annotation.* Algorithms for the operation of a measuring and analytical complex for conducting studies of low-frequency noise of low-resistance objects have been developed and tested.

*Keywords:* reed switch, low-frequency noise, low-frequency amplifier, measuring and analytical complex, magnetically controlled contact, noise power spectral density.

### Введение

Спектроскопии низкочастотного (НЧ) шума применяется как методическая основа для экспресс-диагностики и прогнозирования ресурса работы резисторов, диодов, транзисторов, детекторов ядерных частиц и  $\gamma$ -излучения, интегральных микросхем и других электронных компонентов. Увеличение спектральной плотности мощности НЧ шума свидетельствует о повышении разупорядоченности системы, источник которой в каждом случае индивидуален.

В связи с недоступностью автоматизированных измерителей электрических шумов промышленного выпуска экспериментальные установки исследования характеристик НЧ шума электронных компонентов и их программное обеспечение являются авторскими. В этой связи актуальны разработка и апробирование измерительного оборудования и специального программного обеспечения, а также описание алгоритмов работы.

**Целью** настоящей работы явилась разработка алгоритмов работы измерительно-аналитического комплекса для исследования НЧ шумов низкоомных объектов, которые позволяют в автоматическом режиме удаленно от измерительной ячейки производить задание режимов исследования, управление, измерение и обеспечение высокой точности данных, получаемых за короткие промежутки времени.

### Методика эксперимента

При изучении электрических шумов используют аналоговые, аналого-цифровые и цифровые методы измерений параметров флуктуационных сигналов [1]. Разработанный измерительно-аналитический комплекс для исследования НЧ шумов низкоомных объектов [2] построен на основе аналого-цифрового метода, который заключается в получении необходимого уровня сигнала низкочастотного шума с помощью аналогового тракта и последующем измерении с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП). В качестве низкоомных объектов исследования применены герметизированные магнитоуправляемые контакты (герконы), которые подвергались в наших экспериментах многократной

коммутации (искусственному износу) в разных режимах с предшествующим и последующим измерениями спектров НЧ шума.

Структурная схема установки для измерения спектров НЧ шума аналого-цифровым методом представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Структурная схема установки для измерения спектров электрического шума аналого-цифровым методом

Алгоритм обработки случайного сигнала основан на преобразовании Фурье (ПФ), которое может использоваться как для непрерывных функций времени, так и для дискретных, в этом случае оно называется дискретным преобразованием Фурье (ДПФ). Непрерывное преобразование Фурье — это преобразование, которое применяется к функции  $x(t)$ , заданной на интервале времени  $(-\infty, +\infty)$ . На практике обычно применяется ДПФ [1].

Если аналоговый сигнал имеет математическую модель типа непрерывной (или кусочно-непрерывной) функции, то соответствующий ему дискретный сигнал представляется последовательностью отсчетных значений сигнала  $x(t)$  в определенные моменты времени  $t$ . Применительно к случайным процессам при вычислении энергетического спектра  $S_x(f)$  сигнала  $x(t)$  по теореме Винера–Хинчина интеграл может быть заменен суммой.

Практически число членов ряда Фурье ограничивается определенным числом  $N$ , и ряд равномерно сходится при  $N \rightarrow \infty$ . Ограничение числа членов ряда значением  $N$  означает аппроксимацию сигнала системой базисных функций с определенной погрешностью, в зависимости от фактического спектра сигнала. В этом случае вычисление составляющих спектра в ДПФ выполняется по следующему соотношению [1]:

$$S_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Y_k \exp(-i2\pi f k / N),$$

где  $Y_k$  — комплексные амплитуды гармоник,  $k = 0, \dots$  ;

$N - 1$  — индекс спектральных компонентов (частотных составляющих) анализируемого сигнала.

Результатом вычислений  $S_n$  является комплексное число. После возведения в квадрат и сложения его реальной и мнимой частей получают плотность мощности соответствующей спектральной составляющей.

Коэффициент  $S_0$  (постоянная составляющая) является средним значением всех отсчетов, если  $k = 0$ , то получают условно нулевую гармонику случайного сигнала. Использование быстрого преобразования Фурье позволяет за короткий промежуток времени получить спектр измеряемого сигнала. На описанных выше преобразованиях реализованы алгоритмы обработки полученного сигнала.

### Описание алгоритмов

Для обеспечения работы комплекса было разработано специальное ПО в среде разработки STM32CubeIDE 1.3.0. [3,4]. Разработка проведена под используемый микроконтроллер STM32F030F4P6, который позволяет с высокой производительностью производить обработку данных и одновременно работать с USB, ADC, GPIO, SPI по командам с ПК. Высокая тактовая частота 48 МГц [5] позволяет в реальном времени реализовать измерение, обработку и

передачу измеряемой информации для последующей обработки и анализа. Алгоритм работы микроконтроллера, который обеспечивает управление режимами работы комплекса и измерением НЧ шума, представлен на рисунке 2.

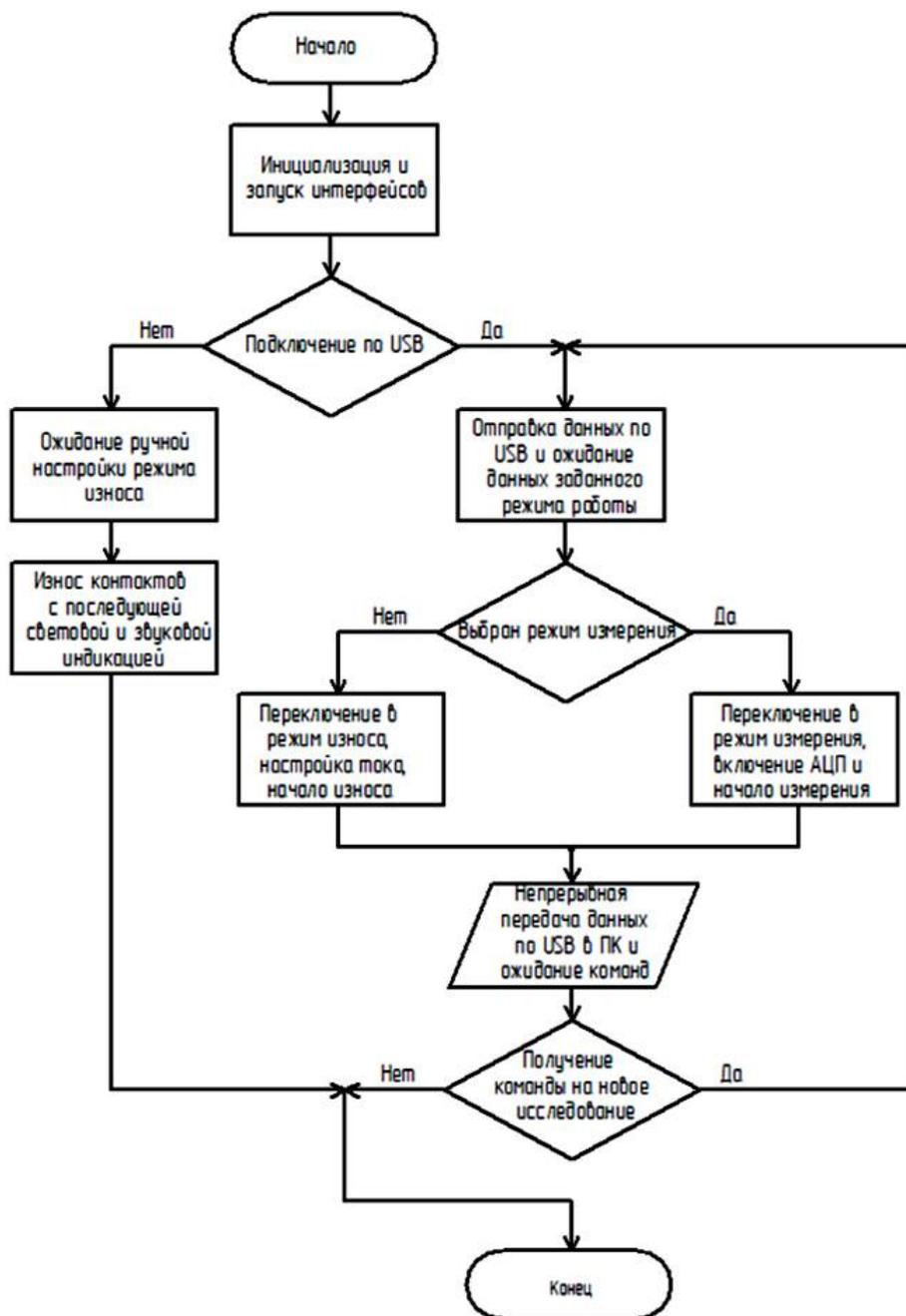


Рис. 2. Алгоритм работы микроконтроллера

Для полноценного функционирования и возможности удаленного управления процессом коммутационных испытаний и измерений спектров НЧ шума было разработано ПО для ОС Windows 7 и новее в среде разработки Rad Studio 10.4 community edition на языке программирования Delphi. Разработанное ПО позволяет поддерживать связь с комплексом по протоколу USB, в режиме реального времени отправлять на него данные о конфигурации, а также получать результаты измерений с обработкой и выводом в режиме реального времени. Алгоритм работы ПО управления комплексом приведен на рисунке 3.

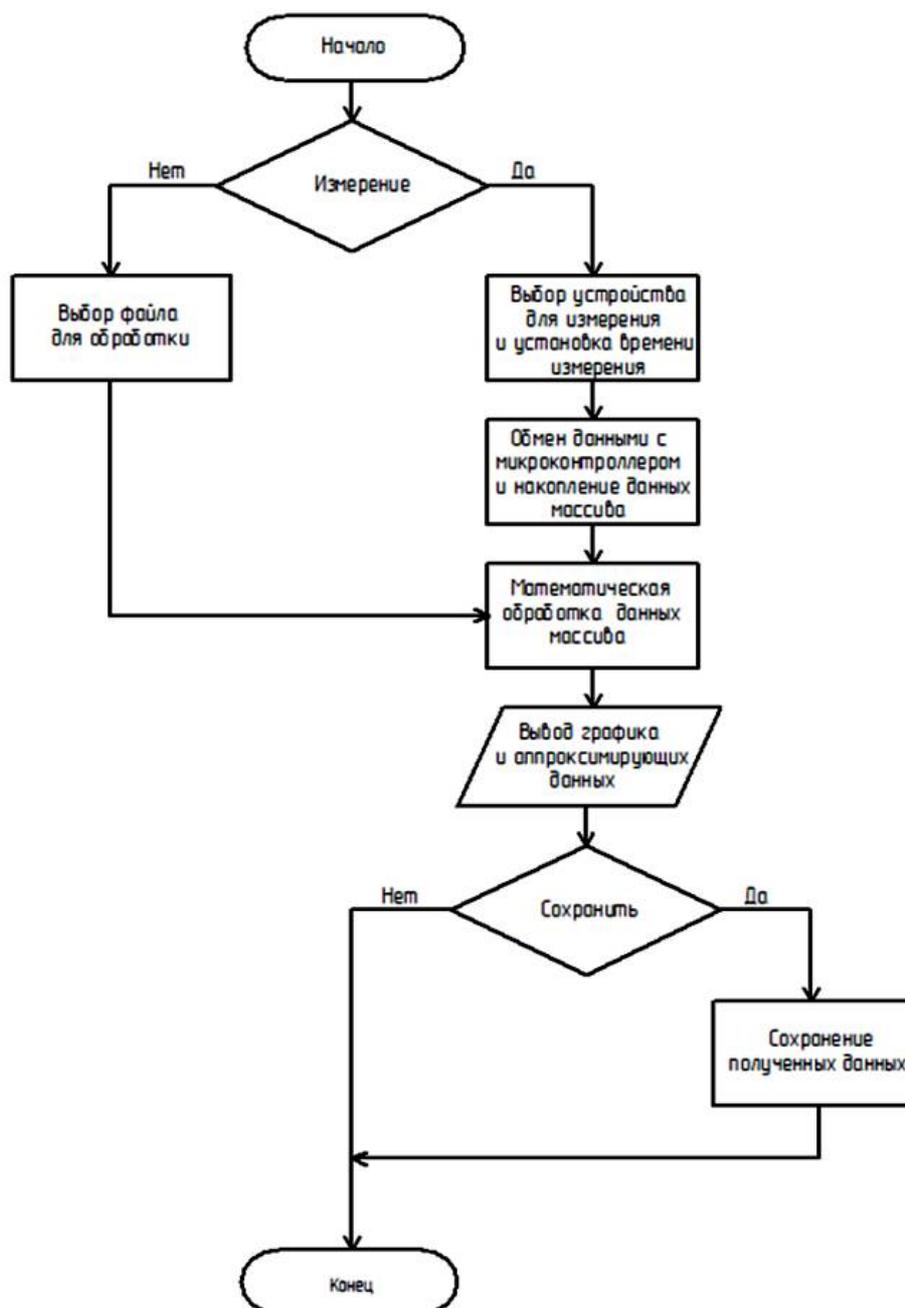


Рис. 2. Алгоритм работы ПО управления измерительно-аналитическим комплексом

При включении автоматизированного измерительно-аналитического комплекса происходит инициализация ПО микроконтроллера STM32F103C8T6 и при готовности комплекса к работе включается световой индикатор «ГОТОВНОСТЬ». Затем следует установка низкоомного объекта - геркона в зажимы и осуществляется настройка режимов работы оборудования при помощи управляющих кнопок. При подключении к ПК программно-аппаратный измерительный комплекс переходит в режим настройки и ожидает поступления данных от терминальной программы по интерфейсу USB.

В разработанном ПО управления комплексом реализована возможность аппроксимации полученных спектров НЧ шума экспоненциальной функцией в логарифмическом масштабе с последующим выводом информации о частоте перегиба, угле

между аппроксимирующими линиями, значениях коэффициентов формы спектра (наклона) каждой аппроксимирующей линии. В комплексе предусмотрена возможность проводить измерения спектров НЧ шума низкоомных объектов. Для этого в программе необходимо выбрать соответствующий режим и настроить разрешение (время) измерения. После завершения измерений, полученные данные сохраняются в графическом и текстовом форматах.

С помощью разработанного ПО обеспечивается полная настройка режимов искусственного износа - многократной коммутации контактов (число переключений, ток, напряжение) с предшествующим и последующим измерениями шумовых параметров [3,4]. Цикл многократной коммутации (износа) геркона запускается при помощи отправки команды с ПК или кнопки на измерительно-аналитическом комплексе. Во время протекания заданного цикла на устройстве светится индикатор «ИЗНОС». По окончании заданного цикла включается световой индикатор «ЗАВЕРШЕНО» и звучит периодический сигнал бипера. После выполнения заданного экспериментального цикла искусственного износа геркон готов к дальнейшим исследованиям: получению и математической обработке спектров НЧ шума, а также других характеристик прибора.

Параметры комплекса, реализованного под управлением разработанного ПО, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры измерительно-аналитического комплекса, реализованного под управлением разработанного ПО

Время измерения спектра, мин	0,5-60
Частота выборки, Гц	0,0003-1,5
Частота дискретизации, кГц	36
Тип аппроксимации	экспонента
Диапазон измерения спектра, Гц	0,01-100
Уровень собственного шума, В <sup>2</sup> ·Гц	10 <sup>-15</sup>
Частота коммутации геркона, Гц	1-1000
Время проведения коммутации, мин	1-2880
Ток коммутируемой цепи, А	0-3
Напряжение коммутируемой цепи, В	0,1-10
Разрядность измерительного АЦП, Бит	12
Напряжение питания комплекса, В	24
Потребляемый ток, А	Не более 2
Интерфейс передачи данных	USB 2.0
Формат вывода данных	.bmp, .txt
Требуемая ОС, не старше	Windows 7

Экспериментальные результаты изучения низкоомных объектов при помощи разработанных измерительно-аналитического комплекса и специального ПО представлены в [6,7].

### Заключение

Разработаны и экспериментально апробированы алгоритмы работы измерительно-аналитического комплекса для исследования спектров НЧ шума низкоомных объектов.

Программное обеспечение реализовано для 32 битного высокопроизводительного микроконтроллера STM32, что позволяет организовать управление коммутируемой цепью, обратную связь для обеспечения защитных функций, прием данных от датчиков и обработку полученной информации, а также обмен данными с ПК.

Программно-аппаратный измерительный комплекс, реализованный под управлением разработанного ПО, позволяет автоматически при заранее заданных параметрах в режиме реального времени проводить исследования по многократной коммутации магнитоуправляемых контактов с предшествующим и последующим измерением и изучением спектров НЧ шума.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003) с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования РГРТУ.*

### Библиографический список

1. Жигальский Г.П. Флуктуации и шумы в электронных твердотельных приборах. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2012. 512 с.
2. Логинов Д.С, Холомина Т.А., Литвинов В.Г. Измерительно-аналитический комплекс для автоматизированных испытаний магнитоуправляемых контактов // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 3. С. 134–140.
3. Логинов Д.С, Семенов А.Р., Холомина Т.А. Программа для расчета и визуализации зависимости спектральной плотности мощности низкочастотного шума. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022615607 от 31 марта 2022 г.
4. Логинов Д.С, Кошкин И.О., Семенов А.Р., Холомина Т.А. Программа для расчета и управления микроконтроллером установки измерения флуктуационных характеристик электронных компонентов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022681218 от 10 ноября 2022 г.
5. Description of STM32F1 HAL and low-layer drivers [электронный ресурс]. 2021. URL: [https://www.st.com/resource/en/user\\_manu-al/dm00154093-description-of-stm32f1-hal-and-lowlayer-drivers-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/user_manu-al/dm00154093-description-of-stm32f1-hal-and-lowlayer-drivers-stmicroelectronics.pdf) (дата обращения 07.09.2021).
6. Логинов Д.С, Холомина Т.А., Шерова И.Ф. Исследование влияния условий коммутации на измерение спектра низкочастотного шума магнитоуправляемых контактов // Вестник РГРТУ. 2022. № 82. С. 228-236.
7. Логинов Д.С., Баскакова А.В., Зинуков А.А., Литвинов В.Г., Холомина Т.А., Мишустин В.Г. Исследование влияния многократной коммутации на параметры НЧ шума магнитоуправляемых контактов // Материалы XII Международной научно-технической конференции «Микро- и нанотехнологии в электронике», 31 мая – 5 июня 2021 г., Нальчик, Россия. С. 449-454.

УДК 621.382: ГРНТИ 29.03.35

## РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ БАРЬЕРНЫХ НАНОСТРУКТУР ПРИ ОПТИЧЕСКОМ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

Ю.Д. Гудков, В.Г. Мишустин

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

*Аннотация.* В работе рассмотрено применение метода компенсации тока нестационарной фотопроводимости (МКТНФ) для исследования р-і-п структур и барьеров типа Шоттки на основе полупроводников с низкой подвижностью, а также указаны ограничения МКТНФ при переходе к исследованию многослойных структур. Проанализированы направления развития МКТНФ, разработана структурная схема макета модернизированного измерительно-аналитического комплекса, сформулированы требования к измерительному оборудованию.

*Ключевые слова:* многослойные гомо- и гетероструктуры, компенсация тока нестационарной фотопроводимости, макет измерительно-аналитического комплекса.

## DEVELOPMENT OF A TECHNIQUE FOR INVESTIGATING MULTILAYER BARRIER NANOSTRUCTURES UNDER OPTICAL AND ELECTRICAL EXCITATION

Yu.D. Gudkov, V.G. Mishustin

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkina,  
Russian Federation, Ryazan, vgmish@yandex.ru*

*Abstract.* The paper considers the application of the transient photoconductivity current compensation method for the investigation of p-i-n structures and Schottky barriers based on semiconductors with low mobility carriers. Also the limitations of the method in the multilayer structures investigation are shown. The structural diagram of the modernized measuring and analytical complex mock-up is developed. The requirements for measuring equipment are formulated.

*Keywords:* multilayer homo- and heterostructures, compensation of transient photoconductivity current, mock-up of the measuring and analytical complex.

### Введение

Метод компенсации тока нестационарной фотопроводимости (МКТНФ) является развитием традиционного времяпролетного метода и предназначен для измерения распределения внутренних электрических полей в барьерных полупроводниковых структурах на основе материалов с низкой подвижностью носителей заряда [1]. Отличие МКТНФ от традиционной времяпролетной методики заключается в том, что внешнее электрическое поле имеет полярность, противоположную внутреннему контактному полю. В результате такое включение приводит к компенсации переходного тока фотопроводимости. Точность МКТНФ измерений выше, чем при непосредственном наблюдении переходных процессов, поскольку исключается влияние на результат измерений дисперсионного характера переноса носителей заряда, а также их потери в процессе дрейфа за счет рекомбинации [2].

Экспериментально МКТНФ реализуется следующим образом: на исследуемую структуру одновременно воздействуют импульсом монохроматического света и электрическим полем от внешнего источника. Носители заряда генерируются за счет оптического возбуждения, и под действием суперпозиции внутреннего и внешнего электрических полей они дрейфуют, создавая ток нестационарной фотопроводимости. Для реализации МКТНФ необходимо обеспечить четкую синхронизацию момента подачи оптического импульса и компенсирующего электрического поля, а также возможность изменения времени задержки между воздействием оптического излучения и внешнего электрического поля [3].

На рисунке 1 представлен пример измерения переходного фототока, полученный при импульсном освещении р-і-n структуры на основе а-Si:H монохроматическим светом с длиной волны 526 нм. Пиковое значение фотоЭДС составляет 0.83 В, длительность наблюдаемого переходного процесса – 550 мс.

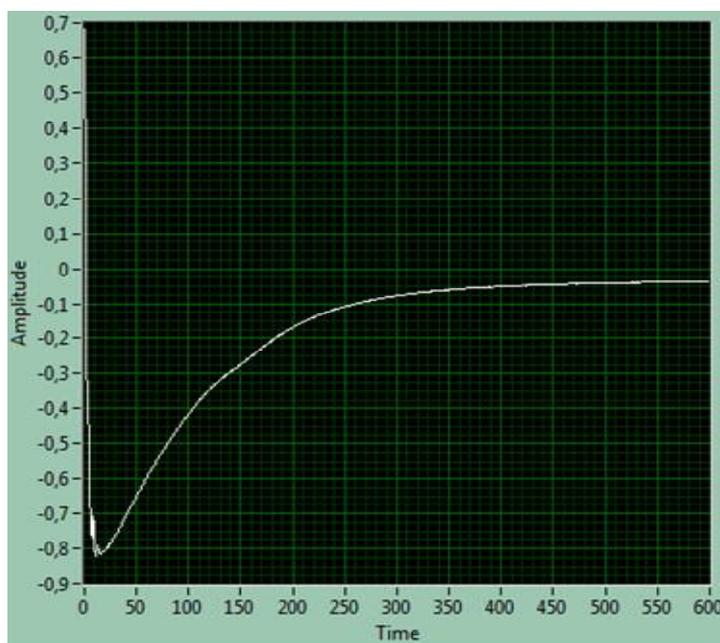


Рис. 1. Переходной процесс в полупроводниковой р-і-n структуре на основе а-Si:H

### Ограничения МНКТФ при исследовании многослойных гомо- и гетероструктур

Экспериментальные исследования "простых" объектов типа р-і-n структур или барьеров Шоттки дают воспроизводимые результаты, которые коррелируют с результатами теоретических расчетов [4]. Однако следует отметить, что при исследовании даже "простых" структур экспериментальные результаты дают значения напряженности встроенного электрического поля в 3 – 5 раз меньше, чем результаты математического моделирования [5].

По мере усложнения структур – увеличения числа активных и пассивных слоев, – расхождения между результатами теоретических расчетов и экспериментальными данными становятся все больше, причем экспериментальные результаты оказываются заметно меньше расчетных.

Таким образом можно констатировать, что МКТНФ обладает определенными ограничениями при увеличении количества слоев в исследуемых барьерных структурах. Их можно разделить на две группы:

- 1) физические ограничения, связанные с особенностями процессов поглощения света и переноса носителей заряда;
- 2) ограничения, связанные с интерпретацией экспериментальных данных.

Поглощение света в многослойных структурах, в которых одновременно присутствуют материалы с существенными различиями оптических свойств, имеет сложный характер, происходит многократное переотражение света на границах раздела различных слоев, а также поглощение света на границах раздела, которое не приводит к фотогенерации свободных носителей заряда в объеме полупроводника. При освещении коротковолновым излучением

большая часть энергии поглощается в тонком приповерхностном слое, где высокая плотность поверхностных состояний обуславливает высокую скорость рекомбинации.

Процессы переноса в многослойных структурах также имеют свои особенности. Различные слои имеют заметные различия по значению электропроводности, что приводит к разным значениям постоянной времени переходных процессов. Кроме того, в высокоомных слоях имеется высокая плотность локализованных состояний. Эти состояния могут работать как центры рекомбинации и ловушки для носителей заряда [6], что приводит к потере части фотогенерированных носителей заряда в процессе их переноса через структуру. Также имеет место неравномерное распределение электрического поля по толщине структуры, что также ухудшает кинетические характеристики материала и приводит к снижению коэффициента собирания носителей заряда [7].

Ограничения, связанные с интерпретацией экспериментальных данных, заключаются в следующем. Значение напряженности внутреннего электрического поля определяется непосредственно по измеренному значению компенсирующего напряжения от внешнего источника и толщине структуры. Пространственное распределение электрического поля по толщине барьерной структуры рассчитывается исходя из известной спектральной зависимости коэффициента поглощения для данного материала. При увеличении количества слоев в структуре вместе с уменьшением их толщины делает такие расчеты гораздо более трудоемкими. При этом необходимо иметь точную информацию о толщинах слоев, их оптических и электрофизических свойствах.

### **Направления развития МКТНФ для исследования многослойных структур**

Для минимизации ограничений МКТНФ применительно к многослойным структурам можно сформулировать два направления:

- 1) работы по минимизации физических ограничений МКТНФ;
- 2) повышение точности математического аппарата для обработки и интерпретации результатов.

Для реализации первого направления, связанного с физическими ограничениями МКТНФ предлагается следующее.

При увеличении количества слоев в барьерной структуре для исследований необходимо обеспечить генерацию носителей заряда в заданных областях структуры. Для фотогенерации носителей заряда в глубине полупроводника необходимо использовать источник света с максимумом интенсивности излучения, сдвинутым в красную и ближнюю ИК области спектра. Это позволит измерять распределение внутреннего электрического поля по всей толщине многослойных барьерных полупроводниковых структур.

Поскольку большая часть излучения от импульсного источника не проходит сквозь монохроматор, для эффективной генерации носителей в глубине структуры необходимо обеспечить высокую интенсивность импульсного источника. Разработка соответствующего высоковольтного источника питания большой мощности позволит обеспечить необходимую интенсивность фотогенерации в многослойных барьерных полупроводниковых структурах.

Наличие материалов с относительно высокой электропроводностью в составе многослойных барьерных структур предъявляет более высокие требования к скоростным характеристикам измерительной цепи. Применение быстродействующего малошумящего прецизионного операционного усилителя в измерительной цепи позволит обрабатывать переходные процессы длительностью до 10 нс.

Для реализации второго направления, связанного с повышением точности МКТНФ, надо отметить следующее.

При исследовании "простых" образцов типа р-і-n структуры или диода типа Шоттки фактически имеет место только один активный слой – область собственного полупроводника в р-і-n структуре или слаболегированного полупроводника р- или n-типа в диоде Шоттки. Вспомогательные слои имеют очень малую по сравнению с активной областью толщину, поэтому поглощением света и соответственно фотогенерацией носителей в этих слоях обычно пренебрегают [8]. Для определения распределения фотогенерированного заряда по толщине активной области используется закон Бугера-Ламберта-Бера, который описывает поглощения света экспоненциальной зависимостью.

При увеличении количества активных слоев заметно уменьшается их толщина, а также существенный вклад в перераспределение светового потока вносит многократное отражение и переотражение на границах раздела различных областей. В этом случае требуется использовать более сложный математический аппарат, который учитывает особенности слоистых структур при прохождении и поглощении света [9].

### Разработка структурной схемы макета МКТНФ комплекса

На рисунке 2 представлена функциональная схема макета измерительно-аналитического комплекса МКТНФ для исследования многослойных полупроводниковых барьерных структур.

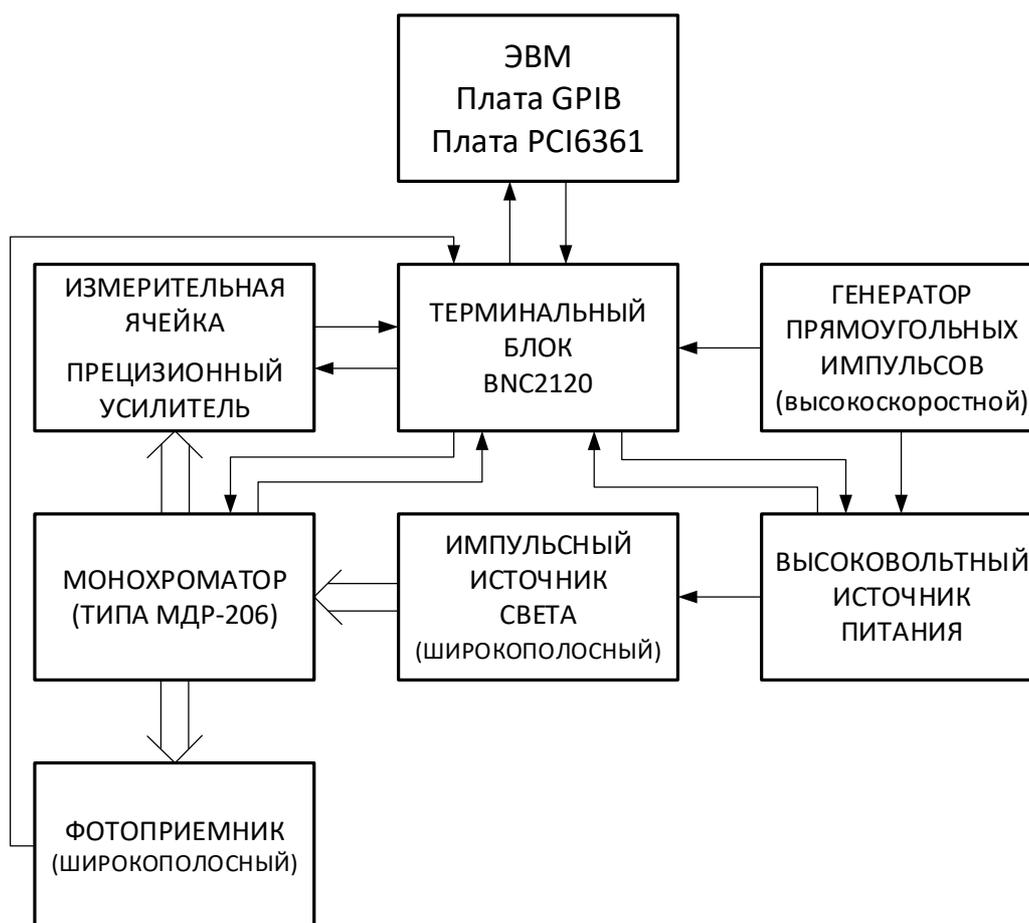


Рис. 2. Функциональная схема макета измерительно-аналитического комплекса МКТНФ

В состав функциональной схемы входят следующие элементы:

- ЭВМ, оснащенная универсальной интерфейсной платой GPIB и универсальной платой ввода-вывода PCI6361 – предназначена для программного управления измерительными приборами и обработки экспериментальных данных;
- терминальный блок BNC2120 – предназначен для коммутации ЭВМ с измерительными и управляющими цепями;
- высоковольтный источник питания – предназначен для питания импульсного источника света (лампы вспышки);
- импульсный источник света – предназначен для создания светового потока в видимой, а также ближней УФ и ИК областях спектра;
- монохроматор – предназначен для выделения определенной длины волны из оптического спектра импульсного источника света;
- фотоприемник – предназначен для регистрации и контроля интенсивности монохроматического света;
- измерительная ячейка / прецизионный усилитель – предназначен для размещения образца и усиления измеренного переходного фототока;
- генератор прямоугольных импульсов – предназначен для процесса отладки макета измерительно-аналитического комплекса МКТНФ, а также для реализации ручного режима управления экспериментом.

### Заключение

Требования к составу и техническим характеристикам измерительного оборудования, входящего в состав макета измерительно-аналитического комплекса МКТНФ, определяется особенностями поглощения света и переходных процессов в многослойных полупроводниковых барьерных структурах. Общим для всех элементов комплекса – стандартных и специально разработанных, – является возможность цифрового управления с помощью ЭВМ, оснащенной необходимыми интерфейсами и коммуникационными устройствами.

Требования для лампы вспышки – непрерывный спектр излучения в диапазоне 350 – 1250 нм с максимумом интенсивности в красной и ближней ИК областях. Требования к высоковольтному источнику питания – выходное напряжение не менее 10 кВ, пиковая мощность – не менее 150 кВт, средняя мощность – не менее 600 Вт. Требования к измерительной ячейке – диапазон измеряемых токов 100 пА – 1 мА, длительность нарастания фронта – не более 10 нс.

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

### Библиографический список

1. Мишустин В.Г. Исследование влияния локализованных состояний на распределение пространственного заряда в барьерных структурах на основе неупорядоченных полупроводников / Дисс. канд. физ.-мат. наук: Рязань, 2008. 185 с.
2. Вихров С.П., Вишняков Н.В., Мишустин В.Г. и др. Анализ и уточнение математического аппарата для модифицированного времяпролетного метода // ФТП. 2001. Т. 36. Вып. 1. С. 433 – 436.
3. Н.В. Вишняков, А.Д. Маслов, В.Г. Мишустин и др. Измерение распределения встроенных электрических полей в полупроводниковых барьерных структурах // Вестник РГРТУ. 2018. № 66. Часть 2. С. 23 – 29.
4. N.V. Vishnyakov, S.P. Vikhrov, V.G. Mishustin et.al. The measurement of electric field distribution in the barrier structures based on disordered semiconductors by using the transient photocurrent compensation method // Journal of nanoelectronics and optoelectronics. 2014. Vol. 9. No. 6, pp. 773 – 777.

5. Баскаков Н.А., Мишустин В.Г. Определение электрофизических характеристик барьерных квантово-размерных структур // В сборнике: Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2022. Сборник трудов V Международного научно-технического форума: в 10 т. Рязань, 2022. С. 109-112.

6. Вихров С.П., Вишняков Н.В., Гудзев В.В. и др. Исследование глубоких энергетических уровней в солнечном элементе типа НГТ // ФТП. 2018. Том 52. Вып. 7. С. 787-791.

7. Мишустин В.Г., Романов А.Г. Метод компенсации тока нестационарной фотопроводимости для исследования полупроводниковых материалов и барьерных структур на их основе // Материалы научно-технической конференции «Микроэлектроника и информатика-2017». Сборник статей. Москва, 2017. С. 123 – 128.

8. Н.В. Вишняков, В.Г. Литвинов, В.Г. Мишустин и др. Комплексные исследования многослойных барьерных структур микро- и нанoeлектроники // Вестник РГРТУ. 2022. № 82. С. 197 – 206.

9. Толкач Н.М., Вишняков Н.В., Литвинов В.Г. и др. Исследование степени кристалличности пленок  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  методами фотометрии отражения и пропускания // Физическая оптика. 2022. Т. 15. Вып. 3.3. С. 219 – 222.

УДК 520.68; ГРНТИ 47.13.07

## ЦИФРОВЫЕ МАТРИЧНЫЕ РАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ДЛЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В.А. Линьков, С.Ю. Линькова

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

*Аннотация.* В работе рассматриваются варианты конструкций матричных ракетных двигательных системам предназначенных для использования в качестве маневровых двигателей малоразмерных космических аппаратов используемых при выполнении операций ориентации, стыковки, причаливания, самосборки и трансформации конструкций создаваемых на их базе.

*Ключевые слова:* матричный ракетный двигатель, реверсивный матричный ракетный двигатель, мультивекторный матричный ракетный двигатель.

## DIGITAL MATRIX ROCKET ENGINES FOR SMALL SPACE VEHICLES

V.A. Linkov, S.Yu. Linkova

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russian Federation, Ryazan, musolin.a.k@rsreu.ru*

*Annotation.* The paper considers design options for matrix rocket propulsion systems intended for use as shunting engines for small spacecraft used in the operations of orientation, docking, mooring, self-assembly and transformation of structures created on their basis.

*Key words:* matrix rocket engine, reversible matrix rocket engine, multi-vector matrix rocket engine.

В работе рассматриваются варианты конструкций матричных ракетных двигательных систем (МРДС) для малоразмерных космических аппаратов (МКА) и предназначенных для использования в качестве маневрового двигателя при выполнении операций ориентации, стыковки, причаливания, самосборки и трансформации конструкций создаваемых из МКА, классифицируемые как фемтоспутники – весом менее 100 грамм и аттоспутники - весом менее 10 грамм [9-37]. Специально для МКА был разработан новый класс маневровых ракетных двигателей - матричные ракетные двигатели (МРД) [1-8]. При разработке к ним предъявлялись следующие требования: высокая скорость разворота МКА с прецизионной точностью (цифровое управление величиной и направлением тяги), компактность, заправка горючим в процессе изготовления, технологичность изготовления, базирующаяся на методах, используемых при изготовлении полупроводниковых микрочипов.

Варианты структур МРДС приведены на рисунке 1, где представлены панельные односторонняя (фрагмент А) и двухсторонняя (фрагмент Б) реверсивная матричная ракетная двигательная система с индивидуальным цифровым управлением величиной тяги каждой

реверсивной двигательной ячейки для МКА и их структурные блок-схемы. На рисунке 2 представлен выносной элемент А (10:1) и Б (10:1) в увеличенном масштабе и разрезе, поясняющие конструкции матричной (фрагмент А) и реверсивной матричной (фрагмент Б) ракетных двигательных систем с индивидуальным цифровым управлением величиной тяги каждой реверсивной двигательной ячейки для МКА. На рисунке 3 приведен примерный трехмерный график распределения величин векторов тяги  $W$  по координате  $Z$  и координатам  $X, Y$  при выполнении маневра малоразмерным космическим аппаратом.

Под используемым в тексте словосочетанием «двигательная ячейка» и «реверсивная двигательная ячейка» понимается следующее: реверсивная двигательная ячейка (в отличие от двигательной ячейки) – это группа  $F$  элементов  $a_r(i, j)$  двух двигательных матриц  $m \times n$  с противоположно направленными векторами тяги, элементы которых находятся на пересечении строки  $m_i$  с группой столбцов  $n_j$  (количество которых равно количеству разрядов управляющего двоичного кода) и состоят из набора коммутируемых разнокалиберных зарядов (элементов)  $F = \{a_1 w_1(i, j_{+1}), a_2 w_2(i, j_{+2}), a_3 w_4(i, j_{+3}), a_4 w_8(i, j_{+4}), a_5 w_{16}(i, j_{+5})\}$  твердого топлива в пропорциях 1-2-4-8-16 где:  $a_r$  – элемент реверсивной двигательной ячейки,  $r$  – номер ячейки ( $r = 1, 2, \dots, N$ );  $w_k$  – весовой коэффициент величины тяги элемента реверсивной двигательной ячейки с распределением величин в виде последовательных степеней числа два ( $k = 1, 2, 4, 8, 16, \dots, (1 \cdot 2^h)$ ), ( $h$  – максимальное количество разрядов управляющего двоичного кода). Каждому элементу реверсивной двигательной ячейки в зависимости от объема (массы) размещенного твердого топлива (после его воспламенения) соответствует определенный весовой коэффициент  $w_k$  величины тяги. В зависимости от управляющего кода, соответствующему определенному двоичному числу, происходит изменение величины тяги реверсивной двигательной ячейки в интервале от 0 до 100% за счет суммирования выбранных двоичным кодом сочетаний дискретных величин тяг двигательных элементов, образующих реверсивную двигательную ячейку. Шаг дискретизации (шаг квантования) изменения величины тяги и, соответственно, точность перемещения определяется количеством разрядов реверсивной двигательной ячейки, например, при пятиразрядной организации он составляет  $\sim 3.2\%$  ( $100\% / 31$ ), а для семи разрядной организации реверсивной двигательной ячейки шаг составляет  $\sim 0.78\%$  ( $100\% / 127$ ). Количество ранжированных зарядов твердого топлива (элементов) в каждой реверсивной двигательной ячейки должно быть больше двух и равно максимальной величине двоичного разряда (пять разрядов для данного примера) требуемой точности перемещения. Матричная двигательная система может быть однослойной или многослойной, закрепленной на внешней поверхности МКА с последовательным сбросом слоев по мере расходования твердого топлива. Реверсивная двигательная система выполняется в виде панели установленной на телескопической штанге с двухсторонним расположением двигательных ячеек для быстрого перемещения МКА в разных направлениях или быстрой остановки (при одновременном включении двигательных ячеек с двух сторон двигательной панели).

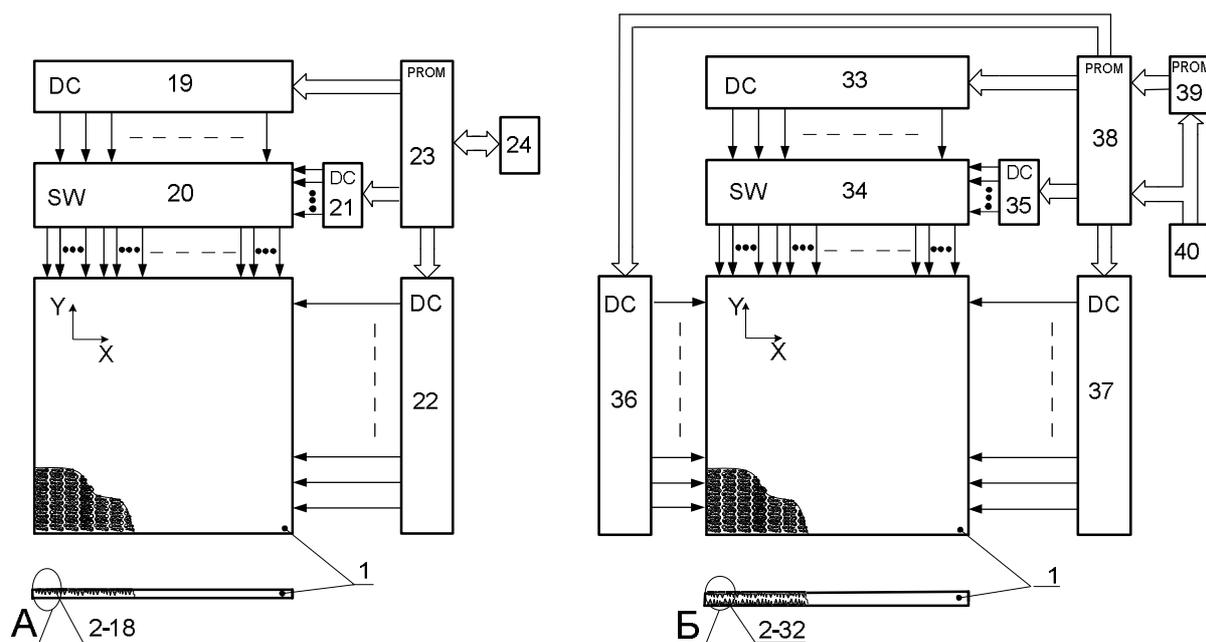


Рис. 1. Структурные блок-схемы панельных (односторонней - А и двухсторонней реверсивной - Б) матричных ракетных двигательных систем с индивидуальным цифровым управлением величиной тяги каждой двигательной ячейки для МКА

Матричная ракетная двигательная система с индивидуальным цифровым управлением величиной тяги каждой двигательной ячейки для малоразмерных космических аппаратов (рис. 1, фрагмент А) содержит монолитную термостойкую диэлектрическую подложку 1 с двигательными ячейками, (позиции 2-18) элементы которых в увеличенном масштабе приведены на выносном элементе А (10:1), представленном на рисунке 2. Также приведены дешифратор столбцов 19, коммутатор адресов двигательных ячеек 20, дешифратор данных 21, дешифратор строк 22, блок памяти отработанных кодовых комбинаций 23, контроллер 24.

Реверсивная матричная ракетная двигательная система с индивидуальным цифровым управлением величиной тяги каждой реверсивной двигательной ячейки для малоразмерных космических аппаратов (рис. 1, фрагмент Б), содержит монолитную термостойкую диэлектрическую подложку 1 с реверсивными двигательными ячейками, (позиции 2 - 32) элементы которых в увеличенном масштабе приведены на выносном элементе Б (10:1), представленном на рисунке 2. Также приведены дешифратор столбцов 33, коммутатор адресов реверсивных двигательных ячеек 34, дешифратор данных 35, первый дешифратор строк 36, второй дешифратор строк 37, блок памяти альтернативных кодовых комбинаций 38, блок памяти отработанных кодовых комбинаций 39, контроллер 40.

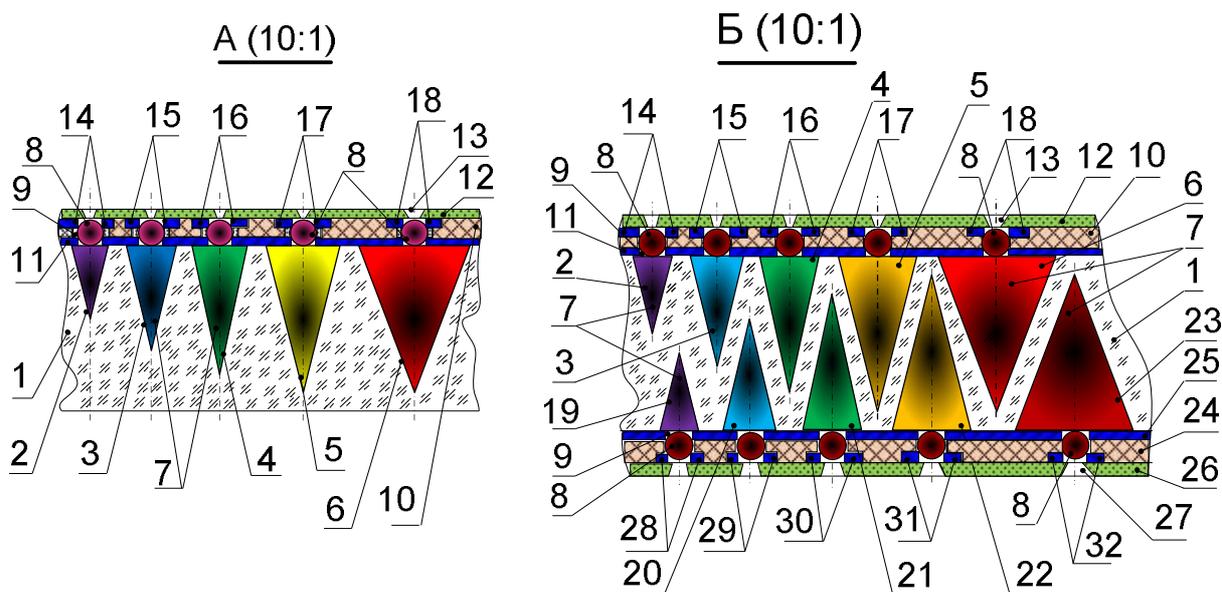


Рис. 2. Выносные элементы А (10:1) и Б (10:1) в увеличенном масштабе и разрезе, поясняющие конструкции матричной (фрагмент А) и реверсивной матричной (фрагмент Б) ракетных двигательных систем с индивидуальным цифровым управлением величиной тяги каждой реверсивной двигательной ячейки для МКА.

На выносном элементе А (10:1), рисунок 2, представлены элементы (реверсивная двигательная ячейка) в разрезе, где: монолитная термостойкая диэлектрическая подложка 1, на лицевой стороне которой размещена первая конусообразная микропора 2, вторая конусообразная микропора 3, третья конусообразная микропора 4, четвертая конусообразная микропора 5, пятая конусообразная микропора 6, заполненные твердым топливом 7 (конусообразные микропоры 2, 3, 4, 5, 6 – калиброваны и ранжированы по объему соответственно в пропорциях 1-2-4-8-16), сферические воспламенители 8, вложенные в сквозные цилиндрические микропоры 9, расположенные на первой термостойкой диэлектрической мембране 10, на поверхности которой, обращенной к монолитной термостойкой диэлектрической подложке 1, нанесена строковая шина 11, на второй термостойкой диэлектрической мембране 12, расположены сквозные конусообразные микропоры 13, и со стороны меньших диаметров оснований конусов нанесены первая столбцовая шина 14, вторая столбцовая шина 15, третья столбцовая шина 16, четвертая столбцовая шина 17, пятая столбцовая шина 18. Наименования позиций элементов в интервале 1-18 одинаковы для обоих типов МРДС. На обратной стороне монолитной термостойкой диэлектрической подложки 1 размещена шестая конусообразная микропора 19, седьмая конусообразная микропора 20, восьмая конусообразная микропора 21, девятая конусообразная микропора 22, десятая конусообразная микропора 23, заполненные твердым топливом 7, (конусообразные микропоры 19, 20, 21, 22, 23 – калиброваны и ранжированы по объему соответственно в пропорциях 1-2-4-8-16), сферические воспламенители 8, вложенные в сквозные цилиндрические микропоры 9, расположенные на третьей термостойкой диэлектрической мембране 24, на поверхности которой, обращенной к монолитной термостойкой диэлектрической подложке 1, нанесена строковая шина 25, на четвертой термостойкой диэлектрической мембране 26, расположены сквозные конусообразные микропоры 27, и со стороны меньших диаметров оснований конусов нанесены шестая столбцовая шина 28, седьмая столбцовая шина 29, восьмая столбцовая шина 30, девятая столбцовая шина 31, десятая столбцовая шина 32.

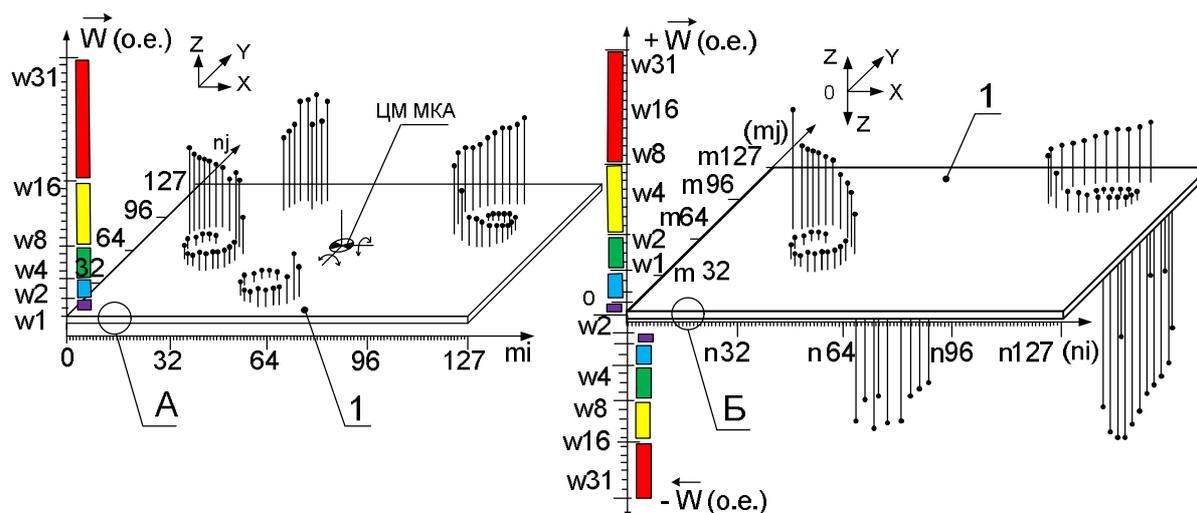


Рис. 3. Примерный трехмерный график распределения величин векторов тяги  $\vec{W}$  по координате  $Z$  и координатам  $X, Y$  при выполнении маневра МКА с использованием матричных двигательных ячеек (фрагмент А) и реверсивных матричных двигательных ячеек (фрагмент Б)

На рисунке 3 приведен примерный трехмерный график распределения величин векторов тяги  $\vec{W}$  по координате  $Z$  и координатам  $X, Y$  при выполнении маневра малоразмерным космическим аппаратом (МКА) при использовании матричных двигательных ячеек (фрагмент А) и реверсивных матричных двигательных ячеек (фрагмент Б). Где: на координате  $X$  – номер адреса столбца ( $n_j$ ) реверсивной двигательной ячейки; на координате  $Y$  – номер адреса строки ( $m_i$ ) реверсивной двигательной ячейки; на координате  $Z$  –  $+\vec{W}$  (о.е.) – величина прямого направления вектора тяги, и  $-\vec{W}$  (о.е.) – величина обратного направления вектора тяги реверсивной двигательной ячейки в относительных единицах (при пяти разрядной организации реверсивных двигательных ячеек,  $+\vec{W}$  и  $-\vec{W}$  принимают значения от 1 до 31 с шагом в одну единицу, задаваемые кодом от 00001 до 11111, при коде 00000 – реверсивная двигательная ячейка выключена). ЦМ МКА – центр масс прямоугольной матричной двигательной системы плоского (панельного) малоразмерного космического аппарата.

В зависимости от класса управляемого МКА, устройство может быть реализовано с помощью известных микроструктурных технологий, используемых для изготовления микроэлектромеханических систем (МЭМС) в диапазоне размеров элементов менее 100 микрометров. Монолитная термостойкая диэлектрическая подложка может быть изготовлена из кварцевого стекла, керамики, термостойкого полимерного композита. В зависимости от назначения двигательной системы, в качестве твердого топлива может быть использовано однокомпонентное, двухкомпонентное или нанокompозитное топливо и быстродействующие воспламенители, осуществляемые торцевое воспламенение заряда со стороны сопла, используемые в известных двигательных системах для МКА, построенные по МЭМС технологии [1-8]. Микропоры различных форм в интервале, близком к нано размерному уровню, также могут быть получены с помощью ионно-трековых технологий (основанные на получении с помощью ионов узких латентных треков с последующим их травлением).

Сборка предлагаемой конструкции двигательной матрицы при ее изготовлении может осуществляться, например, в следующей последовательности: с аверса на монолитную термостойкую диэлектрическую подложку, с заполненными твердым топливом конусообразные микросферы, накладывается первая термостойкая диэлектрическая мембрана с вложенными сферическими воспламенителями, на нее накладывается вторая термостойкая диэлектриче-

ская мембрана со сквозными конусообразными микропорами. После этого алогичные операции происходят с реверса. На монолитную термостойкую диэлектрическую подложку с заполненными твердым топливом конусообразные микросферы накладывается третья термостойкая диэлектрическая мембрана с вложенными сферическими воспламенителями, на нее накладывается четвертая термостойкая диэлектрическая мембрана со сквозными конусообразными микропорами. Конструкция выполнена таким образом, чтобы при сборке пятислойного пакета обеспечить самоцентрировку полюсов сферических воспламенителей в прилегающих к ним контактных отверстиях шин строк и столбцов по линиям шаровых поясов при механическом стягивании или склеивании подложки с мембранами. После сборки проводится тестирование допусковых разбросов сопротивлений сферических воспламенителей, соединенных с шинами столбцов и строк, и последующая разбраковка по окончанию температурных вибрационных и ударных испытаний. Дешифраторы строк, столбцов, данных, коммутатор адресов реверсивных двигательных ячеек, блоки памяти могут быть реализованы на радиационно-стойкой (для использования в космосе) программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС).

Возможность включения реверсивных двигательных ячеек в разных последовательностях с различными величинами тяги в различных координатных точках двигательной матрицы, развертываемой в виде плоской панели, закрепленной, например, перпендикулярно поверхности МКА, позволяет одной двигательной системой, при оптимальном расходовании твердого топлива, производить реверсивные линейные и угловые прецизионные перемещения МКА с помощью индивидуального цифрового управления величиной тяги каждой реверсивной двигательной ячейки, что ранее невозможно было осуществить известными двигательными системами, работающими на твердом топливе.

### Библиографический список

1. Матричная ракетная двигательная система с индивидуальным цифровым управлением величиной тяги каждой двигательной ячейки для малоразмерных космических аппаратов: Патент на изобретение RU 2660210 С1, 05.07.2018. Заявка № 2017114832 от 26.04.2017. / *Линьков В.А., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И., Гусев С.И.*
2. Реверсивная матричная ракетная двигательная система с индивидуальным цифровым управлением величиной тяги каждой реверсивной двигательной ячейки для малоразмерных космических аппаратов: Патент на изобретение RU 2654782 С1, 22.05.2018. Заявка № 2017123451 от 03.07.2017. / *Линьков В.А., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И., Гусев С.И.*
3. Матричная ракетная двигательная система с индивидуальным цифровым управлением величиной тяги каждой двигательной ячейки для малоразмерных космических аппаратов: Патент на полезную модель RU 178924 У1, 23.04.2018. Заявка № 2017116244 от 10.05.2017. / *Линьков В.А., Вишняков Н.В., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И., Гусев С.И.*
4. Реверсивная матричная ракетная двигательная система с индивидуальным цифровым управлением величиной тяги каждой реверсивной двигательной ячейки для малоразмерных космических аппаратов: Патент на полезную модель RU 178748 У1, 18.04.2018. Заявка № 2017123920 от 05.07.2017. / *Линьков В.А., Вишняков Н.В., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И., Гусев С.И.*
5. Мультивекторная матричная ракетная двигательная система с цифровым управлением величиной и направлением тяги двигательных ячеек для малоразмерных космических аппаратов: Патент на полезную модель RU 183937 У1, 09.10.2018. Заявка № 2018125136 от 09.07.2018. / *Линьков В.А., Гусев С.И., Колесников С.В., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И.*
6. Мультивекторная матричная ракетная двигательная система с цифровым управлением величиной и направлением тяги двигательных ячеек для малоразмерных космических аппаратов: Патент на изобретение RU 2707474 С1, 26.11.2019. Заявка № 2018142754 от 03.12.2018. / *Линьков В.А., Гусев С.И., Колесников С.В., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И.*
7. Мультивекторная матричная ракетная двигательная система с цифровым управлением величиной и направлением тяги двигательных ячеек для малоразмерных космических аппаратов: Патент на изобретение RU 2700299 С1, 16.09.2019. Заявка № 2018124424 от 03.07.2018 / *Линьков В.А., Гусев С.И., Колесников С.В., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И.*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

25. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных нанообъектов с магнитными свойствами в окрестностях точек либрации: Патент на полезную модель RU 206426, 13.09.2021. Заявка № 2021111489 от 21.04.2021. / *Линьков В. А.*
26. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных объектов со свойствами квантовых точек и апконвертирующих наночастиц в окрестностях точек либрации: Патент на изобретение 2749431 С1, 10.06.2021. Заявка № 2020135104 от 26.10.2020. / *Линьков В. А.*
27. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных объектов со свойствами квантовых точек в окрестностях точек либрации: Патент на изобретение RU 2744277 С1, 04.03.2021. Заявка № 2020134827 от 22.10.2020. / *Линьков В. А.*
28. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных объектов со свойствами квантовых точек и апконвертирующих наночастиц в окрестностях точек либрации: Патент на полезную модель RU 202750 U1, 04.03.2021. Заявка № 2020136043 от 02.11.2020. / *Линьков В. А.*
29. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных объектов со свойствами квантовых точек в окрестностях точек либрации: Патент на полезную модель RU 202757 U1, 04.03.2021. Заявка № 2020135116 от 26.10.2020. / *Линьков В. А.*
30. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных излучающих нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в солнечную систему: Патент на изобретение RU 2772290 С1, 18.05.2022. Заявка № 2021118434 от 23.06.2021. / *Линьков В. А.*
31. Бинарный космический аппарат для поиска, сбора и анализа внеземных флуоресцентных нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в солнечную систему: Патент на полезную модель RU 211253 U1, 26.05.2022. Заявка № 2021102985 от 07.02.2022. / *Линьков В. А.*
32. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных флуоресцентных нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в солнечную систему: Патент на полезную модель RU 211363 U1, 01.06.2022. Заявка № 202101987 от 27.01.2022. / *Линьков В. А.*
33. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных флуоресцентных нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в солнечную систему: Патент на изобретение RU 2776623 С1, 22.07.2022. Заявка № 2022101616 от 24.01.2022. / *Линьков В. А.*
34. Бинарный космический аппарат для поиска, сбора и анализа внеземных флуоресцентных нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в солнечную систему: Патент на изобретение RU 2776624 С1, 22.07.2022. Заявка № 2022101989 от 27.01.2022. / *Линьков В. А.*
35. Линьков В.А. Наноразмерные допуски и посадки для коллоидной самосборки микропрограммных элементов с конвейерным программированием спектров излучения на базе квантовых точек и апконвертирующих наночастиц структуры ядро-оболочка. Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2020: сб.тр. III междунар. науч.-тех. Форума в 10 т. Т.6 - Рязань: РГРТУ-2020 С. 161-172.
36. Линьков В.А., Линькова С.Ю. ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ПОИСКОВЫХ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ЗОНДОВ ДЛЯ СБОРА И АНАЛИЗА ВНЕЗЕМНЫХ НАНООБЪЕКТОВ В ОКРЕСНОСТЯХ ТОЧЕК ЛИБРАЦИИ ПЛАНЕТ, ВХОДЯЩИХ В СОЛНЕЧНУЮ СИСТЕМУ. В сборнике: Современные технологии в науке и образовании-СТНО-2022. Сборник трудов V Международного научно-технического форума. В 10-ти томах. Под редакцией О.В. Миловзорова. Рязань, 2022. С. 22-28.
37. Линьков В.А., Линькова С.Ю. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОИСКОВЫХ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ЗОНДОВ ДЛЯ СБОРА И АНАЛИЗА ВНЕЗЕМНЫХ ФЛУОРЕСЦИРУЮЩИХ НАНООБЪЕКТОВ В ОКРЕСНОСТЯХ ТОЧЕК ЛИБРАЦИИ ПЛАНЕТ, ВХОДЯЩИХ В СОЛНЕЧНУЮ СИСТЕМУ. В книге: Новые информационные технологии в научных исследованиях Материалы XXVII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. В 2-х томах. Рязань, 2022. С. 148-149.

УДК 520.68; ГРНТИ 47.13.07

## МУЛЬТИВЕКТОРНЫЕ МАТРИЧНЫЕ ДВИГАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ БИНАРНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В.А. Линьков, С.Ю. Линькова

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

*Аннотация.* В работе рассматриваются варианты конструкций мультивекторных матричных ракетных двигательных систем предназначенных для использования в качестве маневровых двигателей при развертывании и свертывании малоразмерных бинарных космических аппаратов и рулонных гибких солнечных батарей.

*Ключевые слова:* мультивекторный матричный ракетный двигатель, бинарный космический аппарат, реверсивная двигательная ячейка.

## MULTI-VECTOR MATRIX PROPULSION SYSTEMS FOR BINARY SPACE VEHICLES

V.A. Linkov, S.Yu. Linkova

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russian Federation, Ryazan, musolin.a.k@rsreu.ru*

*Annotation.* The paper considers design options for multi-vector matrix rocket propulsion systems intended for use as shunting engines in the deployment and collapse of small-sized binary spacecraft and roll-up flexible solar panels.

*Key words:* multivector matrix rocket engine, binary spacecraft, reversible propulsion cell.

Специально для развертывания и свертывания бинарных космических аппаратов (БКА) был разработан новый класс маневровых ракетных двигателей - мультивекторные матричные ракетные двигатели (ММРД) [1-8]. При разработке к ним предъявлялись следующие требования: высокая скорость разворота БКА с прецизионной точностью (цифровое мультивекторное управление величиной и направлением тяги), компактность, заправка горючим в процессе изготовления, технологичность изготовления.

Используемое в тексте работы словосочетание «бинарный космический аппарат» (БКА) понимается как космический аппарат, состоящий из двух корпусов и одной общей армированной гибкой ленточной солнечной батареи, расположенной между ними, разворачиваемый за счет разматывания солнечной батареи, смотанной в рулон, при реверсивном перемещении одного корпуса относительно другого в противоположные стороны и обратно, осуществляемом с помощью мультивекторных матричных ракетных двигателей (ММРД) [9-37]. Гибкая ленточная солнечная батарея (СБ) – это гибкая диэлектрическая ленточная подложка, на которую нанесен массив соединенных между собой тонкопленочных солнечных фотоэлементов в сочетании с микроконтейнерами для сбора нанообъектов. Точки либрации – это точки, где гравитационное и центробежное ускорения, воздействующие на помещенное в окрестностях точки тело, уравниваются, в связи с чем так называемые «малые тела» могут там накапливаться

Используемые сокращения: «МТД-подложка» - это аббревиатура словосочетания монолитная термостойкая диэлектрическая подложка. Под словосочетанием «радиально-веерные группы двигательных ячеек» – понимается наличие возможности у групп ячеек генерации векторов тяги в разных направлениях. Каждая группа сформирована в виде ряда радиально-веерных ячеек с веерообразным дискретным распределением углов продольных осей двигательных элементов с ориентацией их на точку пересечения линии делительной окружности и радиальных лучей, исходящих из центра делительной окружности. Линия делительной окружности - базовая окружность, на которой в точках пересечения с ее радиальными лучами расположены центры лучей радиально-веерных групп двигательных ячеек. Относительно линии делительной окружности формируется внешний замкнутый волнообразный

контур МТД-подложки, на котором размещены радиально-векторные двигательные ячейки. Мультивекторная двигательная система - понимается как создающая массив векторов тяги с различными направлениями и величинами, изменяющимися по времени. Коллинеарные векторы тяги – векторы, лежащие на параллельных прямых (или на одной и той же прямой) независимо от их направления. Цилиндрическая поверхность - боковая поверхность волнообразной цилиндрической подложки параллельная оси Z (поверхность образованная замкнутой волнообразной направляющей (основанием) и параллельными образующими (высота-ми)).

Под используемым в тексте словосочетанием «реверсивная двигательная ячейка» понимается следующее: реверсивная двигательная ячейка – это группа F элементов  $a_r(i, j)$  двух двигательных матриц  $m \times n$  с противоположно направленными векторами тяги, элементы которых находятся на пересечении строки  $m_i$  с группой столбцов  $n_j$  (количество которых равно количеству разрядов управляющего двоичного кода) и состоят из набора коммутируемых разнокалиберных зарядов (элементов)  $F = \{a_1 w_1(i, j+1), a_2 w_2(i, j+2), a_3 w_4(i, j+3), a_4 w_8(i, j+4), a_5 w_{16}(i, j+5)\}$  твердого топлива в пропорциях 1-2-4-8-16 где:  $a_r$ - элемент реверсивной двигательной ячейки,  $r$  – номер ячейки ( $r = 1, 2, \dots, N$ );  $w_k$  – весовой коэффициент величины тяги элемента реверсивной двигательной ячейки с распределением величин в виде последовательных степеней числа два ( $k = 1, 2, 4, 8, 16, \dots, (1 \cdot 2^h)$ ), ( $h$  – максимальное количество разрядов управляющего двоичного кода). Каждому элементу реверсивной двигательной ячейки в зависимости от объема (массы) размещенного твердого топлива (после его воспламенения) соответствует определенный весовой коэффициент  $w_k$  величины тяги. В зависимости от управляющего кода, соответствующему определенному двоичному числу, происходит изменение величины тяги реверсивной двигательной ячейки в интервале от 0 до 100% за счет суммирования выбранных двоичным кодом сочетаний дискретных величин тяг двигательных элементов.

Варианты конструкций ММРД приведены на рисунке 1, где представлена дискообразная мультивекторная матричная ракетная двигательная система с цифровым управлением величиной и направлением тяги двигательных ячеек (фрагмент А) [5, 6] и цилиндрическая с волнообразной наружной поверхностью мультивекторная матричная ракетная двигательная система с цифровым управлением величиной и направлением тяги двигательных ячеек (фрагмент Б) [7, 8] для бинарных малоразмерных космических аппаратов.

Модернизация дискообразной мультивекторной двигательной системы [6], направленная на ускорение операций разматывания гибкой ленточной подложки (вращение с одновременным реверсивным перемещением) на которой закреплены СБ и контейнеры для сбора нанообъектов в точках либрации планет Солнечной системы привела к созданию мультивекторной матричной ракетной двигательной системы [7] с цифровым управлением величиной и направления тяги, которая состоит из плоской дискообразной с волнообразным внешним контуром монолитной термостойкой диэлектрической подложки с размещенными на ней квадратной матричной реверсивной структурой двигательных ячеек, соединенной с повторяющим ее контур цилиндрической полый с волнообразным профилем монолитной термостойкой диэлектрической подложкой с радиально-векторной ориентацией всех продольных осей конусообразных микропор на центры чередующихся сопряженных вогнутых и выпуклых полуокружностей, образующих в совокупности замкнутую волнообразную внешнюю поверхность. Все конусообразные микропоры заполнены твердым топливом и ранжированы по объему в пропорциях последовательных степенях числа два (1-2-4-8-16-32), обеспечивающих генерацию множества разнонаправленных векторов тяги с прецизионным цифровым управлением в двоичном коде величиной тяги каждой ячейки [7].

На рисунке 2 представлены выносной элемент Б (10:1) в увеличенном масштабе и разрезе, поясняющий конструкцию цилиндрической с волнообразной наружной

поверхностью мультивекторной матричной ракетной двигательной системы с цифровым управлением величиной и направлением тяги двигательных ячеек и структурная блок-схема, осуществляющая функционирование ММРД с цилиндрической волнообразной наружной поверхностью.

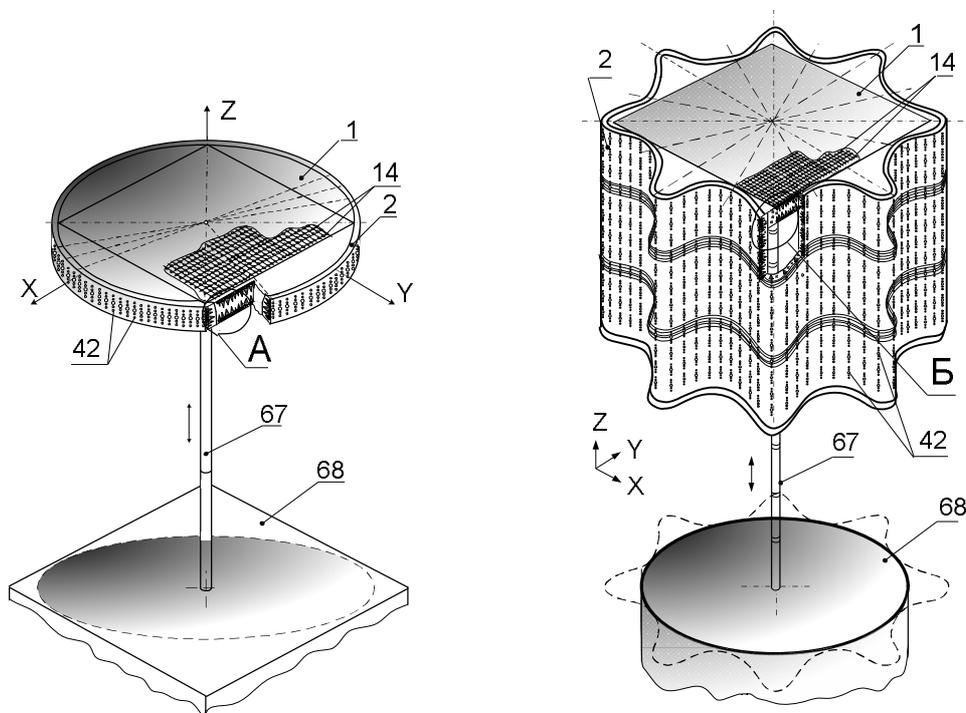


Рис. 1. Дiskoобразная мультивекторная матричная ракетная двигательная система с цифровым управлением величиной и направлением тяги двигательных ячеек (фрагмент А) и цилиндрическая с волнообразной наружной поверхностью мультивекторная матричная ракетная двигательная система с цифровым управлением величиной и направлением тяги двигательных ячеек (фрагмент Б) для бинарных малоразмерных космических аппаратов

Мультивекторная матричная ракетная двигательная система с цифровым управлением величиной и направлением тяги двигательных ячеек (рис. 1), содержит плоскую дискообразную с волнообразным внешним контуром МТД-подложку 1, на которой в виде квадратной матричной реверсивной структуры размещены двигательные ячейки (позиции 3 - 33). Плоская дискообразная с волнообразным внешним контуром МТД-подложка 1 по внешнему контуру соединена с цилиндрической полостью с волнообразным профилем МТД-подложкой 2, на внешней цилиндрической (боковой) поверхности которой размещены радиально-векторные двигательные элементы (позиции 34 - 57), образующие волнообразную прямоугольную матричную структуру, повторяющую форму внешнего контура плоской дискообразной с волнообразным внешним контуром МТД-подложки 1. Продольные оси двигательных элементов, размещенных на плоской дискообразной с волнообразным внешним контуром МТД-подложке 1, перпендикулярны продольным осям двигательных элементов, расположенных на цилиндрической полости с волнообразным профилем МТД-подложке 2. Элементы (позиции 3 - 57) в увеличенном масштабе приведены на выносном элементе Б (10:1), представленном на фиг.2 (фрагмент вида с боку в разрезе). В нижней части рисунка 1 показан один из вариантов крепления мультивекторной двигательной системы с цифровым управлением величиной и направлением тяги двигательных ячеек, например, с помощью телескопической штанги 67, выдвигающейся из корпуса малоразмерного космического аппарата (МКА) 68

после его вывода на орбиту, где: 14 – сквозные конусообразные микропоры, образующие сопла на пересечении строк и столбцов, расположенных на поверхности плоской дискообразной с волнообразным внешним контуром МТД-подложки 1 с аверсной стороны, 42 – сквозные конусообразные микропоры, образующие сопла, расположенные по цилиндрической поверхности с внешней стороны цилиндрической полой с волнообразным профилем МТД-подложки 2.

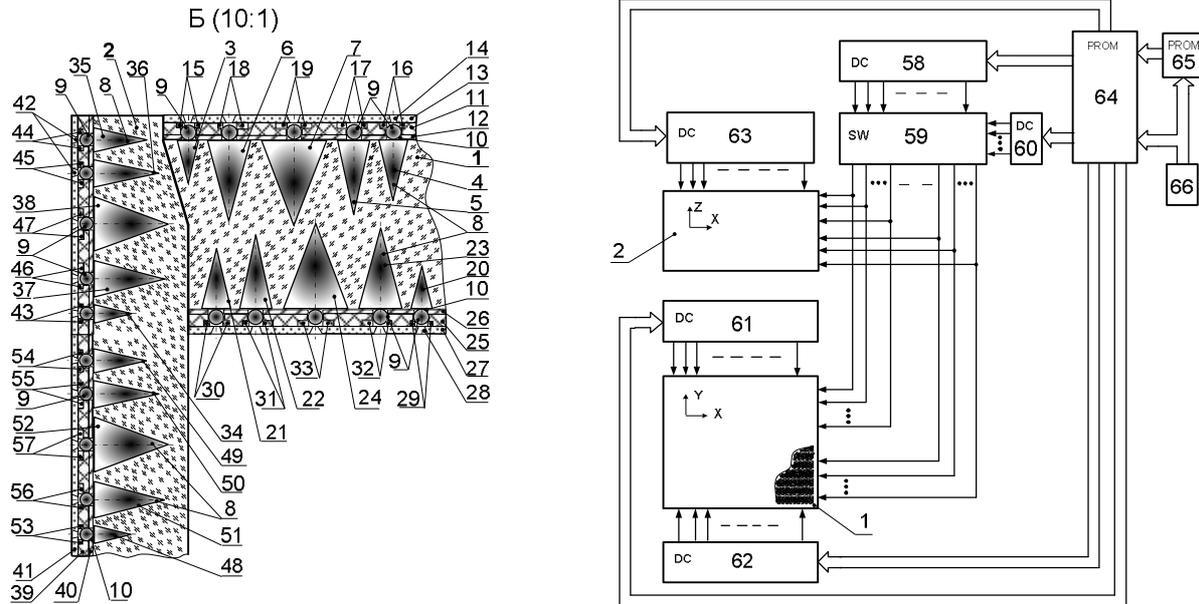


Рис. 2. Выносной элемент Б (10:1) конструкции ММРД с волнообразной наружной поверхностью в увеличенном масштабе и разрезе и структурная блок-схема, осуществляющая функционирование ММРД с волнообразной наружной поверхностью

На выносном элементе Б (10:1), рисунок 2, представлены элементы реверсивной двигательной ячейки, расположенной на плоской дискообразной с волнообразным внешним контуром МТД-подложке 1 и элементы двух радиально-верных двигательных ячеек, расположенных на цилиндрической полой с волнообразным профилем МТД-подложке 2, где: плоская дискообразная с волнообразным внешним контуром МТД-подложка 1, цилиндрическая полая с волнообразным профилем МТД-подложка 2. На лицевой стороне плоской дискообразной с волнообразным внешним контуром МТД-подложке 1 размещена первая конусообразная микропора 3, вторая конусообразная микропора 4, третья конусообразная микропора 5, четвертая конусообразная микропора 6, пятая конусообразная микропора 7, заполненные твердым топливом 8 (конусообразные микропоры 3, 4, 5, 6, 7 – калиброваны и ранжированы по объему соответственно в пропорциях 1-2-4-8-16), сферические воспламенители 9, вложенные в сквозные цилиндрические микропоры 10, расположенные на первой термостойкой диэлектрической мембране 11, на поверхности которой, обращенной к плоской дискообразной с волнообразным внешним контуром МТД-подложке 1, нанесена столбцовая шина 12, на второй термостойкой диэлектрической мембране 13 расположены сквозные конусообразные микропоры 14, и со стороны меньших диаметров оснований конусов нанесены первая строковая шина 15, вторая строковая шина 16, третья строковая шина 17, четвертая строковая шина 18, пятая строковая шина 19. На оборотной стороне плоской дискообразной с волнообразным внешним контуром МТД-подложки 1 размещена шестая конусообразная микропора 20, седьмая конусообразная микропора 21, восьмая конусообразная микропора 22, девятая конусообразная микропора 23, десятая конусообразная микропора 24, заполненные твердым топливом 8 (конусообразные микропоры 20, 21, 22, 23, 24 – калиброваны и

ранжированы по объему соответственно в пропорциях 1-2-4-8-16), сферические воспламенители 9, вложенные в сквозные цилиндрические микропоры 10, расположенные на третьей термостойкой диэлектрической мембране 25, на поверхности которой, обращенной к плоской дискообразной с волнообразным внешним контуром МТД подложке 1, нанесена вторая столбцовая шина 26, на четвертой термостойкой диэлектрической мембране 27 расположены сквозные конусообразные микропоры 28, и со стороны меньших диаметров оснований конусов нанесены шестая строковая шина 29, седьмая строковая шина 30, восьмая строковая шина 31, девятая строковая шина 32, десятая строковая шина 33. Продольные оси всех конусообразных микропор, размещенных на плоской дискообразной с волнообразным внешним контуром МТД-подложке 1, параллельны друг другу и перпендикулярны плоской лицевой и оборотной стороне плоской дискообразной с волнообразным внешним контуром МТД-подложки 1.

На внешней стороне цилиндрической полой с волнообразным профилем МТД-подложки 2 размещена первая радиально-векторная ячейка где: одиннадцатая конусообразная микропора 34, двенадцатая конусообразная микропора 35, тринадцатая конусообразная микропора 36, четырнадцатая конусообразная микропора 37, пятнадцатая конусообразная микропора 38, заполненные твердым топливом 8 (конусообразные микропоры 34, 35, 36, 37, 38 – калиброваны и ранжированы по объему соответственно в пропорциях 1-2-4-8-16), сферические воспламенители 9, вложенные в сквозные цилиндрические микропоры 10, расположенные на первой волнообразной термостойкой диэлектрической мембране 39, на поверхности которой, обращенной к цилиндрической полой с волнообразным профилем МТД-подложке 2, нанесена третья столбцовая шина 40, на второй волнообразной термостойкой диэлектрической мембране 41 расположены сквозные конусообразные микропоры 42, и со стороны меньших диаметров оснований конусов нанесены одиннадцатая строковая шина 43, двенадцатая строковая шина 44, тринадцатая строковая шина 45, четырнадцатая строковая шина 46, пятнадцатая строковая шина 47. Ниже первой радиально-векторной ячейки размещена вторая радиально-векторная ячейка где: шестнадцатая конусообразная микропора 48, семнадцатая конусообразная микропора 49, восемнадцатая конусообразная микропора 50, девятнадцатая конусообразная микропора 51, двадцатая конусообразная микропора 52, заполненные твердым топливом 8 (конусообразные микропоры 48, 49, 50, 51, 52 – калиброваны и ранжированы по объему соответственно в пропорциях 1-2-4-8-16), сферические воспламенители 9, вложенные в сквозные цилиндрические микропоры 10, расположенные на первой волнообразной термостойкой диэлектрической мембране 39, на поверхности которой, обращенной к цилиндрической полой с волнообразным профилем МТД-подложке 2, нанесена столбцовая шина 40, на второй волнообразной термостойкой диэлектрической мембране 41 расположены сквозные конусообразные микропоры 42, и со стороны меньших диаметров оснований конусов нанесены шестнадцатая строковая шина 53, семнадцатая строковая шина 54, восемнадцатая строковая шина 55, девятнадцатая строковая шина 56, двадцатая строковая шина 57.

На рисунке 2 также представлены следующие элементы блок-схемы управления мультивекторной двигательной системой: квадратная матричная структура двигательных элементов, размещенная на плоской дискообразной с волнообразным внешним контуром МТД-подложки 1, прямоугольная волнообразная матричная структура двигательных элементов, расположенная на внешней волнообразной поверхности цилиндрической полой с волнообразным профилем МТД-подложки 2, опоясывающей по цилиндрической (боковой) поверхности плоскую дискообразную с волнообразным внешним контуром МТД-подложку 1, дешифратор строк 58, коммутатор адресов двигательных ячеек 59, дешифратор данных 60, первый дешифратор столбцов 61, второй дешифратор столбцов 62, третий дешифратор

столбцов 63, блок памяти альтернативных кодовых комбинаций 64, блок памяти отработанных кодовых комбинаций 65, контроллер 66.

При программировании режимов работы каждому двигательному элементу присваивается идентификационное кодовое слово, состоящее из кода номера полуокружности (кода радиально-вверной группы)  $N$  (определяющий рабочий угловой ф интервал группы) и кода номера  $n$ , определяющего угловое детерминированное положение продольных осей (угол  $\psi$  направления вектора тяги в группе) двигательных элементов в радиально-вверной группе  $N$ . В блоке памяти альтернативных кодовых комбинаций 64 расположена таблица преобразования координат векторов тяги прямоугольной матричной структуры в угловые координаты векторов тяги волнообразной матричной структуры (т. е. каждой точке на пересечении определенной строки и столбца соответствует двигательный элемент с определенной величиной и направлением угла вектора тяги и определенными геометрическими координатами его расположения на цилиндрической поверхности).

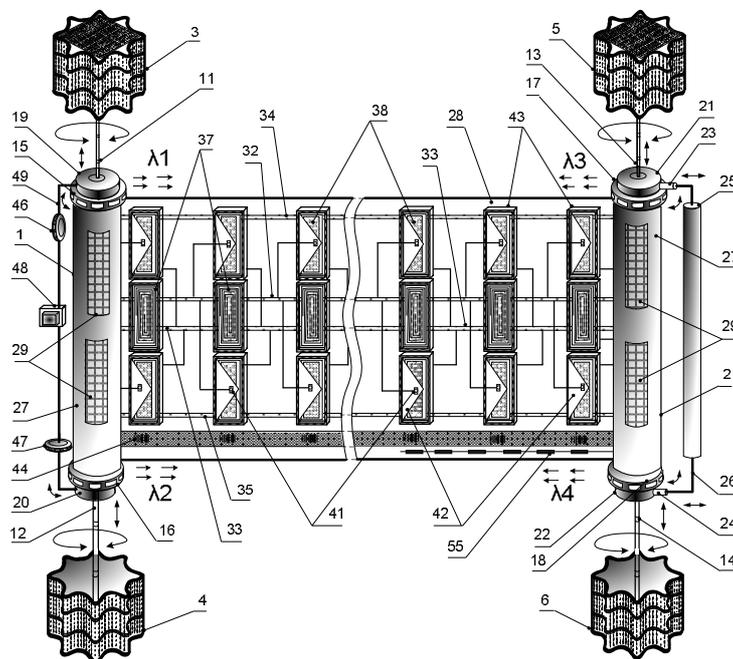


Рис. 3. Бинарный космический аппарат для поиска, сбора и анализа внеземных флуоресцентных нанобъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в солнечную систему: Патент на изобретение RU 2776624 С1, 22.07.2022. / Линьков В. А.

На рисунке 3, приведен в качестве примера использования один из вариантов компоновки четырех ММРД (позиции 3-6), размещенных на торцах двух цилиндрических корпусов (поз. 1, 2), для осуществления ориентации теплозащитного ленточного щита БКА на Солнце и одновременного разворачивания и свертывания в кокон рулонной солнечной батареи (поз. 27, 29) с расположенными на теневой стороне планарными микроконтейнерами (поз. 43) для втягивания электрическими полями и герметизации собранных флуоресцирующих нанобъектов и их спектрального анализа (лавинные фотоэлементы поз.41).

В зависимости от класса управляемого БКА, ММРД может быть реализовано с помощью известных микроструктурных технологий, используемых для изготовления микроэлектромеханических систем (МЭМС) в диапазоне размеров элементов менее 100 микрон. Монолитная термостойкая диэлектрическая подложка может быть изготовлена из кварцевого стекла, керамики, термостойкого полимерного композита. В зависимости от

назначения двигательной системы, в качестве твердого топлива может быть использовано однокомпонентное, двухкомпонентное или нанокompозитное топливо и быстродействующие воспламенители, осуществляемые торцевое воспламенение заряда со стороны сопла, используемые в известных двигательных системах для БКА, построенные по МЭМС технологии [1-8]. Микропоры различных форм в интервале, близком к нано размерному уровню, также могут быть получены с помощью ионно-трековых технологий (основанные на получении с помощью ионов узких латентных треков с последующим их травлением). Дешифраторы строк, столбцов, данных, коммутатор адресов реверсивных двигательных ячеек, блоки памяти могут быть реализованы на радиационно-стойкой (для использования в космосе) программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС).

Предлагаемая конструкция мультивекторной ракетной двигательной системы с цифровым управлением величиной и направлением тяги двигательных ячеек для малоразмерных космических аппаратов, соединенная, например, с помощью телескопической штанги с БКА, позволяет одной мультивекторной цифровой ракетной системой, при оптимальном расходе твердого топлива, осуществить скоростное маневрирование БКА, используя возможность сочетания линейного перемещения с возможностью одновременного вращения по осям за счет цифрового управления величинами разнонаправленных радиальных тяг с веерообразным распределением продольных осей, упорядочено распределенных на волнообразной цилиндрической поверхности, охватывающей квадратный массив перпендикулярно направленных коллинеарных реверсивных тяг, синхронизированных с радиально-веерными тягами, что ранее невозможно было осуществить известными двигательными системами, работающими на твердом топливе.

### Библиографический список

1. Матричная ракетная двигательная система с индивидуальным цифровым управлением величиной тяги каждой двигательной ячейки для малоразмерных космических аппаратов: Патент на изобретение RU 2660210 С1, 05.07.2018. Заявка № 2017114832 от 26.04.2017. / *Линьков В.А., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И., Гусев С.И.*
2. Реверсивная матричная ракетная двигательная система с индивидуальным цифровым управлением величиной тяги каждой реверсивной двигательной ячейки для малоразмерных космических аппаратов: Патент на изобретение RU 2654782 С1, 22.05.2018. Заявка № 2017123451 от 03.07.2017. / *Линьков В.А., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И., Гусев С.И.*
3. Матричная ракетная двигательная система с индивидуальным цифровым управлением величиной тяги каждой двигательной ячейки для малоразмерных космических аппаратов: Патент на полезную модель RU 178924 U1, 23.04.2018. Заявка № 2017116244 от 10.05.2017. / *Линьков В.А., Вишняков Н.В., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И., Гусев С.И.*
4. Реверсивная матричная ракетная двигательная система с индивидуальным цифровым управлением величиной тяги каждой реверсивной двигательной ячейки для малоразмерных космических аппаратов: Патент на полезную модель RU 178748 U1, 18.04.2018. Заявка № 2017123920 от 05.07.2017. / *Линьков В.А., Вишняков Н.В., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И., Гусев С.И.*
5. Мультивекторная матричная ракетная двигательная система с цифровым управлением величиной и направлением тяги двигательных ячеек для малоразмерных космических аппаратов: Патент на полезную модель RU 183937 U1, 09.10.2018. Заявка № 2018125136 от 09.07.2018. / *Линьков В.А., Гусев С.И., Колесников С.В., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И.*
6. Мультивекторная матричная ракетная двигательная система с цифровым управлением величиной и направлением тяги двигательных ячеек для малоразмерных космических аппаратов: Патент на изобретение RU 2700299 С1, 16.09.2019. Заявка № 2018124424 от 03.07.2018 / *Линьков В.А., Гусев С.И., Колесников С.В., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И.*
7. Мультивекторная матричная ракетная двигательная система с цифровым управлением величиной и направлением тяги двигательных ячеек для малоразмерных космических аппаратов: Патент на изобретение RU

2707474 С1, 26.11.2019. Заявка № 2018142754 от 03.12.2018. / *Линьков В.А., Гусев С.И., Колесников С.В., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И.*

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

9. Бинарный космический аппарат с реконфигурируемой сканирующей антенной, совмещенной с солнечной батареей, развертываемой мультивекторными матричными ракетными двигателями: Патент на изобретение RU 2745166 С1, 22.03.2021. Заявка № 2020122810 от 03.07.2020. / *Линьков В.А.*

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

11. Бинарный космический аппарат с реконфигурируемой антенной, совмещенной с солнечной батареей, развертываемой мультивекторными матричными ракетными двигателями: Патент на изобретение RU 2744261 С1, 04.03.2021. Заявка № 2020121447 от 23.06.2020. / *Линьков В.А.*

12. Бинарный космический аппарат с реконфигурируемой антенной, совмещенной со свертываемой в рулон солнечной батареей, развертываемой мультивекторными матричными ракетными двигателями: Патент на изобретение RU 2735448 С1, 02.11.2020. Заявка № 2020113745 от 03.04.2020. / *Линьков В.А.*

13. Бинарный космический аппарат со сканирующей антенной, совмещенной со свертываемой в рулон солнечной батареей, развертываемой мультивекторными матричными ракетными двигателями: Патент на изобретение RU 2735449 С1, 02.11.2020. Заявка № 2020116045 от 27.04.2020. / *Линьков В.А.*

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

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

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

17. Бинарный малоразмерный космический аппарат с реконфигурируемой антенной, совмещенной с гибкой развертываемой ленточной солнечной батареей: Патент на изобретение RU 2716728 С1, 16.03.2020. Заявка № 2019103169 от 05.02.2019. / *Линьков В.А., Гусев С.И., Колесников С.В., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И.*

18. Бинарный космический аппарат с реконфигурируемой антенной, совмещенной с гибкой ленточной солнечной батареей, развертываемой мультивекторными матричными ракетными двигателями: Патент на изобретение RU 2714064 С1, 11.02.2020. Заявка № 2019111570 от 16.04.2019. / *Линьков В.А., Гусев С.И., Колесников С.В., Линьков Ю.В., Линьков П.В., Таганов А.И.*

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

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

21. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных нанообъектов с магнитными свойствами в окрестностях точек либрации: Патент на изобретение RU 2761686 С1, 13.12.2021. Заявка № 2021110352 от 13.04.2021. / *Линьков В. А.*

22. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в солнечную систему: Патент на изобретение RU 2761486 С1, 08.12.2021. Заявка № 2021111499 от 21.04.2021. / *Линьков В. А.*

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

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

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

26. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных объектов со свойствами квантовых точек и апконвертирующих наночастиц в окрестностях точек либрации: Патент на изобретение 2749431 С1, 10.06.2021. Заявка № 2020135104 от 26.10.2020. / *Линьков В. А.*

27. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных объектов со свойствами квантовых точек в окрестностях точек либрации: Патент на изобретение RU 2744277 С1, 04.03.2021. Заявка № 2020134827 от 22.10.2020. / *Линьков В. А.*

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

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

30. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных излучающих нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в солнечную систему: Патент на изобретение RU 2772290 С1, 18.05.2022. Заявка № 2021118434 от 23.06.2021. / *Линьков В. А.*

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

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

33. Бинарный космический аппарат для поиска и сбора внеземных флуоресцентных нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в солнечную систему: Патент на изобретение RU 2776623 С1, 22.07.2022. Заявка № 2022101616 от 24.01.2022. / *Линьков В. А.*

34. Бинарный космический аппарат для поиска, сбора и анализа внеземных флуоресцентных нанообъектов в окрестностях точек либрации планет, входящих в солнечную систему: Патент на изобретение RU 2776624 С1, 22.07.2022. Заявка № 2022101989 от 27.01.2022. / *Линьков В. А.*

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

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

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

УДК 621.315.592; ГРНТИ 29.19.16

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВОЙСТВ СЛОЕВ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ, СФОРМИРОВАННЫХ МЕТОДОМ МЕТАЛЛ-СТИМУЛИРОВАННОГО ТРАВЛЕНИЯ

С.А. Антонова\*, Н.Б. Рыбин\*, Н.В. Рыбина\*, В.В. Трегулов\*\*

\* Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина

\*\* Рязанский государственный университет им. С.А. Есенина

Россия, Рязань, antonovasvetych@mail.ru

*Аннотация.* Представлены результаты исследования морфологии поверхности слоев пористого кремния, сформированных методом металл-стимулированного травления. По изображениям, полученным с помощью растровой электронной микроскопии, методами двумерного флуктуационного анализа с исключенным трендом и средней взаимной информации определены информационно-корреляционные свойства поверхностей образцов.

*Ключевые слова:* пористый кремний, двумерный флуктуационный анализ с исключенным трендом, средняя взаимная информация.

## INVESTIGATION OF INFORMATION-CORRELATION PROPERTIES OF POROUS SILICON LAYERS FORMED BY METAL ASSISTED CHEMICAL ETCHING

S.A. Antonova\*, N.B. Rybin\*, N.V. Rybina\*, V.V. Tregulov\*\*

\*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin

\*\*Ryazan State University named after S.A. Esenin

Russia, Ryazan, antonovasvetych@mail.ru

*Abstract.* The results of a study of the surface morphology of porous silicon layers formed by metal-stimulated etching are presented. The information-correlation properties of the sample surfaces were determined from the images obtained using scanning electron microscopy, using two-dimensional detrended fluctuation analysis and average mutual information.

*Keywords:* porous silicon, 2D detrended fluctuation analysis, average mutual information.

Освоение новых полупроводниковых материалов, в том числе нанокристаллических полупроводников с эффективными электрофизическими и эксплуатационными показателями, является необходимым условием для прогресса в развитии современной полупроводниковой электроники. Пористый кремний (ПК) является одним из таких материалов. Пористый кремний представляет собой форму химического элемента кремния, который имеет нанопоры в своей микроструктуре, что обеспечивает большое отношение поверхности к объему порядка  $500 \text{ м}^2/\text{см}^3$  [1].

Пористый кремний перспективен для создания:

- толстых диэлектрических пленок. За счет развитой системы пор молекулы кислорода способны проникнуть на всю толщину пористого кремния и привести к полному его окислению если этот материал подвергнуть термическому окислению;
- буферных слоев при эпитаксии монокристаллических пленок других полупроводников на кремнии;
- квантовых точек, квантовых нитей в ходе электрохимического травления пористого кремния;
- датчиков влажности, газовых, химических и биологических сенсоров, так как он обладает очень высокой удельной поверхностью;
- интерференционных фильтров в оптике для инфракрасной, видимой или ультрафиолетовой области спектра и др.

Для изучения структуры пористого кремния в данной работе применялись методы двумерного флуктуационного анализа с исключенным трендом (2D DFA) и средней взаимной информации (СВИ) [2], поскольку позволяют выявлять степень упорядоченности, информа-

ционную емкость структуры, определять значения корреляционных векторов в структуре твердотельных материалов.

### Описание образцов

Образцы пористого кремния были получены методом металл-стимулированного травления (Metal Assisted Chemical Etching, MACE), который состоял из трех основных этапов:

- формирование серебряных частиц на поверхности кремниевой монокристаллической подложки в растворе  $\text{Ag}_2\text{SO}_4(0,01 \text{ M})$ :  $\text{HF}(46\%)$ :  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(92\%)$  при соотношении компонентов 1:0,1:0,3;

- формирование пористой структуры, пластина с осажденными серебряными частицами погружалась в раствор:  $\text{H}_2\text{O}_2 (1,24 \text{ M})$ :  $\text{HF} (46\%)$ :  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} (92\%)$  при соотношении компонентов 1:0,5:0,25;

- отмывка образца в концентрированной  $\text{HNO}_3$  в течение 15 минут для удаления серебряных частиц из пор.

Между этапами осуществлялась отмывка пластины дистиллированной водой с целью удаления компонентов растворов и продуктов реакции.

Времена изготовления образцов, а также некоторые особенности технологии представлены в таблице 1.

Таблица 1. Описание образцов с пленками ПК, сформированными методом металл-стимулированного травления

№ обр	Тип подложки	Время первого этапа, с	Время второго этапа, мин	Дополнительные сведения
1	монокристаллический Si p-типа	20	20	-
2	монокристаллический Si p-типа	60	15	-
3	монокристаллический кремний КЭФ-4,5	60	15	-
4	монокристаллический кремний p-типа проводимости	12	60	на этапе 2 применен травитель $\text{KMnO}_4 (0,04 \text{ M})$ : $\text{HF} (46\%)$ : $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} (92\%)$ при соотношении компонентов 1:0,5:0,5

### Эксперимент

Изображения поверхностей образцов ПК были получены с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) JEOL JSM6610LV. Изображения получали в следующих режимах: высокий вакуум, сигнал – вторичные электроны, напряжение на катоде – -30 кВ. Результаты исследования методом РЭМ представлены на рисунке 1.

Далее изображения обрабатывались с помощью методов двумерного флуктуационного анализа с исключенным трендом и средней взаимной информации.

Метод 2D DFA позволяет получить зависимость флуктуационной функции  $F$  от пространственного масштаба  $s$ . График строят в двойном логарифмическом масштабе, из которого можно определить следующие характеристики:

- скейлинговый показатель  $\alpha$  (тангенс угла наклона  $F(s)$  до первого перегиба) – характеризует тип корреляций в структуре;

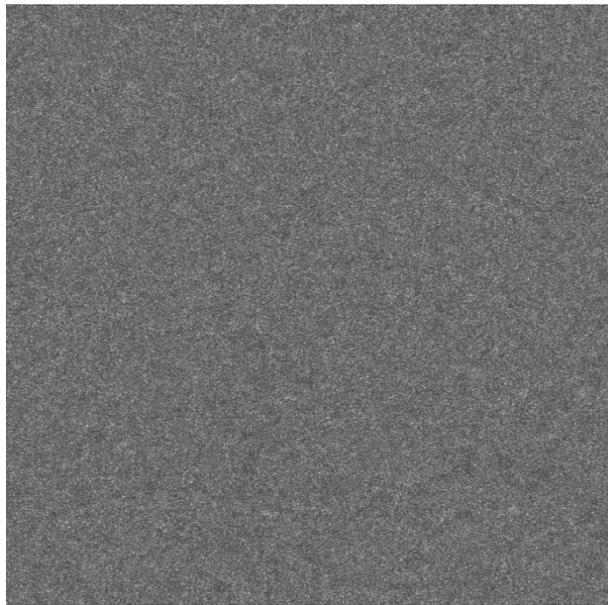
- корреляционный вектор  $d$  (пространственный масштаб, на котором наблюдается перегиб функции  $F(s)$ ) – соответствует периоду гармонических составляющих в структуре.

Метод СВИ позволяет получить распределение ВИ, рассчитанной для каждой пары точек (высот поверхности). Из распределения ВИ определяют следующие характеристики:

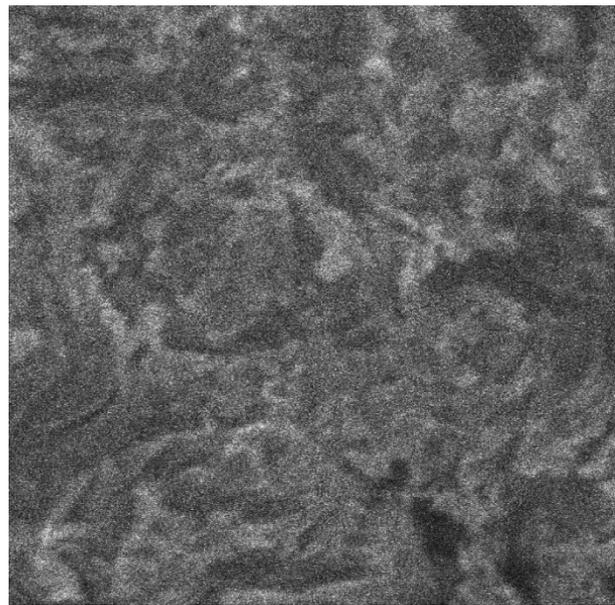
- СВИ – характеризует степень упорядоченности структуры;

- МВИ (максимальная взаимная информация) – характеризует информационную емкость структуры.

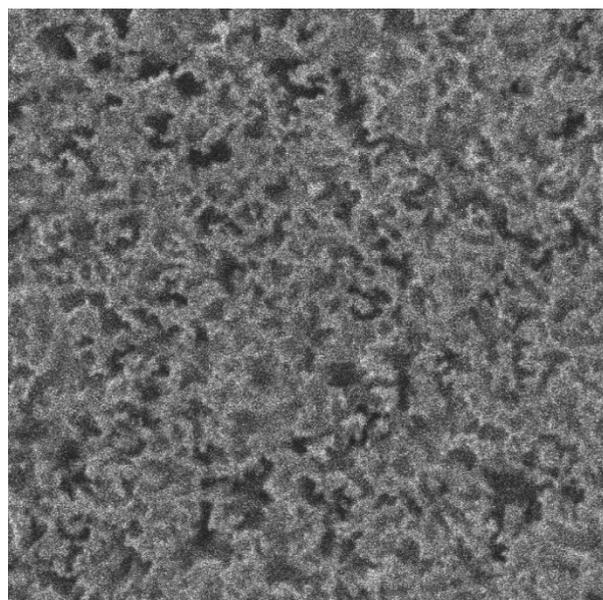
На рисунке 2 в качестве примера приведена зависимость  $F(s)$  для образца № 1 с отмеченными перегибами флуктуационной функции. В таблице 2 приведены значения корреляционных векторов, скейлингового показателя, а также СВИ и МВИ для всех образцов.



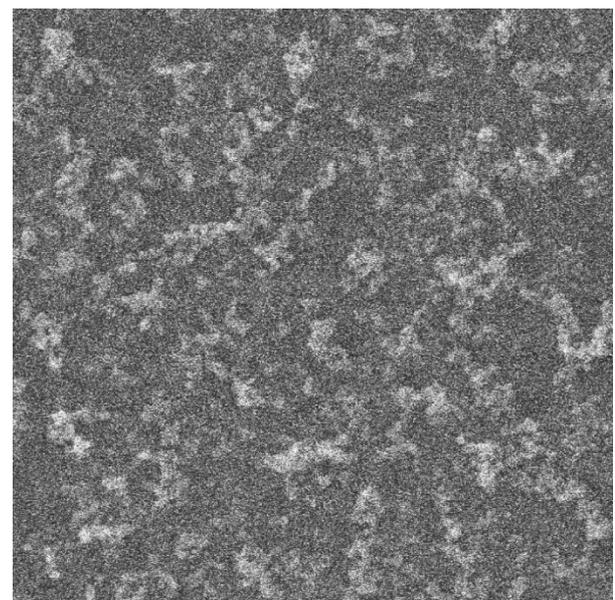
а



б



в



г

Рис. 1. Изображения поверхностей образцов ПК, размерами  $5 \times 5 \text{ мкм}^2$ : 1 (а); 2 (б); 3 (в); 4 (г); 5 (д); 6 (е)

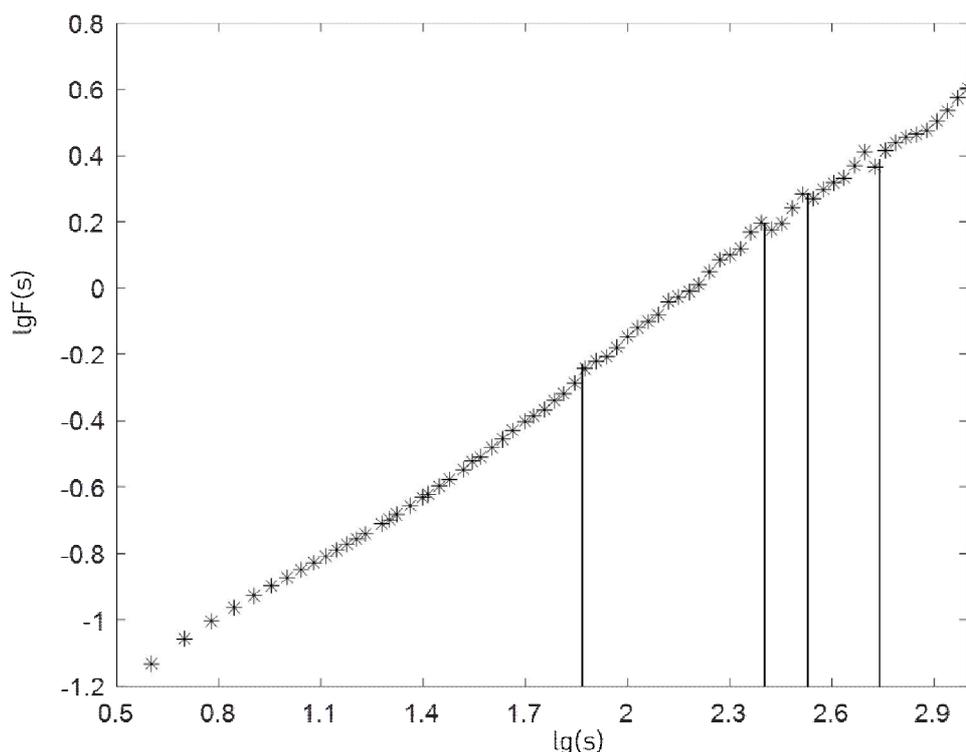
Рис. 2. Зависимость  $F(s)$  для образца № 2

Таблица 1. Результаты исследования образцов ПК методами 2D DFA и СВИ

№ образца	$d \pm 0,05$ , мкм	$\alpha$	СВИ	МВИ
1	2,51	0,59	0,0010	0,471
2	0,35; 1,26; 1,77; 2,81	0,74	0,0011	0,512
3	2,51	0,73	0,0012	0,581
4	0,10; 1,77; 2,69;	0,72	0,0011	0,529

### Анализ экспериментальных результатов

По изображениям РЭМ видно, что способ изготовления образцов существенно влиял на их структуру. Малое время формирования серебряных частиц (20 с) и отсутствие дополнительных травителей не привели к существенному изменению рельефа, визуально наблюдается однородно-шероховатый рельеф. Для остальных образцов рельеф стал более развитым, появились фракталоподобные структуры на поверхности.

Значения скейлингового показателя соответствуют наличию длительных и нестепенных корреляций в структуре. Для образцов 2-4 скейлинговый показатель возрастает (0,72-0,74), что соответствует большей упорядоченности в структуре. Для образцов 1 и 3 наблюдается только один корреляционный вектор, причем имеющий одинаковые значения. Таким образом, несмотря на то, что морфология поверхности этих образцов сильно различается, но метод 2D DFA позволил выявить одинаковые корреляционные свойства. Для образцов 2 и 4

наблюдается несколько корреляционных векторов. У этих образцов с учетом погрешности наблюдаются два одинаковых корреляционных вектора (1,77 и 2,69-2,81).

По значениям СВИ все образцы принадлежат к категории структур с низкой упорядоченностью. Существенных различий по значениям СВИ не наблюдается. По значениям МВИ первый образец попадает в группу структур с низкими информационной емкостью и энтропией. Остальные образцы – в группу со средними информационной емкостью и энтропией. Более длительное формирование металлических частиц и использовании в травителе  $\text{KMnO}_4$  приводят к повышению информационной емкости, что выражается в наличии более развитого рельефа.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003) с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета имени В.Ф. Уткина.*

### Библиографический список

1. Ю.А. Юраков, А.С. Леншин, П.В. Середин Учебно-методическое пособие для вузов «ПОЛУЧЕНИЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ», Воронеж, Издательский дом ВГУ, 2014, 24с
2. Самоорганизующиеся структуры в электронике: монография / С.П. Вихров, Н.В. Рыбина, Н.В. Бодягин, Н.Б. Рыбин, А.В. Алпатов; Рязань: ИП Жуков В.Ю., 2017. 168 с.

УДК 621.315.592; ГРНТИ 29.19.31

## ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПЕРЕЗАРЯДКИ ПРИМЕСНЫХ АТОМОВ ЗОЛОТА В КРЕМНИЕВОЙ P+-N СТРУКТУРЕ

Е.П. Трусов, А.В. Ермачихин, В.Г. Литвинов

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Россия, Рязань, eptrusov@yandex.ru*

*Аннотация.* Описана методика изучения температурной зависимости перезарядки глубоких энергетических уровней в кремниевой полупроводниковой барьерной структуре, образованных атомами золота, а также температурной зависимости энергии ионизации глубокого уровня. Методика основана на получении и анализе спектров токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней.

*Ключевые слова:* глубокий уровень, сечение захвата, энергия ионизации, токовая релаксационная спектроскопия глубоких уровней.

## STUDY OF THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE RECHARGE OF IMPURITY GOLD ATOMS IN A SILICON P+-N STRUCTURE

E.P. Trusov, A.V. Ermachikhin, V.G. Litvinov

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

*The summary.* A method is described for studying the temperature dependence of the recharge of deep energy levels in the silicon barrier structure formed by gold atoms, as well as the temperature dependence of the ionization energy of the deep level. The technique is based on obtaining and analyzing the spectra of current deep level transient spectroscopy.

*Keywords:* deep level, capture cross section, ionization energy, I-DLTS.

### Введение

Наличие глубоких энергетических уровней (ГУ) в полупроводниковых структурах способствует появлению дополнительных эффектов – как позитивных, так и негативных. Таким образом, определение положения, концентрации и параметров дефектов и глубоких цен-

тров (ГЦ) в запрещенной зоне полупроводниковых структур является одним из актуальных векторов развития физики полупроводников [1].

Носители заряда, захваченные на глубокие уровни в полупроводниках, могут термически активироваться в разрешенные энергетические зоны. Важным механизмом безызлучательного захвата носителей заряда (НЗ) для многих глубоких уровней является многофононное излучение через решеточную релаксацию. Существуют ГЦ, сечения захвата которых уменьшаются с повышением температуры. Возникновение зависящих от температуры сечений захвата имеет важное значение, потому что это влияет на измеряемую энергию активации для теплового излучения и, следовательно, это необходимо учитывать при исследовании физической природы ГЦ [2].

ГУ в полупроводниковых структурах действуют как рекомбинационные центры, либо как ловушки захвата для свободных носителей заряда. ГЦ типа «Рекомбинационный центр» сильно уменьшают время жизни и диффузионную длину неосновных носителей заряда. ГЦ типа «Ловушка захвата» влияют на эффективность накопления заряда. Изменение объемного заряда ГУ описывается кинетическим уравнением [3]:

$$\frac{dn_t}{dt} = -e_n n_t + c_n n p_t + e_p p_t - c_p p n_t, \quad (1)$$

где  $c_n$  – коэффициент захвата электронов на глубокий уровень;

$c_p$  – для дырок;  $n_t$  – концентрация электронов на глубоком уровне;

$p_t$  – концентрация дырок на глубоком уровне;  $n$  – концентрация электронов в зоне проводимости;  $p$  – концентрация дырок в валентной зоне;

$e_n$  – вероятность термической эмиссии электронов с ГУ в зону проводимости;

$e_p$  – вероятность термической эмиссии электронов из валентной зоны на ГУ;

$c_n = \sigma_n v_T$  – коэффициент захвата электронов;

$\sigma_n$  – сечение захвата электрона на ГУ;

$v_T$  – средняя тепловая скорость НЗ,

$$n_t(t) = N_t \left[ \frac{e_p}{e_n + e_p} + \frac{e_n}{e_n + e_p} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right], \quad (2)$$

$$p_t(t) = N_t - n_t(t) = N_t \frac{e_n}{e_n + e_p} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right], \quad (3)$$

где  $\tau$  – постоянная времени релаксации заполнения ГУ.

Из уравнения (2) следует, что стационарное заполнение электронами глубокого уровня устанавливается по экспоненциальному закону с постоянной времени  $\tau$ , которая не зависит от начального заполнения уровня и от концентрации ГУ

В условиях термодинамического равновесия скорости эмиссии и сечения захвата глубокого уровня связаны следующими уравнениями [3, 4]:

$$\tau = e_n^{-1} = (\sigma_n v_T N_c)^{-1} \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right), \quad (4)$$

$$\tau = e_p^{-1} = (\sigma_p v_T N_v)^{-1} \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right), \quad (5)$$

где  $\Delta E$  – энергия ионизации ГЦ;

$k$  – постоянная Больцмана;

$N_C, N_V$  – эффективная плотность состояний в зоне проводимости и валентной зоне соответственно;

$T$  – температура.

Заселенность глубокого уровня НЗ изучают при подаче периодических импульсов напряжения смещения на образец. Изучая токовый отклик полупроводниковой структуры с ГЦ имеется возможность определить энергию активации ГУ, сечение захвата НЗ с помощью уравнений (4) и (5). Таким образом, изменение интенсивности выбросов НЗ с ГЦ в зависимости от температуры определяется выражением [3]:

$$e_{n.p.} \sim \exp\left(-\frac{1}{T}\right). \quad (6)$$

### Эксперимент

Для изучения температурной зависимости перезарядки примесных атомов золота в кремниевой  $p^+$ - $n$  структуре использовался автоматизированный комплекс токовой релаксационной спектроскопии глубокого уровня (ТРСГУ) [5].

ТРСГУ-спектры получают путем программной обработки сигнала, приходящего с усилителя и оцифрованного аналого-цифровым преобразователем. Релаксационный сигнал умножается на весовую функцию, в данном случае в качестве окна использовалась весовая функция «lock-in». Для весовой функции «lock-in» выражение для нахождения ТРСГУ-спектра в режиме измерения температурной зависимости скорости эмиссии носителей заряда с глубоких уровней имеет вид [5]:

$$\Delta R(\tau) = \frac{qWSKN_t}{2\tau} \times \exp\left(-\frac{t_d}{\tau_{max}}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{t_c}{2\tau_{max}}\right)\right]^2, \quad (7)$$

где  $K$  – коэффициент усиления;

$q$  – элементарный заряд;

$W$  – ширина области пространственного заряда (ОПЗ);

$S$  – площадь контакта;

$t_d$  – время начала окна;

$t_c$  – длительность окна.

Максимум ТРСГУ-сигнала наблюдается при совпадении времени релаксации с величиной

$$\tau_{max} = \frac{t_c}{2 \ln\left(\frac{t_c}{t_d} + 1\right)}. \quad (8)$$

В ТРСГУ различают заполняющий импульс и опустошающий импульс. При подаче на структуру заполняющего импульса напряжения смещения толщина ОПЗ меньше, чем при воздействии опустошающего импульса на некоторую величину, определяемую амплитудой импульса напряжения заполнения. Поэтому в этой области происходит процесс захвата ловушками свободных носителей заряда.

На рисунке 1 представлен спектр ТРСГУ для кремниевой барьерной структуры, легированной золотом, при длительности заполняющего импульса 10 мкс.

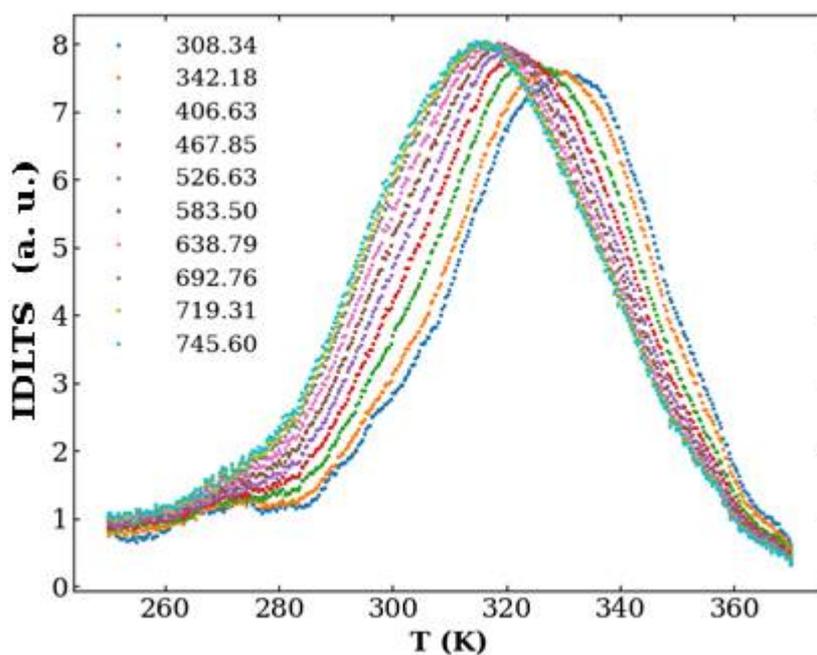


Рис. 1. ТРСГУ-спектр для длительности опустошающего импульса 10 мкс, каждому цвету соответствует своя постоянная времени  $\tau_{max}$  в мкс.

Для расчета энергии активации определяются температуры максимумов пиков на спектре, и строится прямая Аррениуса (рисунок 2) с помощью линейной аппроксимации методом наименьших квадратов.

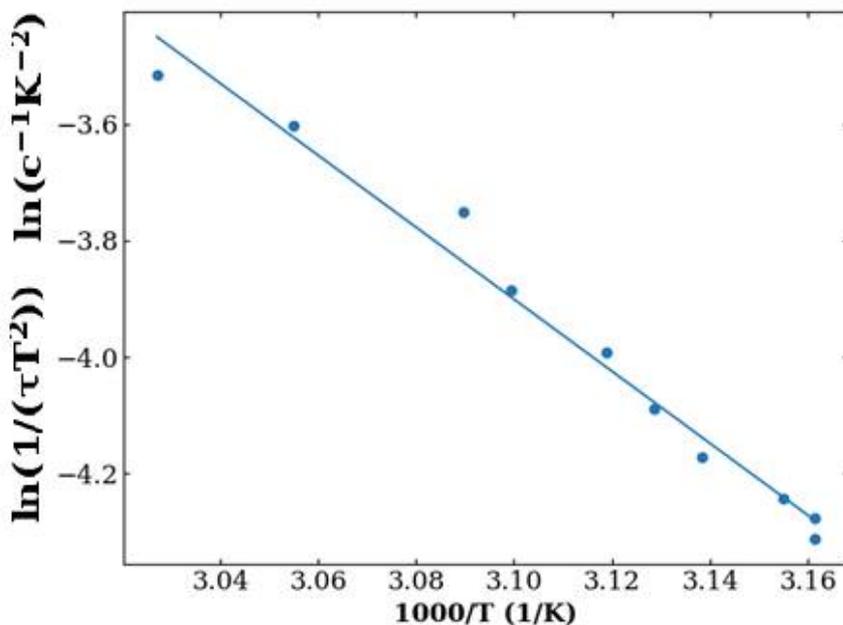


Рис. 1. Прямая Аррениуса для ТРСГУ-спектра

Величина энергии ионизации, определенная через тангенс угла наклона прямой Аррениуса, составила  $0,53 \pm 0,02$  эВ.

Сечение захвата  $\sigma_{n,p}$  возможно определить из графика Аррениуса (рисунок 2) путем экстраполяции в область бесконечно большой температуры. При  $1/T = 0$  определяется

сечение захвата для бесконечно большой температуры, однако, такое значение сечения захвата обычно далеко от значения при конечных температурах по следующим причинам: а) сечение захвата может зависеть от температуры и, следовательно, экстраполяция неверна; б) небольшая ошибка экстраполяции может привести к ошибке определения на несколько порядков величины. Следовательно, сечение захвата должно быть непосредственно измерено при конечных температурах как можно в более широком диапазоне температур [6].

Исследуемая кремневая барьерная структура характеризовалась диаметром контакта  $0,4 \text{ мм}^2$ , удельной электрической емкостью перехода при нулевом напряжении смещения  $1,29 \times 10^{-4} \text{ Ф/м}^2$ .

Основные параметры измерения ТРСГУ-спектров:

- диапазон температур 240 – 370 K;
- коэффициент усиления  $3 \times 10^6 \text{ В/А}$ ;
- амплитуда импульса напряжения заполнения -1 В;
- амплитуда импульса напряжения опустошения -6 В;
- скорость нагрева образца 2 К/мин;
- длительность импульса опустошения 5 мс;
- длительность импульса заполнения  $10^{-1}, 3 \cdot 10^{-1}, 1, 3, 10, 10^2, 10^3, 10^4$  мкс.

Таким образом, было проведено 8 измерений с различными длительностями импульсов заполнения. На рисунке 3 представлены спектры ТРСГУ с фиксированной постоянной времени релаксации  $\tau_{max}$  для различных длительностей импульсов заполнения. С увеличением длительности заполняющего импульса увеличивается амплитуда пика на ТРСГУ-спектре.

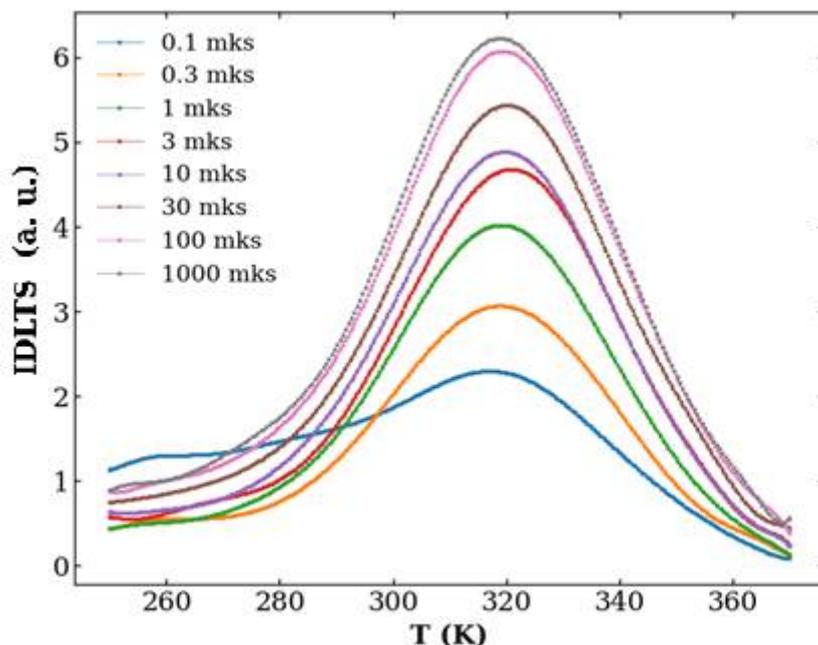


Рис. 3. Спектр ТРСГУ для различных длительностей заполняющих импульсов и одинаковым  $\tau_{max}$ , каждому цвету соответствует длительность импульса заполнения.

Для определения величины сечения захвата выбирается фиксированная скорость эмиссии НЗ с ГЦ (постоянная температура), и выполняется серия измерений РСГУ-спектров при изменении ширины импульса заполнения от одного температурного скана к следующему скану. До определенного значения увеличение ширины импульса приводит и к увеличению

высоты пика на ТРСГУ-спектре. Когда увеличение ширины импульса перестает влиять на величину тока релаксации, наступает насыщение, т.е. все ГЦ полностью заполняются в течение действия импульса заполнения (рисунок 4). Высота пика  $S$  связана с шириной импульса заполнения  $t_p$  следующим соотношением [7]:

$$1 - \frac{S}{S_\infty} = \exp\left(-\frac{t_p}{\tau}\right), \tag{9}$$

С другой стороны процесс захвата ГЦ свободных НЗ для ловушек электронов описывается выражением [1]:

$$\frac{dn(t_p)}{dt} = \sigma_n v_T N_{DM} (N_t - n(t)). \tag{10}$$

Таким образом, изменяя длительность импульса заполнения и определяя при этом зависимость, полученную из уравнения 10:

$$\ln\left[1 - \frac{n(t_p)}{N_t}\right] = -\sigma_n v_T N_{DM} t_p \tag{11}$$

Решая графически уравнение (11), получаем:

$$\sigma_n = \frac{tg\alpha}{nv_T}. \tag{12}$$

где  $t_p$  – длительность импульса заполнения;

$N_t$  – концентрация глубоких центров;

$N_{DM}$  – концентрация мелких доноров;

$n(t_p) \leq N_t$  – концентрация заполненных носителями зарядов глубоких центров.

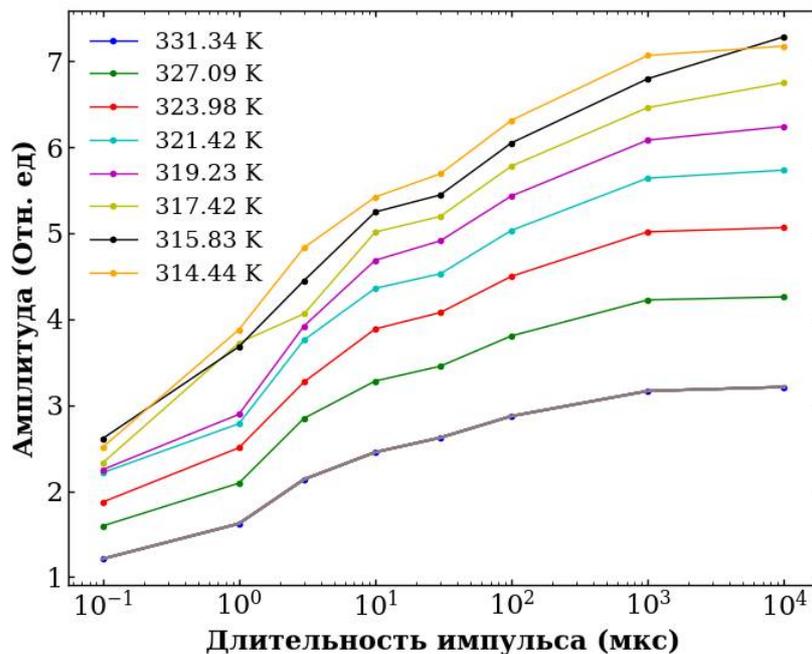


Рис. 2. График зависимости  $\tau_{max}$  от длительности опустошающего импульса при различных температурах максимума пика на ТРСГУ-спектрах

Такой метод определения сечения захвата использовался в [7]. Метод, используемый в данной работе, отличается тем, что производилось несколько температурных сканирований при различных значениях длительности заполняющего импульса. Это позволило иметь выбор любой температуры из спектра ТРСГУ, и дало возможность изменять длительность и время начала окна при использовании весовой функции.

На рисунке 4 представлена зависимость амплитуды максимума пика на ТРСГУ-спектре с различными  $\tau$  (которым соответствует своя температура) от длительности заполняющего импульса. В отличие от работы [8] амплитуды максимумов брались из полученных полных спектров ТРСГУ с соответствующими температурами.

Для нахождения сечения захвата можно воспользоваться уравнением (10). Имея температурную зависимость сечения захвата, можно рассчитать энергию активации для захвата НЗ на ГЦ. На рисунке 5 представлена зависимость сечения захвата от температуры. Энергия активации сечения захвата составила 0,069 эВ.

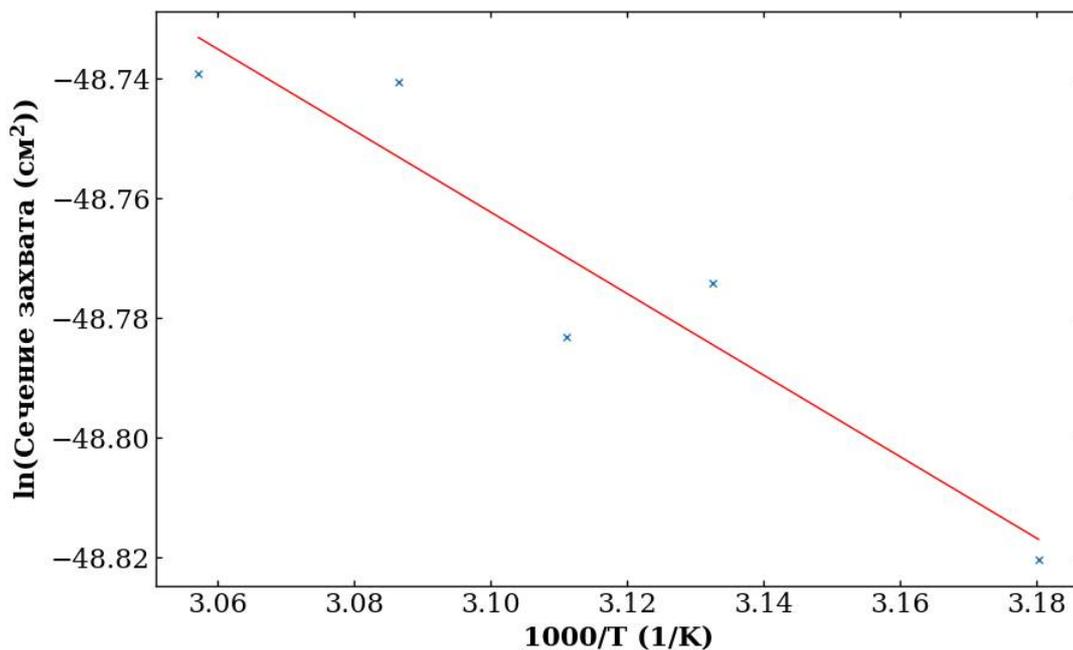


Рис. 5. График зависимости сечения захвата от обратной температуры

### Выводы

В работе представлено описание методики определения температурной зависимости перезарядки ГЦ в полупроводниковой барьерной структуре. Исследования выполнены с использованием автоматизированного измерительного комплекса токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней.

Результаты по изучению сечения захвата и энергии ионизации ГЦ в данной работе коррелируют с результатами работы [8]. Отличительной особенностью метода по изучению температурной зависимости перезарядки ГЦ в полупроводниковых структурах является полнота исследуемых данных, комплексность подхода в проведении сложного экспериментального исследования, позволяющего изучить температурную зависимость тока релаксации в полупроводниковой барьерной структуре, энергию ионизации глубоких уровней, сечение захвата носителей заряда в различных режимах перезарядки.

## Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003) с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета имени В.Ф. Уткина.

## Библиографический список

1. Денисов А.А., Лактюшкин В.Н., Садофьев Ю.Г. //Обзоры по электронной технике. 1985. Сер. 7. Вып. 15 (1141).
2. С. Зи. Физика полупроводниковых приборов (М., Мир, 1984). (Пер. с англ.: S.M. Sze. Physics of Semiconductor Devices (N.Y.–Chichester–Brisbane–Toronto–Singapore, A Wiley–Interscience Publication John Wiley & Sons,1981)].
3. Гудзев В.В. Исследование глубоких энергетических уровней в барьерных структурах на основе кристаллического и аморфного гидрогенизированного кремния: дис. канд. физико-математических наук.- Рязань, 2015.- Режим доступа: <https://studylib.ru/doc/2427763/gudzev-v.v.-issledovanie-glubokih-e-nergeticheskikh-urovnej-v>
4. Lang D.V. // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. P. 3023. <http://dx.doi.org/doi.10.1063/1.1663719>
5. Ермачихин А.В., Литвинов В.Г.// Автоматизированный измерительный комплекс токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней/ Приборы и техника эксперимента, 2018, № 2, с. 118–123
6. Aurangzeb Khan, Yamaguchi Masafumi /Deep Level Transient Spectroscopy: A Powerful Experimental Technique for Understanding the Physics and Engineering of Photo-Carrier Generation, Escape, Loss and Collection Processes in Photovoltaic Materials// Solar Cells April 16th, 2014 Published: October 22nd, 2015 199-222
7. P. Braunlich/ Thermally Stimulated Relaxation in Solids// (Topics in applied physics; v. 37t. Bibliography: p. Includes index. 1. Solid-Thermal properties.2. Thermally stimulated currents. 3. Exoelectron emission. I. Briunlich, P., 1937. QCI76.8.T4T45 530.4'179-18071.
8. Е.П. Трусков, А.В. Ермачихин, В.Г. Литвинов/ Изучение температурной зависимости кинетики захвата носителей заряда на глубокие энергетические уровни в полупроводниковой барьерной структуре// Современные технологии в науке и образовании. СТНО-2022. Международный научно-технический форум. Сборник трудов. Том 2. Рязань. 2022. С.121-127.

УДК 621.315.592; ГРНТИ 47.33.33

## АНАЛИЗ ЗОННОЙ ДИАГРАММЫ HIT-СТРУКТУРЫ

Д.Р. Горячкин, В.В. Гудзев, В.С. Минаева, В.Г. Литвинов

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, [flet.doo@yandex.ru](mailto:flet.doo@yandex.ru)

*Аннотация.* В работе рассматривается солнечный элемент на базе HIT-структуры. Приводятся его основные особенности, материалы, расчет положения уровней для построения структуры и зонной диаграммы наносистемы.

*Ключевые слова:* HIT- структура, энергия, наноструктура, наносистема.

## ANALYSIS OF THE HIT-STRUCTURE ENERGY BAND DIAGRAM

D.R. Goryachkin, V.V. Gudzev, V.S. Minaeva, V.G. Litvinov

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russian Federation, Ryazan, [flet.doo@yandex.ru](mailto:flet.doo@yandex.ru)

*Abstract.* The paper considers a solar cell based on the HIT structure. Its main features, materials, calculation of the position of levels for constructing the structure and band diagram of the nanosystem are given.

*Keywords:* HIT - structure, energy, nanostructure, nanosystem.

Существенный объем современной продукции электроники составляют фотоэлектрические преобразователи и солнечные элементы (СЭ) на их основе. При производстве высокоэффективных солнечных элементов (СЭ) наряду с совершенствованием технологии изготов-

ления необходимо глубокое понимание физических процессов, происходящих в элементах. Выявление взаимосвязи между основными структурными, электрофизическими и оптическими характеристиками и эксплуатационными параметрами СЭ позволяет предложить варианты увеличения КПД преобразования солнечной энергии.

Одной из наиболее перспективных технологий изготовления солнечных элементов (СЭ) на основе кристаллического кремния (с-Si) является НИТ (Heterojunction with Intrinsic Thin layer) технология, базирующаяся на формировании гетероперехода при помощи тонких пленок аморфного кремния ( $\alpha$ -Si:H), нанесенных на поверхность пластины с-Si [1]. Пленки  $\alpha$ -Si:H служат для хорошей адгезии и обеспечения высоких качеств границ раздела (это позволяет снизить потери на рекомбинацию ввиду уменьшения количества дефектов).

НИТ-структура также позволяет существенно снизить температуры получения устройства – по сравнению с доходящими до  $1000^\circ\text{C}$  температурами получения других структур, для НИТ-структуры это всего лишь  $250^\circ\text{C}$  [2]. Данное достоинство заключается в снижении вероятности деградационных процессов в материале, которые возникают с увеличением температуры технологических процессов. Также, снижая температуру, можно получить более тонкие пленки с-Si, которые подвергаются деформации при высоких температур.

Разработка, расчет и моделирование СЭ на основе НИТ-структуры является важной и актуальной задачей современной микро- и нанoeлектроники. Прототипом рассчитываемой структуры являлась НИТ-структура, представленная на рисунке 1 [3].

Целью расчета параметров полупроводниковой НИТ-структуры является получение уточненной зонной диаграммы гетеропереходов. Для построения диаграммы необходимо знать следующие параметры: ширину запрещенной зоны материалов, термодинамическую работу выхода материалов, сродство к электрону.

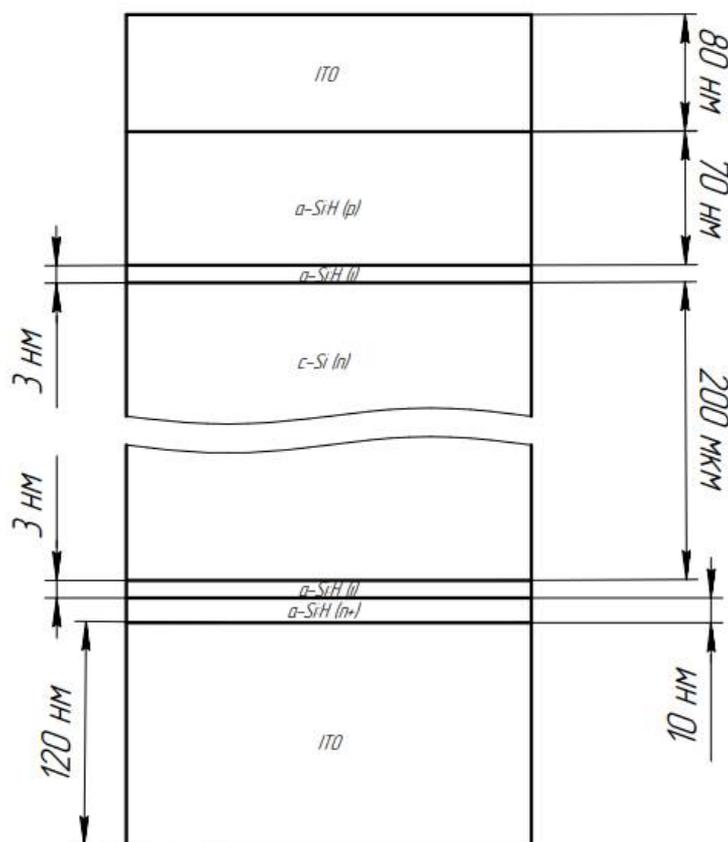


Рис. 1. Рассматриваемая НИТ-структура

Построение зонной диаграммы (рисунок 2) производилось по модели Андерсона (модели электронного сродства) при следующих допущениях:

1. ширина запрещенной зоны и внешняя работа выхода неизменны по плоскости контакта и изменяются скачком;

2. в приконтактном слое полупроводника происходит изменение энергии электрона равное разнице работ выхода, что обеспечивает равное положение уровня Ферми вдоль гетероперехода.

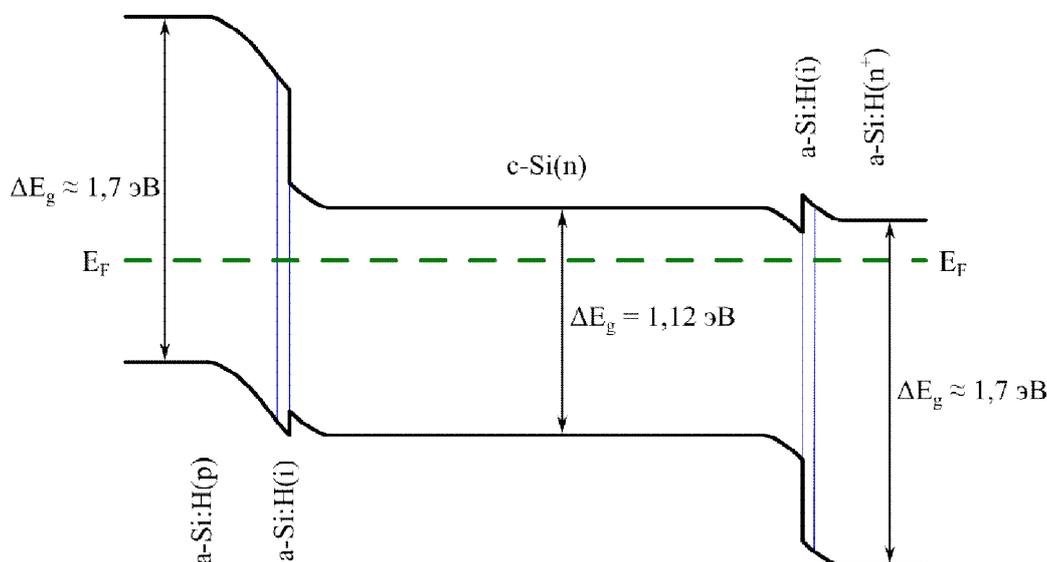


Рис. 2. Зонная диаграмма гетероструктуры a-Si:H(p)/ a-Si:H(i)/ c-Si(n)/ a-Si:H(i)/ a-Si:H(n<sup>+</sup>) в состоянии термодинамического равновесия [1]

Исходные данные:

1. Ширина запрещенной зоны аморфного кремния  $E_{g1} = 1,70$  эВ.
2. Ширина запрещенной зоны кристаллического кремния  $E_{g2} = 1,12$  эВ.
3. Сродство к электрону для аморфного кремния  $\chi_1 = 3,85$  эВ.
4. Сродство к электрону для кристаллического кремния  $\chi_2 = 4,05$  эВ.
5. Температура  $T = 300$  К.
6. Масса электрона  $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг.
7. Элементарный заряд  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.
8. Постоянная Планка  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.
9. Постоянная Больцмана  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.
10. Универсальная диэлектрическая постоянная
11.  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Кл<sup>2</sup>/Н·м<sup>2</sup>.
12. Диэлектрическая проницаемость кремния  $\epsilon = 12$ .

Возьмем концентрацию акцепторов, которые принимают как полностью ионизированные для  $\alpha$ -Si:H р-типа  $N_a = 5 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$  и концентрацию доноров, которые принимают как полностью ионизированные для c-Si n-типа  $N_d = 5 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ , а концентрацию доноров, которые принимают как полностью ионизированные для  $\alpha$ -Si:H n-типа  $N_{dd} = 5 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ .

### Расчет гетероструктуры $\alpha$ -Si:H(p)/ $\alpha$ -Si:H(i)/c-Si(n)

1. Разрыв зоны проводимости формируется вследствие разницы между электронным сродством контактирующих проводников, из-за чего дно зоны проводимости находится на разных уровнях:

$$\Delta E_c = \chi_1 - \chi_2; \quad (1)$$

$$\Delta E_c = -0,200 \text{ эВ.}$$

2. Разрыв валентной зоны формируется аналогично:

$$\Delta E_v = E_{g1} - E_{g2} - \Delta E_c; \quad (2)$$

$$\Delta E_v = -0,380 \text{ эВ.}$$

3. Расчет эффективной массы для электронов и дырок производится по эмпирическим формулам:

$$m_{dn} = 1,08m_0; \quad (3)$$

$$m_{dn} = 9,838 \cdot 10^{-31} \text{ кг};$$

$$m_{dp} = 0,56m_0; \quad (4)$$

$$m_{dp} = 5,101 \cdot 10^{-31} \text{ кг.}$$

4. Вычисление значений плотностей состояний в зонах:

$$N_c = \frac{2(2\pi m_{dn} kT)^{\frac{3}{2}}}{h^3}; \quad (5)$$

$$N_c = 2,822 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3};$$

$$N_v = \frac{2(2\pi m_{dp} kT)^{\frac{3}{2}}}{h^3}; \quad (6)$$

$$N_v = 1,054 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}.$$

5. Вычисление положения уровня Ферми относительно дна зоны проводимости для невырожденного примесного полупроводника n-типа и p-типа:

$$\mu_1 = -k \frac{T}{e} \ln \left( \frac{N_c}{N_d} \right); \quad (7)$$

$$\mu_1 = -0,224;$$

$$\mu_2 = -k \frac{T}{e} \ln \left( \frac{N_v}{N_a} \right) - E_{g2}; \quad (8)$$

$$\mu_1 = -1,318.$$

6. Контактная разность потенциалов рассчитывается следующим образом:

$$\varphi_0 = |(\chi_1 - |\mu_1|) - (\chi_2 - |\mu_2|)|; \quad (9)$$

$$\varphi_0 = 0,895.$$

7. Контактные разности потенциалов, приходящиеся на p и n области при идеальном гетеропереходе:

$$\varphi_1 = \frac{\varphi_0}{1 + \frac{\varepsilon_1 n_{n0}}{\varepsilon_2 p_{p0}}}; \quad (10)$$

$$\varphi_1 = 0,447 \text{ эВ};$$

$$\varphi_2 = \frac{\varphi_0}{1 + \frac{\varepsilon_2 p_{p0}}{\varepsilon_1 n_{n0}}}; \quad (11)$$

$$\varphi_1 = 0,447 \text{ эВ.}$$

7. Ширина области пространственного заряда в  $\alpha$ -Si:H p-типа и c-Si n-типа :

$$d_1 = \left( \frac{2\varepsilon_0\varepsilon_1\varphi_1 e}{e^2 p_{p0}} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad (12)$$

$$d_1 = 3,446 \cdot 10^{-7} \text{ м};$$

$$d_2 = \left( \frac{2\varepsilon_0\varepsilon_2\varphi_2 e}{e^2 n_{n0}} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad (13)$$

$$d_2 = 3,446 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

Аналогично рассчитывается ширина ОПЗ перехода  $\alpha\text{-Si:H(p)}/\text{a-Si:H(i)}/\text{c-Si(n)}$

$$d_{pin} = \left( \frac{2\varepsilon_0\varepsilon_1\varepsilon_2\varphi_0 e (p_{p0} + n_{n0})^2}{e^2 p_{p0} n_{n0} (n_{n0}\varepsilon_1 + p_{p0}\varepsilon_2)} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad (14)$$

$$d_{pin} = 6,892 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

### Расчет гетероструктуры $\text{c-Si(n)}/\text{a-Si:H(i)}/\text{a-Si:H(n}^+)$

Проводится аналогично расчету перехода  $\alpha\text{-Si:H(p)}/\text{a-Si:H(i)}/\text{c-Si(n)}$ .

1. Разрыв зоны проводимости:

$$\Delta E_c = \frac{E_{g2} - E_{g1}}{2}; \quad (17)$$

$$\Delta E_c = 0,290 \text{ эВ}.$$

2. Разрыв валентной зоны:

$$\Delta E_v = \Delta E_c = 0,290 \text{ эВ}.$$

3. Вычисление плотностей состояний в зонах:

$$N_c = 2,822 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3};$$

$$N_{cc} = 2,822 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}.$$

4. Вычисление положения уровня Ферми относительно дна зоны проводимости:

$$\mu_2 = -k \frac{T}{e} \ln \left( \frac{N_{cc}}{d} \right) - E_{g2}; \quad (18)$$

$$\mu_2 = -0,104 \text{ эВ}.$$

5. Контактная разность потенциалов рассчитывается аналогично по формуле (9) и составляет:

$$\varphi_0 = 0,081 \text{ эВ}.$$

6. Контактные разности потенциалов, приходящиеся на n и  $n^+$  области:

$$\varphi_1 = \frac{\varphi_0}{1 + \frac{\varepsilon_1 n_{n0}}{\varepsilon_2 n_{nn0}}}; \quad (19)$$

$$\varphi_1 = 0,08 \text{ эВ};$$

$$\varphi_2 = \frac{\varphi_0}{1 + \frac{\varepsilon_2 n_{nn0}}{\varepsilon_1 n_{n0}}}; \quad (20)$$

$$\varphi_2 = 0,0008 \text{ эВ}.$$

8. Ширина области пространственного заряда в  $\text{c-Si}$  n-типа и  $\alpha\text{-Si:H}$   $n^+$ -типа:

$$d_1 = \left( \frac{2\varepsilon_0\varepsilon_1\varphi_1 e}{e^2 n_{n0}} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad (21)$$

$$d_1 = 146 \cdot 10^{-9} \text{ м};$$

$$d_2 = \left( \frac{2\varepsilon_0\varepsilon_2\varphi_2 e}{e^2 n_{nno}} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad (22)$$

$$d_2 = 1,458 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

Ширина ОПЗ перехода c-Si(n)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n<sup>+</sup>)

$$d_{ninn} = \left( \frac{2\varepsilon_0\varepsilon_1\varepsilon_2\varphi_0 e (n_{nno} + n_{no})^2}{e^2 p_{p0} n_{no} (n_{no}\varepsilon_1 + n_{nno}\varepsilon_2)} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad (23)$$

$$d_{ninn} = 1,472 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

**Общая ширина ОПЗ структуры**

$$d_{\text{общее}} = d_{pin} + d_{ninn}. \quad (27)$$

$$d_{\text{общее}} = 8,364 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

По результатам расчета построена уточнённая зонная диаграмма НИТ-структуры солнечного элемента (рисунок 3).

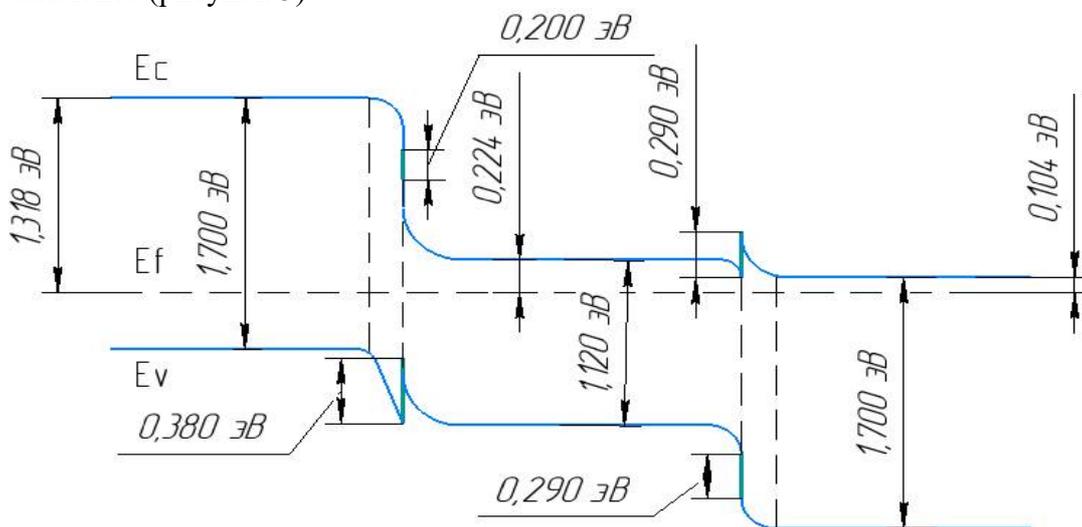


Рис. 3. Зонная диаграмма при концентрациях акцепторов в области a-Si:H (p)  $5 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$  доноров в области a-Si:H (n<sup>+</sup>)  $5 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$  и области c-Si (n)  $5 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании СЭ на основе сложной гетероструктуры на базе тонких слоев аморфного гидрогенизированного и кристаллического кремния.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003) с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета имени В.Ф. Уткина.

### Библиографический список

1. Гудзев В. В. Исследование глубоких энергетических уровней в барьерных структурах на основе кристаллического и аморфного гидрогенизированного кремния: специальность 01.04.10 «Физика полупроводников»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Гудзев Валерий Владимирович. – Рязань, 2015. – 22 с.
2. Street R. A. Technology and Applications of Amorphous Silicon / R. A. Street. – Heidelberg: Springer Berlin, 2000. – 418 с.
3. Вихров С.П., Вишняков Н.В., Гудзев В.В., Ермачихин А.В., Жилина Д.В., Литвинов В.Г., Маслов А.Д., Мишустин В.Г., Теруков Е.И., Титов А.С. // Физика и техника полупроводников. 2018. Т. 52. № 7. С. 787-791.

УДК 621.382: ГРНТИ 47.33.29

## МОДЕЛИРОВАНИЕ I-V И C-V ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ТУННЕЛЬНО-РЕЗОНАНСНОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ

К.С. Зайцев, В.Г. Литвинов

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, kasperskiy219@gmail.com*

*Аннотация.* Работа посвящена моделированию I-V и C-V характеристик полупроводниковой туннельно-резонансной гетероструктуры. В результате расчетов и моделирования были получены параметры уровней размерного квантования и влияние на них упругих напряжений, модели электрофизических I-V и C-V характеристик гетероструктуры  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ .

*Ключевые слова:* туннельно-резонансная гетероструктура, моделирование электрофизических характеристик.

## MODELING OF I-V AND C-V CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR TUNNEL-RESONANCE HETEROSTRUCTURE

K.S. Zaitsev, V.G. Litvinov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russian Federation, Ryazan, kasperskiy219@gmail.com*

*Abstract.* The paper is devoted to modeling of I-V and C-V characteristics of a semiconductor tunnel-resonance heterostructure. As a result of calculations and modeling parameters of size quantization energy levels and the effect of elastic strains on them as well as models of electrophysical I-V and C-V characteristics of the  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  heterostructure were obtained.

*Keywords:* tunnel-resonance heterostructure, modeling of electrophysical characteristics.

Полупроводниковые туннельно-резонансные диоды (ТРД) представляют собой двухбарьерные структуры с одной квантовой ямой, как правило для электронов, симметричными барьерами, имеющими одинаковые характеристики, и электрическими омическими контактами. Работа такого диода базируется на эффекте резонансного туннелирования носителей заряда через последовательно расположенные туннельнопрозрачные потенциальные барьеры, между которыми расположена квантовая яма. Туннелирование электронов в низкоразмерных структурах зависит от наличия и характеристик разрешенных энергетических состояний между потенциальными барьерами.

Туннельно-резонансные гетероструктуры используются для создания полупроводниковых быстродействующих приборов СВЧ диапазона. Важной отличительной чертой туннельно-резонансных гетероструктур является наличие N-образной вольтамперной характеристики, т.е. участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Время переключения между двумя устойчивыми состояниями составляет доли и единицы пс, т.е. на основе этих гетероструктур возможно создавать быстродействующие элементы интегральных схем. В качестве материалов для изготовления туннельно-резонансных структур чаще всего используются бинарные соединения GaAs и InP и тройные твердые растворы на их основе [1].

Рассматриваемая гетероструктура содержит слои  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  – материал барьерных слоев, двумерный слой GaAs – материал квантовой ямы (КЯ). Содержание алюминия на уровне 0.4 выбрано исходя из того, что при дальнейшем увеличении молярной доли алюминия полупроводниковый материал становится непрямозонным, и ширина запрещенной зоны практически не изменяется [2]. GaAs хорошо подходит для таких целей, так как характеризуется высокой подвижностью носителей заряда и, следовательно, высокой дрейфовой скоростью электронов, что позволяет работать в субтерагерцовом и терагерцовом диапазонах частот. AlGaAs практически идеально подходит к GaAs по структурным характеристикам. Постоянные решетки этих материалов практически совпадают: 5,653 Å для GaAs и 5,661 Å для AlAs [2]. Это делает возможным выращивание смешанных кристаллов, обладающих совершенной структурой.

Эффект туннелирования и квантовый размерный эффект наблюдаются при уменьшении размера структурных элементов ниже некоторой величины. Эти эффекты начинают проявляться в полупроводниках, когда средний размер полупроводниковых структур не превышает 15 нм, и отчетливо появляются при размерах менее 10 нм. Ширина барьерных слоев AlGaAs  $L_b$  и слоя GaAs  $L_w$  между ними составляет единицы нм.

Для данной гетероструктуры были найдены величины энергии минизон (уровней) размерного квантования для четных и нечетных состояний из известного решения уравнения Шредингера для прямоугольной потенциальной ямы конечной глубины. Энергия размерного квантования микрочастицы, соответствующая четным состояниям, находится из решения уравнения [3]:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{L_w}{2\hbar}\sqrt{2m_{eqw}E_n}\right) = \sqrt{\frac{m_{eb}(\Delta E_c - E_n)}{m_{eqw}E_n}},$$

где  $m_{eqw}$  – эффективная масса электрона в квантовой яме GaAs;

$m_{eb}$  – эффективная масса электрона в барьерном слое AlGaAs;

$\Delta E_c$  – величина разрыва зоны проводимости на границе раздела GaAs/AlGaAs;

$\hbar$  – постоянная Планка;

$E_n$  – величина энергии размерного квантования электрона;

$q$  – элементарный заряд.

Энергия размерного квантования микрочастицы, соответствующая нечетным состояниям, находится из решения уравнения [3]:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{L_w}{2\hbar}\sqrt{2m_{eqw}E_n}\right) = -\sqrt{\frac{m_{eqw}E_n}{m_{eb}(\Delta E_c - E_n)}}.$$

Для оценки влияния упругих напряжений в квантово-размерной структуре на зонную диаграмму из-за рассогласования постоянных решетки был проведен расчет величины разрыва валентной зоны при наличии таких упругих напряжений в приближении так называемой модели твердого тела [4]. Ввиду малого различия постоянных решеток материалов КЯ и барьерного слоя валентная зона практически не расщепляется на подзоны тяжелых и легких дырок. Величина разрыва валентной зоны для тяжелых дырок ( $\Delta E_{vhh}$ ) и легких дырок ( $\Delta E_{vllh}$ ) составила 0,468 эВ. Величина разрыва зоны проводимости при наличии упругих напряжений составила 0,228 эВ.

Используя данные, полученные в расчете, можно схематично построить зонную диаграмму структуры AlGaAs/GaAs, изображенную на рисунке 1.

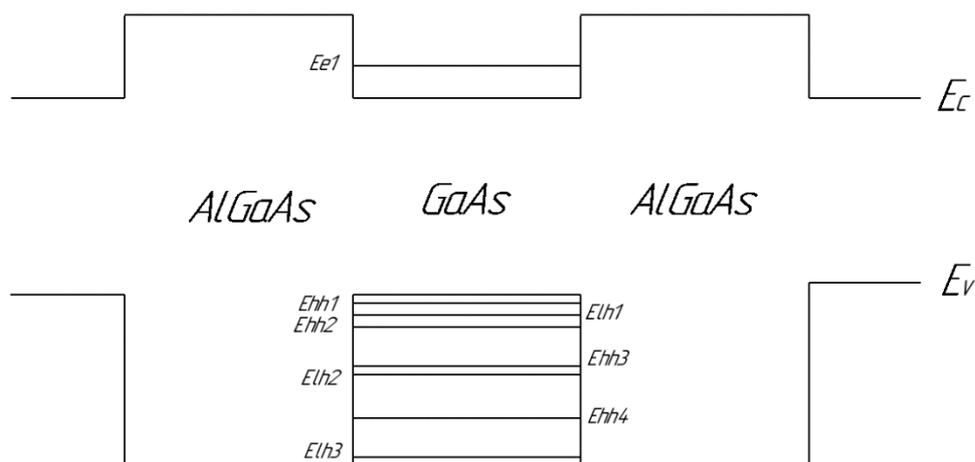


Рис. 1. Зонная диаграмма туннельно-резонансной структуры на основе гетероперехода AlGaAs/GaAs

Для моделирования ВАХ туннельно-резонансного диода воспользуемся выражением [5]:

$$I(V) = \frac{q^2 m_e}{4\pi\hbar^2 \tau(V)} \left( \mu - E_0 + \frac{V}{2} \right) \left( \text{sign} \left( \mu - E_0 + \frac{V}{2} \right) + \text{sign} \left( E_0 + \frac{V}{2} \right) \right),$$

где  $\tau(V)$  – время релаксации, зависящее от коэффициентов прозрачности барьерных слоев AlGaAs;

$\mu$  – уровень Ферми;

$E_0 = E_{e1}$  – энергия основного уровня размерного квантования электрона в КЯ GaAs;

$V$  – напряжение смещения.

Данное выражение описывает идеализированную модель вольт-амперной характеристики (I-V) ТРД. I-V характеристика туннельно-резонансного диода представлена на рисунке 2.

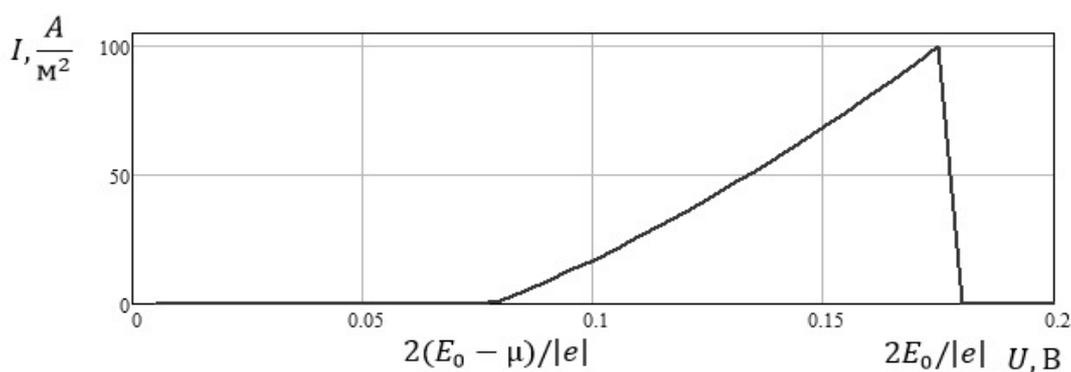


Рис. 2. I-V характеристика туннельно-резонансной структуры

Для моделирования вольт-фарадной характеристики (C-V) предлагается использовать эквивалентную схему, состоящую из четырех электрических емкостей, изображенную на рисунке 3.

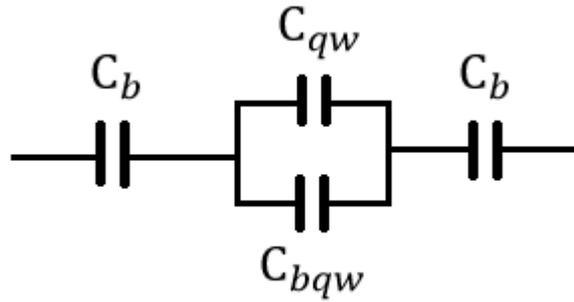


Рис. 3. Эквивалентная схема ТРД

$C_b$  – это геометрические электрические емкости слоев потенциальных барьеров на основе AlGaAs,  $C_{bqw}$  – емкость слоя КЯ GaAs соответственно, которые можно определить, как емкость плоского конденсатора:

$$C_b = \frac{\varepsilon_b \varepsilon_0 S}{L_b}, C_{bqw} = \frac{\varepsilon_{qw} \varepsilon_0 S}{L_w},$$

где  $\varepsilon_b$  – относительная диэлектрическая проницаемость AlGaAs;  
 $\varepsilon_{qw}$  – относительная диэлектрическая проницаемость GaAs;  
 $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума;  
 $S$  – площадь потенциального барьера.

$C_{qw}$  представляет собой емкость, обусловленную накоплением заряда электронов на уровнях размерного квантования в КЯ, определяется по формуле:

$$C_{qw}(V) = \frac{N_s(V) q (2L_b + L_w)}{L_w V},$$

где  $N_s(V)$  представляет собой слоевую концентрацию электронов в квантовой яме и определяется как [6]:

$$N_s(V) = \frac{m_{eqw} kT}{\pi h^2} \ln \left( 1 + \exp \left( \frac{E_{cw} + E_n - \mu - qV}{kT} \right) \right),$$

где  $E_{cw}$  – положение дна в КЯ в зоне проводимости.

Таким образом, вольт-фарадная характеристика структуры туннельно-резонансного диода будет определяться по формуле, справедливой для вычисления общей емкости электрической цепи, показанной на рис. 3:

$$C(V) = \left( \frac{2}{C_b} + \frac{1}{C_{bqw} + C_{qw}(V)} \right)^{-1}.$$

Вольт-фарадная характеристика ТРД изображена на рисунке 4. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют разным значениям концентрации электронов и соответственно разным положениям уровня Ферми.

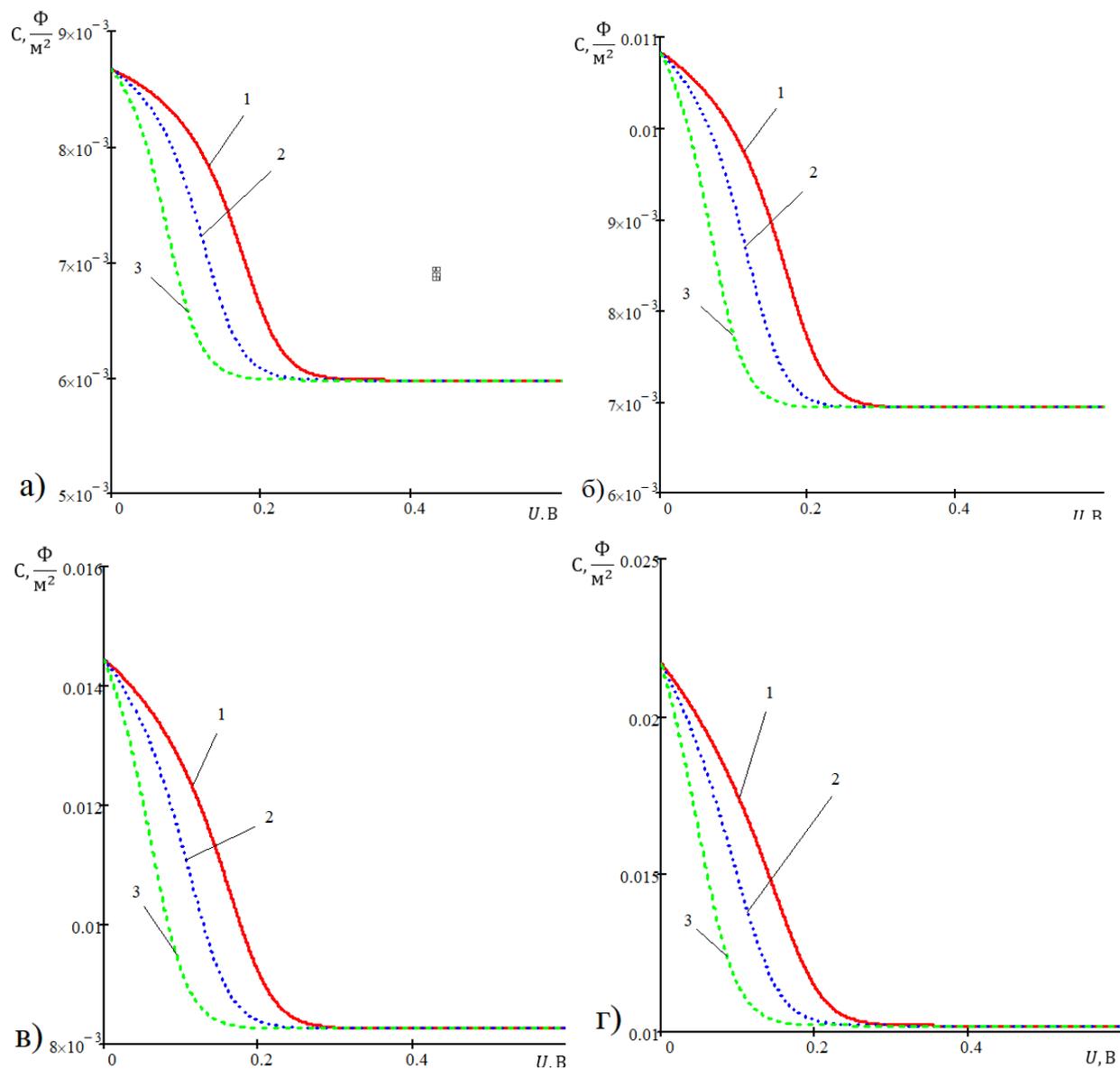


Рис. 4. C-V характеристика ТРД для разных значений концентрации свободных носителей заряда

Концентрация для 1-й кривой –  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ , для 2-й –  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ , для 3-й –  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  соответственно. Буквы а, б, в и г на рис. 4 соответствуют разным значениям ширины барьерных слоев  $L_b$ , для а –  $L_b = 5 \text{ нм}$ , б –  $L_b = 4 \text{ нм}$ , в –  $L_b = 3 \text{ нм}$ , г –  $L_b = 2 \text{ нм}$ .

В результате расчетов и моделирования были получены параметры уровней размерного квантования, теоретические вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики для разных величин концентрации электронов и ширины потенциальных барьеров туннельно-резонансной гетероструктуры.

Работа выполнена в Региональном центре зондовой микроскопии коллективного пользования (РЦЗМкп) и в научно-образовательном центре неупорядоченных и наноструктурированных материалов и устройств на их основе (НОЦ “ННМУ”) при Рязанском государственном радиотехническом университете имени В.Ф. Уткина.

### Библиографический список

1. Резонансно-туннельные структуры [электронный ресурс]. – 2020. URL: <https://lektsii.org/14-80541.html> (дата обращения 20.05.2022)
2. Vurgaftman I., Meyer J.R., Ram-Mohan L.R Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys // J. Appl. Phys. V. 89. N. 11. P. 5815-5875.
3. Флюгге З. Задачи по квантовой механике. Т.1. М.: Мир. 1974. 341 с.
4. Van de Walle C.G. Band lineups and deformation potentials in the model-solid theory // Phys. Rev. B. 1989. V. 39. P. 1871-1883.
5. Демиховский В. Я., Вугальтер Г. А. Физика квантовых низкоразмерных структур. М.: Логос, 2000. 248 с.
6. Электрические методы исследования разрывов энергетических зон в полупроводниковых микро- и наногетероструктурах: учеб. пособие / В.Г. Литвинов, О.А. Милованова, Н.Б. Рыбин. Рязан. гос. радиотехн. ун-т.-Рязань, 2013. 52 с.

УДК 519-7; ГРНТИ 29.19.31

## ПРИМЕНЕНИЕ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ ЗАШУМЛЕННЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ТОКОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУРАХ

А.С. Моргунов, В.В. Гудзев, А.В. Ермачихин

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

*Аннотация.* В работе показано применение вейвлет-преобразования и быстрого преобразования Фурье для уменьшения шумовой составляющей релаксационного тока, возникающего в барьерной полупроводниковой структуре. Приведен пример обработки реального тока релаксации, полученного при температурном сканировании *por-Si* структуры.

*Ключевые слова:* релаксационная спектроскопия глубоких уровней, вейвлет-преобразование, БПФ, шумы.

## APPLICATION OF METHODS FOR PROCESSING NOISY SIGNALS IN THE STUDY OF RELAXATION CURRENTS IN SEMICONDUCTOR BARRIER STRUCTURES

A.S. Morgunov, V.V. Gudzev, A.V. Ermachikhin

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

*The summary.* The paper shows the application of the wavelet transform and the fast Fourier transform to reduce the noise component of the relaxation current that occurs in the barrier semiconductor structure. An example of processing the real relaxation current obtained by temperature scanning of a *por-Si* structure is given.

*Keywords:* deep-level transient spectroscopy, wavelet transform, FFT, noise.

### Введение

В полупроводниковых материалах практически всегда присутствуют дефекты и примеси, образующие глубокие энергетические уровни (ГУ) в запрещенной зоне полупроводника. [1]. Такие дефекты и примеси называют глубокими центрами (ГЦ). К глубоким центрам относят радиационные дефекты, дефекты кристаллической решетки, атомы примесей и дефекты термообработки.

Значительное влияние на характеристики, качество и надежность полупроводниковых приборов оказывают электронные свойства ГЦ. В настоящее время больше всего известно о химических и кристаллографических особенностях дефектов структуры, чем об их влиянии на характеристики приборов. Причины деградации характеристик приборов из-за наличия кристаллографических дефектов многочисленны, сложны и еще мало изучены. Эксперимен-

тальный материал по изучению влияния ГЦ, созданных несовершенствами структуры материалов, на характеристики полупроводниковых приборов, как правило, носит качественный характер.

Для изучения влияния и параметров ГЦ одним из наиболее точных и информативных методов является релаксационная спектроскопия глубоких уровней (РСГУ) [2]. Данный метод позволяет определять следующие параметры ГЦ: энергию активации носителей заряда с ГУ, концентрацию носителей заряда на ГУ, а также сечение захвата ГУ. Существует несколько разновидностей РСГУ, самыми распространенными являются токовая и емкостная релаксационная спектроскопия.

При исследовании с помощью метода РСГУ на барьерную структуру попеременно подают заполняющие и опустошающие импульсы напряжения. При воздействии опустошающих импульсов происходит эмиссия носителей с ГУ, у которых энергетическое положение оказывается выше уровня Ферми. При этом наблюдаются релаксации барьерной емкости или тока.

Данные релаксации носят экспоненциальный характер, параметры которого меняются в результате температурного сканирования образца. Выражение для относительного изменения емкости:

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

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

$N_t$  – концентрация глубоких центров;

$N_D$  – концентрация ионизированных доноров в слое объемного заряда;

$t$  – постоянная времени;

$\tau$  – время релаксации заполнения уровня.

Выражение для общего тока:

$$i(t) = \frac{eSN_tW_R}{2\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad 2)$$

где  $e$  – заряд электрона;

$S$  – площадь контакта;

$W_R$  – ширина ОПЗ [3].

В реальном эксперименте на экспоненциальную зависимость накладывается существенная шумовая составляющая, которая приводит к искажению выходного РСГУ спектра [4]. В некоторых случаях возникает невозможность использования корреляционной обработки РСГУ сигнала. Поэтому актуальной задачей стоит снижение шумовой составляющей в релаксационном отклике без потери полезного сигнала.

Для анализа алгоритмов избавления от шумов исследовались два наиболее распространенных метода: вейвлет-преобразование и быстрое преобразование Фурье (БПФ).

В методе вейвлет-преобразования для обработки зашумленных сигналов использовался трешолдинг. В данной работе полученный сигнал раскладывался в вейвлет-спектр на аппроксимирующие коэффициенты, представляющие сглаженный сигнал, и детализирующие коэффициенты, описывающие колебания, и далее этот сигнал обрабатывался. Информация о шумовой компоненте в основном содержится в детализирующих коэффициентах, поэтому обычно именно они обрабатываются при очистке

от шумов.

Таким образом, вейвлет-преобразование обеспечивает двумерную развертку исследуемого одномерного сигнала, при этом координата и частота рассматриваются как независимые переменные, в отличие от традиционно применяемого для анализа сигналов преобразования Фурье.

Процедура очистки сигнала от шума состояла из трех шагов:

1. Декомпозиция. Выбирался вейвлет и уровень разложения  $N$ . Вычислялось вейвлет-разложение исходного сигнала до уровня  $N$ .

2. Детализация. Для каждого уровня от 1 до  $N$  выбирался определенный порог и применялась пороговая обработка детализирующих коэффициентов.

3. Реконструкция. Производилась вейвлет-реконструкция, основанная на первоначальных аппроксимирующих коэффициентах уровня  $N$  и модифицированных детализирующих коэффициентах уровней от 1 до  $N$  [5].

Недостатком вейвлет-преобразования является относительная сложность, компенсируемая использованием компьютерных программных средств.

При использовании быстрого преобразования Фурье (БПФ) находились спектральные характеристики сигнала, с дальнейшей его обработкой. В методе БПФ количество вычислений гораздо меньше числа операций, чем при стандартном дискретном преобразовании Фурье, что обеспечивает наиболее высокую скорость вычисления. При цифровой оценке спектра сигнала учитывался шум квантования, вносимый АЦП. Шум квантования представляет собой разницу значений оцифрованного и исходного аналогового сигналов. [6].

Алгоритмы БПФ предназначены для эффективного вычисления дискретного преобразования Фурье (ДПФ), которое представляет собой следующую сумму:

$$G(k, l) = \frac{1}{\sqrt{N \cdot M}} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} g(n, m) \cdot W_N^{kn} \cdot W_M^{lm}, \quad 3)$$

где  $k = 0, \dots, N - 1; l = 0, \dots, M - 1; W_N = e^{\frac{2 \cdot \pi \cdot i}{N}}$ ;

$g(n, m)$  – выборка функции;

$G(k, l)$  – выборка ее Фурье-образа.

В данной работе применялся алгоритм Кули-Тьюки по основанию 2. При использовании данного алгоритма количество отсчетов в выборке функции должно быть кратно степени 2. Двумерное разбиение по основанию 2, делит выборку  $N \cdot N$  элементов на четыре выборки  $\frac{N}{2} \cdot \frac{N}{2}$  элементов и так далее, до тех пор, пока не останутся выборки  $2 \cdot 2$  элементов, Фурье-преобразование которых и следует выполнить (рис. 1).

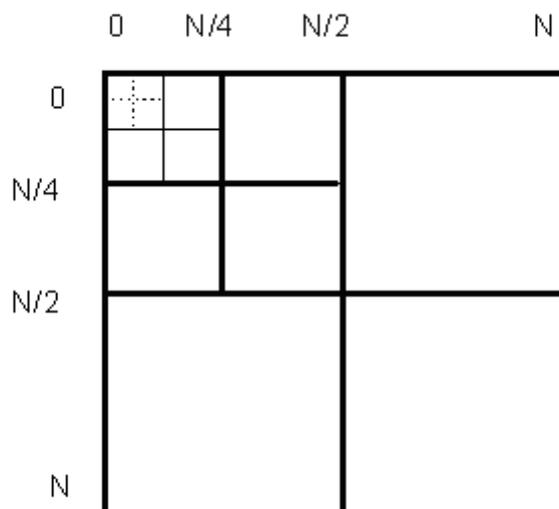


Рис 1. Схема прореживания двумерного ДПФ по основанию 2

Таким образом, при вычислении одномерного ДПФ длиной  $N$  было необходимо выполнить  $\frac{N}{2} \log_2(N)$  двухточечных ДПФ, каждое из которых требует одно комплексное умножение и два комплексных сложения. Алгоритм двумерного ДПФ с разбиением на строки и столбцы требует проведения  $2 \cdot N$  одномерных ДПФ и вычислительная сложность его составляет:  $M = N^2 \log_2(N)$  комплексных умножений и  $A = 2 \cdot N^2 \log_2(N)$  комплексных сложений [7].

Особенности БПФ:

1. Высокая скорость вычисления.
  2. Квантование весовых коэффициентов преобразования Фурье вносит дополнительный мультипликативный шум в оценку спектра оцифрованного сигнала.
  3. Расчёт удастся, если количество точек сигнала является степенью числа 2. ( $2^m$ , где  $m = 0, 1, 2 \dots$ )
  4. Не обеспечивает локализацию характеристики процесса во времени.
- Для первичного анализа использовался модельный сигнал (рис. 2, а):

$$f(x) = x + awgn(x, 2, -20), \quad (4)$$

где  $x = \exp(-5t)$ ;

$awgn(x, 2, -20)$  – функция, добавляющая белый Гауссов шум к векторному сигналу  $x$ .

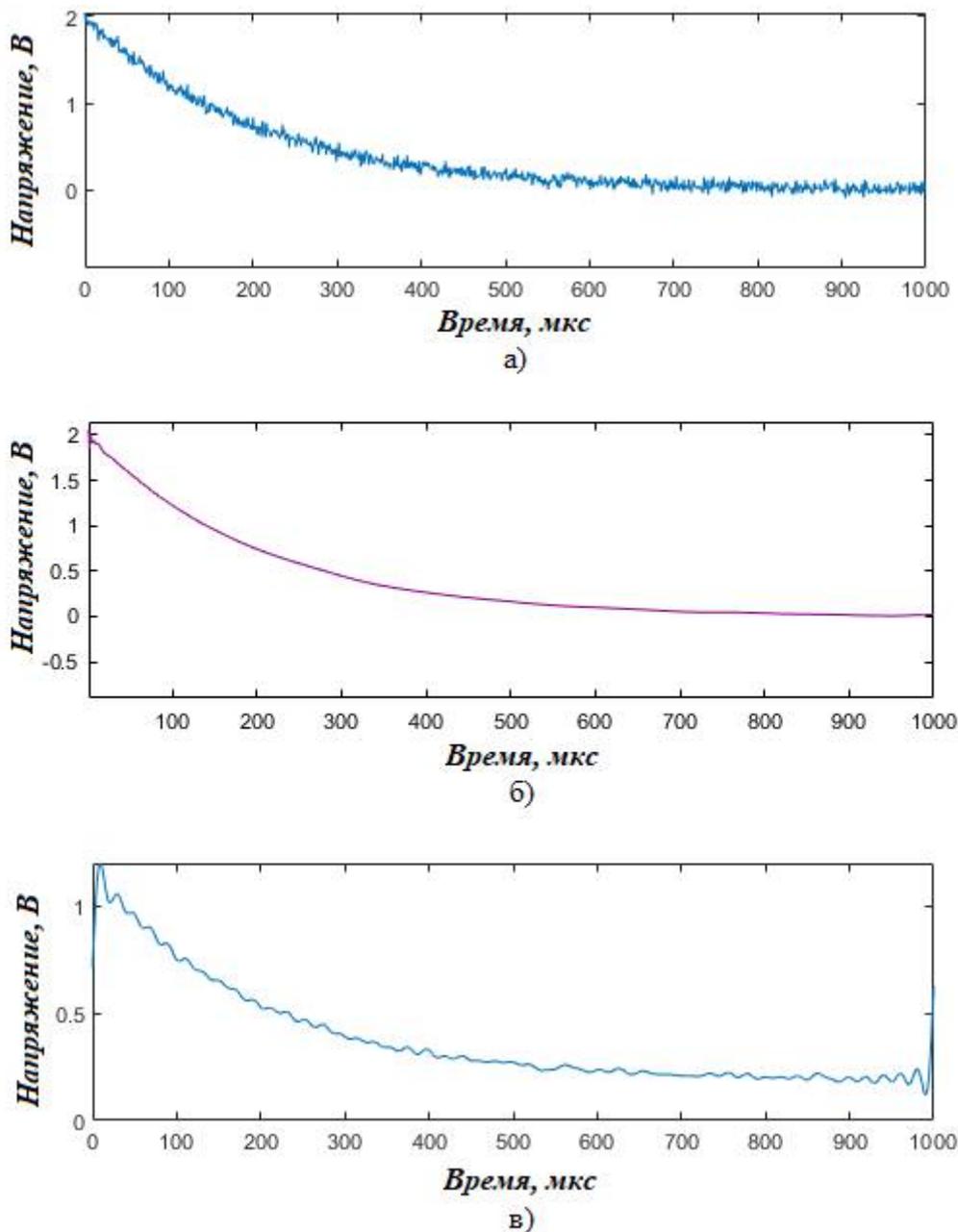


Рис. 2. а) модельный сигнал с шумовой составляющей;  
б) обработанный сигнал с помощью вейвлет-преобразования;  
в) обработанный сигнал алгоритмом БПФ

Исходя из полученных графиков можно сделать вывод, что вейвлет-преобразование является наиболее подходящим методом обработки модельного сигнала.

Для апробации описанных алгоритмов используются реальные релаксационные данные барьерной структуры с пористым кремнием, полученные при следующих параметрах: время заполняющего импульса равно 1000 мкс, опустошающего – 10 000 мкс; напряжение заполняющего импульса было 0 В, опустошающего – минус 1 В. Температурный диапазон, на котором проводилось исследование, был от 70 до 370 К. На рисунке 3, а) показан токовый сигнал при температуре 273 К.

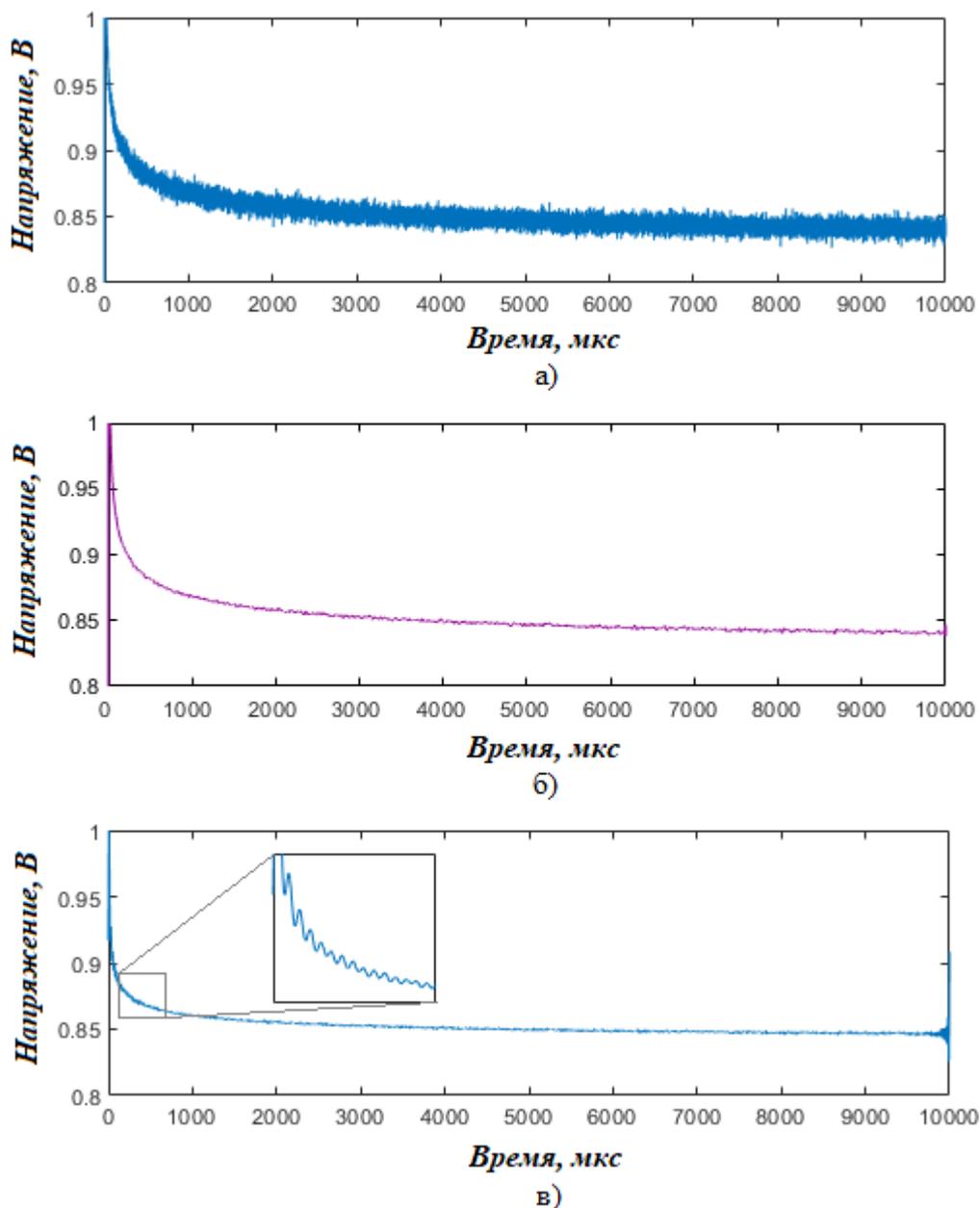


Рис 3. а) реальный релаксационный токовый сигнал; б) обработанный реальный сигнал с помощью вейвлет-преобразования; в) обработанный реальный сигнал алгоритмом БПФ

Из обработки экспериментальных сигналов релаксации тока можно сделать вывод, что вейвлет-преобразование является лучшим методом устранения шума без информационного изменения сигнала по сравнению с БПФ, как для модельного сигнала, так и для реального РСГУ отклика. Избавление от шумовой составляющей в релаксационном отклике становится особенно актуально при дальнейшем использовании экспериментальных данных для РСГУ с преобразованием Лапласа или разложения на экспоненты, так как эти методы очень чувствительны к шуму. Чем лучше соотношение сигнал/шум, тем полученные значения, описывающие параметры ГУ, ближе к искомым [4].

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003) с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета имени В.Ф. Уткина.*

### Библиографический список

1. Гудзев В. В. Исследование глубоких энергетических уровней в барьерных структурах на основе кристаллического и аморфного гидрогенизированного кремния: специальность 01.04.10 «Физика полупроводников»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Гудзев Валерий Владимирович. – Рязань, 2015. – 22 с.
2. Lang D.V. Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors // Journal of Applied Physics. 1974. Vol. 45. Issue 7. pp. 3023-3032.
3. Ермачихин А.В., Литвинов В.Г. Автоматизированный измерительный комплекс токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 2. С. 118-123.
4. Ермачихин А.В., Воробьев Ю.В., Трусев Е.П., Литвинов В.Г. Сравнение методов релаксационной спектроскопии глубоких уровней при анализе релаксационного тока // Вестник РГРТУ. 2022. № 82. С. 207-217.
5. Московский С.Б., Сергеев А.Н., Лалина Н.А. Очистка сигнала от шумов с использованием вейвлет-преобразования // Universum: Технические науки: электрон. научн. журн. 2015. № 2 (15). 13 с.
6. Медведев С.Ю., Перов М.Ю., Якимов А.В. Влияние быстрого преобразования Фурье на оценку спектра сигнала // Известия вузов. Радиофизика. 2001. Том XLV. № 3. С. 263-270.
7. Cooley J.W., Tukey J.W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series // Mathematics of Computation. 1965. Vol. 19. P. 297-301.

УДК 004.932.2; ГРНТИ 28.23.15

## МЕТОДЫ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ С ДЕФЕКТАМИ

**Н.В. Рыбина, Н.Б. Рыбин, В.Д. Степнов**

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

*Аннотация.* В работе рассматриваются методы анализа изображений поверхности с дефектами. Приводятся результаты обработки изображений с различными типами дефектов на поверхности с помощью флуктуационного анализа и метода средней взаимной информации.

*Ключевые слова:* поверхность, анализ изображений, метод флуктуационного анализа с исключенным трендом (2D DFA), средняя взаимная информация (СВИ), информационно-корреляционные характеристики.

## METHODS FOR IMAGE ANALYSIS OF A SURFACE WITH DEFECTS

**N.V. Rybina, N.B. Rybin, V.D. Stepnov**

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

*The summary.* In this paper methods for analyzing images of a surface with defects are considered. The results of processing images with various types of defects on the surface using fluctuation analysis and the method of average mutual information are presented.

*Keywords:* surface, image analysis, fluctuation analysis with excluded trend (2D DFA), average mutual information (IIS), information-correlation characteristics

Состояние поверхности твердотельных материалов оказывает существенное влияние на функциональные свойства этих материалов. В полупроводниках, например, поверхностные дефекты могут служить центрами рекомбинации. Дефекты на поверхности металла ухудшают их физические и механические свойства, такие как электропроводность, прочность и другие.

В ряде работ, например [1], были разработаны методы анализа изображений поверхностей по их-информационно-корреляционным характеристикам. Метод флуктуационного анализа с исключенным трендом (2D detrended fluctuation analysis, 2D DFA) позволяет выявлять периодичность в сложных поверхностях (с большим числом гармонических составляющих, зашумленных, с нарушением периодичности); изучать особенности поверхности на разных пространственных масштабах. Метод 2D DFA заключается в следующем: суммируются высоты в каждой точке исходного изображения; полученная зависимость разбивается на фрагменты различного масштаба; на каждом фрагменте устраняется линейный тренд и рассчитывается флуктуационная функция. В результате получается зависимость флуктуационной функции от масштаба, из которой находят следующие величины: корреляционный вектор (соответствует периоду гармонических составляющих поверхности), скейлинговый показатель (определяет тип корреляций).

Метод средней взаимной информации (СВИ), основанный на теории информации, позволяет определять несовершенства, искажения рельефа поверхности. Работает следующим образом: по исходному изображению идет обход векторами разных длин и между парами точек высот рассчитывается взаимная информация. В результате получается распределение взаимной информации по изображению, из которого определяется непосредственно СВИ (характеризует степень упорядоченности), максимальная взаимная информация (характеризует информационную емкость поверхности).

В данной работе проводилось исследование изображений поверхности с различными видами дефектов методами 2D DFA и СВИ.

Модельные поверхности для исследований были получены путем наложения трехмерных изображений дефектов на поверхность «Равномерный шум». Примеры изображений модельных поверхностей показаны на рисунке 1.

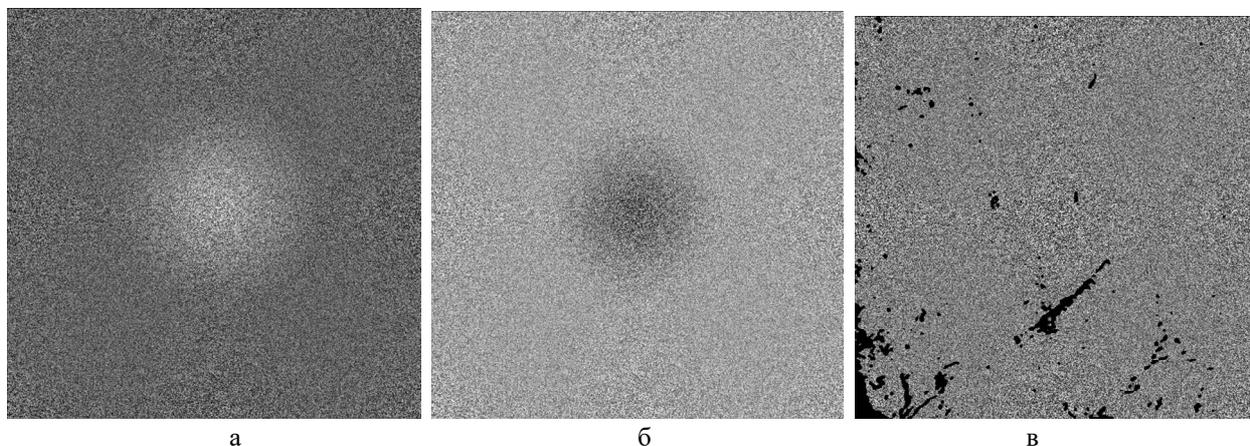


Рис. 1. Примеры поверхностей: а – «Бугор по центру»; б – «Углубление по центру»; в – «Грязь крупная»

Затем проводилась обработка изображений методами 2D DFA и СВИ. Результаты в виде полученных графиков и информационно-корреляционных характеристик сравнивались с данными поверхности «Равномерный шум». На рисунке 2 показаны зависимости флуктуационной функции от масштаба в двойном логарифмическом масштабе для поверхностей «Равномерный шум» и «Бугор по центру». Вид зависимости для поверхности «Бугор по центру» нелинейный и существенно отличается от зависимости поверхности «Равномерный шум». Кроме этого отличаются скейлинговые показатели  $a$ , которые рассчитывались как тангенс угла наклона флуктуационной функции. В таблице 1 приведены рассчитанные значения  $a$ , СВИ и МВИ для всех исследованных поверхностей.

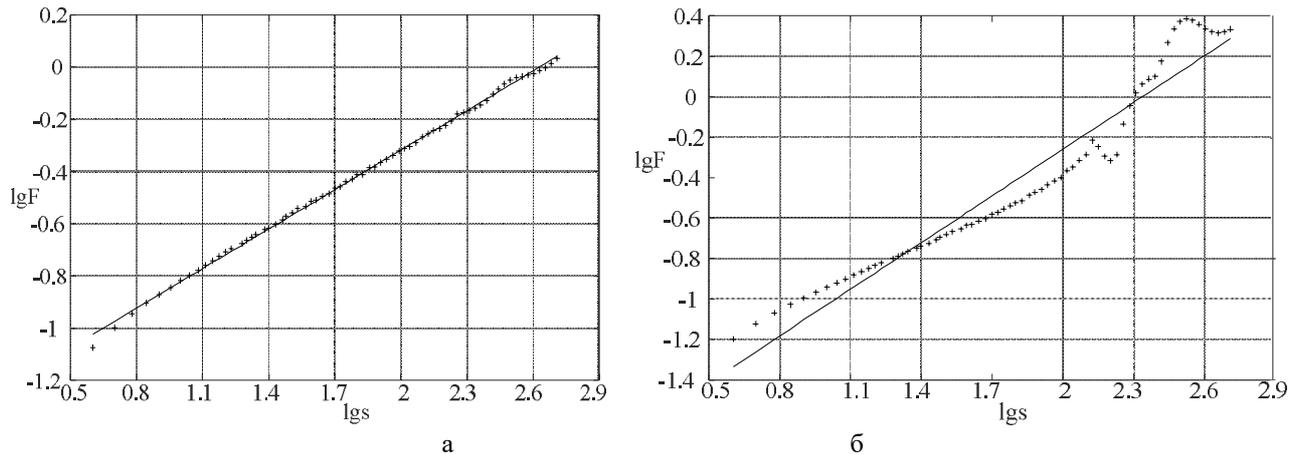


Рис. 2. Графики 2D DFA для поверхностей: а – «Равномерный шум»; б – «Бугор по центру»

Таблица 1. Информационно-корреляционные характеристики модельных поверхностей с дефектами

Название модельной поверхности	СВИ	МВИ	$a$
Равномерный шум	0,0012	0,689	0,50
Бугор по центру	0,0003	0,623	0,60
Грязь крупная	0,0002	0,707	0,65
Скол	0,0002	0,698	0,65
Точечные дефекты мелкие	0,0003	0,694	0,50
Углубление по центру	0,0003	0,621	0,57
Царапины крупные	0,0003	0,694	0,71
Царапины мелкие	0,0003	0,700	0,65

Анализ полученных данных показывает, что СВИ всех поверхностей меньше 0,02, что говорит о низкой упорядоченности структур [1]. При этом СВИ для поверхности «Равномерный шум» составляет 0,0012, а для остальных поверхностей с дефектами СВИ существенно ниже (0,0002-0,0003). Таким образом, по значению СВИ можно оценивать наличие каких-либо дефектов на поверхности.

В [1] также обозначены диапазоны значений МВИ:

- МВИ<0.5 – низкая информационная емкость и энтропия структур;
- 0.5<МВИ<0.7 – средняя информационная емкость и энтропия структур;
- МВИ>0.7 – высокая информационная емкость и энтропия структур.

По этим критериям большинство исследованных поверхностей относится к группе структур со средней информационной емкостью и энтропией. Поверхности «Грязь крупная» и «Царапины мелкие» относятся к категории структур с высокой информационной емкостью и энтропией.

Таким образом, в значениях МВИ не прослеживается однозначной взаимосвязи с наличием дефектов на поверхности.

Значения скейлингового показателя для исследованных поверхностей составляют в диапазон 0,5 – 0,7, что соответствует длительным и нестепенным корреляциям в структуре. При этом можно заметить зависимость значения скейлингового показателя от типа дефекта на поверхности. Для поверхности «Точечные дефекты мелкие» значение  $a$  такое же, как и для поверхности «Равномерный шум». Вероятно, это связано с мелким масштабом проявления особенностей поверхности и на скейлинговом показателе они не отражаются. Однако, как только дефекты на поверхности становятся более крупными, значение скейлингового показателя повышается. Кроме того, дефекты одного масштаба дают примерно одинаковые значения  $a$  (например, у поверхностей «Бугор по центру» и «Углубление по центру»  $a = 0,60$

и 0,57 соответственно; у поверхностей «Грязь крупная», «Скол» и «Царапины мелкие»  $a = 0,65$ ). Самое больше значение скейлингового показателя у поверхности «Царапины крупные» и составляет 0,71.

Таким образом, результаты обработки изображений с различными типами дефектов на поверхности с помощью методов 2D DFA и СВИ показывают, что данные методы могут служить эффективным инструментом обнаружения несовершенств рельефа поверхности. Выявление дефектов поверхности может происходить на основе сравнения данных с характеристиками эталонного рельефа поверхности. Наиболее эффективными информационно-корреляционными характеристиками в этом вопросе являются СВИ и  $a$ . При этом если СВИ характеризует только наличие дефектов на поверхности, то скейлинговый показатель способен также определить тип дефекта.

Методы анализа изображений 2D DFA и СВИ имеют практическое значение для большого класса задач. Например, в области металлообработки дефекты имеют колоссальное влияние на функционирование различных соединительных деталей, элементов и узлов. В работе [2] был составлен целый атлас дефектов, обнаруженных металлографическими методами. На рисунке 3 показаны некоторые из них.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003) с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета имени В.Ф. Уткина.*

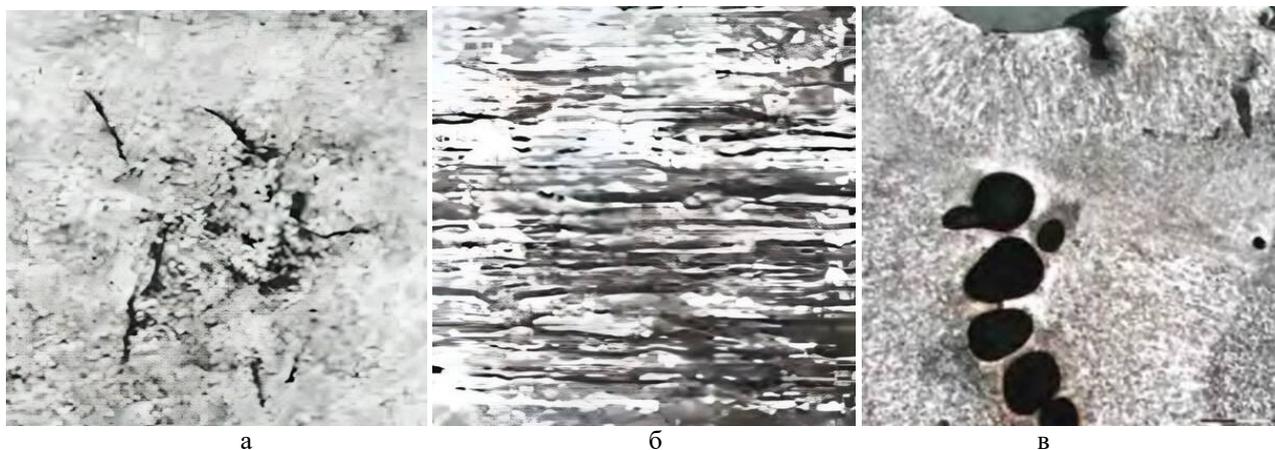


Рис. 3. Примеры дефектов на поверхности металлов [2]: а – «Макрошлиф с флокенами»; б – «Поверхность металла с морщиной»; в – «Скопление сферических пор на поверхности металла»

### Библиографический список

1. Вихров, С.П. Самоорганизующиеся структуры в электронике / С.П. Вихров, Н.В. Рыбина, Н.В. Бодягин, Н.Б. Рыбин, А.В. Алпатов // Рязань, ИП Жуков В.Ю. – 2017. – 168 с.
2. Васин, О.Е. Атлас дефектов. Научно-технический сборник // О.Е. Васин, В.М. Югай, Р.А. Садртдинов, В.А. Подмогаев, В.Б. Гейцан, Н.К. Кареев, А.А. Селиванов // Екатеринбург. – 2008. – 56 с.

УДК 621.315.592; ГРНТИ 29.03.35

## ОЦЕНКА ШУМОВЫХ СВОЙСТВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ТОКОВОЙ РЕЛАКСАЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ГЛУБОКИХ УРОВНЕЙ

В.Г. Литвинов, В.С. Литвинова

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

*Аннотация.* В работе представлены результаты анализа шумовых свойств измерительного комплекса токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней. Проведен анализ шумовых характеристик входного предусилителя – преобразователя ток-напряжение сигнала релаксационного тока. Представлены оценки возможных для измерения минимальных величин электрического тока и слоевой концентрации глубоких центров.

*Ключевые слова:* релаксационная спектроскопия глубоких уровней, преобразователь ток-напряжение.

## EVALUATION OF THE I-DLTS MEASURING SPECTROMETER NOISE PROPERTIES

V.G. Litvinov, V.S. Litvinova

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

*Abstract.* The paper presents the results of the current deep level transient spectroscopy (I-DLTS) measuring complex noise properties analysis. The relaxation current to voltage converter and pre-amplifier noise characteristics are analyzed. Estimates of the electric current and the deep centers sheet concentration minimum values of that are possible for measuring are presented.

*Keywords:* deep level transient spectroscopy, I-V converter.

Метод релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ) получил широкое распространение с момента его изобретения Лэнгом в 1974 г. [1]. Метод основан на анализе температурной зависимости постоянной времени релаксации электрической емкости изучаемой полупроводниковой диодной структуры или протекающего через нее электрического заряда или тока при импульсном воздействии электрическим полем и (или) оптическим излучением [2]. Токовый вариант РСГУ (ТРСГУ) в некоторых случаях использовать предпочтительнее, например, при исследовании высокоомных образцов, образцов, у которых электрическая барьерная емкость не зависит от напряжения смещения, а также когда необходима максимальная чувствительность по концентрации глубоких центров (ГЦ) – дефектов, образующих глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне полупроводника [2]. Чувствительность измерительной системы ТРСГУ-спектрометра определяется уровнем шума входного измерительного тракта, являющегося малозумяющим быстродействующим усилителем – преобразователем “ток-напряжение”. Источники шума, которые необходимо учесть, представлены в модели генерации шума в упрощенной по сравнению с реальной схемой (см. рис. 1) измерительной схеме на рис. 2.

Для оценки чувствительности необходимо вычислить эквивалентную плотность входного шумового тока  $i_{noise, eq}$ . Источниками шума являются:  $e_N$  – эквивалентное напряжение шума на входе усилителя – преобразователя ток-напряжение,  $i_N$  – эквивалентная плотность тока шума на входе усилителя – преобразователя ток-напряжение,  $e_{bias}$  – напряжение шума генератора импульсного напряжения. Кроме этого, каждый резистор вносит Джонсоновский шум. Резисторы  $R_{01}$  и  $R_{02}$  соответствует паразитному сопротивлению коаксиальных проводов, соединяющих образец в измерительной ячейке с генератором импульсного напряжения и входом усилителя. Ток релаксации в исследуемой диодной структуре, соответствующий полезному сигналу, обозначен  $i_R$ . Диодная структура вносит ток шума  $i_{noise}$ , который во многих случаях является дробовым шумом на фоне протекающего тока утечки  $I_L$ . Поэтому можно считать в первом приближении, что  $i_{noise} \approx \sqrt{2qI_L}$ , где  $q$  – элементарный заряд.

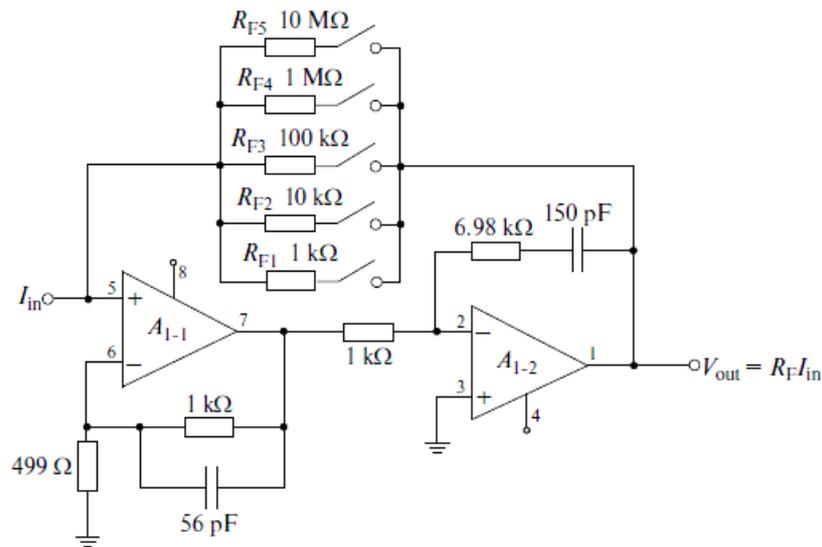


Рис. 1. Вариант электрической схемы преобразователя ток-напряжение ТРСГУ-спектрометра [3]

Таким образом, эквивалентная плотность входного шумового тока может быть найдена из выражения [4]:

$$i_{noise,eq}^2 = i_N^2 + i_{noise}^2 + \frac{4kT}{R_f} + (e_N^2 + e_{bias}^2 + 4kTR_0)\omega^2 C_{DUT}^2, \quad (1)$$

где  $T$  – абсолютная температура;

$k$  – постоянная Больцмана;

$\omega$  – круговая частота;

$C_{DUT}$  – электрическая барьерная емкость исследуемого образца при напряжении смещения  $U_R$ , которая в случае равномерного легирования базы атомами мелкой донорной или акцепторной примеси с концентрацией  $N_{D(A)}$  равна [5]:

$$C_{DUT} = S \sqrt{\frac{qN_{D(A)}\epsilon\epsilon_0}{2(U_{bi} + U_R)}}, \quad (2)$$

где  $S$  – площадь барьерного контакта;

$U_{bi}$  – контактная разность потенциалов;

$\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника;

$\epsilon_0$  – электрическая постоянная.

Входной шумовой ток, как видно из выражения (1), является частотнозависимым. Сигналы с частотами вблизи величин, характерных для скоростей эмиссии носителей заряда с ГУ  $1/\tau$  будут сильно коррелировать с шумом, поэтому в (1)  $\omega = 1/\tau$ . Таким образом, величина  $i_{noise,eq}$  будет характеризовать выходной шум коррелятора ТРСГУ-спектрометра.

Амплитудное значение тока релаксации с учетом выражения (2) равно

$$I_{max} = \frac{qSN_t W}{2\tau} = \frac{N_t}{N_{D(A)}} \left( \frac{U_{bi} + U_R}{\tau} \right) C_{DUT},$$

где  $N_t$  – концентрация ГЦ;

$W$  – ширина части слоя объемного заряда (СОЗ), в которой происходит перезарядка ГЦ.

Таким образом, соотношение сигнал-шум  $S/N$  определяется соотношением  $\frac{I_{max}^2}{i_{noise,eq}^2 B}$ ,

где  $B$  – эквивалентная ширина частотного диапазона шума [4]:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_I^2 = \left(\frac{N_t}{N_{D(A)}}\right)^2 \left(\frac{U_{bi} + U_R}{\tau}\right)^2 \frac{C_{DUT}^2}{B \left( i_N^2 + i_{noise}^2 + \frac{4kT}{R_f} + (e_N^2 + e_{bias}^2 + 4kTR_0) \frac{C_{DUT}^2}{\tau^2} \right)}.$$

Эквивалентная плотность тока шума на входе усилителя – преобразователя ток-напряжение, выполненного на операционном усилителе LTC6244HV  $i_N = 0,56 \cdot 10^{-15}$  А/Гц<sup>1/2</sup> и плотность входного напряжения шума  $e_N = 8 \cdot 10^{-9}$  В/Гц<sup>1/2</sup>.

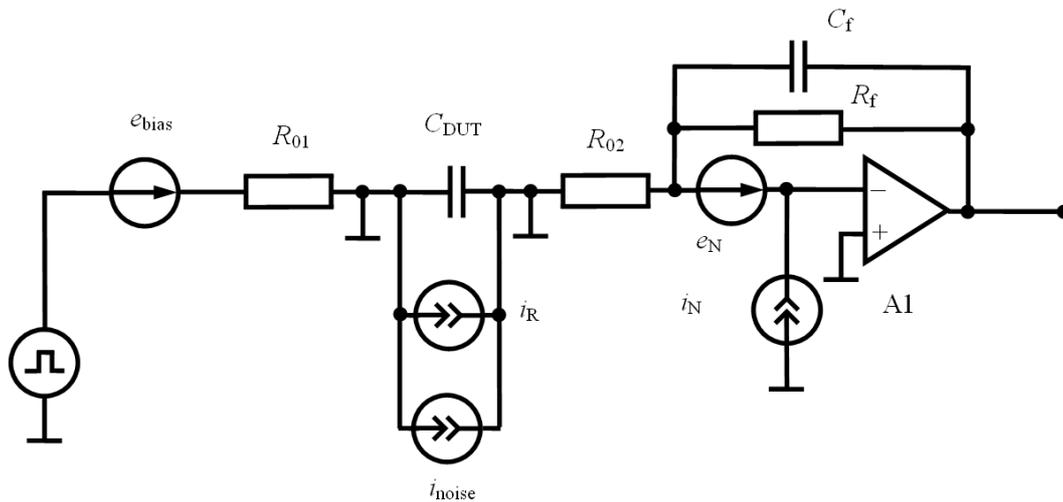


Рис. 2. Эквивалентная схема входной измерительной цепи усилителя – преобразователя ток-напряжение ТРСГУ-спектрометра

Для теоретической оценки чувствительности ТРСГУ-спектрометра можно использовать величины источников шума, представленные в таблице. Однако такая оценка дает заведомо заниженный результат, т.к. реальное устройство подвержено влиянию внешних нежелательных воздействий в виде электромагнитных наводок. Измерение напряжения шума усилителя – преобразователя ток-напряжение, выполненного по схеме, представленной на рисунке 1 при коэффициенте преобразования усилителя  $2 \cdot 10^7$  Ом показало, что среднеквадратичное значение напряжения шума в полосе частот 1МГц составило 4 мВ.

Таблица. Параметры переходного процесса релаксации тока и параметров входной измерительной схемы ТРСГУ-спектрометра

Параметр	Величина
$U_{bi} + U_R$	2 В
$e_{bias}$	1 нВ/Гц <sup>1/2</sup>
$R_{01}, R_{02}$	50 Ом
$R_f$	1кОм – 20 МОм
$R_f C_f$	$10^{-9} - 2 \cdot 10^{-5}$ с

Следовательно, шумовой ток на выходе усилителя составляет величину 200 пА. Применение операции фильтрации в методе РСГУ позволяет выделить полезный сигнал на уровне шумов не хуже, чем –40 дБ [2], следовательно, минимальный ток, соответствующий полезному сигналу, равен 2 пА. Из выражения для тока релаксации в выражении [2]

$$i(t) = \frac{eSN_t W}{2\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right),$$

где  $t$  – время, амплитуда тока релаксации равна:

$$I_{0min} = \frac{eSN_t W}{2\tau},$$

тогда минимальная слоевая концентрация ГЦ равна:

$$N_{tmin} W = \frac{2\tau I_{0min}}{qS}.$$

Примем площадь точечного контакта, формируемого, например, проводящим зондом атомно-силового микроскопа (АСМ),  $S = 100 \times 100 \text{ нм}^2$ ,  $\tau = 1 \text{ мкс}$ ,  $I_{0min} = 2 \text{ пА}$ , получим  $N_{tmin} \cdot W = 2,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . Полученная величина слоевой концентрации соизмерима с экспериментально получаемыми величинами слоевой концентрации носителей заряда при изучении наноструктур с квантовыми ямами и слоями самоорганизованных квантовых точек [6-8].

Чувствительность по концентрации ГЦ тем выше, чем больше площадь барьерного контакта, толщина СОЗ, в которой перезаряжаются ГЦ и меньше время релаксации. Для круглого контакта диаметром 200 мкм,  $\tau = 1 \text{ мкс}$ ,  $I_{0min} = 2 \text{ пА}$ ,  $w_R = 100 \text{ нм}$  получим  $N_{tmin} = 8 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ .

Для оценки минимального тока, который может быть измерен ТРСГУ-спектрометром в случае использования для формирования барьерного контакта проводящего зонда АСМ (локальной ТРСГУ), зададим следующие параметры:

- радиус закругления острия зонда  $r = 50 \text{ нм}$ ;
- критическая плотность тока в полупроводнике  $i_{кр} = 5 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2$ ;
- минимальный фиксируемый аппаратурой ток  $I_{мин} = 2 \text{ пА}$ .

Ток, протекающий через острие зонда, должен быть не меньше  $I_{мин}$ , но при этом не превышать критическое значение. Тогда величина максимального тока, не приводящего к деградации зонда  $I_{макс} = j_{кр} \cdot S \approx 7,5 \text{ нА}$ , где  $S = 2\pi r^2$  – площадь полусферической поверхности острия зонда. Таким образом, минимальная величина тока полезного сигнала на входе ТРСГУ-спектрометра не превышает критического значения.

Ток, создаваемый в цепи при вылете из квантовой точки одного электрона, по литературным данным [9], составляет порядка 1 пА. Таким образом, для измерения тока в цепи зонд АСМ – ТРСГУ-спектрометр необходимо, чтобы в процессе заполнения/опустошения энергетических уровней участвовало не менее нескольких единиц – десятков НЗ.

В квантовой точке имеет место дискретный спектр энергий НЗ. В одной КТ или нанокластере может находиться несколько единиц – десятков НЗ, занимающих близкие друг к другу уровни энергии [9]. Нанокластеры можно заполнять электронами, оказывая внешние воздействия электрическим полем, облучением или за счет легирования структуры. Уровень легирования  $10^{16} \text{ см}^{-3}$  будет соответствовать одному электрону в кластере в виде куба с ребром 46,4 нм. С ростом размера кластера возрастает число разрешенных энергетических состояний.

Таким образом, из оценок видно, что исследование отдельных кластеров с размерами менее 100 нм или их групп вполне возможно, поскольку в таких структурах достигаются величины электрического тока, которые можно уверенно измерить и, таким образом, реализовать метод локальной ТРСГУ [10].

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

### Библиографический список

1. Lang D.V. Deep level transient spectroscopy: a new method to characterize traps in semiconductors // J. Appl. Phys. V. 45, 1974. P. 3023-3032.
2. Денисов А.А., Лактюшкин В.Н., Садофьев Ю.Г. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней // Обзоры по электронной технике. 1985. Сер. 7. Вып. 15 (1141). 52 с.
3. Ермачихин А.В., Литвинов В.Г. Автоматизированный измерительный комплекс токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней // Приборы и техника эксперимента, 2018, № 2, С. 118-123.
4. Borsuk J.A., Swanson R.M. Current transient spectroscopy: a high-sensitivity DLTS system // IEEE Transactions on Electron Devices. 1980. V. ED-27. No.12. P. 2217-2225.
5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. Кн. 1. М.: Мир. 1984. 456 с.
6. Litvinov V., Kozlovsky V., Sadofyev Yu., Rybin N. Local study of the energy spectrum of electrons in CdSe/ZnSe QD structure by current DLTS cooperated with AFM // Phys. Status Solidi C. 2012. V. 9. P. 1772-1775.
7. Kozlovsky V.I., Sadofyev Yu.G., Litvinov V.G. Deep level transient spectroscopy and cathodoluminescence of  $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te}/\text{ZnTe}$  QW structures grown on GaAs(100) by MBE // J. Cryst. Growth. 2000. V. 214/215. P. 983-987.
8. Kozlovsky V.I., Sadofyev Yu.G., Litvinov V.G. Band alignment in ZnCdTe/ZnTe and ZnCdSe/ZnSe SQW structures grown on GaAs(100) by MBE // Nanotechnology. 2000. V.11. No.4. P. 241-245.
9. Кульбачинский В.А. Полупроводниковые квантовые точки // Соросовский образовательный журнал. 2001. № 4. С. 98-104.
10. Литвинов В.Г., Рыбин Н.Б. Токовая релаксационная спектроскопия глубоких уровней в полупроводниковых структурах на основе точечного барьерного контакта // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. № 4, Вып. 42. Часть 2. С. 28-33.

## СЕКЦИЯ «ПРОМЫШЛЕННАЯ СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ»

УДК 533.924; ГРНТИ 29.27.01

### ЭРОЗИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ ВАКУУМНОГО ПРЕРЫВАТЕЛЯ

А.И. Кудюкин

*Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина,  
Российская Федерация, Рязань, a.kudykin@365.rsu.edu.ru*

*Аннотация.* На основе квадрупольных систем, встроенных в технологический процесс, предложен механизм генерации плазмы в катодных точках вакуумной дуги. Информация о перераспределении атомов композитного сплава Cu-Cr электрода вакуумного прерывателя на поверхности и массиве, полученная методом РСМА после эксплуатационного испытания. Была получена информация как о поверхностной, так и об объемной сегрегации атомов в зоне кратеров плавления.

*Ключевые слова:* вакуумная дуга, дугогасительная камера, эмиссия, многокомпозиционные сплавы, атомно-силовая микроскопия, рельеф поверхности, катодные пятна.

### VACUUM BREAKER ELECTRODE SURFACE EROSION

A.I. Kudyukin

*Ryazan State University named after S.A. Esenin,  
Russia, Ryazan, a.kudykin@365.rsu.edu.ru*

*The summary.* On base on the quadrupole systems embedded in the process equipment is proposed a plasma generation mechanism in the cathode spots of the vacuum arc. The information on the atom redistribution for Cu-Cr composite electrode of the vacuum interrupter on surface and bulk after the exploitation test were researched by PCMA. The information both the surface and bulk segregation and as for the crater zone convexities periphery were obtained.

*Keywords:* vacuum arc, arc suppression chamber, emission, multicomposition alloys, atomic force microscopy, surface relief, cathode spots.

#### Введение

Сплавы Cu-Cr нашли применение в современной промышленности, в частности, для производства электродов вакуумных дугогасительных камер. Отсутствуют данные о деградации поверхности сплавной системы (Cu 60 ат.% - Cr 40 ат.%) под действием вакуумной дуги высокой плотности. Эта информация имеет практическое значение для совершенствования приборов данного типа. Также неизвестно о теплофизических процессах, происходящих в электродных сплавах, включая особенности их перераспределения в условиях неравновесных процессов (резкого нагрева и охлаждения) зоны микроэксплозий. Как изменяется состав и морфология поверхности электроцепей при многократном дуговом испарении и напылении под действием ионно-плазменного потока, непонятно.

Отсутствие информации такого рода не позволяет целенаправленно совершенствовать конструктивные и технологические особенности производства таких устройств.

Делается попытка аппроксимировать процессы модификации поверхности таких электродных материалов.

#### Результаты и обсуждение

Рельеф исходной поверхности характеризуется существенной шероховатостью (рис.1).

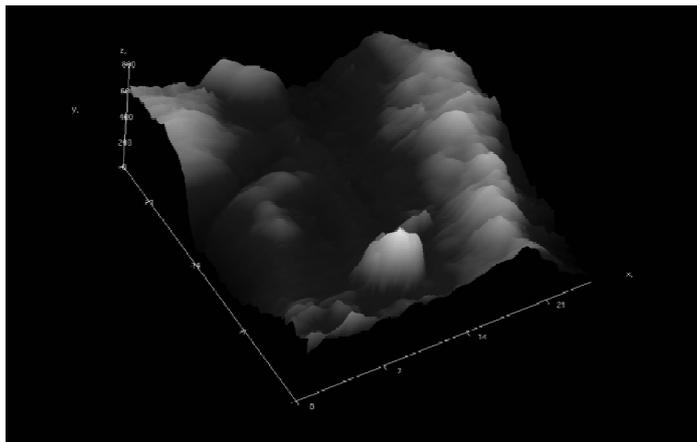


Рис. 1. Изначальный рельеф электрода

По данным сканирования состава поверхности электрода прерывателя следует, что атомы Cr и Si концентрируются и образуют зоны повышенного и пониженного содержания атомной массы отдельных атомов. Перераспределение атомов также указывает на особенности появляющегося рельефа (рис. 2): на периферии зон плавления концентрация меди сильно уменьшается, а хрома, наоборот, увеличиваются (рис. 3).

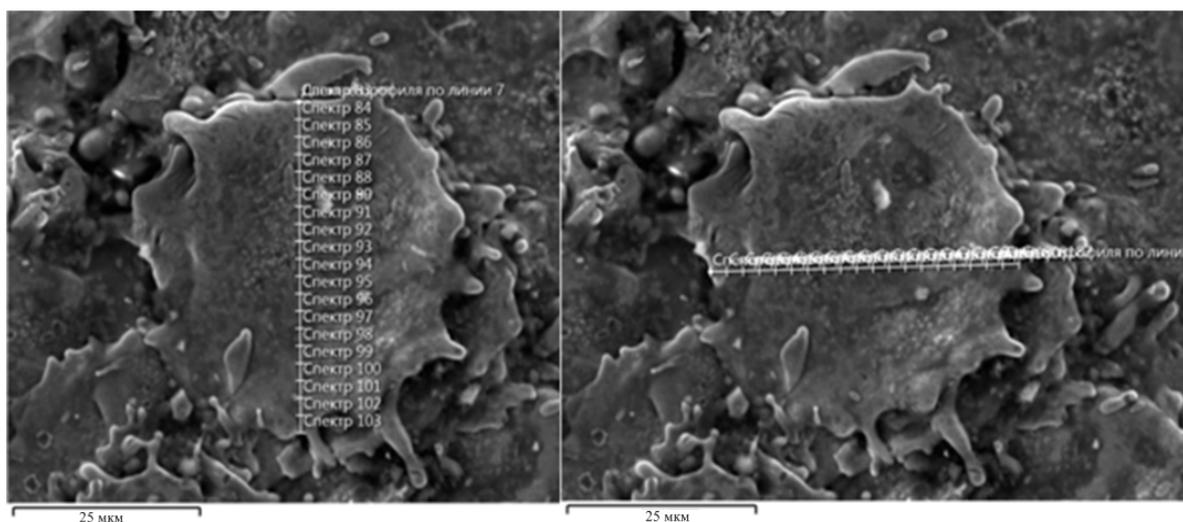


Рис. 2. Зона застывшего расплава микроэсплозии (указаны точки с измеренной концентрацией:  
а - вертикальное направление,  
б - горизонтальное направление).

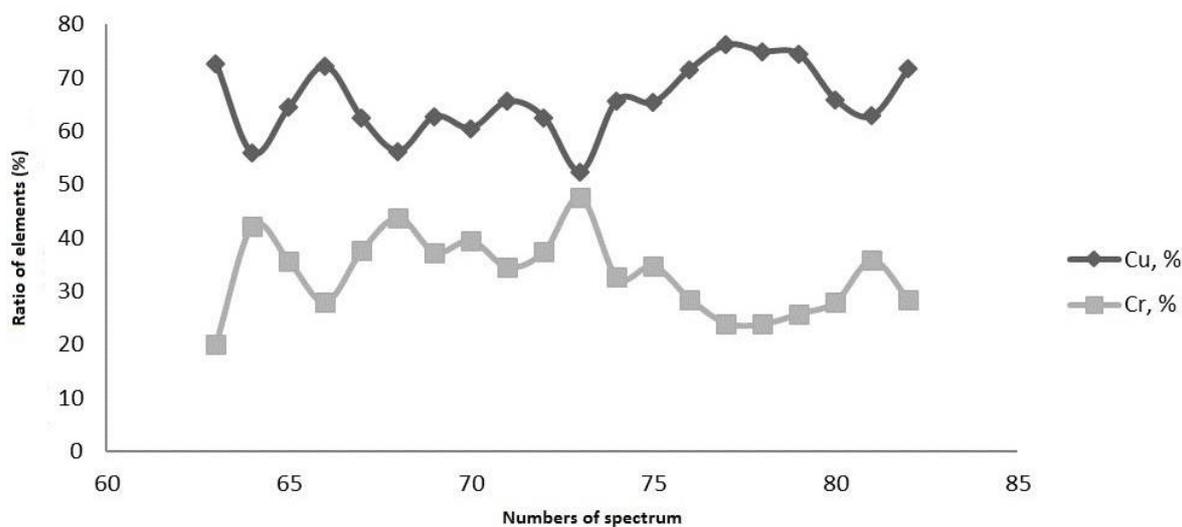


Рис. 3. Процентное соотношение атомов Cu и Cr вдоль вертикальной линии (рис. 1а)

Несмотря на очевидное нарушение равновесия процессов плавления и охлаждения в вакуумной дуге, распределение элементов в зоне микроэсплозии можно объяснить из ее равновесного состояния Cu 60 ат.% - Cr 40 ат.%.

Элементный анализ по сплаву, распространяющемуся вдоль двух линий сканирования: вертикальной и горизонтальной (рис. 2а и 2b), показывает снижение концентрации атомов Cu на края плавления с 72% до 53,4% в первом случае и с 71,7% до 61,4% во втором. Это указывает на концентрацию хрома по краям зоны плавления.

Процесс происходит в неравновесных условиях и сравнение со схемой состояния Cu-Cr начальной объемной концентрации Cu составляет 60% (поверхностная концентрация - 72%), то есть атомы Cu сегрегируются на поверхность ( $\Delta n = 10-12\%$ ).

Вакуумные дуговые прерыватели были откачаны в вакуумной печи серии «Кристалл» при  $10^{-4}$  Па, где эти образцы были установлены в пространстве внутри вакуумного колпака. Квадрупольная система KMS-250 позволила обнаружить и зарегистрировать состав остаточных газов на протяжении всех стадиях технологического цикла. В спектрах видны как следы технологических газов (H и He), так и диффузионных масел (тип  $C_xH_y$ ), а так же молекул десорбированных со всех поверхностей ( $CO_2$ ,  $H_2O$ , N) (рис.4). Из-за шероховатости поверхности (рис. 1) расхождение контактов происходит не одновременно. Через отдельные пятна будет течь основная часть тока.

Поэтому можно предположить, что наблюдаемые пары (рис.4) адсорбировались на всех поверхностях и покрыли их, становясь инициатором образования вакуумной дуги.

К тому же были обнаружены (после испытания устройств на герметичность) молекулы остаточного гелия с различной энергией в рабочей системе. Этот результат указывает на различное состояние молекул He в объемном пространстве или на поверхности. Квадрупольная система, также, позволяет регистрировать молекулы  $H_2$ . Последний результат был неожиданным, потому что он обычно наблюдался при больших токах и давлении.

Изменение состава газа происходило в ходе дегазации и пайки (прогрев до  $815^\circ C$ ).

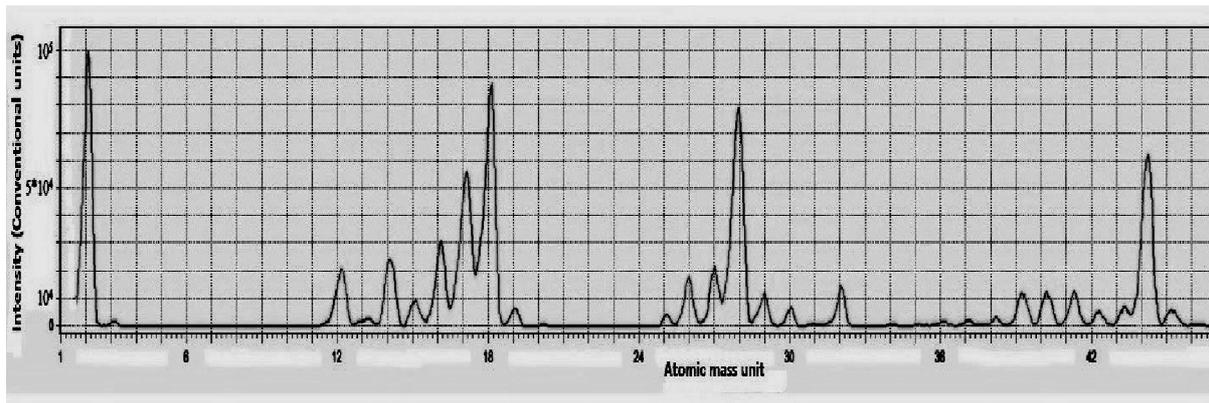


Рис. 4. Состав газа во внутреннем объеме камеры

На этих технологических этапах линии  $H_2$  и  $H_2O$  уменьшались, а оксидов углерода и азота, наоборот, увеличивались. На этапе пайки все масс-спектры увеличивались, что связано с выделением паров из жидкой фазы расплавленных компонентов.

### Заключение

При анализе поверхностного состава и состава массива электродов РСМА-методом (при различном ускоряющем напряжении) было дополнительно проведено АФМ-сканирование в местах локального взрыва. Благодаря этому обнаруживается возможность для наблюдения за перераспределением атомов в электродах системы Си-Сг в зоне катодных пятен. Эти результаты позволяют более точно определить конструктивные и технологические изменения для вакуумных дуговых прерывателей. Кроме того, регистрация масс-спектров на всех стадиях технологического процесса дает возможность интерпретации роли адсорбированных слоев.

УДК 621.316.925.2; ГРНТИ 44.29.31

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОБРЫВА ТОКОВЫХ ЦЕПЕЙ В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТАХ

В.В. Захаркин, Е.В. Сливкин

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, zakharkin\_99@mail.ru*

*Аннотация.* В работе рассматриваются методы контроля обрыва токовых цепей в дифференциальных защитах. Описываются принципы их работы, преимущества и недостатки. Приводится пример внедрения систем машинного обучения методом опорных векторов (SVM) для современных микропроцессорных защит.

*Ключевые слова:* дифференциальные токовые защиты, обрыв токовых цепей, машинное обучение, метод опорных векторов (SVM), микропроцессорные защиты.

## MACHINE LEARNING METHODS FOR OPEN-CIRCUIT MONITORING IN DIFFERENTIAL PROTECTION

V.V. Zaharkin, E.V. Slivkin

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, zakarkin\_99@mail.ru*

*The summary.* The paper deals with methods of monitoring open-circuit current circuits in differential protections. Their operating principles, advantages and disadvantages are described. An ex-

ample of implementation of machine learning systems by the support vector machine (SVM) for modern microprocessor-based relay protections is given.

*Keywords:* differential current protections, open-circuit, machine learning, Support Vector Machine (SVM), microprocessor-based protections.

Дифференциальная защита является одной из основных систем защиты электрических цепей от коротких замыканий и других неисправностей. Одной из главных проблем в дифференциальной защите является возможность ложного срабатывания, которое может произойти при наличии утечек тока в цепи. В таких случаях защита может отключить исправное первичное электрооборудование, что может привести к негативным последствиям, таким как простой оборудования, остановка производственного процесса или необходимость проведения дополнительных проверок и ремонтных работ.

Другой проблемой является возможность обрыва токовых цепей, которая может привести к срабатыванию защиты, необходимой для предотвращения негативных последствий. При этом, дифференциальная защита должна обнаруживать обрывы цепей и запускать программную или аппаратную блокировку, но не должна ложно срабатывать при изменении сопротивления цепей [1].

Контроль обрыва токовых цепей - важнейшая функция, обеспечивающая правильную работу дифференциальных защит и отстройку от ложных срабатываний. Контроль обрыва токовых цепей может быть реализован с помощью различных методов, которые могут быть применены к современным микропроцессорным терминалам релейной защиты.

Первым методом является использование специальных реле. Для контроля обрыва токовых цепей в дифференциальных защитах, могут быть использованы специальные реле, которые обнаруживают изменение величины тока и включаются при обрыве токовых цепей. Данные реле могут обеспечить быстрый и точный контроль обрыва токовых цепей. Преимущества метода заключаются в относительной простоте реализации и высокой точности измерений токовых величин. Недостатком метода является необходимость установки специальных трансформаторов тока для каждой фазы, что может увеличить стоимость системы защиты.

Второй метод - использование алгоритмов дифференциальной защиты микропроцессорных терминалов. Современные микропроцессорные терминалы релейной защиты могут быть оснащены алгоритмами дифференциальной защиты, которые учитывают изменения величины тока и напряжения в цепи [2]. Уставки и логика работы блокировки отстраиваются от режима наибольшего небаланса в системе, тем самым работая в диапазоне между наибольшим рабочим током защищаемого участка и минимальной уставкой срабатывания дифференциальной защиты. К преимуществам данного способа можно отнести следующие:

- метод не требует использования дополнительных аналоговых входов;
- селективность метода позволяет применять его как в защитах шин, так и в защитах линий.

Недостатками являются:

- метод не может быть применен для защиты трансформаторов;
- быстродействие избирательных алгоритмов находится на низком уровне.

Третьим способом контроля обрыва токовых цепей является измерение напряжения на концах токовых цепей. Современные микропроцессорные терминалы релейной защиты могут быть оснащены устройствами защиты, которые могут отслеживать изменения величины тока в цепи и выдавать предупреждающие или аварийные сигналы при обнаружении обрыва цепи. Эти устройства могут также включать функции автоматического переключения на резервное питание или другие системы защиты для обеспечения бесперебойной работы системы.

Преимущества метода:

- установка внешних датчиков напряжения позволяет использовать блокировку при помощи элементарных логических алгоритмов.

- точность измерения напряжения достаточно высока, что обеспечивает эффективную защиту системы;

Недостатки метода:

- требуется установка дополнительных аналоговых входов для терминалов;

- режим работы датчиков ограничивает минимальную потребляемую мощность токовыми преобразователями.

В целом, МП-терминалы релейной защиты обеспечивают широкий спектр методов контроля обрыва токовых цепей в дифференциальных защитах. Каждый из этих методов может быть использован в зависимости от специфики конкретной системы и требований к защите. Кроме того, некоторые из этих методов могут быть комбинированы для повышения надежности защиты и снижения вероятности ложных срабатываний.

Еще одной возможностью является использование метода определения направления тока. Этот метод использует принцип дифференциальной защиты, который базируется на определении направления тока в цепи. Современные микропроцессорные терминалы релейной защиты могут быть оснащены алгоритмами определения направления тока, которые обеспечивают точное определение изменений величины тока в цепи. Это позволяет быстро обнаруживать обрывы цепей и принимать соответствующие меры для обеспечения защиты системы.

Преимущества данного метода:

- быстрое действие при возникновении обрывов в токовых цепях;

- метод применим для большинства систем защиты.

Недостатком метода является недостаточная точность измерения направления тока при наличии высокочастотных помех в цепи.

Метод анализа спектра тока также применяется для контроля обрыва токовых цепей. Этот метод основывается на анализе спектра тока в цепи и может использоваться для обнаружения обрывов токовых цепей. Современные микропроцессорные терминалы релейной защиты могут быть оснащены алгоритмами анализа спектра тока, способными быстро обнаруживать обрывы цепей и принимать соответствующие меры для обеспечения защиты системы.

Преимущества:

- метод обеспечивает высокую точность измерения гармонических компонентов тока, что позволяет быстро обнаруживать обрывы цепей;

- метод применим для большинства систем защиты.

Недостатки:

- необходимость установки дополнительных схем для защиты от ложных срабатываний, что может увеличить стоимость системы защиты;

- сложность анализа результатов измерений может затруднить определение точного местоположения обрыва цепи.

Все методы контроля обрыва токовых цепей в дифференциальных защитах обладают своими преимуществами и недостатками, и выбор применяемого метода зависит от требований и характеристик конкретной системы защиты. В то же время важно учитывать стоимость, точность, скорость обнаружения и местоположение обрыва при выборе метода контроля.

### **Действие защит при оперативных отключениях**

Для того чтобы дифференциальная защита не сработала при оперативном отключении первичного оборудования, а сработала только при обрыве токовых цепей, используются специальные методы и алгоритмы [3].

Один из таких методов - метод "сравнительной защиты". Он основан на сравнении тока, протекающего по защищаемого участка, с током, протекающим по другому участку, который не подвержена обрыву. Если ток на защищаемого участка больше, чем на не защищаемого, то возможно, что произошел обрыв, и должна сработать блокировка. Однако, при отключении участка при помощи выключателя, ток на защищаемом и не защищаемом участках будет примерно одинаковым, и блокировка не сработает.

Еще один метод - метод "технологического отключения". Он заключается в том, что перед отключением линии при помощи выключателя, система защиты получает соответствующий сигнал и временно отключает дифференциальную защиту на этой линии. Таким образом, защита не сработает при отключении линии, но останется работоспособной для обнаружения обрывов токовых цепей.

Важно отметить, что выбор конкретного метода зависит от требований и характеристик конкретной системы защиты, и должен производиться квалифицированным специалистом.

### **Внедрение комплекса машинного обучения в работу дифференциальных защит**

На современных цифровых подстанциях (ЦПС) для контроля за обрывом токовых цепей используются различные передовые методы, среди которых можно выделить метод опорных векторов (Support Vector Machine, SVM).

Метод опорных векторов - это метод машинного обучения, который позволяет проводить классификацию данных на основе заданного набора признаков. Он широко применяется в различных областях, включая электроэнергетику, для обработки и анализа больших объемов данных. В контексте дифференциальной защиты, метод SVM используется для обнаружения обрывов токовых цепей, путем анализа электрических параметров системы, таких как напряжение, ток и другие физические величины.

С помощью метода SVM на ЦПС можно создавать модели обнаружения обрывов токовых цепей, которые учитывают различные параметры сети и условия эксплуатации. Модели обучаются на данных, полученных в ходе тестовых испытаний и эксплуатации системы, что позволяет достигать высокой точности и быстродействия при обнаружении обрывов. Однако, стоит отметить, что метод SVM не является универсальным и его эффективность зависит от специфики конкретной системы защиты и условий эксплуатации. Также требуется высокая квалификация специалистов для разработки и настройки моделей обнаружения обрывов с использованием метода SVM.

Метод SVM — это алгоритм машинного обучения, который может быть использован для решения задач классификации, регрессии и детектирования выбросов. Он основан на построении гиперплоскости в пространстве признаков, которая максимально разделяет объекты разных классов. Для этого выбирается гиперплоскость, которая наиболее близка к точкам разных классов и максимизирует расстояние между ними (это расстояние называется зазором). SVM пытается найти оптимальное разделение на два класса, используя только небольшое количество обучающих примеров. Одним из главных преимуществ SVM является его способность обрабатывать данные высокой размерности. Это означает, что SVM может работать с наборами данных, содержащими множество признаков, без значительной потери качества модели.

Этот метод может быть применен к любой энергетической системе, где доступны данные о токе, напряжении и других параметрах. В дифференциальной защите SVM используется для построения модели, которая позволяет определить наличие обрыва в токовой цепи, а также для определить местоположения обрыва в системе [4]. С помощью SVM можно использовать различные признаки для обнаружения обрывов, такие как изменения напряжения, частоты или фазы сигнала, а также анализ спектральных характеристик. После того, как модель обучена на этих данных, она может использоваться для предсказания возникновения обрыва цепи. В качестве входных данных модель получает измеренные значения тока и напряжения на участках цепи, а в качестве выходных данных - прогноз наличия обрыва цепи.

Для использования SVM в задаче контроля обрыва токовых цепей в дифференциальных защитах необходимо написать код для обучения модели на имеющихся данных и для предсказания наличия обрыва на новых данных. Пример кода на языке Python, который демонстрирует использование SVM для классификации данных и предсказания наличия обрыва токовой цепи представлен на листинге 1:

Листинг 1. Базовый код для обучения и работы SVM модели

```
from sklearn import svm
import numpy as np

# Загрузка данных для обучения модели
X_train = np.loadtxt('train_data.txt')
y_train = np.loadtxt('train_labels.txt')

# Обучение SVM на имеющихся данных
clf = svm.SVC(kernel='linear', C=1.0)
clf.fit(X_train, y_train)

# Загрузка данных для анализа
X_test = np.loadtxt('test_data.txt')

# Анализ наличия обрыва на новых данных
y_pred = clf.predict(X_test)

# Вывод результата анализа
if y_pred == 1:
    print("Обрыв обнаружен!")
else:
    print("Обрыв не обнаружен")
```

Этот код загружает данные для обучения модели из файлов "train\_data.txt" и "train\_labels.txt", обучает SVM на этих данных и использует обученную модель для предсказания наличия обрыва на новых данных, загруженных из файла "test\_data.txt". Результат предсказания выводится в консоль в виде сообщения. Реализация зависит от конкретной задачи, и могут потребоваться дополнительные шаги, такие как предобработка данных, настройка параметров SVM и т.д.

Результаты работы SVM продемонстрированы в виде таблицы 1, показывающей, какие данные были классифицированы как с обрывом токовой цепи, а какие - без него.

Таблица 1. Пример работы SVM при изменении величины дифференциального тока в системе шин

№ измерения	Ток 1 плеча, о.е.	Ток 2 плеча, о.е.	Действие SVM
1	0.2	0.8	1
2	0.5	0.4	1
3	0.7	0.2	0
...			
49	0.3	0.9	1
50	0.6	0.3	0

Здесь каждая строка представляет собой набор данных с двумя признаками и классификацию SVM, где "1" означает наличие обрыва токовой цепи, а "0" - его отсутствие. Для удобства визуализации используется только два признака.

Эти данные могут быть представлены в виде графика на двумерной плоскости:

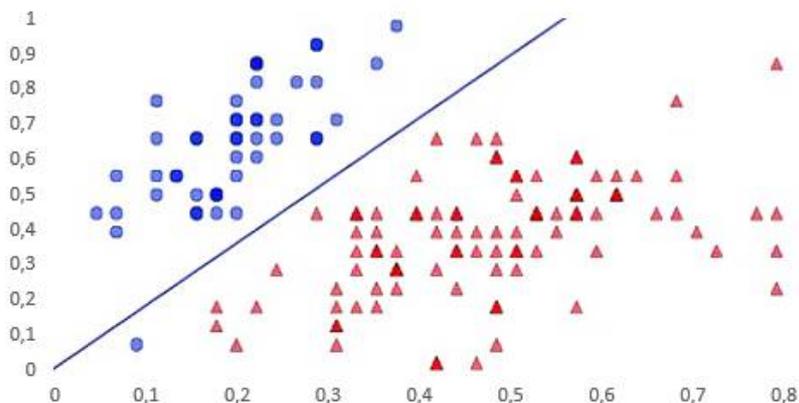


Рис. 1. Визуализация работы SVM для определения «зазора» токов.

Здесь красные точки представляют данные с обрывом токовой цепи, а синие - без него. Разделяющая синяя линия, построенная SVM, является границей между этими двумя классами. В результате, SVM может определить, был ли обрыв токовой цепи или нет, на основе двух признаков, таких как ток первого и второго плеч, полученных с дифференциальной защиты.

Важно отметить, что применение SVM в микропроцессорных терминалах релейной защиты на цифровых подстанциях является современным и эффективным подходом для контроля обрыва токовых цепей. Однако, необходимо учитывать, что для его реализации требуется квалифицированный персонал и достаточно мощное аппаратное обеспечение.

Также, необходимо проводить тщательные исследования и эксперименты для подбора оптимальных параметров SVM и обучения модели на достаточном количестве данных, что может занять значительное время и потребовать дополнительных затрат.

Тем не менее, применение SVM для контроля обрыва токовых цепей в дифференциальных защитах на цифровых подстанциях является перспективным направлением развития релейной защиты и может значительно повысить ее надежность и эффективность.

### Библиографический список

1. Лабушев Т. А., Лабушева М. В. Роль систем контроля за обрывом токовых цепей в дифференциальных защитах // Вестник электромеханики. - 2021. - № 2. - С. 24-29.
2. Wang, Z., & Zhang, W. (2016). A novel algorithm for digital differential protection of power transformers based on harmonic restraint principle. *Electric Power Systems Research*, 131, 90-98.
3. Гончаров, Д., Шахматов, Е. и Ткаченко, О. (2018). Исследование алгоритмов контроля токовых цепей дифференциальных защит при оперативных переключениях. *Электроника и связь*, 1, 28-34.
4. Третьяков, О. В., & Мещеряков, Д. В. (2018). Анализ применимости методов машинного обучения для задач дифференциальной защиты. *Электротехнические системы и комплексы*, (3), 72-77
5. J. Chen, H. Zhou, J. Zhang, J. Yu, and S. Wang, "Transformer differential protection based on support vector machine and linear regression," in *Proceedings of 2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*, Chengdu, China, May 2019, pp. 727-731.

УДК 621.31; ГРНТИ 44.29.33

## ОБЗОР ТРЕНАЖЁРА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ОПЕРАТИВНЫХ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ TWR-12

А.А. Донских, Д.Ю. Тарабрин

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

*Аннотация.* В данной статье представлено описание организации тренировочного процесса в программном комплексе TWR-12. Проанализирован функционал программы, особенности создания мнемокода для проведения тренировок и некоторые ключевые признаки, характерные для данного тренировочного комплекса.

*Ключевые слова:* энергетическая трансформация России, цифровизация, оперативные переключения, TWR-12

## OVERVIEW OF THE SIMULATOR FOR CARRYING OUT OPERATIONAL SWITCHING TWR-12

A.A. Donskikh, D.Y. Tarabrin

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

*The summary:* This article presents a description of the organization of the training process in the TWR-12 software package. The functionality of the program, the features of creating a mnemonic code for training and some key features characteristic of this training complex are analyzed.

*Keywords:* energy transformation of Russia, digitalization, operational switching, TWR-12

Одной из главных проблем современной энергетики является проблема проведения безопасных оперативных переключений и высокого риска травматизма. С учетом энергетической трансформации России и роста высокотехнологичных единиц различного подконтрольного энергетического оборудования необходимо принимать соответствующие решения для поддержания достойного уровня выполнения возложенных задач по генерации и передаче электроэнергии, снижению числа чрезвычайных происшествий при участии сотрудников различных подразделений.

Как следствие, необходимо развивать современные системы обучения оперативно-диспетчерского персонала с внедрением программных комплексов, соответствующих повышающимся стандартам качества.

Примером подобных комплексов, может стать отечественный проект «TWR-12». Использование подобных программных решений является следующим шагом для перехода с традиционных систем обучения по бумажным вариантам коммутируемых схем на более высокую ступень, так как виртуальные схемы позволяют реализовать любые функции коммутируемого оборудования, в том числе работу с панелями цепей РЗА и автоматики.

Основной задачей проводимого в статье исследования является анализ функциональной базы программы, разбор алгоритма реализации тренировочного процесса с момента создания элементов схемы до формирования программного кода бланка оперативных переключений программы TWR-12. Прикладное значение изложенного материала базируется на дальнейшей возможности реализации тренировочного процесса читателем, что с учётом изучения основных характерных особенностей данного тренировочного комплекса, станет более простой задачей.

Создание будущей тренировки, в данной программной среде, следует начинать с формирования электросхемы для проведения дальнейших оперативных переключений. Библиотека тренажёра уже с момента установки имеет обширный ряд стандартных элементов, однако для реализации некоторых тренировочных схем, с визуальной составляющей оборудования конкретной подстанции, часть элементов придётся создавать самостоятельно.

Рассмотрим именно такой пример. Создание нестандартного элемента начинается с формирования его графического отображения при различном режиме коммутации. Это реа-

лизуется с помощью программной среды комплекса. Следующим этапом станет нанесение точек электрического подключения на графическую составляющую элемента. Так же можно добавить музыкальное сопровождение в виде звука переключения переключателя или при возникновении аварийной ситуации, видеоряда с обрывом высоковольтной линии.

После создания нестандартной элементной базы будущей схемы, следует этап расположения всех необходимых элементов на специальном поле программы. Далее необходимо задать исходное оперативное состояние каждого элемента перед началом тренировочного процесса. Для этого, в формате программного кода TWR-12, прописывается цифровое состояние всех элементов схемы до начала оперативных переключений в формате логического нуля или единицы.

Название любого элемента, начиная с отрезка высоковольтной линии, заканчивая трансформатором носит функцию переменной в программном коде тренировочного бланка. Следовательно, если брать в качестве примера высоковольтный двухконтактный выключатель, при значении ноль в коде тренировки – выключатель разомкнут, при инверсии данного значения – цепь будет замкнута.

Следующим этапом идёт формирование программного кода каждой операции на основе бумажного бланка запланированных оперативных переключений. Каждая операция из данного бланка переводится в формат программного бланка TWR-12 с учётом цифрового состояния задействованных в данной операции элементов. Исходное состояние всех элементов схемы, в виде кода называется базисом тренировки.

В языке программирования тренажёра так же имеется логический элемент «или», который позволяет реализовать вариативность операций, определённую цепочку событий, в зависимости от формата будущей тренировки, с присуждением баллов за правильные операции при ветвлении алгоритмов.

Сам тренировочный процесс включает в себя проведение оперативных переключений, как с системой отслеживания баллов и времени, так и в режиме демо тестирования возможностей программы. При прохождении тренировки в режиме обучения новой схеме, имеется возможность вызова подсказок с указанием следующей правильной коммутационной операции, что позволяет не начинать тренировку с нуля при возникновении у обучающегося трудностей.

Так же программа TWR-12 предоставляет обширные возможности для модуляции различных узлов электроники на базе принципов программирования Булевой алгебры. Соответственно, на высоковольтной схеме можно реализовать работу с цепями релейной защиты и автоматики, низковольтными трансформаторами собственных нужд и различной индикационной техникой.

Создание нового электронного элемента, например, индикации, аналогично алгоритму создания обычного элемента высоковольтной схемы TWR-12. Следовательно, работа всех элементов релейной защиты и автоматики базируется на программном коде тренировки и мастерстве её создателя.

Упомянутая ранее особенность позволяет не только реализовывать довольно сложные технические решения по работе с различными электронными модулями, но и даст простор для творчества, развития технического склада ума у молодого специалиста. В недалёком будущем, профессия диспетчера будет затрагивать не только управление коммутацией различных элементов, но и прикладное микропрограммирование, следовательно, самостоятельная работа с данным программным комплексом даст общее представление о создании кода и различных алгоритмических циклов с использованием логических переменных.

На базе описываемого в данной статье программного комплекса можно создавать целые тренировочные базы с конвертированием реального оборудования в формат схем тренажёра. Основным вариантом реализации тренировочного процесса станет создание комплекса схем с разделением по уровням сложности. Начать обучение специалистов следует с доста-

точно простых схем, для того чтобы молодые диспетчеры смогли ощутить преимущество визуального восприятия коммутации элементов, по сравнению с обычной системой подготовки на базе рукописного бланка переключения и бумажного варианта схемы.

По мере изучения схем и их прохождения, можно реализовать процесс составления рейтинговых таблиц для дополнительной мотивации обучающихся. Завершающим этапом курса подготовки станет прохождение схем с коммутацией элементов в различном диапазоне классов напряжения, а в качестве экзамена можно использовать типовую схему с заранее не изученным студентом бланком оперативных переключений для имитации ликвидации аварийной ситуации.

Немаловажной частью разработки тренировочных оперативных переключений, станет тема статистики по травматизму при проведении реальных коммутаций в электроэнергетике. Наибольшее количество несчастных случаев происходит при совершении ошибок диспетчерским персоналом, что ставит под удар корректность дальнейших действий электромонтёра и влечёт за собой тяжелые последствия, которые могут привести не только к финансовым потерям, но и человеческим жертвам. Следовательно, необходимо уделять особое внимание проработке будущих плановых оперативных переключений и действиям при ликвидации внештатных ситуаций.

Так же учитывая веяние цифровой трансформации России и дальнейший переход страны на энергетические объекты нового поколения, которые предполагают функционирование под управлением искусственного интеллекта, необходимо понимать и то, что от человеческого фактора отказаться в полной мере невозможно. Так как для ликвидации аварийных ситуаций на данных объектах нового поколения всегда будут требоваться высококвалифицированные специалисты, вопрос повышения уровня знаний в данной области будет актуален, как никогда.

Подводя итоги статьи, можно прийти к выводу, что повышение эффективности обучения молодых специалистов довольно актуальный вопрос, который можно решить различными программными решениями. На фоне ухода зарубежных компаний с российского рынка следует более детально присматриваться к отечественным программным продуктам на предмет их функционала, сложности внедрения и дальнейшего обновления. TWR-12 отвечает всем требованиям доступного и интуитивно понятного тренажёра с большим спектром возможностей, что делает разрабатываемые на его базе тренировочные программы наиболее оптимальным для реализации переподготовки диспетчерского персонала на фоне энергетической и цифровой трансформации России.

### **Библиографический список**

1. Приказ Минэнерго России от 13.09.2018 № 757 "Об утверждении Правил переключений в электроустановках".
2. Инструкция по предотвращению и ликвидации аварий в электрической части энергосистем. – М.: НЦ "Энас", 2004. – 196с.
3. Приказ Минтруда России от 15.12.2020 № 903 "Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок".
4. Правила технической эксплуатации электрических систем и сетей Российской Федерации. Госэнергонадзор Минэнерго России. – М.: ЗАО "Энергосервис", 2013. – 488с.

УДК 621.311; ГРНТИ 44.29.29.

## ИССЛЕДОВАНИЕ АРХИТЕКТУР ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

**В.В. Комаров, Е.В. Сливкин**

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, vovankomar1@gmail.com*

*Аннотация.* В работе рассматриваются основные методы реализации цифровых подстанций с использованием различных архитектур. Приводятся их основные особенности, реализация, используемое оборудование.

*Ключевые слова:* архитектура цифровой подстанции, протокол MMS, протокол GOOSE, протокол SV, SCADA.

## RESEARCH OF DIGITAL SUBSTATION ARCHITECTURES

**V.V. Komarov, E.V. Slivkin**

*Ryazan State Radiotechnical University named after V.F. Utkin,  
Russian Federation, Ryazan, vovankomar1@gmail.com*

*Annotation.* The paper discusses the main methods for implementing digital substations using various architectures. Their main features, implementation, equipment used are given.

*Keywords:* digital substation architecture, MMS protocol, GOOSE protocol, SV protocol, SCADA.

Согласно нормам проектирования Публичного Акционерного Общества “ФСК ЕЭС” [1] цифровой подстанцией является подстанция с высоким уровнем автоматизации, в которой все процессы обмена данными и управления производятся с использованием цифрового стандарта МЭК 61850. Этот стандарт распространяется на реконструируемые подстанции, вновь возводимые и подстанции, на которых производится техническое перевооружение.

Использование данного цифрового стандарта позволяет персоналу, в основном, диспетчеру, производить контроль, оперативные переключения без отправки на объекты электроэнергетики бригад, что сильно ускоряет время принятия решений и самих переключений, позволяя обеспечить потребителей качественной электрической энергией, снизить недоотпуск при возникновении отказа электрооборудования.

В настоящее время успешно применяются три архитектуры цифровых подстанций.

### Архитектура I

Архитектура I – это архитектура, в которой обмен информацией осуществляется дискретными и аналоговыми сигналами, а обмен между системой диспетчеризации и мониторинга (Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA) и интеллектуальными электронными устройствами (ИЭУ) с помощью протокола Manufacturing Message Specification (MMS) (рисунки 1).

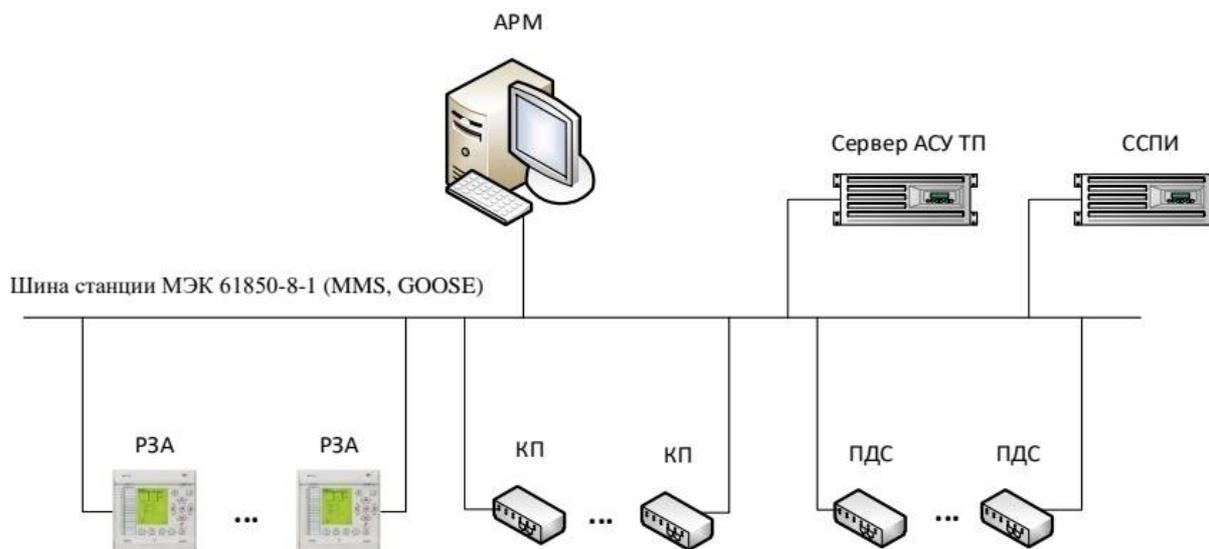


Рис 1. Связь систем подстанции с интеллектуальными электронными устройствами

Главной особенностью первой архитектуры является применение сообщения по протоколу MMS, который используется для интеграции релейной защиты и автоматики, а также контроллеров присоединения к общей автоматизированной системе управления технологическими процессами (АСУ ТП). При использовании данной архитектуры не применяются шкафы преобразователей аналоговых и дискретных сигналов. Данный протокол применяется для обмена информацией между клиентом и сервером или же подстанцией и диспетчером.[1]

Данный протокол используется для:

1. Передачи данных от ИЭУ.
2. Считывания и записи данных в виде стандартизированных сообщений.
3. Формирования и передачи журналов событий, а также файлов различных форматов.

Способы обмена информацией в протоколе MMS:

1. Система периодического опроса сервера клиентом для сбора данных и управления (рисунок 2 а).
2. Передача данных в виде отчетов (рисунок 2 б).

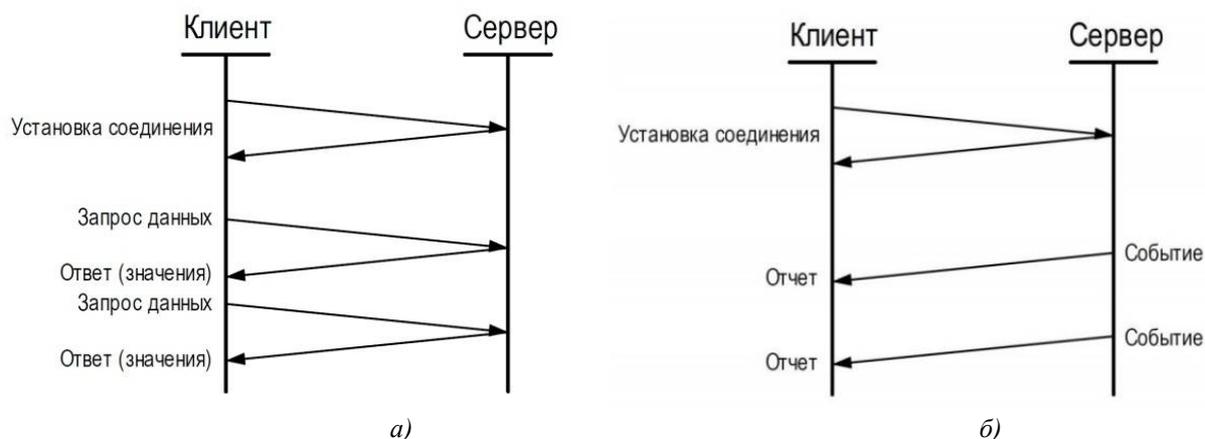


Рис. 2. Обмен данными: а – с помощью опроса, б – с помощью отчетов

С помощью системы периодического опроса сервера клиентом для сбора данных и управления, клиент может считать информацию о количестве логических узлов и устройств, объектов и атрибутах данных. Передача данных в виде отчетов используется для получения

информационной модели, управления и выгрузки файлов, а также для обновления модели ИЭУ на клиенте или сборе данных, когда отсутствуют условия для получения измененных данных.

## Архитектура II

Архитектура II – Архитектура, в которой обмен информацией между интеллектуальными электронными устройствами выполняется с помощью объектно-ориентированных сообщений используя протокол GOOSE, информационный обмен между SCADA и ИЭУ осуществляется с помощью протокола MMS, а значения токов и напряжений передаются в виде аналоговых сигналов [1].

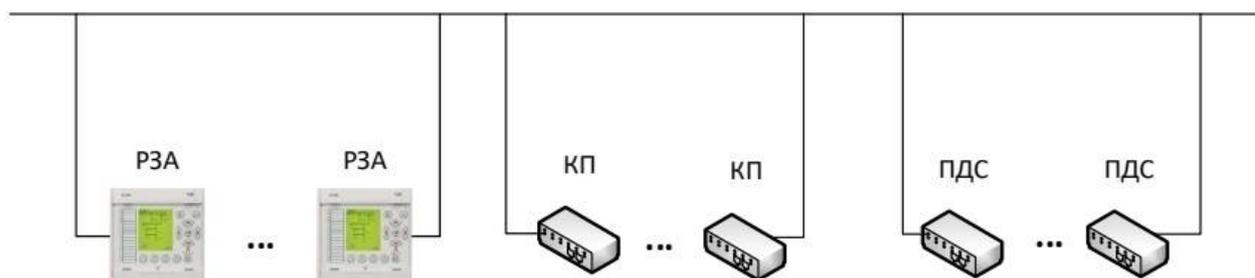


Рис. 3. Протокол GOOSE:  
РЗА – релейная защита и автоматика, КП – контроллер присоединения,  
ПДС – преобразователь дискретных сигналов.

Также, как и в первой архитектуре, во второй используется протокол MMS, служащий для интеграции устройств РЗА и КП в единую систему АСУ ТП. Особенностью данной архитектуры является использование протокола GOOSE, который используется для организации обмена информации и команд между устройствами и локальными вычислительными сетями.

Этот протокол передает наборы данных, состоящие из атрибутов данных. К передаче обязательны атрибуты качества. Помимо значения дискретного сигнала, обязательно должен содержаться атрибут качества сигнала, сигнализирующий о нештатной работе источника данных.

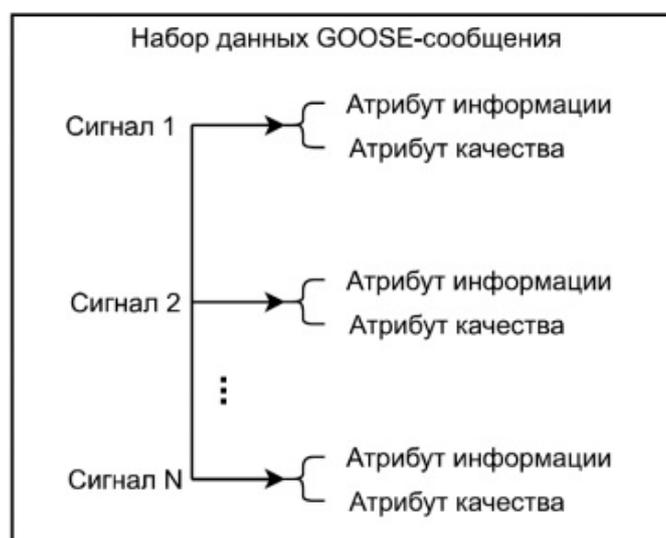


Рис. 3. Формирование набора данных для GOOSE-сообщения

В рамках одного GOOSE-сообщения может отправляться набор данных, который, в свою очередь, может состоять из одного или нескольких наборов, но устройство-получатель будет выбирать только те наборы, что необходимы ему. Передача GOOSE-сообщения осуществляется в режиме Multicast. Для адресации кадров используется MAC-адреса физических устройств.

Особенностью данной архитектуры является применение преобразователей дискретных сигналов, для реализации которых применяется специальных шкаф, ШПДС.[2]

По данной архитектуре была построена подстанция 110/10/10 кВ «Развитие» в Рязанской области для обеспечения электрической энергией промышленного (промышленного) парка «Рязанский».



Рис. 4. Общеподстанционный пункт управления цифровой подстанцией «Развитие» 110/10/10 кВ

### Архитектура III

Архитектура III - архитектура, в которой обмен информацией между интеллектуальными электронными устройствами выполняется с помощью объектно-ориентированных сообщений используя протокол GOOSE, информационный обмен между SCADA и ИЭУ осуществляется с помощью протокола MMS, а значения токов и напряжений передаются в цифровом виде с использованием протокола SV, который помогает передавать значения мгновенно [1].

Архитектура III также, как и II использует протокол MMS для интеграции релейной защиты и автоматики в единую систему АСУ ТП, а также использует GOOSE-сообщение для быстрого обмена информацией между устройствами защиты и автоматики со шкафом преобразователей дискретных сигналов. Особенностью данной архитектуры является использование протокола SV (рисунок 5), который используется для передачи данных с цифровых трансформаторов тока и напряжения.

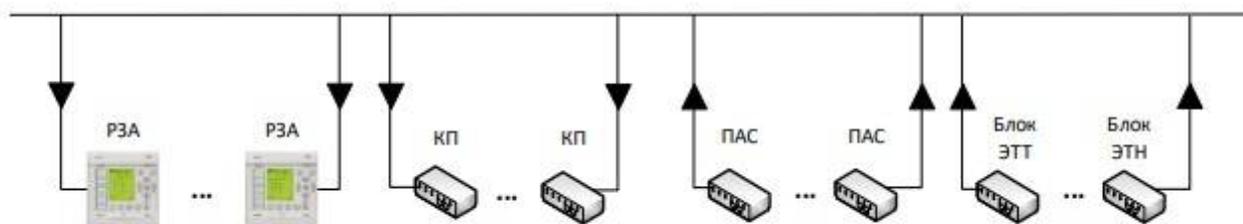


Рис. 5. Мгновенная передача сообщений по протоколу SV

Информация с блоков цифровых трансформаторов тока и напряжения напрямую передается контроллерам присоединения и устройствам релейной защиты и автоматики.

В случае использования цифровых (волоконно-оптических) трансформаторов тока (рисунок 6) изменяется методика выбора номинальных параметров. В ячейках вводных присоединений 6-35 кВ используют преобразователь аналоговых сигналов, подключаемые к электромагнитным трансформаторам тока.

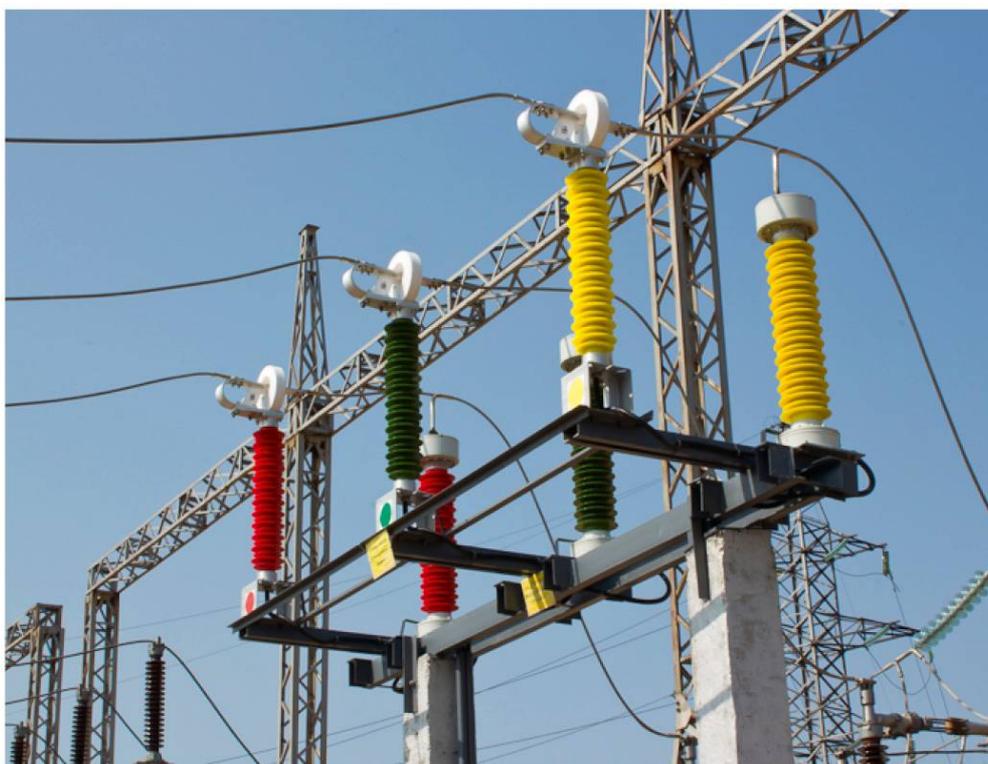


Рис. 6. Комплект ВОПТН на подстанции «Магистральная» 220 кВ [3]

Схема цифрового трансформатора тока содержит чувствительный элемент в виде нескольких витков оптоволокну, помещенных в жесткую защитную оболочку из немагнитного материала. С их помощью можно повысить точность измерения первичного тока и напряжения, создания взрывобезопасных измерительных схем, полноценно заменить существующие трансформаторы тока и напряжения и переход к передаче информации по оптоволокну.[4]

Потоки данных по протоколу SV формируются на основе мгновенных значений напряжения и тока, а также и других сигналов, если необходима передача с большой частотой дискретизации за период промышленной частоты:

- 1) 96 выборок; также передается кадр, содержащий 2 последовательные выборки.
- 2) 288 выборок. также передается кадр, содержащий 6 последовательных выборок.

В качестве сервисной информации, передаваемой в кадре данных используются: атрибут качества сигнала, показывающий присутствие нештатной работы источника информации, а также перевод в прочие ненормальные режимы и информация о нахождении измерений в пределах, допустимых заданным классом точности. Протокол SV, также как и GOOSE, использует рассылку Multicast. По аналогии используются MAC-адреса. Для получения сообщения необходима соответствующая подписка.

### Сравнительный анализ архитектур

В таблице 1 приведены основные параметры рассмотренных архитектур.

Таблица 1. Сравнение архитектур.

Параметр	Архитектура I	Архитектура II	Архитектура III
Протокол MMS	+	+	+
Протокол GOOSE	-	+	+
Протокол SV	-	-	+
Использование ШПДС	-	+	+
Использование ШПАС	-	-	+
Рассылка Multicast	-	+	+
Использование ЦТТ и ЦТН	-	-	+
Оборудование станционного уровня	+	+	+
Оборудование уровня присоединения	+	+	+
Оборудование полевого уровня	-	+	+

На всех архитектурах применяется оборудование станционного уровня, которое обязательно должно поддерживать профиль МЭК 61850. То же требование выполняется и на оборудовании уровня присоединения. Оборудование полевого уровня используется только в архитектуре II и архитектуре III.

В заключение стоит отметить, что наиболее бюджетным вариантом исполнения цифровой подстанции является проектирование цифровых подстанций по I архитектуре. В этом случае используется минимум сетевого оборудования, а вторичные цепи привычны персоналу в обслуживании. Однако большое количество вторичных соединений и низкий уровень автоматизации являются существенными недостатками.

Наиболее дорогой в строительстве и обслуживании является III архитектура, в том числе из-за применения большого количества современных цифровых устройств, сетевого оборудования, цифровых трансформаторов тока и напряжения. К достоинствам этой архитектуры можно отнести исключение кабельных связей практически на 80%, снижение нагрузки на трансформаторы тока и отсутствие проблемы их насыщения.

Оптимальным решением, на данный момент, является строительство подстанций по II архитектуре. Несмотря на необходимость установки шкафов преобразователей дискретных сигналов и увеличения количества коммутаторов, на подстанции сокращаются вторичные цепи, значительно повышается уровень автоматизации и надежности.

**Библиографический список:**

1. Корпоративный профиль ПАО «ФСК ЕЭС» МЭК 61850. [Электронный ресурс] [https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO\\_56947007-25.040.30.309-2020.pdf](https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-25.040.30.309-2020.pdf) (дата обращения 31.01.2023)
2. СТАНДАРТ МЭК 61850. Протокол GOOSE. [Электронный ресурс] [http://www.news.elteh.ru/arh/2012/78/07.php#:~:text=Протокол GOOSE, описанный главой МЭК,-ориентированное событие на подстанции». \(дата обращения 01.02.2023\)](http://www.news.elteh.ru/arh/2012/78/07.php#:~:text=Протокол%20GOOSE,%20описанный%20главой%20МЭК,-ориентированное%20событие%20на%20подстанции.)
3. А. Головин, А. Аношин. Насколько счётчик ARIS EM цифровой? [Электронный ресурс] <https://www.cta.ru/articles/otrasli/energetika/124632/> (дата обращения 01.02.2023)
4. ЦИФРОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ. [Электронный ресурс] [https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/37188/Cifrovye\\_transformatory\\_toka\\_i\\_napryazheniya.pdf;jsessionid=AAA07F9B3A6B2A9155FB543759980A39?sequence=1](https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/37188/Cifrovye_transformatory_toka_i_napryazheniya.pdf;jsessionid=AAA07F9B3A6B2A9155FB543759980A39?sequence=1) (дата обращения 01.02.2023).

УДК 621.387.33; ГРНТИ 47.29.33

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ГАЗОРАЗРЯДНОГО  
ПРЕРЫВАТЕЛЯ ТОКА С СЕТОЧНЫМ УЗЛОМ  
С ЩЕЛЕВОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ**

**С.А. Круглов, А.А. Сerezhin, Д.С. Кусакин**

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

*Аннотация.* В работе представлены результаты исследования специализированного газоразрядного прерывателя тока с сеточным узлом с щелевой конфигурацией. Определены основные параметры нового прибора.

*Ключевые слова:* газоразрядный прерыватель тока, индуктивный накопитель энергии, критический заряд, ток обрыва, время обрыва, время выключения.

**INVESTIGATION OF A SPECIALIZED GAS-DISCHARGE CURRENT BREAKER  
WITH A GRID UNIT WITH A SLOT CONFIGURATION**

**S.A. Kruglov, A.A. Serezhin, D.S. Kusakin**

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

*The summary.* The paper presents the results of a study of a specialized gas-discharge current interrupter with a grid node with a slotted configuration. The main parameters of the new device are determined.

*Keywords:* gas discharge current interrupter, inductive energy storage, critical charge, break current, break time, turn off time.

Газоразрядные прерыватели тока низкого давления тиратронного типа позволяют осуществлять коммутацию тока, при этом не требуют дополнительных коммутирующих устройств [1]. Генераторы на их основе способны формировать импульсы напряжением несколько сотен киловольт при токах единицы килоампер. Недостатками использования данных прерывателей в режиме обрыва тока является наличие временной нестабильности в момент обрыва тока, нагрев прибора, ограниченная пропускная способность по току, значительное время выключения. Экспериментальные исследования проводились на макете генератора высоковольтных импульсов с индуктивным накопителем энергии, собранного по схеме, показанной на рисунке 1.

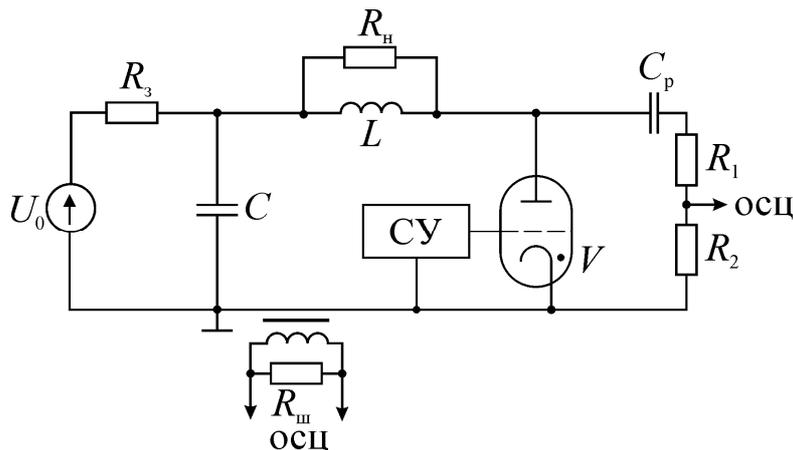


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Входной конденсатор  $C$  заряжается в период между импульсами до напряжения  $U_0$  через сопротивление  $R_3$ . При подаче отпирающего импульса со схемы управления СУ на сетку газоразрядного прерывателя  $V$ , прибор открывается, ток через него обеспечивает накопление энергии в индуктивности. Через некоторое время ток в прерывателе обрывается. Энергия, накопленная в индуктивности, передается в нагрузку. В результате на нагрузке формируется импульс напряжения большой мощности [2,3].

### Описание сеточного узла с щелевой конфигурацией отверстий

Конструкция сеточного узла с щелевой конфигурацией отверстий представлена на рисунке 2.

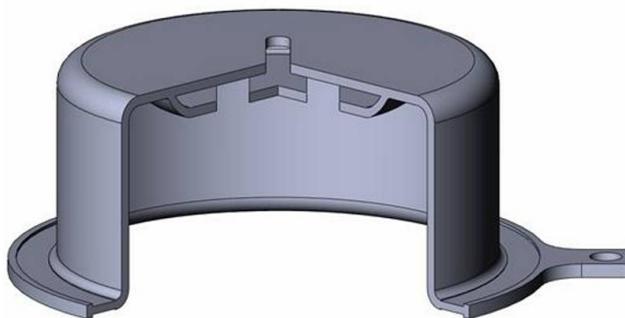


Рис. 2. Конструкция сеточного узла опытного прерывателя тока с щелевой конфигурацией отверстий

Отверстия в сетке и экране выполнены в виде прямых прорезей (расстояние между центрами полных скруглений). В сетке и экране выполнены отверстия в виде прямой прорези. Ширина прорези в сетке меньше ширины прорезей в экране. Площадь каждого отверстия в экране превышает площадь сеточного отверстия. Площадь отверстия в сетке меньше, чем совокупная площадь отверстий сетки тиратрона. Величина перекрытия отверстий экрана и сетки аналогична классическому тиратрону. В результате после прохождения отверстий экрана сетки площадь сечения разрядного канала снижается и достигает минимума в отверстии сетки.

В представленной конструкции сеточного узла обрыв тока происходит в наиболее узкой части разрядного канала. Сосредоточение процесса обрыва тока вблизи анода приводит к уменьшению количества заряженных частиц в остаточной плазме, находящейся в анодно-сеточной части коммутатора, которое приводит к снижению времени выключения. В

результате ограничения места обрыва тока сечением одного отверстия, снижается величина временной нестабильности момента обрыва тока благодаря уменьшению количества возможных путей горения разряда в области обрыва.

Такая особенность конструкции позволяет снизить рабочее давление в приборе, что приводит к уменьшению критического заряда. Как следствие, уменьшается время протекания тока через него, и уменьшаются потери на проводимость, при этом возрастает коэффициент полезного действия. Снижение рабочего давления также позволяет уменьшить время выключения за счет уменьшения концентрации носителей в остаточной плазме.

### Исследование сеточного узла с щелевой конфигурацией отверстий

В результате проведения исследований с описанным выше сеточным узлом, были установлены следующие рабочие характеристики прибора.

Зависимости критического заряда от давления водорода при различных напряжениях источника питания (рисунок 3) показали, что диапазон рабочих давлений, при которых наблюдался обрыв тока при изменении критического заряда с 0,5 мкКл до 2 мкКл, составляет приблизительно 10 Па с 9 до 19 Па.

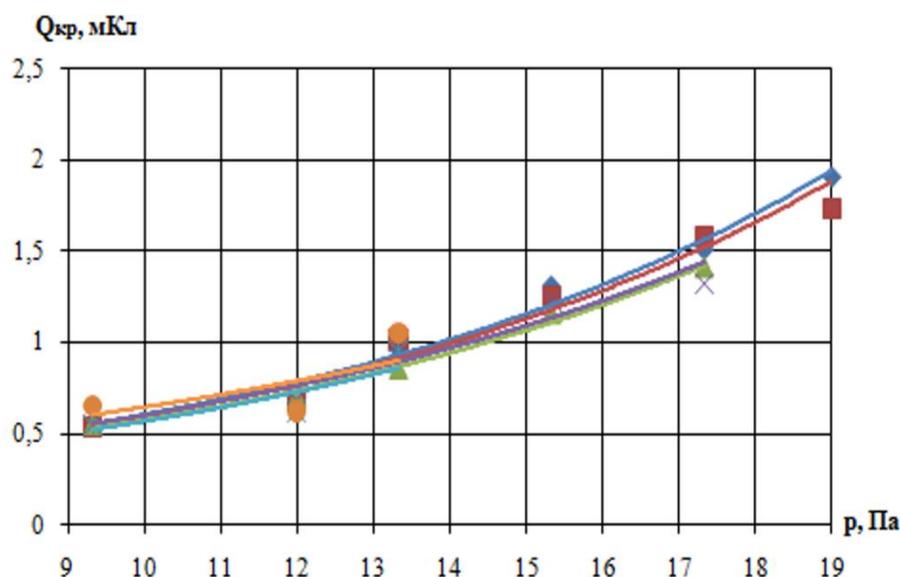


Рис. 3. Зависимости критического заряда от давления водорода при напряжениях источника питания 950 В, 1220 В, 1670 В, 2130 В, 2600 В, 3100 В при параметрах:  $L = 23$  мкГн,  $R_n = 95$  Ом

Зависимости критического заряда от тока обрыва (рисунок 4) показали, что при диапазоне токов от 150 до 400 А критический заряд возрастает с 0,7 до 0,9 мкКл. Зависимость критического заряда от тока является причиной слабой нелинейности зависимостей от давления. Возрастание критического заряда в области малых токов обусловлено низкой эффективностью вытеснения газа.

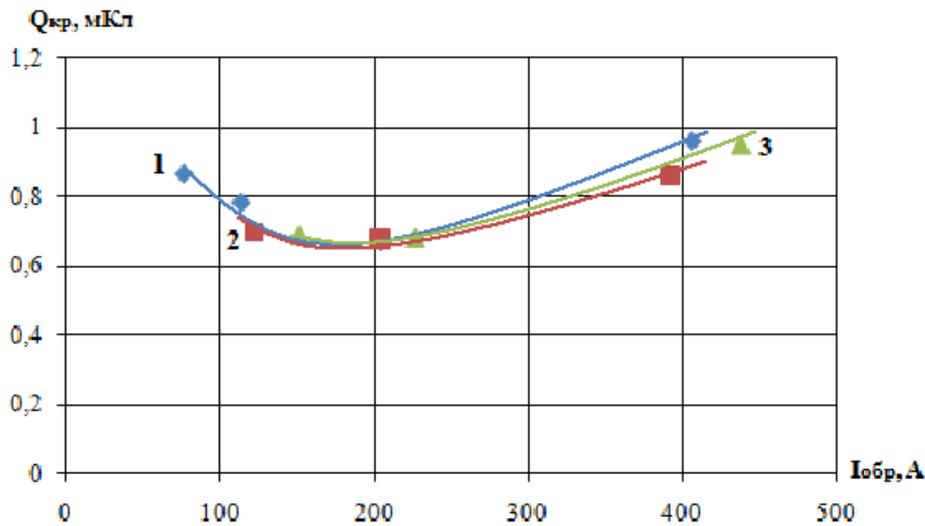


Рис. 4. Зависимости критического заряда от тока обрыва при амплитудах импульса на нагрузке 8 кВ (1), 12 кВ (2), 16 кВ (3), давлении водорода 12 Па и индуктивности накопителя энергии 23 мкГн

Результаты исследования временной нестабильности момента обрыва в зависимости от тока обрыва (рисунок 5) показали, что минимум временной нестабильности наблюдается при токах порядка 200 А и составляет 250-300 нс.

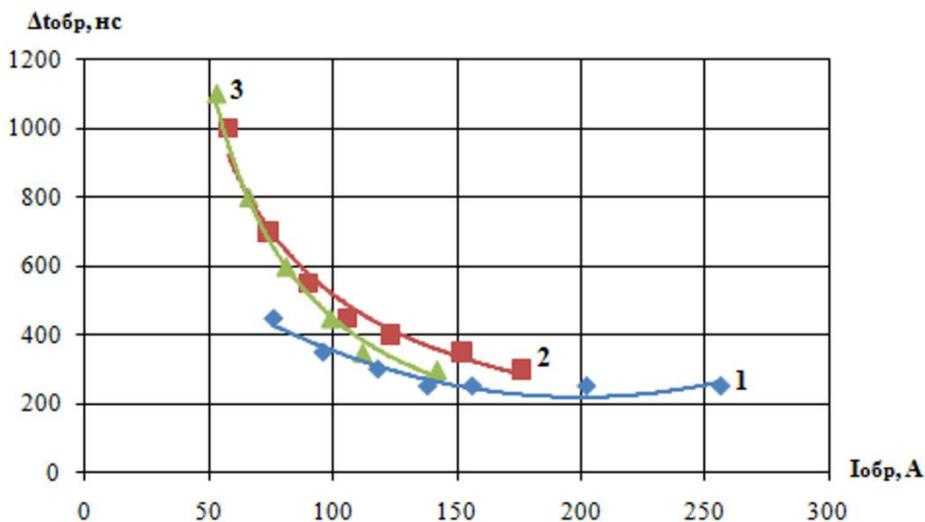


Рис. 5. Зависимости временной нестабильности от тока обрыва в прерывателе с щелевой конфигурацией отверстий сеточного узла при давлении водорода 12 Па и индуктивностях накопителя энергии 23 мкГн (1), 72 мкГн (2), 123 мкГн (3)

Зависимости предельной пиковой мощности импульса на нагрузке от величины индуктивности накопителя при различных сопротивлениях нагрузки (рисунок 6) показали, что экспериментально зафиксированный максимум предельной пиковой мощности импульса на нагрузке составил 14,1 МВт при индуктивности накопителя 23 мкГн, сопротивлении нагрузки 155 Ом и давлении водорода 12 Па. Амплитуда импульса при этом составила 47 кВ при максимальном токе обрыва 425 А.

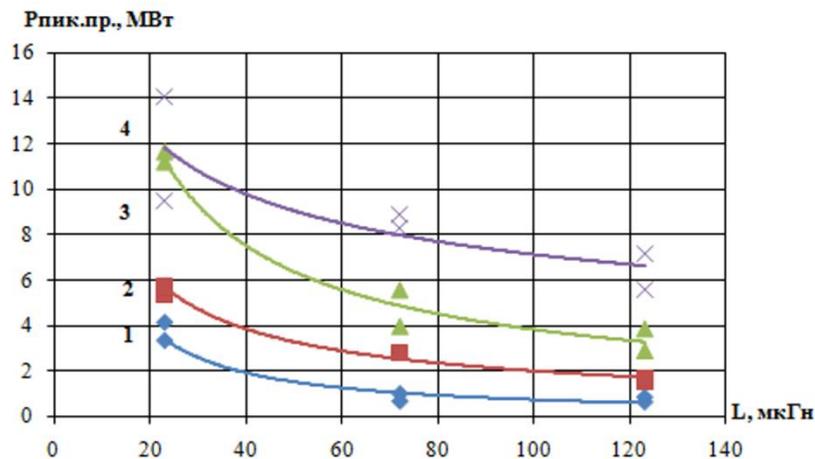


Рис. 6. Зависимости предельной пиковой мощности импульса на нагрузке от индуктивности накопителя при давлении водорода 12 Па и сопротивлениях нагрузки 24 Ом (1), 47 Ом (2), 95 Ом (3), 155 Ом (4)

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSSN-2020-0003).*

### Библиографический список

1. Фогельсон Т. Б., Бреусова Л.Н., Вагин Л.Н. Импульсные водородные тиратроны. -М: Сов. радио, 1974.
2. Верещагин Н.М., Круглов С.А. Водородный тиратрон как размыкатель тока в схеме с индуктивным накопителем энергии // Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии. 2002. №10. С. 71-74
3. Верещагин Н.М., Круглов С.А., Сережин А.А., Шатилов С.Г., Агальцов К.Д., Павлов М.Б. Газоразрядные прерыватели тока низкого давления в генераторе высоковольтных наносекундных импульсов с индуктивным накопителем энергии // ПТЭ. 2017. №6

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ИНФОРМАЦИЯ О VI МЕЖДУНАРОДНОМ ФОРУМЕ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» СТНО-2023».....</b>	<b>3</b>
<b>МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ. РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА».....</b>	<b>6</b>
<b>Секция «МИКРОВОЛНОВАЯ, ОПТИЧЕСКАЯ И КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА».....</b>	<b>6</b>
Морев С.П., Филин Ю.Ю., Коломийцева Н.М., Именина К.С., Кривошей Н.А. Особенности преобразования кольцевого электронного потока в сплошной поток электронной пушкой с низковольтным бессеточным управлением.....	6
Морев С.П., Филин Ю.Ю., Коломийцева Н.М., Комраков П.А., Ачкинадзе А.А. Модернизация магнитной периодической фокусирующей системы, предназначенной для транспортировки электронного потока при высоких значениях параметра магнитного поля.....	10
Будак В.П., Железнов И.И. О решении уравнения переноса излучения в низкотемпературной ртутной плазме.....	14
Самойлов В.С. Исследование радиопоглощающих покрытий из тонких лавсановых пленок.....	19
Буянов Д.С., Мишин В.Ю., Серебряков А.Е. Система сбора данных для контроля состояний конструкций.....	23
Чиркин М.В., Крюков А.Д., Мишин В.Ю., Устинов С.В. Исследование сопротивления положительного столба в кольцевом гелий-неоновом лазере.....	27
Серебряков А.Е., Тепцов Д.Б., Витязев С.В. Модернизация алгоритма реверсивного счета импульсов информационных сигналов кольцевого лазера.....	32
Милованова О.А., Авачева Т.Г., Тимошкина Ю.М. Микроволновая терапия в стоматологии.....	37
Сикорская И.А., Демшевский В.В. Печатная скрутка на основе интегрированного в подложку волновода.....	43
Корнеев Н.Д., Серебряков А.Е., Кижаяев О.В., Мишин В.Ю. Система регистрации порога захвата лазерного гироскопа.....	46
Котляров Е.Ю., Архипов Д.Ю. Освоение производства ЦЗУ «мм» диапазона длин волн.....	50
Галдецкий А.В. О возможности создания коллектора для ЭВП с алмазным теплоотводом..	54
<b>Секция «ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА».....</b>	<b>59</b>
Попов А.И., Баринев А.Д., Емец В.М., Мирошникова И.Н., Чуканова Т.С. Методы изменения физических свойств аморфных кремний-углеродных пленок при постоянном химическом составе.....	59
Логинов Д.С., Рыбин Н.Б., Холомина Т.А., Шерова И.Ф. Исследование влияния Au-Ru покрытий магнитоуправляемых контактов на параметры спектров низкочастотного шума.....	64

Логинов Д.С. Алгоритмы работы измерительно-аналитического комплекса для исследования НЧ шумов низкоомных объектов.....	70
Гудков Ю.Д., Мишустин В.Г. Развитие методики исследования многослойных барьерных наноструктур при оптическом и электрическом возбуждении.....	76
Линьков В.А., Линькова С.Ю. Цифровые матричные ракетные двигатели для малоразмерных космических аппаратов.....	81
Линьков В.А., Линькова С.Ю. Мультивекторные матричные двигательные системы для бинарных космических аппаратов.....	89
Антонова С.А., Рыбин Н.Б., Рыбина Н.В., Трегулов В.В. Исследование информационно-корреляционных свойств слоев пористого кремния, сформированных методом металл-стимулированного травления.....	98
Трусов Е.П., Ермачихин А.В., Литвинов В.Г. Изучение температурной зависимости перезарядки примесных атомов золота в кремниевой p+-n структуре.....	102
Горячкин Д.Р., Гудзев В.В., Минаева В.С., Литвинов В.Г. Анализ зонной диаграммы НТ-структуры.....	109
Зайцев К.С., Литвинов В.Г. Моделирование I-V и C-V характеристик полупроводниковой туннельно-резонансной гетероструктуры.....	115
Моргунов А.С., Гудзев В.В., Ермачихин А.В. Применение способов обработки зашумленных сигналов при исследовании релаксационных токов в полупроводниковых барьерных структурах.....	120
Рыбина Н.В., Рыбин Н.Б., Степнов В.Д. Методы анализа изображений поверхности с дефектами.....	126
Литвинов В.Г., Литвинова В.С. Оценка шумовых свойств измерительного комплекса токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней.....	130
<b>Секция «ПРОМЫШЛЕННАЯ СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ».....</b>	<b>135</b>
Кудюкин А.И. Эрозия поверхности электродов вакуумного прерывателя.....	135
Захаркин В.В., Сливкин Е.В. Применение методов машинного обучения для контроля обрыва токовых цепей в дифференциальных защитах.....	138
Донских А.А., Тарабрин Д.Ю. Обзор тренажёра для проведения оперативных переключений TWR-12.....	144
Комаров В.В., Сливкин Е.В. Исследование архитектур цифровых подстанций.....	147
Круглов С.А., Сережин А.А., Кусакин Д.С. Исследование специализированного газоразрядного прерывателя тока с сеточным узлом с целевой конфигурацией.....	153

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ****Научное издание****В 10 томах****Том 2**

Под общей редакцией О.В. Миловзорова.

Подписано в печать 15.06.23. Формат 60x84 1/8.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л. .

Тираж 100 экз. Заказ №.

ISBN 978-5-7722-0375-0



9 785772 203750

Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Редакционно-издательский центр РГРТУ,  
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.