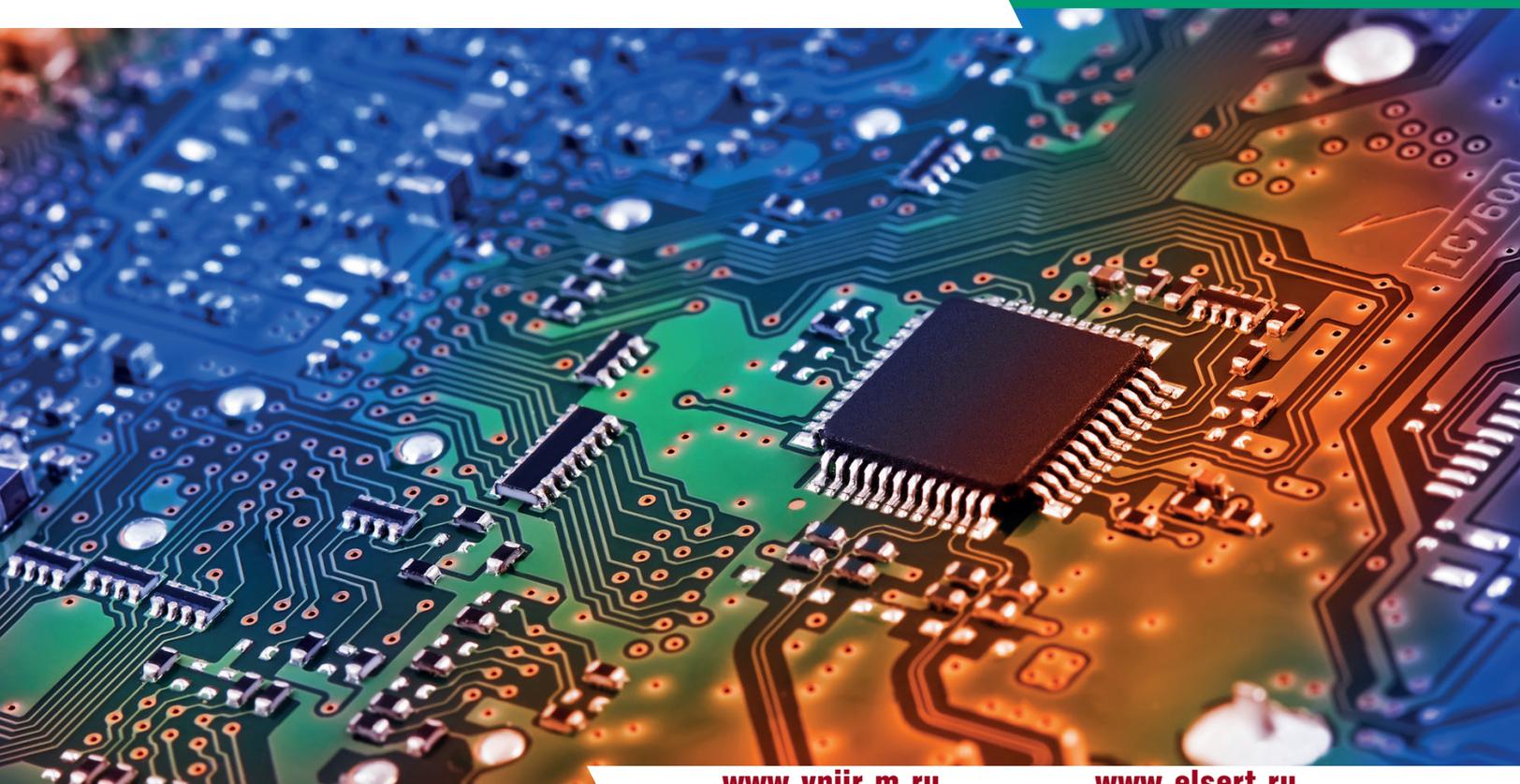


4⁽¹²⁾ | РАДИОЭЛЕКТРОННАЯ ОТРАСЛЬ: 2023 | ПРОБЛЕМЫ И ИХ РЕШЕНИЯ



www.vniir-m.ru

www.elsert.ru

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ, МЕТРОЛОГИЯ
РАЗРАБОТКА, ПРОИЗВОДСТВО, ИСПЫТАНИЯ
КАЧЕСТВО И НАДЁЖНОСТЬ



Автономная некоммерческая организация
«Центр сертификации, обучения и
консалтинга «Электронсертифика»
АНО «Электронсертифика»

**СЕРТИФИКАЦИЯ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА
ПРЕДПРИЯТИЙ И ОРГАНИЗАЦИЙ РАЗРАБОТЧИКОВ,
ИЗГОТОВИТЕЛЕЙ И ПОСТАВЩИКОВ ЭКБ и РЭА**

**ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ
ОБРАЗОВАНИЕ СПЕЦИАЛИСТОВ**

по направлениям подготовки:

- Система менеджмента качества. Требования;
- Подготовка экспертов по сертификации СМК и квалификации поставщиков ЭКБ;
- Внутренний аудит системы менеджмента качества предприятий и организаций;
- Задачи и функции поставщиков при осуществлении процессов закупки ЭКБ, ее идентификации, испытаний, хранения и поставки;
- Входной контроль ЭКБ. Методы обнаружения контрафакта. Рекламационная работа;
- Организация функционирования испытательных лабораторий (центров);
- Метрологическое обеспечение разработки, производства и испытаний ЭКБ и РЭА.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УСЛУГИ:

- Системы менеджмента качества предприятий и организаций;
- Технология проведения испытаний ЭКБ в испытательных лабораториях (центрах);
- Метрологическое обеспечение разработки, производства и испытаний ЭКБ и РЭА;
- Применение ЭКБ отечественного и иностранного производства.



141008, Московская область,
г. Мытищи, ул. Матросова, д. 8,
2-й этаж, офис 9 и 19
+7 (495) 055-05-99
e-mail: elsert@bk.ru
сайт: elsert.ru

РО ПИР 4(12)/2023 (Основан в 2021 году)

Зарегистрирован в федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-83479 от 15 июня 2022 г. Материалы журнала размещаются на сайте научной электронной библиотеки и включаются в национальную информационно-аналитическую систему РИНЦ.

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

В.В. Шпак, кандидат экономических наук
Г.Я. Красников, Президент РАН
И.С. Иванов, генеральный директор ФГБУ «ВНИИР»
С.И. Боков, доктор экономических наук
А.В. Брыкин, доктор экономических наук
В.Л. Гладышевский, доктор экономических наук
Н.В. Завьялов, член-корреспондент РАН
В.М. Исаев, доктор технических наук
А.С. Сигов, академик РАН
В.Б. Стешенко, кандидат технических наук
А.А. Рахманов, доктор технических наук
В.А. Телец, доктор технических наук
А.В. Трусов, доктор технических наук

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

О.Ю. Булгаков, заслуженный работник связи РФ,
кандидат военных наук

Заместитель главного редактора:

С.Б. Подъяпольский, кандидат технических наук

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

А.С. Афанасьев, кандидат технических наук
В.В. Быканов, кандидат технических наук
Л.П. Дюжакова, заместитель ГД ФГБУ «ВНИИР»
П.С. Желтухин, доктор технических наук
И.Н. Кабанов, доктор технических наук
Р.Г. Левин, кандидат физико-математических наук
С.С. Миросердов, кандидат технических наук
Д.В. Орехов, кандидат экономических наук
А.Г. Подольский, доктор экономических наук
Ю.В. Рубцов, генеральный директор АО «ЦКБ «Дейтон»
Д.А. Руденко, кандидат военных наук
В.А. Трусов, доктор технических наук
Л.А. Фёдорова, академик Академии проблем качества
В.Н. Храменков, доктор технических наук
В.А. Цветкова, доктор технических наук

РЕДАКЦИЯ:

В.В. Малышева, графический дизайнер
В.А. Сахаров, редактор-корректор
Ю.А. Зайцева, редактор-корректор
О.Е. Николаева, редактор-корректор

Адрес редакции: Колпакова ул., д. 2а,
г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141002
Тел/факс: +7 (495) 586-17-21 / +7 (495) 588-69-61

Отпечатано:

Юридический адрес: Колпакова ул., д. 2а,
г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141002
Тел/факс: +7 (495) 586-17-21 / +7 (495) 588-69-61

Сдано в набор 01.12.2023 г.

Подписано к печати 15.12.2023 г.

Тираж 350 экз.

Редакция не несёт ответственности за содержание авторских материалов и достоверности сведений в рекламе.

Фотография на обложке – открытый источник сети Интернет.

Совместное учреждение и издание федерального государственного бюджетного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт радиоэлектроники» (ФГБУ «ВНИИР») и автономной некоммерческой организации «Центр сертификации, обучения и консалтинга «Электронсертифика» (АНО «Электронсертифика»). Журнал выпускается при содействии Департамента радиоэлектронной промышленности Минпромторга РФ и Российского технологического университета – МИРЭА.

СОДЕРЖАНИЕ**СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ, МЕТРОЛОГИЯ****Выставка «Электроника России»**

Подъяпольский С.Б., Булгаков О.Ю.
Круглый стол «Стандартизация, метрология и сертификация – инструменты реализации государственной политики развития радиоэлектронной отрасли в современных условиях»,
29.11.2023 года 2

Зажигалкин А.В., Булгаков О.Ю., Подъяпольский С.Б.
О некоторых подходах к вопросу стандартизации автоэлектроники отечественного производства для автомобильной промышленности 4

Быканов В.В., Есакова М.М., Тупицина А.В., Кремнева А.В.
Роль и место метрологического обеспечения в повышении качества и эффективности в современных экономических условиях 9

РАЗРАБОТКА, ПРОИЗВОДСТВО, ИСПЫТАНИЯ

Голубков В.А., Мельников С.Ю., Федоренко А.Г., Зотов Н.А.
Диагностика дефектов трубчатых керамических конденсаторов 14

Мещанов В.П., Саяпин К.А., Семенчук В.В.
Синтез многоэлементных фиксированных фазовращателей в микрополосковом исполнении 17

Гагарина А.Ю., Кукушкина О.В., Сашин Д.И., Смирнова Т.Н.
Исследование зависимости разрядных характеристик положительного окисноникелевого электрода от способа внесения активной массы в пористую основу электрода 20

КАЧЕСТВО И НАДЁЖНОСТЬ

Богатырёв Ю.В., Огородников Д.А., Божаткин В.А., Зайцев В.Б.,
Воздействие ионизирующего излучения на параметры микросхемы стабилизатора напряжения отрицательной полярности 25

Амеличев В.В., Кадочкин А.С., Генералов С.С., Горелов Д.В.
Исследование влияния конструктивных факторов логических элементов на их функционирование для перспективных интегральных оптических микросистем 29

Бондаренко А.С., Аскерко А.Н.
Применение сканирующей электронной микроскопии в задачах анализа отказов полупроводниковых приборов 35

**Выставка электронной продукции российского производства
«ЭЛЕКТРОНИКА РОССИИ»
Круглый стол ФГБУ «ВНИИР»
«СТАНДАРТИЗАЦИЯ, МЕТРОЛОГИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ –
ИНСТРУМЕНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПОЛИТИКИ РАЗВИТИЯ
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ОТРАСЛИ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ»
г. Москва, 29 ноября 2023 года**

29 ноября 2023 года в рамках деловой программы выставки «ЭЛЕКТРОНИКА РОССИИ» ФГБУ «ВНИИР» с участием Ассоциации «Консорциум «Базис» был организован и проведен Круглый стол по теме «СТАНДАРТИЗАЦИЯ, МЕТРОЛОГИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ – ИНСТРУМЕНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПОЛИТИКИ РАЗВИТИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ОТРАСЛИ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ».



В работе круглого стола приняли участие представители ФГБУ «Российский институт стандартизации», Ассоциации «Консорциум предприятий в сфере автомобильных электронных приборов и телематики», ФГАОУ ДПО «Академия стандартизации, метрологии и сертификации», АО «РНИИ «Электронстандарт», представители технических комитетов по стандартизации, 42 представителя (руководители и специалисты) от более, чем 20 организаций, разработчиков и изготовителей радиоэлектронной продукции.

С вступительным словом выступил доктор экономических наук **Зажигалкин Александр Владимирович**, ректор ФГАОУ ДПО «Академия стандартизации, метрологии и сертификации», отметив, что в основе государственной политики Российской Федерации в области развития электронной и радиоэлектронной промышленности на период



до 2030 года и дальнейшую перспективу, электронная и радиоэлектронная промышленность является отраслью экономики, связанной с разработкой и производством электронной и радиоэлектронной аппаратуры, программно-аппаратных комплексов и систем на основе такой аппаратуры, электронных и радиоэлектронных модулей, электронных и радиоэлектронных компонентов и встраиваемого программного обеспечения (далее – электронная продукция), разработкой и производством технологического, вспомогательного, измерительного и испытательного оборудования, комплектующих изделий и расходных материалов, специальных и особо чистых материалов, газов и веществ, специального прикладного и инструментального программного обеспечения, необходимых для производства электронной и радиоэлектронной аппаратуры, электронных радиоэлектронных компонентов и модулей, а также развитием соответствующих технологий. Одними из основных обеспечивающих направлений в реализации этой деятельности является стандартизация, метрология и сертификации.



С докладами, проиллюстрированными слайдами, выступили:

- кандидат технических наук **Алексеев Виктор Валентинович**, заместитель директора НИЦ ФГБУ «ВНИИР»;
- кандидат физико-математических наук **Левин Роман Григорьевич**, генеральный директор АО «РНИИ «Электронстандарт»;
- кандидат технических наук **Гусев Станислав Валентинович**, начальник центра разработки и внедрения перспективных технологий ФГУП «ВНИИФТРИ»;
- кандидат технических наук **Быканов Владимир Васильевич**, ведущий научный сотрудник отдела метрологии ФГБУ «ВНИИР»;
- **Невский Артем Александрович**, и. о. директора информационно-технического центра ФГБУ «ВНИИР».

Доклады содержали анализ состояния, формирования методических подходов и выработку предложений по совершенствованию элементов инструментальной базы по реализации государственной политики развития радиоэлектронной отрасли в современных условиях, включая:

- анализ современных тенденций в приоритетных перспективных направлениях развития радиоэлектроники, электронной компонентной базы и технологий их создания;
- подход и задачи по формированию отраслевой стандартизации в рамках обеспечения решения задач, поставленных в нормативных и правовых документах по развитию отрасли и совершенствованию системы стандартизации;

- метрологическое обеспечение в области оценки соответствия при создании и применении электронной компонентной базы общепромышленного и двойного назначения, выработка подходов по выполнению метрологических требований на предприятиях отрасли;

- методология решения задачи по применению отечественной электронной компонентной базы в радиоэлектронной продукции с использованием механизмов нормативно – правового регулирования и формирования информационных ресурсов на основе работ в области оценки качества, сертификации систем менеджмента качества с дальнейшим использованием формата маркировки.

Выводы и предложения, сформулированные в докладах, были одобрены участниками круглого стола, и содержат следующие системные задачи:

1. Сформировать в рамках Совета отрасли (в статусе рабочей группы Совета) Отраслевой совет по стандартизации электронной и радиоэлектронной промышленности для взаимодействия с Росстандартом, ФГБУ «РСТ», техническими комитетами (ТК) по стандартизации, концернами и консорциумами с целью проведения системных работ по инвентаризации и актуализации фондов документов по стандартизации, программному планированию с обеспечением взаимосвязи работ по разработке стандартов в области требований к новой продукции, материалам, технологиям их создания, оборудованию, подтверждения и обеспечения качества, а также системы стандартов с требованиями доверенной ЭКБ и ЭКБ для автоэлектроники;

2. Разработать комплекс онтологических документов по стандартизации, ориентированных на цифровизацию



- и устанавливающих требования к представлению данных в части атрибутов (свойств объектов) по классификации и техническим характеристикам;

3. Провести исследования и разработку предложений по взаимоувязке и максимально возможной унификации требований к электронной продукции, технологиям и материалам, а также процедурам планирования, разработки, применения и отмены документов по стандартизации в системах стандартизации гражданской и оборонной продукции.

4. Организовать работы по подготовке кадров в области стандартизации со знаниями и опытом работы в радиоэлектронной отрасли, для чего необходимо, совместно с организациями высшей школы, обучающими организациями, Росстандартом сформировать систему подготовки кадров со специализацией «стандартизация в области радиоэлектроники»;

5. Признать необходимость актуализации фонда документов отраслевого уровня в части ЭКБ, ссылки на которые приведены в конструкторской и технологической документации. Участники мероприятия подтвердили заинтересованность в разработке концепции метрологического обеспечения комплекса работ по разработке, изготовлению и испытаниям перспективных изделий микроэлектроники с реализацией ее основных положений путем разработки среднесрочных программ разработки государственных стандартов и специализированных средств измерений и эталонов.

6. В рамках содействия импортозамещению и расширению применения ЭКБ отечественного производства в электронной и радиоэлектронной продукции общепромышленного назначения целесообразно продолжить проработку и реализацию концепции создания Комплексной системы обеспечения качества ЭКБ с разработкой и внедрением методического аппарата мониторинга, анализа и оценки качества ЭКБ, единой системы сертификации производств и аттестации технологических процессов с применением системы маркировки и прослеживаемости ЭКБ, поставляемой на регулируемый рынок.

Завершая работу Круглого стола **Александр Владимирович Зажигалкин** отметил полезность проведенного мероприятия и выразил мнение, что необходимо чаще проводить подобный обмен опытом и мнениями по вопросам стандартизации гражданской электронной продукции.

**О НЕКОТОРЫХ ПОДХОДАХ К ВОПРОСУ СТАНДАРТИЗАЦИИ АВТОЭЛЕКТРОНИКИ ОТЕЧЕСТВЕННОГО
ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**ABOUT SOME APPROACHES TO THE ISSUE OF STANDARDIZATION OF AUTOMOTIVE ELECTRONICS OF DOMESTIC
PRODUCTION FOR THE AUTOMOTIVE INDUSTRY**

Зажигалкин А.В., д. э. н., **Булгаков О.Ю.**, к. воен. н., **Подъяпольский С.Б.**, к. т. н.,
ФГБУ «ВНИИР»; +7 985-725-73-68, psb@vniir-m.ru

Zazhigalkin A.V., Doctor of Economics, **Bulgakov O.Yu.**, Ph.D. of military sciences, **Podyapolsky S.B.**,
Candidate of Technical Sciences, S.N.S., FSBI “VNIIR”; +7 985-725-73-68, psb@vniir-m.ru

Аннотация. В представленном материале раскрываются проблемные вопросы необходимости разработки отсутствующих актуализированных комплексов национальных стандартов, на основании которых должна функционировать и развиваться отечественная автоэлектроника. Определены направления для достижения целей стандартизации автоэлектроники. Достижение указанных целей и целевых значений показателей развития автоэлектроники будет обеспечено за счет комплексного решения задач по ключевым направлениям развития национальных стандартов. Показаны пути достижения целей по переводу иностранных стандартов и их адаптации, переработки в виде национальных стандартов, а также методы, способы организации и проведения подтверждения соответствия установленным техническим требованиям ЭКБ для автоэлектроники на базе существующих испытательных лабораторий (центров).

Annotation. The presented material reveals the problematic issues of the need for the development of missing updated sets of national standards, on the basis of which the domestic automotive electronics should function and develop. The directions for achieving the goals of standardization of automotive electronics are determined. The achievement of this goal and the target values of the indicators of the development of automotive electronics will be ensured through a comprehensive solution of tasks in key areas of the development of national standards. The ways of achieving the goals of translation of foreign standards and their adaptation, processing in the form of national standards, as well as methods, methods of organizing and conducting confirmation of compliance with the established technical requirements of ECB for automotive electronics, on the basis of existing testing laboratories (centers) are shown.

Ключевые слова: автоэлектроника, автомобильная электроника, электронные системы и устройства в автомобильной технике, стандарты для автомобильной электроники.

Keywords: automotive electronics, automotive electronics, electronic systems and devices in automotive technology, standards for automotive electronics.

Введение

Автоэлектроника в разработке и производстве автомобильной техники и системах на сегодняшний день во многом определяет их функциональные возможности и сервисные характеристики. Автоэлектроника объединяет различные электронные системы и устройства, используемые в автомобильной технике. Это различного рода системы, включающие в себя от устройств зажигания до сложных систем управления, обеспечения безопасности, диагностики, навигации и других. Автоэлектроника играет ключевую роль в обеспечении безопасности, комфорта и эффективности эксплуатации, вождения.

Активное применение на автомобилях электроники началось в 30-х годах прошлого века и в современных условиях её основная база, основанная на современных технологиях производства электронной компонентной базы, значительно претерпела изменения.

Первыми полупроводниковыми приборами, нашедшими применение в автомобильной технике, были кремниевые диоды, используемые в качестве выпрямителей напряжения генераторов переменного тока (60-е годы).



Зажигалкин А.В.



Булгаков О.Ю.



Подъяпольский С.Б.

Затем транзистор нашел свое самое широкое распространение сначала в транзисторных ключах (регуляторах напряжения, коммутаторах систем зажигания), а затем и в других электронных устройствах. Это дало значительное улучшение параметров и надежности автомобиля.

Интегральные микросхемы на полупроводниковых элементах совершили революцию в автомобилестроении, особенно в управлении автомобильными агрегатами и автомобилем в целом. Сейчас нигде в мире не выпускается ни одного автомобиля без электронных приборов. Основные из них – регуляторы напряжения, устройства управле-

ния трансмиссией, впрыском топлива, тормозной системой, рулевым управлением, подвеской, бортовыми системами контроля на базе электронных блоков управления.

Усовершенствованные автомобили содержат до 100 ECU (Electronic Control Unit) модулей с датчиками, а простейшие автомобили – от 30 до 50 модулей. Эти модули устанавливаются вблизи от двигателя, в корпусе, дверях, приборной панели, в потолке и сиденьях салона, в багажнике. Данные устройства управляют электронными и электрическими системами автомобиля, контролируя все его основные функции и части.

При наличии более одного миллиарда транспортных средств на дорогах мира использование передовых стандартов в автомобильной промышленности, а особенно в таких сферах, как безопасность и воздействие на окружающую среду, становится весьма актуальным. Наиболее известными организациями по стандартизации для автомобильных применений являются ISO (International Organization for Standardization), IEC (International Electrotechnical Commission), SAE (Society of Automotive Engineers) International и AEC (Automotive Electronics Council).

Развитие автомобильной электроники на основе применения отечественной электронной компонентной базы (далее – ЭКБ) предполагает решение комплекса научно-технических задач с включением вопросов стандартизации, проектированием, производством и эксплуатацией автомобильных электронных систем.

Основная часть

В настоящее время в мировом сообществе тема, связанная с ролью стандартизации, ее влиянием на экономическое развитие, а также с оценкой эффективности деятельности в сфере стандартизации, достаточно актуальна.

Это обусловлено тем, что стандартизацию напрямую связывают с научно-техническим прогрессом. Экономические выгоды от стандартизации огромны – как в рамках отдельных предприятий, так и в государственном масштабе.

Цели международной стандартизации:

- сближение уровня качества продукции, изготавливаемой в различных странах;
- обеспечение взаимозаменяемости элементов сложной продукции;
- содействие международной торговле;
- содействие взаимному обмену научно-технической информацией и ускорение научно-технического прогресса.



ISO, как Международная организация по стандартизации, с ее основным стандартом ISO/TS 16949, выпущенным в 2009 г., устанавливает требования к организации и менеджменту качества предприятий, занимающихся проектированием, разработкой,

производством, установкой и обслуживанием продукции автомобильной промышленности. На соответствие данного стандарта сертифицируются предприятия автомобильной промышленности, а не электронные изделия, установленные в их продукции.



В области международной стандартизации работает ряд организаций, наиболее представительной из которых является Международная электротехническая комиссия (International Electrotechnical Commission) (далее – МЭК, IEC).

МЭК – всемирная организация по стандартизации, состоящая из совокупности всех национальных электротехнических комитетов (Национальных комитетов МЭК). Цель МЭК – содействие международному сотрудничеству по всем вопросам, касающимся стандартизации в области электротехники и электроники. С этой целью МЭК издает международные стандарты, технические условия, технические отчеты, спецификации и руководства. Их подготовку проводят технические комитеты. Любой национальный комитет МЭК, заинтересованный в рассматриваемой проблеме, может принять участие в подготовительной работе. Межгосударственные, государственные и негосударственные организации, связанные с МЭК, также принимают участие в этой работе. В целях содействия международной унификации национальные комитеты МЭК должны в максимально возможной степени применять международные стандарты МЭК в своих национальных и региональных стандартах. Любое расхождение стандартов МЭК с соответствующими национальными или региональными стандартами должно быть четко указано в последних.



обеспечения международных стандартов, которые органично сочетаются друг с другом и дополняют друг друга.

Россия представлена и участвует в работе в более, чем 200 технических комитетах МЭК. В том числе в технических комитетах, связанных с разработкой стандартов для обеспечения цифрового производства.



В глобальном масштабе МЭК является одной из трех глобальных организаций (МЭК, ИСО, МСЭ), которые разрабатывают международные стандарты для всего мира. МЭК тесно сотрудничает с ИСО и МСЭ (Международным союзом электросвязи, International Telecommunication Union) для

обеспечения международных стандартов, которые органично сочетаются друг с другом и дополняют друг друга. Организация SAE International, первоначально учрежденная в 1905 г. как Ассоциация автомобильных инженеров (Society of Automotive Engineers – Сообщество автомобильных инженеров), в насто-

ящее время является международной профессиональной ассоциацией и стандартизирующей организацией для автомобильной и аэрокосмической областей, а также в части вооружений [1].

Одним из основных комитетов этой организации – Automotive Electronic Systems Reliability – подготовлен ряд стандартов для автомобильной электроники, в которых особое внимание уделено вопросам надёжности (11 стандартов) и проблемам, связанным с электромагнитной совместимостью EMC (Electromagnetic Compatibility), для которых разработано 28 стандартов.

В 1993 г. несколько ведущих автомобильных фирм США («Крайслер», «Форд» и «Дженерал Моторс») создали организацию AEC (Automotive Electronics Council), которая устанавливает стандарты, определяющие требования к качеству и надёжности электронных компонентов, используемых в автомобильной электронике. Компоненты, соответствующие требованиям этих стандартов, могут использоваться в жёстких условиях автомобильного применения без дополнительного тестирования на компонентном уровне.

Наиболее известные стандарты для автомобильной электроники (см. рис. 1), это стандарты AEC – Qxxx, кото-

рые классифицируются в соответствии с категорией компонентов [2-7]:

AEC – Q100 (Stress Test Qualification for Integrated Circuits) – стандарт для интегральных полупроводниковых схем;

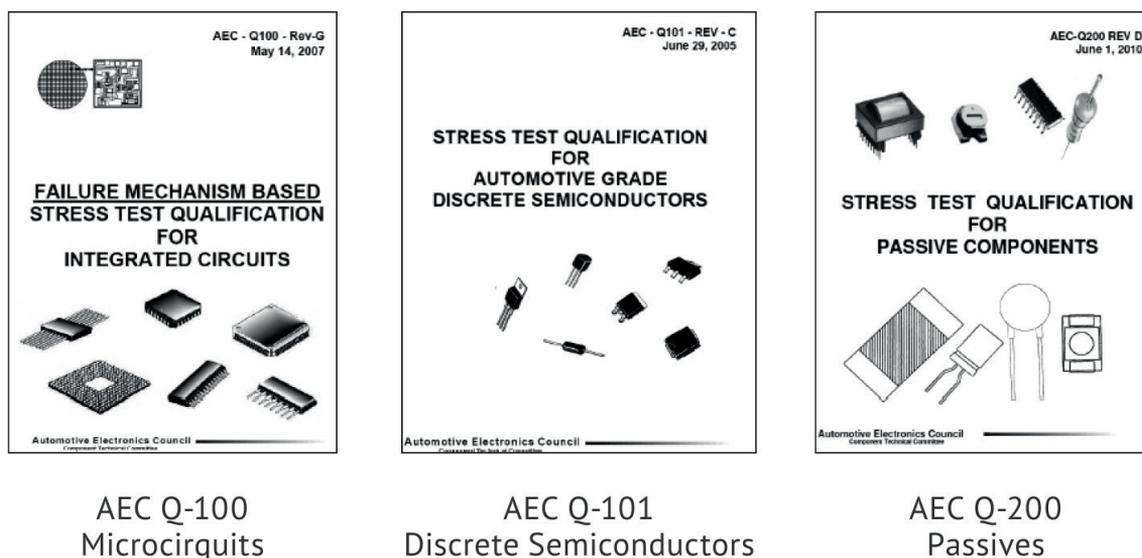
AEC – Q101 (Stress Test Qualification for automotive grade discrete semiconductors) – стандарт для дискретных полупроводниковых компонентов (транзисторы, диоды и т. д.);

AEC – Q102 (Failure mechanism based stress test qualification for optoelectronic semiconductors in automotive applications) – стандарт для оптоэлектронных полупроводниковых приборов;

AEC – Q103 (Failure mechanism based stress test qualification for micro electro-mechanical system (mems) pressure sensor devices) – стандарт для датчиков;

AEC – Q104 (Failure mechanism based stress test qualification for multichip modules (mcm) in automotive applications) – стандарт для многокристальных модулей;

AEC – Q200 (Stress test qualification for passive components) – стандарт для пассивных компонентов (резисторы, конденсаторы, индукторы, ферриты, резонаторы и т. д.).



AEC Q-100
Microcircuits

AEC Q-101
Discrete Semiconductors

AEC Q-200
Passives

Рис. 1. Стандарты для автомобильной электроники ведущих мировых стран



Европейская экономическая комиссия ООН (далее – ЕЭК ООН) – это одна из пяти региональных комиссий Организации Объединенных Наций. Она была учреждена в 1947 году Экономическим и Социальным Советом ООН (ЭКОСОС) с целью

развития экономической деятельности, норм, стандартов и укрепления экономических связей внутри региона ЕЭК ООН и между этим регионом и остальным миром.

Выполняя эту функцию, ЕЭК ООН обеспечивает гарантии безопасности и качества потребителям, помогает охранять окружающую среду, упрощает процедуры торговли, а также способствует более тесному единению государств-членов

внутри региона и их более полной интеграции в мировую экономику. Членами Комиссии являются 56 стран.

Одним из основополагающих документов является «Соглашение о принятии единообразных технических предписаний для колесных транспортных средств, предметов оборудования и частей, которые могут быть установлены и/или использованы на колесных транспортных средствах, и об условиях взаимного признания официальных утверждений, выдаваемых на основе этих предписаний» (заключено в г. Женеве 20.03.1958).

К сожалению, в настоящее время в Российской Федерации отсутствует актуализированный комплекс стандартов, на основании которых должна функционировать и развиваться отечественная автоэлектроника. Этот значительный пробел в системе стандартизации нам необходимо восполнить, осно-

вываясь на положительном опыте системы стандартизации в зарубежных странах и наработках отечественных специалистов по стандартизации и радиоэлектронике.

При этом, решением комиссии Таможенного союза от 09.12.2011 № 877 был принят Технический регламент Таможенного союза «О безопасности колесных транспортных средств» (ТР ТС 018/2011), разработанный на основе Правил ЕЭК ООН [8].

Стандартизация – деятельность по разработке (ведению), утверждению, изменению (актуализации), отмене, опубликованию и применению документов по стандартизации и иная деятельность, направленная на достижение упорядоченности в отношении объектов стандартизации [9]. Она включает в себя деятельность по установлению для всеобщего и многократного применения технических требований (технических норм, правил и характеристик) в отношении постоянно повторяющихся задач, направленную на достижение упорядоченности в области разработки, производства, реализации, транспортирования, хранения и утилизации продукции и оказания услуг.

Стандартизации подлежат продукция, процессы, услуги, включая материалы, комплектующие, оборудование, правила, процедуры, функции, организационные процессы и т. д.

Объектами стандартизации являются также типовые технологические процессы, формы и методы организации труда и производства, правила выполнения производственных и контрольных операций, правила транспортирования и хранения продукции.

Достижение целей стандартизации осуществляется путем реализации задач, направленных на:

1) разработку и внедрение передовых технологий, в том числе информационных технологий, достижение и поддержание технологического лидерства Российской Федерации в высокотехнологичных (инновационных) секторах экономики;

2) повышение уровня безопасности жизни и здоровья людей, охрану окружающей среды, охрану объектов животного, растительного мира и других природных ресурсов, имущества юридических и физических лиц, государственного и муниципального имущества, а также содействие развитию систем жизнеобеспечения населения в чрезвычайных ситуациях;

3) оптимизацию и унификацию номенклатуры продукции, обеспечение ее совместимости и взаимозаменяемости, сокращение сроков ее создания, освоения в производстве, а также затрат на эксплуатацию и утилизацию;

4) применение документов по стандартизации при поставке товаров, выполнении работ, услуг, в том числе при осуществлении закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд;

5) обеспечение единства измерений и сопоставимости их результатов;

6) предупреждение действий, вводящих потребителя продукции (далее – потребитель) в заблуждение;

7) обеспечение рационального использования ресурсов;

8) устранение технических барьеров в торговле и создание условий для применения международных стандар-

тов и региональных стандартов, региональных сводов правил, стандартов иностранных государств и сводов правил иностранных государств.

Стратегия развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 17.01.2020 № 20-р [10], является документом, определяющим основные направления государственной политики в сфере развития электронной промышленности.

Стратегией предусматривается комплексное решение задач по девяти ключевым направлениям: «Научно-техническое развитие», «Средства производства», «Отраслевые стандарты», «Кадры», «Управление», «Кооперация», «Отраслевая информационная среда», «Рынки и продукция» и «Экономическая эффективность» [10].

Достижение указанных целей и целевых значений показателей развития отрасли будет обеспечено за счет комплексного решения задач по ключевым направлениям развития отрасли.

Планируется по ключевому направлению «Отраслевые стандарты» обеспечить конкурентоспособность отрасли через инструменты технического и отраслевого регулирования.

План мероприятий по реализации Стратегии развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года в области стандартизации предусматривает:

- модернизацию отраслевой системы стандартов в соответствии с существующими и перспективными международными требованиями к продукции, технологиям, организационным процессам;
- обеспечение разработки по перспективным видам электронной продукции национальных стандартов с последующей их трансформацией в международные.

В связи с вышеизложенным было бы целесообразным рассмотреть ряд вопросов, касающихся порядка и условий применения международных стандартов, а также стандартов иностранных государств.

Установленная процедура по порядку и условиям применения международных стандартов, а также стандартов иностранных государств, предусматривает, в том числе, необходимость [11]:

- соблюдения основополагающих национальных стандартов;
- наличия разрешения от правообладателя на использование стандарта и выполнение его перевода на русский язык;
- соответствия стандартов межправительственным соглашениям, а также договорам и контрактам, заключаемым предприятиями, организациями и корпорациями с иностранными партнерами.

Рассматривая нормативное обеспечение необходимо отметить, что система ГОСТ Р в области автомобильной промышленности и области дополнительных требований к организациям автомобильной промышленности по системе менеджмента качества (ГОСТ Р 58139, ГОСТ Р ИСО/

ТУ 16949), а также системе менеджмента качества в автомобилестроении (ГОСТ Р серии 51814 (2-5)) [12-17]:

- в целом построена на базе международных стандартов (например, ГОСТ Р ИСО 9001 [18]) и отраслевых документов применительно к автомобильной промышленности, в том числе по процедурам и методам одобрения производства автомобильных компонентов;
- требования отечественных стандартов, (например, программы обеспечения и повышения качества и надежности на различных стадиях жизненного цикла ЭКБ ПОК (программа обеспечения качества), ЭКБ ПОН (программа обеспечения надежности) технически соответствуют международному подходу.

Проведенный экспресс-анализ:

- в стратегии развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 17.01.2020 № 20-р (в части стандартизации) [10];
- в системе нормативно-правовых актов по применению иностранных стандартов в Российской Федерации;
- в основных действующих нормативных документах применительно к автомобильной промышленности и их техническое сопоставление с системой стандартизации на оборонную ЭКБ (оценка подходов к требованиям и подтверждению соответствия продукции, процессов производства, программ обеспечения и повышения качества),

позволяет сделать некоторые выводы и наметить пути решения в рассматриваемых проблемах в области системного подхода к стандартизации ЭКБ, применяемой в автомобильной электронике.

Заключение

Таким образом, следует отметить, что наиболее рациональный метод организации обеспечения комплектования электронной аппаратуры автомобильной техники ЭКБ отечественного производства, в том числе с реализацией уже действующего общего подхода в автомобильной отрасли по одобрению производства автомобильных компонентов (ГОСТ 51814.4) [16] заключается в:

1. организации переводов иностранных стандартов, устанавливающих общие требования к системе обеспечения и подтверждения качества (контроль производства и испытания) комплектующих изделий и специальные требования к отдельным классификационным группам ЭКБ, и разработка на их основе отечественных национальных стандартов,
2. проведении сопоставительного анализа зарубежных и отечественных требований и, на основе этого, выработка предложений по структуре комплекса отечественных нормативных документов в развитии действующей системы стандартов на автомобильной промышленности в части конкретизации требований к обеспечению и подтверждению качества ЭКБ (ГОСТ 17466-80, ГОСТ 24460-80 [19-20]), с отработ-

кой их на одной из готовых к освоению групп изделий по согласованию с потребителем, и последующим развитием на все классы ЭКБ, в рамках реализации этапов создания нормативной базы и изготовления ЭКБ для автоэлектроники,

3. формировании системы подтверждения соответствия установленным техническим требованиям к ЭКБ для автоэлектроники на базе лучших практик международных организаций, с использованием функционирующих в Российской Федерации испытательных лабораторий (центров), компетенция которых подтверждается аттестатами их аккредитации в национальной системе.

Дальнейшее освещение поднятых проблем формирования требований к отечественной ЭКБ, авторами планируется в последующих номерах журнала.

Литература

1. Международные стандарты для автомобильной электроники. <https://guide.efind.ru/6-mezhdunarodnye-standarty-dlya-avtomobilnoi-elektroniki>.
2. AEC – Q100 (Stress Test Qualification for Integrated Circuits) – стандарт для интегральных полупроводниковых схем.
3. AEC – Q101 (Stress Test Qualification for automotive grade discrete semiconductors) – стандарт для дискретных полупроводниковых компонентов (транзисторы, диоды и т. д.).
4. AEC – Q102 (Failure mechanism based stress test qualification for optoelectronic semiconductors in automotive applications) – стандарт для оптоэлектронных полупроводниковых приборов.
5. AEC – Q103 (Failure mechanism based stress test qualification for micro electro-mechanical system (mems) pressure sensor devices) – стандарт для датчиков.
6. AEC – Q104 (Failure mechanism based stress test qualification for multichip modules (mcm) in automotive applications) – стандарт для многокристальных модулей.
7. AEC – Q200 (Stress test qualification for passive components) – стандарт для пассивных компонентов (резисторы, конденсаторы, индукторы, ферриты, резонаторы и т. д.).
8. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств» (принят Решением Комиссии Таможенного союза № 877 от 09.12.2011 г.).
9. Федеральный закон от 29.06.2015 № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации».
10. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 17.01.2020 N 20-р «Об утверждении Стратегии развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года и плана мероприятий по реализации Стратегии развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года».
11. Приказ Росстандарта от 21.06.2021 № 1061 «Об определении Порядка и условий применения международных стандартов, региональных стандартов, межго-

- сударственных стандартов и региональных сводов правил, а также стандартов иностранных государств и сводов правил иностранных государств».
12. ГОСТ Р 518139-2018 «Системы менеджмента качества. Требования к организациям автомобильной промышленности».
 13. ГОСТ Р ИСО/ТУ 16949-2009 «Система менеджмента качества. Особые требования по применению ИСО 9001:2008 в автомобильной промышленности и организациях, производящих соответствующие запасные части».
 14. ГОСТ Р 51814.2-2001 «Система качества в автомобилестроении. Метод анализа видов и последствий потенциальных дефектов».
 15. ГОСТ Р 51814.3-2001 «Система качества в автомобилестроении. Методы статистического управления процессами».
 16. ГОСТ Р 51814.4-2001 «Система менеджмента качества в автомобилестроении. Одобрение производства автомобильных компонентов».
 17. ГОСТ Р 51814.5-2001 «Система менеджмента качества в автомобилестроении. Анализы измерительных и контрольных процессов».
 18. ГОСТ Р ИСО 9001-2015 «Системы менеджмента качества. Требования».
 19. ГОСТ 17466-80 «Транзисторы биполярные и полевые. Основные параметры».
 20. ГОСТ 24460-80 «Микросхемы интегральные цифровых устройств. Основные параметры».

УДК 006.91

РОЛЬ И МЕСТО МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ПОВЫШЕНИИ КАЧЕСТВА И ЭФФЕКТИВНОСТИ В СОВРЕМЕННЫХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

THE ROLE AND PLACE OF METROLOGICAL SUPPORT IN IMPROVING QUALITY AND EFFICIENCY IN MODERN ECONOMIC CONDITIONS

Быканов В.В., к. т. н., с. н. с., **Есакова М.М.**, **Тупицина А.В.**, **Кремнева А.В.**
ФГБУ «ВНИИР», +7 (903) 774-25-07, sertifbv@yandex.ru

Vykanov V.V., Ph. D. of engineering sciences, Senior Researcher Officer, **Esakova M.M.**, **Tupitsina A.V.**, **Kremneva A.V.**
FSBI "VNIIR", +7 (903) 774-25-07, sertifbv@yandex.ru

Аннотация. В настоящее время метрологи и разработчики изделий электронной компонентной базы сталкиваются с неоднозначностью в вопросах повышения качества разработок посредством метрологического обеспечения. В статье проведен анализ состояния проблемы и рассмотрена система, изъятие из которой любого звена приводит к получению недостоверной информации и, соответственно, к значительным экономическим потерям и принятию ошибочных решений.

Annotation. At present metrologists and developers of electronic component base products face ambiguity in the issues of improving the quality of developments by means of metrological support. The article analyses the state of the problem and considers the system, the removal of any link from which leads to unreliable information and, consequently, to significant economic losses and erroneous decision making.

Ключевые слова: метрология, единство измерений, обеспечение единства измерений, государственная система обеспечения единства измерений, сфера государственного регулирования обеспечения единства измерений, метрологическое обеспечение, метрологическая служба, метрологическая экспертиза, средство измерений, испытательное оборудование, электронная компонентная база.

Keywords: metrology, uniformity of measurements, ensuring the uniformity of measurements, sphere of state regulation of ensuring the uniformity of measurements, metrological support, metrological service, metrological expertise, measuring instruments, testing equipment, electronic component base.

Введение

Одной из важнейших целей электронной промышленности является освоение и создание новых технологий производства, то есть разработка и производство высококачественного, высокотехнологического продукта, востребованного и конкурентоспособного как на внутреннем, так и на внешнем рынках. Однако возникают проблемы, связанные, наряду с серьезным технологическим отставанием, зависимостью от зарубежных технологий, кадровым дефицитом, отсутствием должного

выполнения обязательных метрологических требований [1] в процессе обеспечения единства измерений в сфере государственного регулирования [2]. Указанные недоработки приводят к срыву государственных заказов, задержке в реализации проектов по созданию новой техники. В каждом конкретном случае руководители предприятий радиоэлектронной отрасли ссылаются на большое количество самых разных причин, но не говорят о наличии глубокой системной проблемы в обеспечении качества продукции электронной отрасли, состоя-



Кремнева А.В., Есакова М.М., Быканов В.В., Тупицина А.В.

нии и практической реализации задач метрологического обеспечения (далее – МО), которое является основой метрологической деятельности, позволяющей повысить точность измерений до значений, применимых в практической работе.

Роль и место МО определяется тем, что измерительное звено является основным источником информации о

состоянии электронной компонентной базы (далее – ЭКБ) при ее разработке, испытаниях, производстве. Достоверность информации, точность и единство проводимых измерений непосредственно влияют на уровень технических характеристик изделий, их качество и конкурентоспособность, что в результате влияет на качество задач, решаемых радиоэлектронной отраслью.

Основная часть

Обеспечение, поддержание и повышение уровня качества изделий ЭКБ невозможны без систематического мониторинга и контроля параметров изделий ЭКБ на стадиях жизненного цикла: от исследований и проектирования до снятия с производства (ремонта, эксплуатации) [3], что неизбежно связано с обеспечением метрологических и нормированных точностных характеристик средств измерений (далее – СИ) и испытательного оборудования (далее – ИО) соответственно.

Тенденцией в развитии системы МО в России явился переход от существовавшей ранее сравнительно узкой задачи обеспечения единства и требуемой точности измерений к принципиально новой задаче обеспечения качества измерений (рис. 1).

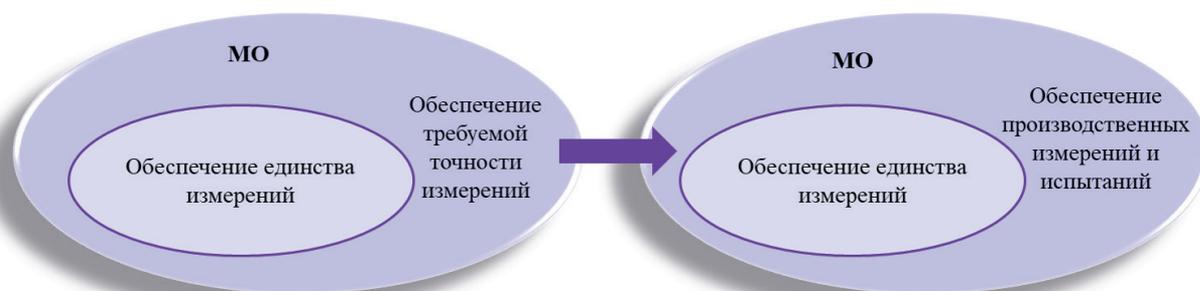


Рис. 1. Соотношение понятий МО и ОЕИ до принятия [1] и в настоящее время

Причинами возрастания роли МО при разработке и производстве ЭКБ являются:

- повышение требований к качеству ЭКБ, их готовности к применению, эффективности использования по назначению, безопасности и безаварийности;
- инновационное развитие технологий;
- повышение сложности и стоимости разработки и производства ЭКБ, увеличение объема затрачиваемых ресурсов МО (СИ эталонной точности, определяющие характеристики ЭКБ);
- рост ответственности за выработку и принятие технически обоснованных решений при разработке и производстве ЭКБ;
- оснащение промышленных предприятий современными техническими средствами для успешного сокращения отставания в техническом отношении от ведущих стран мира;
- широкое применение на предприятиях системы менеджмента качества, основанной на обеспечении следующих показателей качества:

- 1) полнота измерений;
- 2) единство измерений;
- 3) точность результатов измерений и достоверность решений по полученным данным;
- 4) оперативность измерений (временные показатели);
- 5) своевременность измерений (соответствие выполнения измерений установленной периодичности);
- 6) экономичность измерений.

Понятие МО применяют по отношению к измерениям (испытаниям), а также к технологическому процессу производства, подразумевая при этом МО контроля. В стандарте [4] МО представляет собой «совокупность элементов и процессов, необходимых для получения измерительной информации с заданными свойствами». Состав набора средств и методов в стандарте остался нераскрытым. В отраслевых стандартах и стандартах предприятий понятие МО представляют как установление и применение научных и организационных основ, технических средств,

правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений, что больше относится к термину обеспечения единства измерений (далее – ОЕИ) в соответствии с [2].

Необходимо подчеркнуть, что деятельность по ОЕИ является составной частью МО, т. е. ОЕИ является функцией государства, а хозяйствующие субъекты выполняют функцию соблюдения правовых норм. Поэтому следует считать наиболее правильным определение: «Метрологическое обеспечение – создание и поддержание условий для получения измерительной информации, соответствующей установленным заданным требованиям» [5], причем измерение как система, служит объектом метрологии, а качество измерения – ее предметом. Главной задачей МО является рациональная организация измерительного процесса, обеспечение достоверности его результатов.

Положения государственной системы обеспечения

единства измерений (далее – ГСИ) в соответствии с [3] предусматривают осуществление функций МО, т. е. комплекса последовательных взаимосвязанных мероприятий при разработке и производстве ЭКБ, обеспечивающих техническое и организационное единство измерений и их требуемую точность на всех стадиях жизненного цикла продукции, кроме ликвидации (таблица 1). Например, на стадии разработки ЭКБ для достижения высокого качества продукции предполагается выбор контролируемых параметров, норм точности, допусков СИ, контроля и испытаний, разработка и проведение аттестации применяемых методик косвенных измерений, метрологическая экспертиза технической документации (далее – МЭ ТД). Решение этих задач предполагает системный подход, выполняемый на предприятии, суть которого состоит в рассмотрении МО, как ряда мероприятий, объединенных целью достижения требуемого качества измерений.

Таблица 1

Взаимосвязь национальной системы разработки и постановки продукции на производство с ГСИ на стадиях жизненного цикла продукции в соответствии с [3]

Общетеchnические системы и комплексы стандартов	Задачи (функции)	Объект стандартизации	Действие систем и процесса выполнения работ на стадиях жизненного цикла продукции																	
			Исследования и проектирование			Разработка						Изготовление (производство)		Эксплуатация (потребление, хранение)						
			ТЗ на исследование, техническое предложение	Исследование	Техническое предложение	ТЗ на опытно-конструкторскую работу, основные технические решения	Эскизный проект	Технический проект	Рабочая конструкторская документация	Изготовление и предварительные испытаний образцов	Приемочные испытания	Доработка рабочей конструкторской документации опытного образца	Постановка на производство	Единое повторяющееся, серийное, массовое производство	Поставка	Эксплуатация (применение, хранение)	Ремонт (для ремонтных изделий)	Обеспечение эксплуатации и ремонта организациями промышленности	Снятие с производства, ремонта, эксплуатации	Ликвидация
ГСИ	МО	Методы измерений и СИ	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	

Процесс МО является элементом системы менеджмента качества, действующей на предприятии. Более того, где такая система не создана, МО выступает в качестве побудительного фактора к ее созданию.

Содержание работ по МО на предприятии обусловлено системной сущностью измерения и особенностями производственного процесса, которые включают в себя предметную (рис. 2), функциональную (рис. 3) и временную (рис. 4) структуры системы измерений [6].

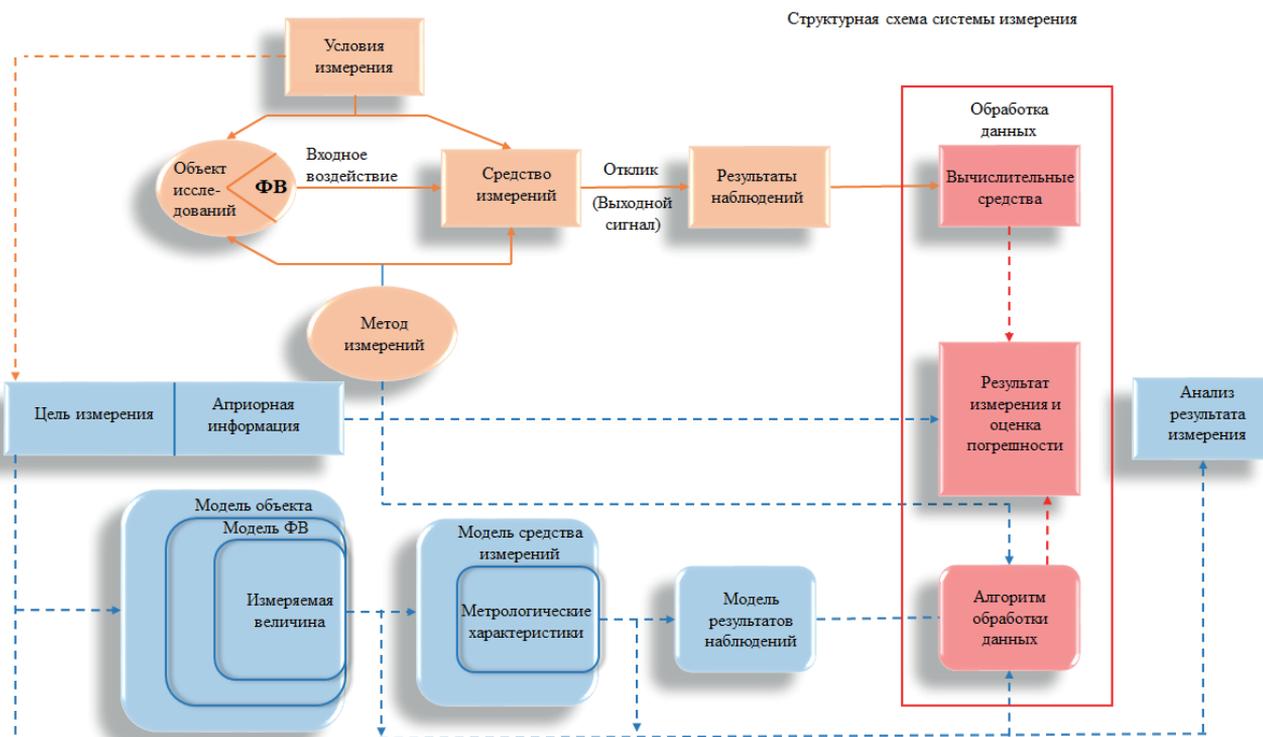


Рис. 2. Предметная структура измерения

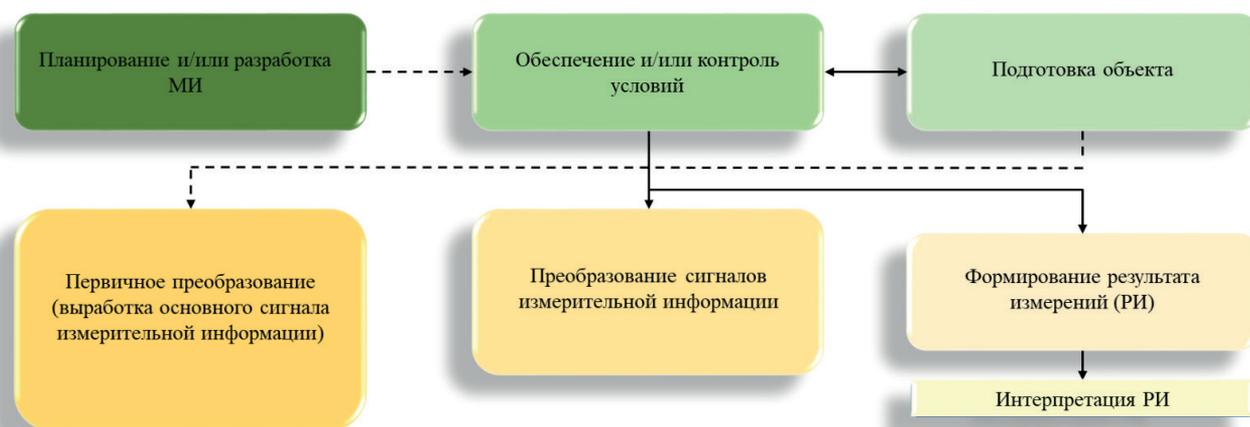


Рис. 3. Функциональная структура измерения

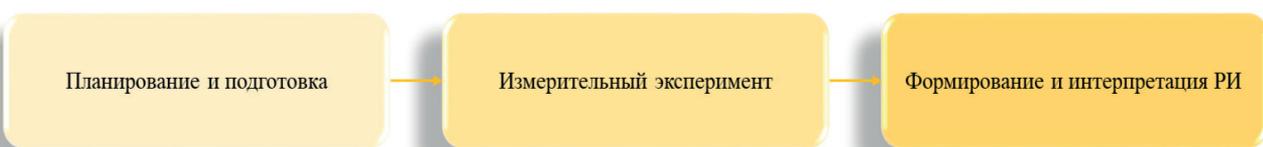


Рис. 4. Временная структура измерения

Основные функции МО можно представить тремя большими подгруппами (рис. 5).



Рис. 5. Основные функции МО

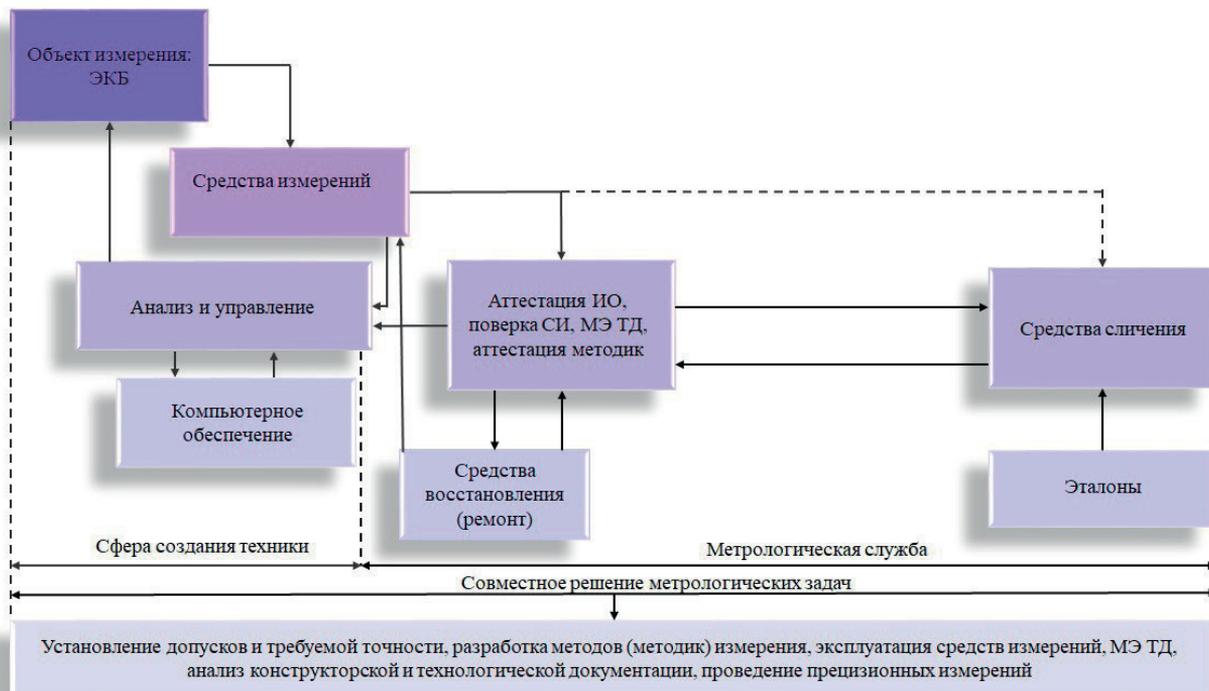


Рис. 6. Схема системы МО предприятия

Мероприятия по МО при разработке и производстве изделий имеют научный, технический и организационный характер. К сожалению, по всем направлениям осуществление предприятиями радиоэлектроники функций МО далеко от идеального.

Реализацией научно-технических функций МО является создание не только новых перспективных отечественных эталонов, СИ, ИО и технологического оборудования, но и способных заменить ушедшие иностранные аналоги.

Одними из главных организационных функций МО при разработке ЭКБ являются выбор и разработка методик (методов) измерений, а также обязательная аттестация методик (методов) измерений, предназначенных для выполнения не прямых измерений, и проведение МЭ, которая включает в себя анализ и оценку правильности установления и соблюдения метрологических требований применительно к объекту, подвергаемому экспертизе. В процессе проведения МЭ ТД осуществляется анализ заложенных мероприятий МО и разработка рекомендаций по его совершенствованию, что означает повышение качества.

Организационно-технические функции МО на этапе производства заключаются в поддержании и проверке правильности выполнения измерений при проведении технологического процесса и подразумевают комплекс мероприятий, обеспечивающих контроль с требуемой точностью характеристик ЭКБ, материалов, сырья, параметров технологического процесса, оборудования, поэтому являются важной составной частью функционирования современного производства.

Решение вопросов по перечисленным функциям МО позволяет добиться значительного повышения качества выпускаемой продукции и снижения затрат на ее разработку и производство.

Общая схема системы МО предприятия приведена на рис. 6.

Перечисленные выше положения представляют собой систему, изъятие из которой любого звена приведет к получению недостоверной информации и, следовательно, к невыполнению установленных задач системы разработки и постановки продукции на производство [3].

Заключение

Таким образом, при полноценном выполнении МО на предприятии в процессе разработки и производства ЭКБ реализуется потенциальный замысел изделия, гарантируется его качество и конкурентоспособность на рынке в современных экономических условиях.

Для установления системного управления и контроля процесса МО разработки и производства ЭКБ, описанного в данной статье, целесообразно рассмотреть предложение о создании в Департаменте радиоэлектронной промышленности Минпромторга России отраслевой метрологической службы, организующей централизованное руководство и координацию процесса МО радиоэлектронной отрасли.

Литература:

1. Федеральный закон от 26 июня 2008 года № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений».
2. ГОСТ Р 8.000-2015 «Государственная система обеспечения единства измерений. Основные положения».
3. ГОСТ Р 15.000-2016 «Система разработки и постановки продукции на производство. Основные положения».
4. ГОСТ Р 8.820-2013 «Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение. Основные положения».
5. Гвоздев В.Д. Прикладная метрология. Учебное пособие. – М.: МИИТ, 2011. – 208 с.
6. Грановский В.А. Метрологическое обеспечение на промышленном предприятии: проблемы и решения. Главный метролог. № 4, 2014.

УДК 621.319.4

ДИАГНОСТИКА ДЕФЕКТОВ ТРУБЧАТЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ

DIAGNOSTICS OF DEFECTS IN TUBULAR CERAMIC CAPACITORS

Голубков В.А., к. т. н., доцент, **Мельников С.Ю.**, к. т. н., доцент,
Федоренко А.Г. к. т. н., доцент, СПбГУАП; **Зотов Н.А.**, ЗАО «РЕОМ», +79213279688, nzotov@reom.ru

Golubkov V.A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Melnikov S.Yu., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Fedorenko A.G. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, SPbSUAP;
Zotov N.A., CJSC "REOM", +79213279688, nzotov@reom.ru

Аннотация. Авторы исследуют случаи отказов трубчатых проходных керамических конденсаторов из-за наличия скрытых дефектов керамики и предлагают аппаратный метод объективного контроля, основанный на сравнении амплитудно-частотных характеристик заведомо годного керамического конденсатора и тестируемого с индикацией дефекта и отбраковкой.

Annotation. *The authors investigate cases of failures of tubular flow-through ceramic capacitors due to the presence of hidden ceramic defects and propose a hardware method of objective control based on a comparison of the amplitude-frequency characteristics of a known ceramic capacitor and a tested one with defect indication and rejection.*

Ключевые слова: диагностика, проходной конденсатор, керамика, индикация дефекта.

Keywords: diagnostics, flow capacitor, ceramics, vibration response, frequency response analysis, indication of defects.

Введение

Проходные конденсаторы КТП разработаны в конце 50-х годов, однако до настоящего времени применяются в ранее разработанной аппаратуре и продолжают выпускаться мелкими сериями. Высоковольтные трубчатые керамические конденсаторы широко применяются в радиоаппаратуре в качестве простейших С-фильтров, развязывающих по высокой частоте источники питания и нагрузку [1]. Метод контроля, приведенный в данной статье, применим и к выпускаемым в настоящее время отечественным конденсаторам серии Б7, Б14, Б23А, Б24 и др.

Основная часть

Конструктивно проходной конденсатор (например, серии КТП) представляет собой керамическую трубку с нанесенными на нее внутренней и внешней обкладками. Через трубку проходит вывод, припаянный к внутренней обкладке. К внешней обкладке припаяна металлическая резьбовая втулка, служащая элементом крепления к «земле» прибора (рис.1).



Рис. 1. Внешний вид конденсатора КТП

В практике эксплуатации проходных керамических конденсаторов часто встречаются случаи их отказов из-за наличия скрытых дефектов керамики, таких как микротрещины, поры или каверны. Эти дефекты являются причиной неправильной работы или даже выхода из строя конденсатора. Поры и каверны в керамических трубках могут появиться при их изготовлении, а на стадии припайки стержня и втулки к обкладкам на керамической части, при ее нагреве, возможно появление микротрещин в керамике.

Визуальный контроль качества керамических конденсаторов малоэффективен и не позволяет выявить скрытые дефекты. Для повышения достоверности диагностики качества таких изделий предлагается метод, основанный на сравнении амплитудно-частотных характеристик заведомо «годного» керамического конденсатора и тестируемого, позволяющий сделать вывод о наличии или отсутствии дефектов у последнего [2].

Метод заключается в том, что на тестируемый конденсатор через вибродатчик-возбудитель механических колебаний подается сигнал, изменяющийся в определенном диапазоне частот. Другой вибродатчик (приемник механических колебаний) фиксирует реакцию корпуса кон-



Голубков В.А.



Мельников С.Ю.



Федоренко А.Г.



Зотов Н.А.

денсатора на подаваемый вибросигнал. Конденсатору без дефектов керамики присущи всплески амплитуды колебаний на определенных резонансных частотах. У конденсатора с дефектами керамики амплитудно-частотная характеристика иная, чем у заведомо «годного», что позволяет диагностировать его неисправность.

Данный метод диагностики может быть реализован с помощью прибора, состоящего из трех основных блоков – блока генераторного (далее – БГ), блока измерительного (далее – БИ) и блока питания (далее – БП) (рис.2).

С выхода генераторного блока переменное напряжение фиксированной амплитуды и качающейся частоты подводится к вибродатчику-возбудителю механических колебаний (далее – ВД1), вибрация которого передается на контролируемый керамический конденсатор (далее – КК). Спектр вибрации конденсатора воспринимается вибродатчиком-приемником (далее – ВД2), преобразуется им в электрический сигнал и подается в измерительный блок (БИ).

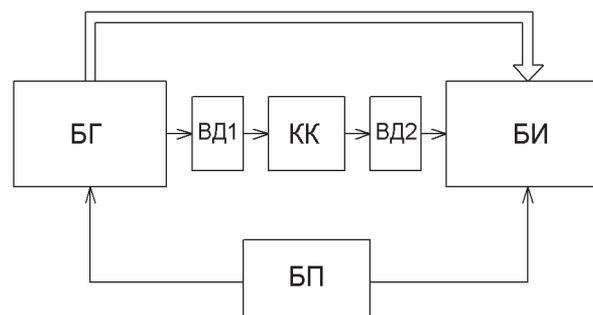


Рис. 2. Функциональная схема прибора для диагностики дефектов трубчатых керамических конденсаторов

Генераторный блок (рис. 3) содержит следующие узлы: генератор пилообразного напряжения и импульсов такта (далее – ГПНТ), генератор опорной частоты (далее – ГОЧ), 4-канальный генератор дополнительных частот (далее – ГДЧ) и формирователь зондирующего сигнала (далее – ФЗС). Данный блок предназначен для формирования синусоидального напряжения n -ой информационной частоты, «качающейся» в некотором диапазоне, и обеспечения автоматической коммутации частоты зондирующего сигнала. Информационная частота представляет собой одну из частот ультразвукового резонанса или акустической эмиссии конденсатора без дефектов керамики.

В схему блока измерительного (рис. 4) входят: усилитель, интегратор, 4-канальная схема сравнения и схема индикации дефекта. Этот блок предназначен для усиления сигналов, снимаемых с вибродатчика ВД2, их детектирования и интегрирования, определения скорости их изме-

нения и сравнения с заданной, а также для вывода результата сравнения на светодиодный индикатор.

Блок питания обеспечивает схемы прибора постоянным напряжением +5 В и ±15 В.

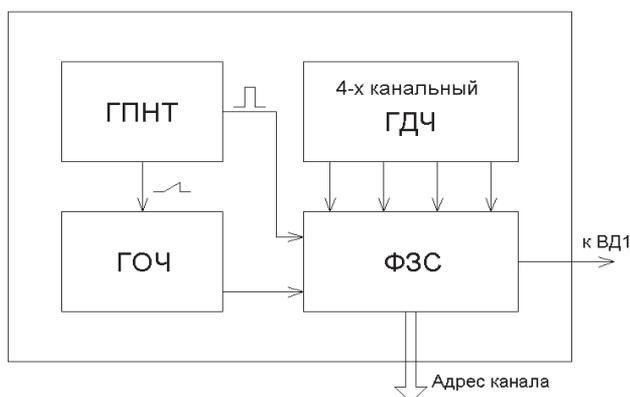


Рис. 3. Функциональная схема генераторного блока

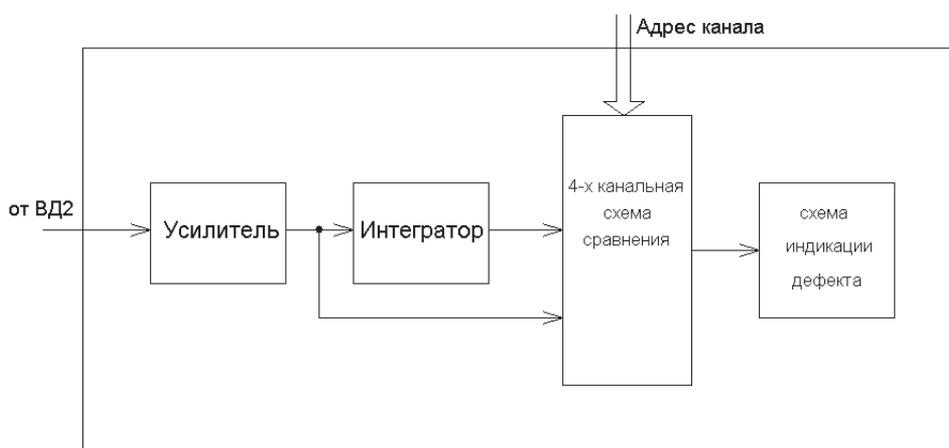


Рис. 4. Функциональная схема измерительного блока

Прибор работает следующим образом. В ГПНТ формируется пилообразное напряжение, обеспечивающее периодическое изменение емкости варикапа, входящего в колебательный LC-контур ГОЧ. Он настроен на фиксированную частоту f_0 , «качающуюся» в диапазоне $\Delta f_{\text{кач}}$, определяемом амплитудой пилообразного сигнала ГПНТ. Каждый из 4-х каналов ГДЧ настроен на частоту $f_{\text{ин}}$, называемую дополнительной, которая определяется исходя из условия:

$$f_{\text{ин}} = f_0 + f_{\text{кач}},$$

где: $f_{\text{ин}}$ – n -ая информационная частота (частота ультразвукового резонанса или акустической эмиссии конденсатора).

Напряжение с выхода ГОЧ и каждого из n каналов ГДЧ поступает на ФЗС, где происходит выделение информационных частот $f_{\text{ин}}$, их усиление и коммутация. Выходной сигнал прибора представляет собой синусоидальное напряжение с амплитудой 10 В и частотой:

$$f_{\text{вых}} = f_{\text{ин}} + \Delta f_{\text{кач}}.$$

Этот сигнал подается на вибродатчик-возбудитель ВД1, который преобразует его в механическую вибрацию, действующую на контролируемый конденсатор. Спектр

вибрации конденсатора фиксируется вибродатчиком-приемником ВД2, электрический сигнал с которого, пропорциональный амплитудным значениям величины вибрации в заданном диапазоне «качания» частоты, поступает на вход измерительного блока.

Входной сигнал измерительного блока усиливается, выпрямляется и сглаживается в интеграторе. Затем сигнал, полученный непосредственно после усиления, и сглаженный сигнал подаются на схему сравнения.

Постоянная времени интегратора, в котором происходит сглаживание сигнала, подобрана таким образом, что при малой скорости нарастания сигнала амплитуда напряжений, поступающих на вход схемы сравнения, равны между собой. При большой скорости нарастания входного напряжения сглаженный сигнал будет иметь меньшую амплитуду. Эта разница фиксируется в схеме сравнения и схеме индикации дефекта.

Если амплитуда вибрации контролируемого конденсатора на одной из информационных частот отличается от эталонной, определенной заранее для заведомо годного конденсатора, загорается соответствующий светодиод блока индикации, свидетельствующий о неисправности

контролируемого конденсатора. Даже небольшой внутренний дефект может существенно повлиять на резонанс контролируемого конденсатора.

Заключение

Предлагаемый прибор позволяет с высокой достоверностью диагностировать дефекты керамики трубчатых конденсаторов и существенно ускоряет процесс контроля их качества. Кроме того, имеется возможность автоматизации процесса контроля качества, что исключает в этой операции влияние «человеческого фактора».

УДК 631.382.3:539.12.04

СИНТЕЗ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ФИКСИРОВАННЫХ ФАЗОВРАЩАТЕЛЕЙ В МИКРОПОЛОСКОВОМ ИСПОЛНЕНИИ

SYNTHESIS OF MULTI-ELEMENT FIXED PHASE SHIFTERS IN MICROSTRIP DESIGN

Мещанов В.П., д. т. н., профессор, **Саяпин К.А.**, к. т. н., ООО «НПП «НИКА-СВЧ», +7 (927) 277-27-26,
Семенчук В.В., ФГБУ «ВНИИР», +7 (495) 586-17-21 (доб. 1260), vniir@vniir-m.ru;

Meshchanov V.P., Doctor of Technical Sciences, Professor,
Sayapin K.A., Candidate of Technical Sciences, "NPP "NIKA-Microwave" LLC; +7 (927) 277-27-26,
Semenchuk V.V., FSBI "VNIIR"; +7 (495) 586-17-21 (ext. 1260), vniir@vniir-m.ru

Аннотация. В данной статье рассматриваются вопросы синтеза широкополосных фиксированных фазовращателей (далее – ФФ) с предельно-достижимыми фазочастотными и амплитудно-частотными характеристиками (далее – ФЧХ и АЧХ) на основе внедрения и исследования новых структур электрических цепей (далее – СЭЦ), содержащих несогласованные нагрузки в виде коротко замкнутых шлейфов (далее – КЗШ).

Annotation. This article discusses the issues of synthesis of broadband fixed phase shifters (hereinafter – FF) with extremely achievable phase-frequency and amplitude-frequency characteristics (hereinafter – frequency response and frequency response) based on the introduction and research of new structures of electrical circuits (hereinafter – SEC) containing inconsistent loads in the form of short-closed loops (hereinafter – KZSH).

Ключевые слова: фиксированный фазовращатель, фазочастотные и амплитудно-частотные характеристики, несогласованные нагрузки, связанные и несвязанные линии передачи, Т – и квази-Т-волны, опорный канал, фазосдвигающий канал.

Keywords: fixed phase shifter, phase-frequency and amplitude-frequency characteristics, inconsistent loads, connected and unrelated transmission lines, T – and quasi-T-waves, reference channel, phase-shifting channel.

Введение

ФФ на линиях передачи (далее – ЛП) с распределёнными электрическими параметрами относятся к пассивным устройствам, обеспечивающим в заданной рабочей полосе частот постоянный фазовый сдвиг между сигналами на выходах опорного и фазосдвигающего (далее – ФК) каналов.

Такие устройства по обработке радиосигналов используются в радиоэлектронной аппаратуре различного назначения: приёмно-передающей, измерительной, контрольной, испытательной и др.

Исследование широкополосных ФФ на ЛП с Т – и квази-Т-волнами продолжается более 70 лет. Значительный вклад в изучение СЭЦ ФФ внесли отечественные ученые

Литература

1. Керамические проходные конденсаторы и фильтры нижних частот. Состояние и перспективы развития / Воловик М., Смирнов М. // Электроника НТБ. № 7, 2004.
2. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 т. / под общ. ред. Ключева В.В. Т.3: Ультразвуковой контроль – М.: Машиностроение, 2004.



Мещанов В.П.



Саяпин К.А.



Семенчук В.В.

Мещанов В.П., Аристархов Г.М., Салий И.Н., Михалевский В.С., Алексеев А.Н., Шикова Л.В., Шапошников А.А., Юрьев Н.В., Метельникова И.В., Чумаевская Г.Г., а также зарубежные – Schiffman В.М., Tresselt С.Р., Rodell А.А.,

Soen M., Page J.E., Esteban I., Camacho-Panalosa C., Cristal E.G., Shelton J.P., Mosko J.A., Wolf J.J.

Внедрение в арсенал техники СВЧ новых СЭЦ требует создания новых классов устройств по обработке микроволновых радиосигналов с расширенными диапазонами рабочих частот и улучшенными АЧХ и ФЧХ.

Что касается широкополосных ФФ, то построение, исследование и внедрение новых СЭЦ ещё далеки от завершения. Это связано прежде всего с перспективами исследований новых СЭЦ на одиночных и связанных ЛП с несогласованными нагрузками, в качестве которых используются КЗШ.

Основная часть

В связи с вышесказанным, должны быть решены следующие задачи:

1. Определение предельно-достижимых ФЧХ и АЧХ известных широкополосных ФФ, структура ФК которых состоит из одного элемента – отрезка связанных ЛП, нагруженного КЗШ.

2. Построение и исследование новой СЭЦ широкополосных ФФ, структура ФК которых представляет собой каскадное включение двух элементов, каждый из которых состоит из одного отрезка связанных ЛП, нагруженных КЗШ. Определение потенциальных электрических характеристик ФФ.

3. Исследование новой СЭЦ широкополосных ФФ, состоящих из двух одинаковых каскадно соединённых четырёхполюсников, каждый из которых представляет собой двухступенчатое соединение слабосвязанных ЛП класса I*, нагруженных КЗШ. Определение предельных характеристик ФФ.

(*Согласно классификации, введённой в технике СВЧ, ступенчатые структуры из отрезков одиночных либо связанных ЛП с распределёнными электрическими параметрами разделяются на два класса: класс I, где длины отрезков одинаковые, а волновые сопротивления (для одиночных ЛП) или коэффициенты связи (для связанных ЛП) различны; класс II, где длины отрезков различные, а волновые сопротивления (для одиночных ЛП) или коэффициенты связи (для связанных ЛП) принимают только два чередующиеся значения).

4. Построение широкополосных ФФ с оптимальными характеристиками на основе новой структуры ФК из чередующихся отрезков связанных и несвязанных ЛП класса II*, нагруженных КЗШ.

Достоверность результатов: в процессе реализации основных этапов процесса синтеза ФФ использовались строгие формулировки задач анализа и параметрической оптимизации. Достоверность результатов решения теоретических задач синтеза подтверждается экспериментальным исследованием широкополосных ФФ, а также сравнением их с результатами работ других авторов.

Представляет большой научный и практический интерес продолжение исследований многоэлементной структуры электрической цепи (СЭЦ) широкополосных фиксированных фазовращателей, предложенных и син-

тезированных в приближении Т-волн в работе [1]. Такая структура состоит из включенных каскадно элементов, каждый из которых представляет собой так называемое С-звено Шиффмана (рис. 1) [2]. Каждое звено содержит отрезок согласованных и идеально направленных распределено связанных линий передачи, выходные плечи которого соединены между собой отрезком 1 одиночной ЛП «нулевой» длины (рис.1).

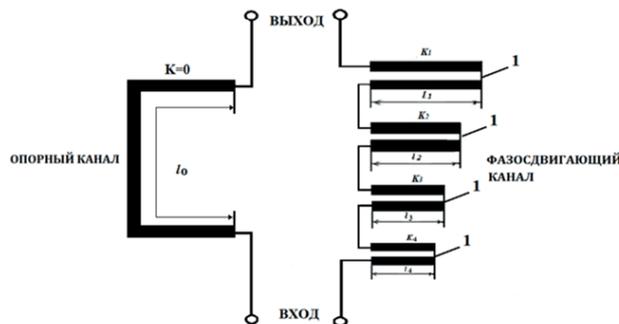


Рис. 1. Многоэлементная структура, предложенная в работе [2]

На рисунке обозначены l_0 – электрическая длина опорного канала фазовращателя; K_i, l_i – коэффициенты связи и электрические длины элементов фазосдвигающего канала. Таким образом, процесс синтеза многоэлементного ФФ в приближении Т-волн сводится к решению однокритериальной задачи аппроксимации заданной функции $\varphi_0(\theta)$ фазового сдвига выходных сигналов фазовращателя в рабочей полосе частот $[\theta_1, \theta_2]$ функцией $S(\theta, \bar{A})$, зависящей от частоты сигнала θ и вектора варьируемых параметров \bar{A} :

$$\min_{\bar{A} \in A} \max_{\theta \in [\theta_1, \theta_2]} |\varphi_0(\theta) - S(\theta, \bar{A})|, \quad (1)$$

где A – допустимое множество значений вектора параметров \bar{A} .

Многоэлементная СЭЦ была существенно усовершенствована, когда вместо С-звеньев Шиффмана были использованы отрезки распределено связанных ЛП, выходные плечи которых нагружены короткозамкнутым шлейфом (КЗШ) (рис.2).

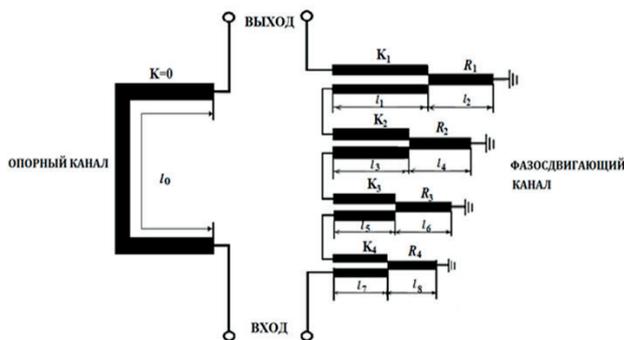


Рис. 2. Многоэлементная структура, предложенная в работе [3]

Такая усовершенствованная многоэлементная структура позволила существенно расширить рабочие полосы ча-

стот ФФ и улучшить их ФЧХ и АЧХ [3]. Как видно из рис. 2, многоэлементная структура по сравнению со структурой, показанной на рис.1, стала несогласованной вследствие использования КЗШ и снятия ограничений на согласование и идеальную направленность в отрезках связанных ЛП. Поэтому задача синтеза такой структуры, по сравнению с задачей 1, требует решения двухкритериальной задачи аппроксимации вида:

$$\min_{\bar{A} \in A} \max_{\theta \in [\theta_1, \theta_2]} |\varphi_0(\theta) - C(\theta, \bar{A})|, \quad (2)$$

$$\min_{\bar{A} \in A} \max_{\theta \in [\theta_1, \theta_2]} \text{КСВН}(\theta, \bar{A}). \quad (3)$$

Следует заметить, что в задаче (2) в качестве одной из компонент вектора варьируемых параметров \bar{A} используется электрическая длина l_0 опорного канала (см. рис. 2), а в задаче (3) эта компонента в векторе \bar{A} отсутствует.

Представляет теоретический и практический интерес, заключающийся в решении задач (2) и (3) для реальной многоэлементной структуры (рис. 2), где в качестве отрезков одиночных и связанных ЛП используются микрополосковые линии передачи. Это является целью настоящей работы.

Аппроксимирующая функция $C(\theta, \bar{A})$ в задачах аппроксимации (2) и (3) может быть построена двумя способами: на основе математической модели в Т-приближении, либо на основе этой модели с использованием схемотехнической и электродинамической моделей синтезируемой СЭЦ.

В результате решения задач (2) и (3) были найдены оптимальные значения вектора варьируемых параметров \bar{A}_0 и получены теоретические характеристики $C_T(\theta, \bar{A}_0)$ и $\text{КСВН}_T(\theta, \bar{A}_0)$. На рис. 3 представлены оптимальные характеристики.

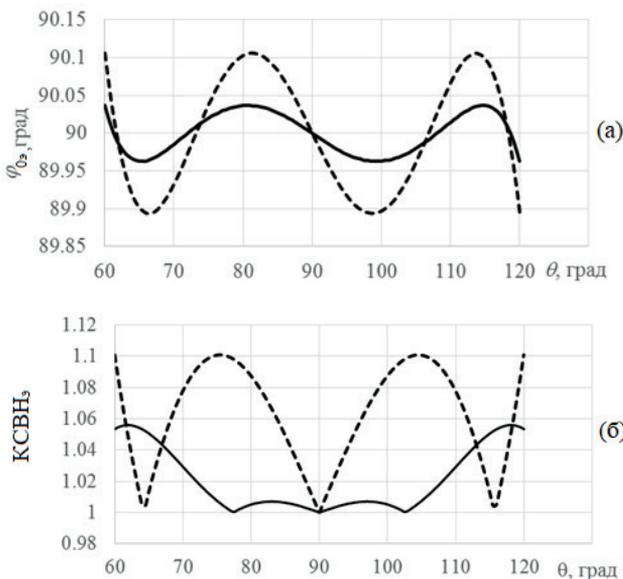


Рис. 3. Оптимальные характеристики сдвига фазы ФФ (а) и КСВН (б) ФК.

Штриховые кривые – один элемент, сплошные кривые – два элемента сдвига фазы фиксированного фазовраща-

теля (а) и КСВН (б) фазосдвигающего канала. Штриховые кривые относятся к одному элементу СЭЦ, а сплошные кривые относятся к двухэлементной СЭЦ.

Был изготовлен ФФ на основе найденных оптимальных значений компонент вектора \bar{A} для двухэлементной структуры. Экспериментальный образец был рассчитан на рабочий диапазон частот 1,5-3,0 ГГц.

На рис. 4 представлены экспериментальные ФЧХ и АЧХ для двухэлементной структуры – $C_3(\theta, \bar{A}_0)$ и $\text{КСВН}_3(\theta, \bar{A}_0)$.

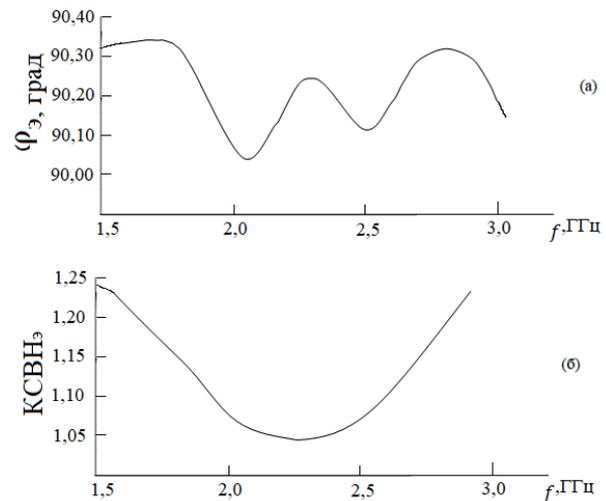


Рис. 4. Экспериментальные характеристики микрополоскового ФФ

Экспериментальные характеристики хорошо согласуются с теоретическими характеристиками: $C_3(\theta, \bar{A}_0)$ отличается от номинального значения фазового сдвига $\varphi_0 = 90^\circ$ в пределах 6° , при этом уклонение ФЧХ от нового экспериментального значения φ_0 лежит в пределах $90,2^\circ \pm 0,2^\circ$. Максимальное экспериментальное значение КСВН не превосходит 1.21, при этом теоретическое значение КСВН не превосходит 1.07.

Заключение

1. Показано, что строгое решение двухкритериальной задачи чебышевской аппроксимации заданных АЧХ и ФЧХ позволило вскрыть потенциальные возможности известной структуры ФФ в виде одного отрезка связанных ЛП, нагруженных КЗШ. Было найдено парето-оптимальное решение с привлечением симплексного метода (метода Нельдера-Мида) в среде проектирования AWR DE. Достигнуто существенное улучшение характеристик ФФ по сравнению с результатами работ других авторов: например, для номинального фазового сдвига $\varphi_0 = 90^\circ$ в полосе рабочих частот с коэффициентом перекрытия $\kappa = 2$ отклонение $\Delta\varphi_0$ от φ_0 уменьшено с $0,17^\circ$ до $0,10^\circ$, а КСВН ФК уменьшен с 1,14 до 1,10.

2. Фазосмещающие свойства новой СЭЦ широкополосных ФФ, состоящей из двух включённых каскадно элементов, каждый из которых содержит отрезок связанных ЛП, нагруженных КЗШ, позволили превзойти АЧХ и ФЧХ одноэлементных структур. Определены предельно-

достижимые параметры и преимущества по сравнению с одноэлементной структурой. Например, для $\varphi_0 = 90^\circ$ и $\kappa = 2$ достигнуто существенное уменьшение основных параметров по сравнению с прототипом: $\Delta\varphi_0$ – от 0,17° до 0,04°; КСВН – от 1,14 до 1,034; $K_{\text{макс}}$ – от 0,12 до 0,08. Структура защищена патентом на изобретение № 2374471.

3. Проведено исследование новой СЭЦ широкополосного ФФ в виде двухэлементного каскадного соединения, каждый элемент которого представляет собой структуру класса I из слабосвязанных ЛП, нагруженных КЗШ. Структура позволила обеспечить существенное уменьшение $\Delta\varphi_0$ и КСВН на входе ФК по сравнению с аналогом. С ростом числа n ступеней в структуре эти преимущества становятся подавляющими: для $n = 2$ величина $\Delta\varphi_0 = 0,15^\circ$, а для $n = 3$ – $\Delta\varphi_0 = 0,05^\circ$; КСВН уменьшается от 1,09 до 1,02. Структура защищена патентом на изобретение № 2619799.

4. Проведено комплексное теоретическое и экспериментальное исследование новой СЭЦ широкополосного ФФ, которая представляет собой структуру класса II, нагруженную на КЗШ. При равном числе ступеней, значениях φ_0 и величине κ структура обеспечивает существенно меньшие значения коэффициентов связи и $\Delta\varphi_0$ по сравнению с ФФ, на С-звеньях. Например, в случае трёхступенчатой структуры для $\varphi_0 = 90^\circ$ и $\kappa = 3$ коэффициент связи уменьшается с 0,66 до 0,24, а $\Delta\varphi_0$ уменьшается с 1,93° до 0,14°; при этом габаритные размеры ФФ уменьшаются в 1,5 раза по сравнению с прототипом. Экспериментальное исследование подтвердило указанные преимущества. Структура защищена патентом на изобретение № 2621881.

5. Предложены принципиально новые СЭЦ каналов ФФ, которые открывают перспективы исследований более

совершенных и сложных структур не только фазосмещающих, но и опорных каналов.

6. Решённые многокритериальные задачи чебышевской аппроксимации заданных АЧХ и ФЧХ, а также реализация расчётно-экспериментального метода аппроксимации функций служат эффективным инструментом исследования новых СЭЦ и ФФ на их основе.

7. Сформирован обширный материал в виде таблиц оптимальных параметров результатов решения многокритериальных задач синтеза на основе математических моделей в приближении Т-волн. Он служит основой решения подобных задач для конкретных типов ЛП – коаксиальных, полосковых, микрополосковых.

Результаты были использованы в учебном процессе Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А. на кафедре «Радиоэлектроника и телекоммуникация», номера направлений подготовки бакалавров: 11.03.01 – радиотехника и 11.03.02 – инфокоммуникационные технологии и системы связи.

Литература

1. Meschanov V.P., Metelnikova I.V., Tupikin V.D. and Chumaevskaya G.G. A New Structure of Microwave Ultrawide-Band Differential Phase Shifter. IEEE Trans. on MTT, V. 42, No 5, May, 1994, pp. 762-765.
2. Schiffman B.M. // IRE Trans. 1958. V. MTT-6. № 4. P. 232.
3. Исаев В.М., Мещанов В.П., Семенчук В.В., Шикова Л.В. Сверхширокополосные фиксированные фазовращатели на связанных линиях передачи со шлейфами – Радиотехника и электроника, 2015, т. 60, № 6, с. 604-609.

УДК 541.136/.136.88

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ РАЗРЯДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО ОКИСНОНИКЕЛЕВОГО ЭЛЕКТРОДА ОТ СПОСОБА ВНЕСЕНИЯ АКТИВНОЙ МАССЫ В ПОРИСТУЮ ОСНОВУ ЭЛЕКТРОДА

INVESTIGATION OF THE METHOD DEPOSITING ACTIVE MATERIAL INTO THE POROUS ELECTRODE BASE ON DISCHARGE CHARACTERISTICS OF THE POSITIVE NICKEL-OXIDE ELECTRODE

Гагарина А.Ю., Кукушкина О.В., Сашин Д.И., Смирнова Т.Н., к. х. н. ;
АО «НИАИ» ИСТОЧНИК», +7 (812) 449-28-98, info@niai.ru

Gagarina A.Yu., Kukushkina O.V., Sashin D.I., Smirnova T.N., Ph.D. of Chemical Sciences;
JSC "NIAI "ISTOCHNIK"; +7 (812) 449-28-98, info@niai.ru

Аннотация. Исследовано влияние способа внесения активного материала в поры металлокерамической основы окисноникелевого положительного электрода никель-кадмиевой электрохимической системы на разрядные характеристики электродов. Осаждение активного материала осуществлялось химическим, вакуумным и электрохимическим методами из насыщенного водного раствора нитрата никеля. Исследование разрядных характеристик проводилось при режимах разряда 0,3Сн, 1Сн, 2Сн и 3Сн в ячейках с одним положительным металлокерамическим и двумя отрицательными кадмиевыми электродами. Было показано, что применение новых подходов позволяет получить положительные электроды со схожими емкостными характеристиками, при этом отмечается, что корреляция между массой активного материала

и разрядной емкостью с ростом скорости разряда снижается. Также было установлено, что применение электрохимического метода осаждения позволит получать положительные электроды для разрядов высокими токами, которые необходимы в том числе и для авиационных стартерных аккумуляторных батарей. При этом возникает потенциальная возможность сократить технологический цикл изготовления положительных электродов, обеспечить стабильность их характеристик на стадии изготовления, а также значительно уменьшить энергозатраты на поддержание высоких температур при длительных циклах осаждения и, соответственно, углеродный след производства.

Abstract. The influence of the method of active material incorporation into the pores metal-ceramic base of nickel oxide positive electrode Ni-Cd system on the discharge characteristics is investigated. Deposition of active material is carried out by chemical, vacuum and electrochemical methods from saturated aqueous solution of nickel nitrate. The discharge characteristics are investigated at discharge modes 0,3Cn, 1Cn, 2Cn and 3Cn in cells with one positive metal-ceramic and two negative cadmium electrodes. It is shown the application of new approaches allows obtaining positive electrodes with similar capacitive characteristics, while it is noted that the correlation between the mass of active material and discharge capacitance decreases with increasing discharge rate. It is found that the use of electrochemical deposition method would allow obtaining positive electrodes for discharges with high currents, which are necessary for aviation starter batteries. In this case, there is a potential opportunity to reduce the technological cycle of manufacturing of positive electrodes, to ensure the stability of their characteristics at the manufacturing stage, as well as to significantly reduce energy consumption for maintaining high temperatures during long deposition cycles and the carbon footprint of production.

Ключевые слова: Ni-Cd аккумуляторы, окисноникелевый электрод, химические источники тока, электрохимическое осаждение, вакуумное осаждение, химическое осаждение, химическая технология, оксидно-никелевый электрод, металлокерамические электроды, пористые материалы.

Keywords: Ni-Cd batteries, nickel oxide electrode, chemical current sources, electrochemical deposition, vacuum deposition, chemical deposition, chemical technology, metalceramic electrodes, porous materials.

Введение

В настоящий момент аккумуляторы никель-кадмиевой (далее – НК) электрохимической системы находят широкое применение в авиационной промышленности, железнодорожных и морских транспортных системах, а также военной технике. Никель-кадмиевые аккумуляторы (далее – НКА) отличаются долговечностью и способностью выдерживать экстремальные условия эксплуатации. Так, например, рабочие температуры НК систем варьируются в диапазоне от минус 40 °С до +50 °С. Такая устойчивость особенно актуальна для отраслей, которым требуются надежные источники питания, где другие электрохимические системы с трудом обеспечивают стабильную работу. Еще одним важным преимуществом НКА заключается в их способности обеспечивать высокую скорость разряда вплоть до 5C_n. Также НКА обладают длительным сроком службы, что позволяет им выдерживать многочисленные циклы заряда-разряда без существенного ухудшения качества, средняя наработка составляет 400-900 циклов, а в буферном режиме достигает нескольких десятков тысяч циклов. Одним из ключевых достоинств НКА является низкая скорость саморазряда. В отличие от других перезаряжаемых аккумуляторов, НКА имеют минимальные потери мощности с течением времени [1-3].

Металлокерамические электроды являются одним из наиболее распространенных типов электродов в производстве химических источников тока на основе НК электрохимической системы. Металлокерамические основы получают путем спекания смеси порошкового никеля и порообразователя (карбамид, карбонат аммония и др.) в атмосфере водорода при температурах от 800 до 950 °С.

Внесение активного материала (далее – АМ) в пористую основу положительного электрода осуществляется



Гагарина А.Ю.



Кукушкина О.В.



Сашин Д.И.



Смирнова Т.Н.

путем осаждения солей никеля из растворов Ni(NO₃)₂ или NiSO₄ с последующей обработкой в щелочном растворе (KOH) для перевода солей никеля в гидроксид никеля (Ni(OH)₂) [4]. Наиболее часто используемым методом внесения АМ в металлокерамические основы является химическое осаждение (далее – ХО). Однако данный способ имеет ряд недостатков. Во-первых, осаждение АМ осуществляется в кислых растворах с водородным показателем менее 2, что приводит к коррозии никелевого каркаса электрода. Во-вторых, химический способ осаждения занимает много времени, так как представляет собой цикл из выдержки основ в растворе солей

никеля и последующей обработки в щелочи до тех пор, пока не будет набрана необходимая масса АМ. Поэтому возникает необходимость в поиске альтернативных способов осаждения АМ в металлокерамические основы. В качестве альтернативных методов в рамках данной работы рассматриваются электрохимический (далее – ЭХО) и вакуумный (далее – ВО) способы осаждения АМ.

1. Методика эксперимента

Металлокерамические основы были изготовлены путем спекания смеси порошкового никеля и порообразователя (NH_2CON) в восстановительной атмосфере водорода. В эксперименте использовались основы с пористостью не менее 70 % и толщиной 0,75 мм.

1.1. Внесение активного материала в пористую основу положительного электрода

Внесение АМ в пористые основы осуществлялось химическим, электрохимическим и вакуумным методами в водном растворе $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ с содержанием Ni^{+2} 250 г/дм³. Режимы осаждения АМ приведены в таблице 1.

Затем основы выдерживались при комнатных температурах для кристаллизации $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ на поверхности пор основы, после чего обрабатывались в течение 1 часа в концентрированном растворе КОН (280 г/дм³) при температуре 90 °С для перевода $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ в $\text{Ni}(\text{OH})_2$.

На последнем этапе осуществлялись отмывка готовых электродов в проточной воде в течение 30 минут и сушка при 20 °С.

Таблица 1

Режимы осаждения активного материала в металлокерамические основы положительного электрода

№ п/п	Параметры	Химическое осаждение	Электрохимическое осаждение	Вакуумное осаждение
1	Длительность пропитки, ч	6	1	0,5
2	Температура пропиточного раствора, °С	75	25	75
3	Кристаллизация, ч	0,5	0,5	0,5
4	Обработка в растворе КОН при 90 °С, ч	1	0,5	0,5
5	Режим осаждения	-	Потенциостатический (-700 мВ)	-
6	Остаточное давление, атм	-	-	-0,7
7	Количество циклов	4	3	3

1.2. Конструкция ячейки для определения емкостных характеристик положительных электродов

Определение емкостных характеристик электродов проводилось в ячейках с одним положительным и двумя отрицательными кадмиевыми электродами, разделенными сепаратором из полипропиленовой ткани. В качестве рабочего электролита использовался электролит, содержащий 336 г/дм³ КОН и 33 г/дм³ LiOH.

Корпусом ячейки служил пакет из полимерного материала. Постоянство габаритов ячейки обеспечивалось сжатием в струбцине, обеспечивающим межэлектродный зазор 0,36-0,39 мм.

1.3. Описание режимов электрических испытаний

Испытания электродов проводились при температуре окружающей среды (20±5) °С. В таблице 2 представлены режимы электрических испытаний.

Таблица 2

Режимы электрических испытаний

Заряд		Разряд	
Режим	Время, ч	Режим	Конечное напряжение на разряде, В
0,2C _n	до 1,55 В, но < 5	0,2C _n	1,0
0,33C _n	до 1,55 В, но < 4	0,33C _n	1,0
0,33C _n	до 1,55 В, но < 4	1C _n	1,0
0,33C _n	до 1,55 В, но < 4	2C _n	1,0
0,33C _n	до 1,55 В, но < 4	3C _n	1,0

Режим 0,2C_n соответствует стандартному режиму испытания НКА. На данном этапе происходит разработка АМ и формирование транспортных каналов в металлокерамической основе для подвода ионов электролита к активным областям электрода. Суммарно было про-

ведено 3 цикла формирования электродов, в результате чего были получены воспроизводимые значения емкостных характеристик электродов. Для электродов с ХО АМ значение формирочной разрядной емкости на третьем формирочном цикле составило 0,716 А·ч,

для электродов с ВО АМ – 0,639 А·ч, для электродов с ЭХО АМ – 0,605 А·ч.

ретиической (расчетной) емкости полученных электродов в зависимости от метода осаждения АМ в поры металлокерамической основы.

2. Результаты и обсуждения

В таблице 3 представлены значения массы АМ и теоретической емкости электродов.

Таблица 3

Характеристики основ в зависимости от метода осаждения АМ

Характеристика	Расчетное значение	Химическое осаждение	Вакуумное осаждение	Электрохимическое осаждение
Масса активного материала, г	2,47	2,58	2,42	2,4
Емкость электрода, $C_{теор}$, А·ч	0,713	0,746	0,699	0,693
Формировочная емкость электрода, $C_{форм}$, А·ч	-	0,716	0,639	0,605

В таблице 4 представлены разрядные характеристики электродов при различных режимах.

Таблица 4

Разрядные характеристики образцов при режимах разряда $0,33C_H$, $1C_H$, $2C_H$ и $3C_H$

Режим	Химическое осаждение		Вакуумное осаждение		Электрохимическое осаждение	
	$C_{раз}$, А·ч	$C_{раз} / C_{форм}$, %	$C_{раз}$, А·ч	$C_{раз} / C_{форм}$, %	$C_{раз}$, А·ч	$C_{раз} / C_{форм}$, %
$0,33C_H$	0,714	99,7	0,637	99,7	0,602	99,5
$1C_H$	0,659	92,0	0,591	92,5	0,548	90,6
$2C_H$	0,499	69,7	0,545	85,3	0,525	86,8
$3C_H$	0,469	65,5	0,464	72,6	0,471	77,8

На рисунке 1 представлены разрядные кривые, полученные при разрядах режимами $1C_H$, $2C_H$ и $3C_H$.

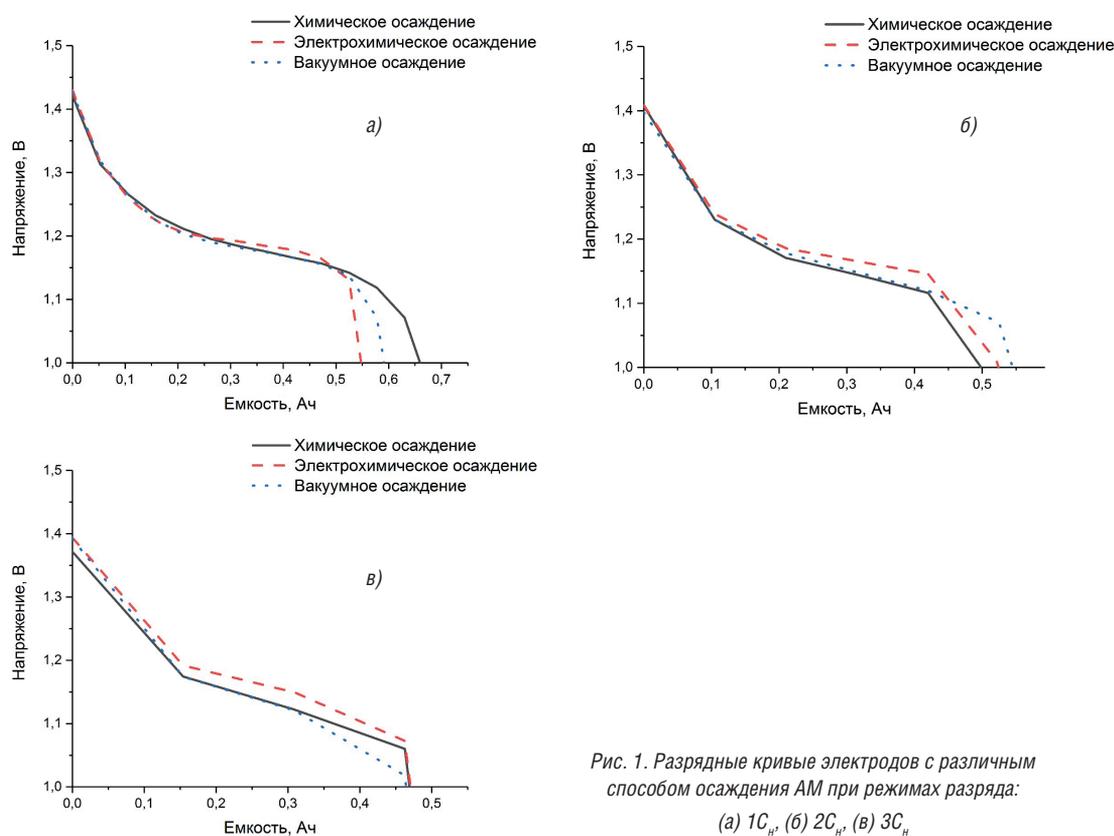


Рис. 1. Разрядные кривые электродов с различным способом осаждения АМ при режимах разряда: (а) $1C_H$, (б) $2C_H$, (в) $3C_H$

При более высоких разрядных токах наблюдается просадка разрядной ёмкости относительно формировочной до 69,7% в случае ХО, до 85,3% при ВО и 86,8% для ЭХО.

Анализ кривых показывает, что при токе разряда $1C_n$, независимо от способа внесения АМ в металлокерамическую основу, принципиальных различий в характере хода разрядных кривых нет (рис. 1 а). Наблюдается полная корреляция между количеством внесенного АМ и суммарной ёмкостью, снимаемой до напряжения 1,0 В.

При переходе к режимам $2C_n$ и $3C_n$ отмечается меньшая зависимость ёмкостных характеристик положительного электрода с ЭХО АМ от величины разрядного тока. Разрядная кривая просаживается меньше, чем при ВО и ХО (рис. 1 б-в), потери ёмкости относительно формировочной меньше (таблица 4), при этом при режиме $3C_n$ разрядная ёмкость практически не зависит от способа внесения АМ.

На рис. 2 представлены зависимости разрядной ёмкости положительных электродов от скорости разряда.

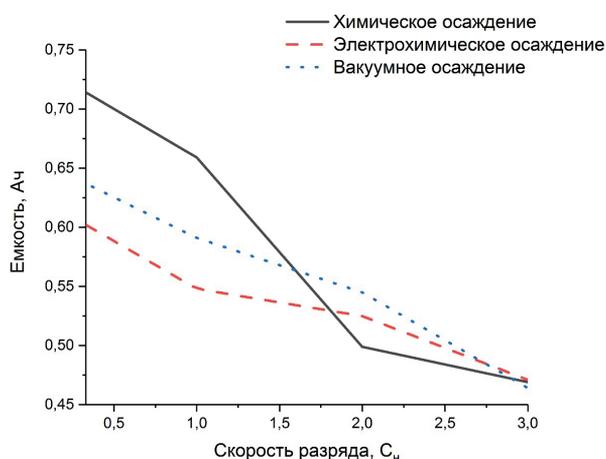


Рис. 2. Зависимость разрядной ёмкости от скорости разряда для электродов с разными способами осаждения активной массы

Из зависимости разрядной ёмкости от скорости разряда (рис. 2) видно, что для всех способов осаждения АМ ёмкость положительного электрода монотонно снижается при переходе от тока разряда $0,2C_n$ к $1C_n$, при этом величина разрядной ёмкости согласуется со значениями формировочной ёмкости и составляет порядка 90 % от значения последней. Монотонное снижение ёмкости положительного электрода наблюдается для ВО и ЭХО и при дальнейшем переходе к токам разряда $2C_n$ и $3C_n$. Для ХО наблюдается другой характер зависимости. При переходе к току разряда $2C_n$ происходит резкое падение разрядной ёмкости, реализуется всего 69,7 % формировочной ёмкости, в то время как для ВО и ЭХО эта величина составляет 85-87 %. Дальнейшее увеличение разрядного тока приводит к практическому совпадению абсолютных значений ёмкостных характеристик независимо от способа внесения АМ. Однако, для ЭХО это значение максимально и составляет 77,8 %.

Предполагается, что подобная тенденция связана с глубиной проникновения АМ и спецификой его адсорбции на поверхности пор исходной металлокерамической осно-

вы и, как следствие, уровнем его проработки в процессе циклирования [5-7].

Осаждение нитрата никеля в поры электрода за один цикл ограничено по времени, то есть оптимальным является проведение нескольких кратковременных циклов осаждения длительностью 30-90 мин с последующей обработкой в щелочи после каждого осаждения АМ. В этом случае реализуется более упорядоченное проникновение АМ в поры электрода и полный перевод нитратов в гидроксид. При этом не происходит закупорки транспортных пор и обеспечивается достаточная равнодоступность электрохимического процесса в порах, заполненных АМ. Достаточно равномерное распределение АМ по поверхности и объёму положительного электрода, полученных методами ЭХО и ВО, обеспечивает равнодоступность электрохимического процесса в широком диапазоне рабочих токов и эффективное использование АМ при высоких токах разряда, особенно при ЭХО.

В случае химического осаждения АМ лимитирующим фактором является диффузия нитрата никеля в поры металлокерамической матрицы. Так как осаждение осуществляется в насыщенном водном растворе $Ni(NO_3)_2$ при $75^\circ C$, то материал активно осаждается на поверхности пористой матрицы и его проникновение на глубину затруднено. АМ преимущественно концентрируется в приповерхностных слоях и непосредственно на самой поверхности пористой матрицы, снижая активную зону реакции и перекрывая транспортные поры, что приводит к снижению ёмкостных характеристик электродов. Высокая температура и длительные циклы при ХО провоцируют коррозию основы, что с одной стороны приводит к повышению ёмкости, но с другой приводит к потере механической прочности и нарушению связи между отдельными кластерами АМ. При низких скоростях разряда проработка АМ в глубину идет со скоростью, достаточной для получения требуемых характеристик, а при высоких скоростях разряда процесс сосредотачивается на поверхности электрода, глубокие слои электрода не прорабатываются, что приводит к резкому снижению ёмкости.

В случае ЭХО и ВО коррозия основ маловероятна ввиду малого суммарного времени осаждения, которое составляет 3 и 1,5 часа соответственно вместо 24 часов при ХО. При этом предполагается, что при ЭХО происходит более равномерное распределение АМ по пористой структуре электрода, чем в случае ХО, за счет превалирования процессов электродиффузии. В случае ВО равномерность достигается за счет сопутствующего подвода исходных ионов вещества и отвода продуктов реакции при вакуумировании и преодоления капиллярных эффектов.

Заключение

Было показано, что применение новых подходов позволяет получить положительные электроды со схожими ёмкостными характеристиками. При этом возникает потенциальная возможность сократить в несколько раз технологический цикл их изготовления, обеспечить стабильность характеристик на стадии изготовления, а также значительно уменьшить энергозатраты на поддержание

высоких температур при длительных циклах осаждения АМ и избежать коррозии никелевых основ. Применение электрохимического метода осаждения потенциально позволит получать электроды для разрядов сверхвысокими токами, которые необходимы для авиационных стартерных аккумуляторных батарей.

Литература

- Jeyaseelan C., Jain A., Khurana P., Kumar D., Thatai S. Ni-Cd Batteries. In Rechargeable Batteries: History, Progress and Applications, Boddula R., Inamuddin I., Pothu R., Asiri A.M. (Eds.), 2020. – P. 177-194.
- Daniel C., Besenhard J.O. (Eds.) Handbook of battery materials. –Wiley-VCH, Weinheim, 2011.
- Moseley P.T., Garche J. (Eds.) Electrochemical energy storage for renewable sources and grid balancing. – Elsevier, Amsterdam, 2015.
- Bernard P. Secondary batteries – Nickel systems I Nickel–Cadmium: Sealed. In book: Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, 2009. – P. 459–481. DOI:10.1016/b978-044452745-5.00154-4
- Кудрявцев Ю.Д., Галушкин Н.Е. Распределение среднего тока по глубине пористого оксидно-никелевого электрода // Электрохимия, 1997. – Т. 33. – № 5 – С. 605-606.
- Галушкин Н.Е. Моделирование процессов распределения в пористом электроде при поляризации асимметричным переменным током: диссертация к. т. н. / Галушкин Николай Ефимович. – Новочеркасск: НПИ, 1989. – 199 с.
- Сметанкин Г.П., Бурдюгов А.С., Плохова Т.В. Исследование процесса формирования никель-кадмиевых аккумуляторов на их физических моделях // Электрохимическая энергетика. – 2011. – Т. 11. – № 4 – С. 187-192.

УДК 621.3.049.77:539.12.04

ВОЗДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ МИКРОСХЕМЫ СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ПОЛЯРНОСТИ

IONIZING RADIATION ACTION ON PARAMETERS OF THE CHIP OF THE VOLTAGE REGULATOR OF THE NEGATIVE POLARITY

Богатырев Ю.В., д. т. н., г. н. с.,

Огородников Д.А., м. н. с., ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»,

Божаткин В.А., ведущий инженер,

Зайцев В.Б., ведущий конструктор, Филиал НТЦ «Белмикросистемы»
ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

Bogatyrev Yu.V., Doctor of Technical Sciences, Chief Scientific Officer,

Aharodnikau D.A., Junior Research Assistant, Chief Scientific Officer,
Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus,

Bozhatkin V.A., Lead Engineer,

Zajtsev V.B., Lead Designer, Branch of STC “Belmikrosystems” OJSC “INTEGRAL” –
Managing Company of the Holding “INTEGRAL”

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния гамма-излучения Co^{60} на параметры микросхемы IL137 линейного регулируемого стабилизатора напряжения отрицательной полярности. Микросхемы IL137 предназначены для создания опорного напряжения U_{on} значением минус 1,25 В и с помощью внешнего резистивного делителя – регулируемого выходного напряжения от минус 1,25 В до минус 31,25 В. Разработаны конструктивно-технологические решения реализации радиационно-стойкого стабилизатора напряжения: использование вертикальных изолированных pnp-транзисторов (вместо горизонтальных pnp транзисторов); использование сильнолегированных разделительных областей p^+ типа между элементами и др. Получена устойчивая по накопленной дозе с уровнем не менее 100 крад (Si) конструкция регулируемого стабилизатора напряжения. Достаточно высокая радиационная стойкость микросхем IL137 позволяет рекомендовать их для использования в космической аппаратуре.

Annotation. The results of experimental studies of the effect of gamma radiation Co^{60} on the parameters of the IL137 chip of a linear adjustable voltage stabilizer of negative polarity are presented. The IL137 chips are designed to create a reference voltage U_{on} with a value of minus 1,25 V and with the help of an external resistive divider – an adjustable output voltage from minus 1,25 V to minus 31,25 V. Constructive and technological solutions for the implementation of a radiation-resistant voltage stabilizer have been developed: the use of vertical isolated pnp transistors (instead of horizontal pnp transistors); the use of

heavily alloyed p^+ type separation areas between elements, etc. The design of an adjustable voltage stabilizer, stable in terms of accumulated dose with a level of at least 100 krad (Si), was obtained. Sufficiently high radiation resistance of IL137 chips allows us to recommend them for use in space equipment.

Ключевые слова: гамма-излучение, микросхема, регулируемый стабилизатор напряжения, радиационная стойкость.

Keywords: gamma radiation, chip, adjustable voltage regulator, radiation resistance.

Введение

Обеспечение радиационной стойкости интегральных микросхем (далее – ИМС) является важной проблемой микроэлектроники, связанной с созданием и эксплуатацией электронной аппаратуры авиационной, ракетно-космической техники, атомных энергетических установок, ряда промышленных систем [1-3].

За последние годы в ОАО «Интеграл» достигнуты определенные успехи в реализации новых схемотехнических, конструктивных и технологических решений, обеспечивающих высокую стойкость ИМС к воздействию ионизирующей радиации [4].

Любая электронная аппаратура, от простейших функциональных блоков до сложнейших цифровых и микропроцессорных систем, требует для своей работы одного или нескольких источников питания, стабильность которых обеспечивается с помощью стабилизаторов напряжения.

Стабилизатор напряжения – это устройство, которое вырабатывает постоянное напряжение, необходимое для работы схемы и для обеспечения тока в нагрузке [5]. Внутренняя схема стабилизатора управляет выходным напряжением таким образом, чтобы оно незначительно зависело от тока, потребляемого нагрузкой, изменения напряжения питания, температуры окружающей среды и некоторых других параметров. Существует большое количество ИМС стабилизаторов напряжения, обеспечивающих как положительное, так и отрицательное выходное напряжение, включая регулируемые стабилизаторы напряжения, трехвыводные стабилизаторы с фиксированным выходным напряжением и импульсные стабилизаторы.

В статье [6] были представлены радиационно-стойкие линейные стабилизаторы напряжения серии IRUN3301 компании International Rectifier. Устойчивость этих стабилизаторов к воздействию накопленной дозы радиации достигала 500 крад (Si).

В работе [7] были представлены радиационно-стойкие микросхемы линейных стабилизаторов напряжения 5321EH01, 5321EH02, 5321EM06, которые выпускаются в брянском АО «Группа Кремний ЭЛ». Электрические параметры микросхем после воздействия ионизирующей радиации дозой 1 Мрад (Si) не выходили из предельно допустимых значений.

Ранее в нашей работе [8] исследовались микросхемы 1326ПН1Т (импульсный понижающий стабилизатор напряжения). Было установлено, что выходное напряжение образцов микросхем 1326ПН1Т, измеренное в процессе гамма-облучения, оставалось в пределах норм технических условий при дозе 1,3 Мрад (Si).

Цель данной работы — исследование и разработка



Богатырев Ю.В.



Огородников Д.А.



Божаткин В.А.



Зайцев В.Б.

конструктивно-технологических решений реализации линейного регулируемого стабилизатора напряжения отрицательной полярности с повышенной радиационной стойкостью по накопленной дозе.

Методика экспериментов

Объектом исследований являлись экспериментальные образцы линейного регулируемого стабилизатора напряжения отрицательной полярности (далее ИМС-1), разработанные в ОАО «Интеграл» и изготовленные по биполярной технологии в металлокерамическом корпусе КТ-93-1. В качестве функционального аналога был выбран линейный регулируемый стабилизатор напряжения отрицательной полярности иностранного производства (далее – ИМС-2) с уровнем стойкости по накопленной дозе 100 крад (Si).

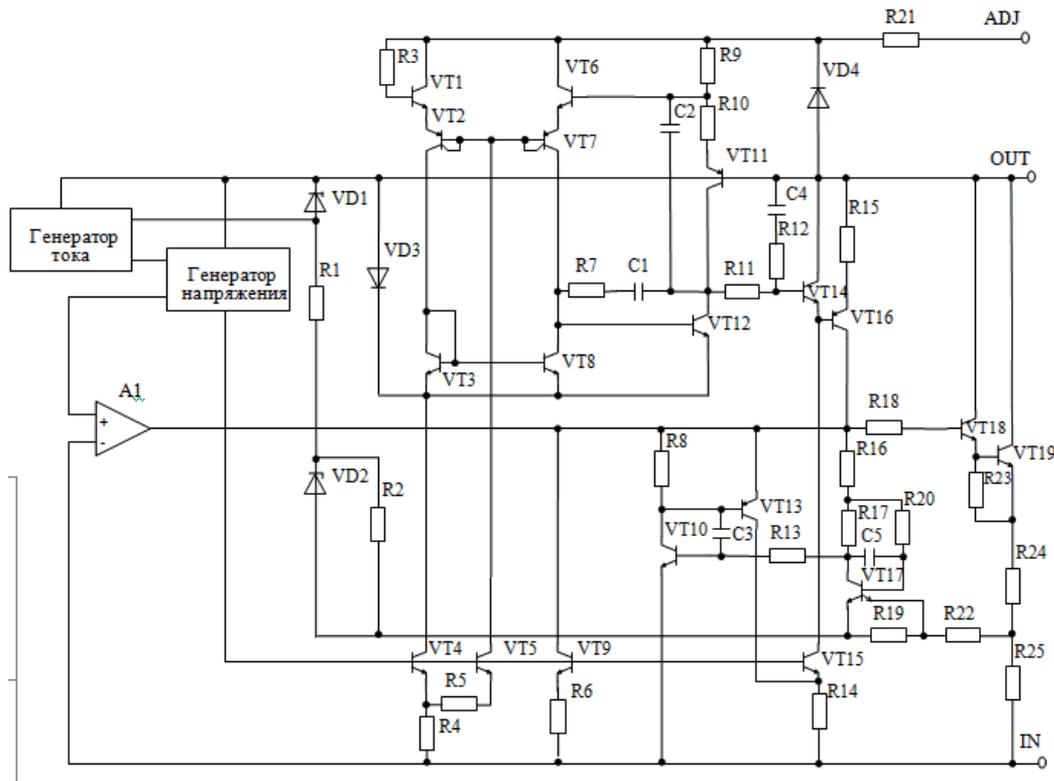
ИМС-1 предназначены для создания опорного напряжения $U_{оп}$ значением минус 1,25 В и с помощью внешнего резистивного делителя – регулируемого выходного напряжения от минус 1,25 В до минус 31,25 В. Выходной ток составляет не менее 1,5 А. Падение напряжения ($U_{вх} - U_{вых}$) на стабилизаторе – в диапазоне от минус 3 В до минус 30 В. Данный стабилизатор имеет защиту от превышения мощности путем внутреннего ограничения выходного тока (тока нагрузки) при превышении напряжения питания, имеет внутреннее ограничение максимального тока нагрузки с температурным сбросом выходного напряжения.

Разработка ИМС-1 заключалась в поиске конструктивно-технологических решений для получения уровня стойкости по накопленной дозе 100 крад (Si). Отработку

конструктивно-технологических решений для повышения стойкости к воздействию ионизирующей радиации проводили на основе конструкции серийно выпускаемого регулируемого стабилизатора напряжения отрицательной полярности (далее – ИМС-3) с уровнем стойкости по на-

копленной дозе до 60 крад (Si) в режиме $U_{\text{вх}} = -4,25 \text{ В}$; $I_{\text{ввх}} = 10 \text{ мА}$.

Структурная схема регулируемого стабилизатора приведена на рис. 1.



А1 – усилитель; С1 – С5 – конденсаторы; R1 – R25 – резисторы; VD1, VD2 – стабилитроны; VD3, VD4 – диоды; VT1 – VT19 – транзисторы

Рис. 1. Схема электрическая структурная регулируемого стабилизатора напряжения отрицательной полярности

Изначально элементная база регулируемого стабилизатора напряжения отрицательной полярности включала в себя: вертикальные ррп-транзисторы с разной площадью эмиттера; горизонтальные и вертикальные ррп транзисторы; р⁺ резисторы, выполненные в слое «База» с $R_s=200 \text{ Ом/кв}$; п⁺ резисторы; конденсаторы на переходе коллектор – база, эмиттер – база.

Следует отметить, что уменьшение размеров биполярных транзисторов и переход к интегральным микросхемам большой и сверхбольшой степени интеграции привели к тому, что доминирующими стали поверхностные радиационные эффекты. Эти эффекты связаны с процессами накопления поверхностных состояний и заряда в пассивирующем окисле над базовой областью транзистора по периферии эмиттерного перехода [2]. При облучении на границе раздела Si-SiO₂ образуются дополнительные центры рекомбинации, что и приводит к уменьшению времени жизни. Как результат деградации времени жизни коэффициент усиления по току β существенно уменьшается в биполярных транзисторах ррп – и рпп-типов [9]. Особенно чувствительными к эффектам полной ионизационной дозы являются горизонтальные ррп-транзисторы, которые имеют радиационно-чувствительную границу раздела «окисел–кремний» над рп-переходом эмиттер – база. В то же время, вертикальные ррп-транзисторы наименее чув-

ствительны к ионизационным эффектам по сравнению с другими биполярными приборами, включая вертикальные ррп-транзисторы [7, 10].

В данной работе проводились предварительные радиационные испытания элементной базы ИМС стабилизаторов. Было установлено, что радиационная стойкость вертикальных ррп-транзисторов заметно выше стойкости горизонтальных ррп-транзисторов после облучения дозой 150 крад (Si) (таблица 1).

Поскольку основным компонентом элементной базы, склонным к деградации (уменьшению $\beta_{\text{рпп}}$) при дозовой нагрузке, является горизонтальный ррп-транзистор, разработка микросхемы для повышения $\beta_{\text{рпп}}$ была основана на замене горизонтальных ррп-транзисторов на вертикальные, изолированные от подложки, с большим на порядок быстродействием, что потребовало поиска и применения дополнительных схемотехнических решений, реализованных с использованием при проектировании Spice-моделей [11], в результате чего был выполнен ряд изменений в электрической схеме для исключения паразитной генерации, особенно при малых рабочих базовых токах ррп-транзисторов (10-20 нА).

Обеспечение стойкости к воздействию ионизирующего излучения также достигается использованием специальных конструктивных и технологических решений:

формирование высоколегированных р⁺ областей между элементами; использование вертикальных изолированных ррр-транзисторов; использование п-кармана, п⁺ и р⁺ скрытых слоев для предотвращения тиристорного эффек-

та; использование мелкозалегающих базовых областей вертикальных ррп – и ррр-транзисторов; защита поверхности кристалла нитридом кремния при формировании базового диэлектрика.

Таблица 1

Влияние гамма-облучения C_{o}^{60} на коэффициент усиления по току горизонтальных и вертикальных ррр-транзисторов

D, крад	№ обр.	Коэффициент усиления по току (в режиме питания), ед.					
		Горизонтальный ррр-транзистор			Вертикальный ррр-транзистор		
		$I_0=100 \text{ нА}$ $U_3=5,0 \text{ В}$	$I_0=1 \text{ мкА}$ $U_3=5,0 \text{ В}$	$I_0=10 \text{ мкА}$ $U_3=5,0 \text{ В}$	$I_0=100 \text{ нА}$ $U_3=5,0 \text{ В}$	$I_0=1 \text{ мкА}$ $U_3=5,0 \text{ В}$	$I_0=10 \text{ мкА}$ $U_3=5,0 \text{ В}$
0	1	100	62,4	30,9	92	99	87
	2	111	64	31,1	110	101	82
	3	98	62	30,5	98	92	76
	4	112	66	31	120	110	84
	5	112	66	31	-	-	-
	6	111	66	31	-	-	-
150	1	1	2,19	3,7	8,3	17,7	30
	2	0,9	2,1	3,6	8	16,9	28,3
	3	0,9	2,1	3,57	8,8	17,3	28
	4	1	2,2	3,84	8,7	16,9	27,4
	5	1	2,1	3,68	-	-	-
	6	1	2,08	3,55	-	-	-

Облучение образцов ИМС гамма-квантами Co^{60} с энергией 1,25 МэВ проводилось на установке «Исследователь» при температуре 300 К. Мощность дозы гамма-излучения составляла 6 рад (Si)/с, доза $D = 10^4 \div 5 \cdot 10^5$ рад (Si). Дозиметрия гамма-излучения проводилась образцовыми твердотельными стеклянными детекторами ДТС-0.01/1.0 с погрешностью $\pm 7\%$.

Результаты экспериментов

Результаты испытаний экспериментальных образцов ИМС-1 на воздействие накопленной дозы с контролем при проведении испытаний параметра «опорное напряжение» $U_{оп}$ приведены на рис. 2, где для сравнения показаны дозовые зависимости параметра $U_{оп}$ ИМС-3 (первоначальный вариант серийно выпускаемой ИМС), ИМС-1 в различных режимах (схема доработана конструктивно и технологически), а также функционального аналога – ИМС-2.

Получены следующие результаты после воздействия накопленной дозы:

- для ИМС-1: в режиме $U_{вх} = -4,25 \text{ В}$, $I_{вых} = 10 \text{ мА}$, $P = 0,03 \text{ Вт}$, $T_{кр} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ приборы выдержали 150 крад (Si), в режиме $U_{вх} = -41,3 \text{ В}$, $I_{вых} = 10 \text{ мА}$, $P = 0,4 \text{ Вт}$, $T_{кр} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ – 100 крад (Si), в режиме $U_{вх} = -6,4 \text{ В}$, $I_{вых} = 380 \text{ мА}$, $P = 2 \text{ Вт}$, $T_{кр} = 105 \text{ }^\circ\text{C}$ – 220 крад (Si);
- для ИМС-3 при $D = 60$ крад (Si) в режиме $U_{вх} = -4,25 \text{ В}$, $I_{вых} = 10 \text{ мА}$.

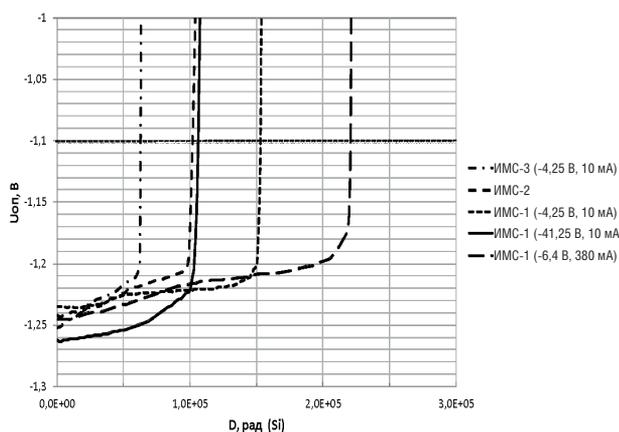


Рис. 2. Дозовые зависимости параметра $U_{оп}$ микросхем регулируемых стабилизаторов напряжения отрицательной полярности ИМС-3 (первоначальный вариант схемы), ИМС-1 (схема доработана конструктивно и технологически) в различных режимах, а также функционального аналога – ИМС-2

Заключение

Исследовано влияние гамма-излучения Co^{60} на параметры конструктивно и технологически доработанного линейного регулируемого стабилизатора напряжения отрицательной полярности ИМС-1. Проведен поиск и опробованы конструктивно-технологические решения реализации ИМС радиационно стойкого стабилизатора напряжения. Получена конструкция регулируемого стабилизатора напряжения отрицательной полярности ИМС-1 с уровнем стойкости по накопленной дозе не менее 100 крад (Si). Следует отметить, что при определен-

ных электрических режимах ИМС-1 выдержали дозу до 220 крад (Si).

Достаточно высокий уровень стойкости по накопленной дозе ИМС-1 позволяет рекомендовать их для использования в космической аппаратуре при серийном выпуске.

Литература

1. Коршунов Ф.П. Воздействие радиации на интегральные микросхемы / Коршунов Ф.П., Богатырев Ю.В., Вавилов В.А., Минск: Наука и техника, 1986. 254 с.
2. Першенков В.С. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем / Першенков В.С., Попов В.Д., Шальнов А.В., М.: Энергоатомиздат, 1988. 256 с.
3. Чумаков А.И. Действие космической радиации на интегральные схемы / Чумаков А.И., М.: Радио и связь, 2004. 320 с.
4. Белоус А.И. Космическая электроника / Белоус А.И., Солoduха В.А., Шведов С.В., М.: Техносфера, 2015. Кн. 2. 488 с.
5. Костиков В.Г. Источники электропитания электронных средств. Схемотехника и конструирование: Учебник для ВУЗов / Костиков В.Г., Парфенов Е.М., Шахнов В.А., М.: Горячая линия — Телеком, 2001. 344 с.
6. Жданкин В. Радиационно-стойкие линейные стабилизаторы напряжения со сверхнизким падением напряжения для ракетно-космической техники / Жданкин В. // Компоненты и технологии. 2011, № 7. С. 124-128.
7. Громов В. Радиационно-стойкие отечественные линейные стабилизаторы напряжения 5321ЕН01, 5321ЕН02, 5321ЕМ06 / Громов В., Дерябин А., Смирнов В. // Электроника: наука, технология, бизнес. 2020, № 7 (00198). С. 138-140.
8. Определение работоспособности микросхем стабилизаторов напряжения в процессе и после облучения / Богатырев Ю.В., Ластовский С.Б., Шведов С.В. (и др.) // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2016. Вып. 4. С. 27-29.
9. Emily D.W. Total Dose Response of Bipolar Microcircuits / Emily D.W. // 1996 IEEE NSREC. IEEE Nuclear and Space Radiation Conference. Short Course. Radiation Effects Challenges for 21st Century Space Systems. California, 1996. P. III-1-III-78.
10. Hardness Assurance and Testing Issues for Bipolar / BiCMOS Devices / Nowlin R.N., Fleetwood D.M., Schrimpf R.D. (et al.) // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1993. Vol. NS-40, No.6. P. 1686-1693.
11. Володин В.Я. LTspice: компьютерное моделирование электронных схем / Володин В.Я., СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 400 с.

УДК 621.371.334:004.312.22

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ФАКТОРОВ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ МИКРОСИСТЕМ

STUDY OF THE INFLUENCE OF DESIGN FACTORS OF LOGIC ELEMENTS ON THEIR FUNCTIONING FOR PROMISING INTEGRATED OPTICAL MICROSYSTEMS

Амеличев В.В., к. т. н., **Кадочкин А.С.**, к. ф.-м. н., **Генералов С.С.**, **Горелов Д.В.**,
НПК «Технологический центр»; +7 (499) 720-87-79; V.Amelichev@tcen.ru

Amelichev V.V., Ph. D., **Kadochkin A.S.**, Ph. D., **Generalov S.S.**, **Gorelov D.V.**,
SMC "Technological Centre"; +7 (499) 720-87-79; V.Amelichev@tcen.ru

Аннотация: Логические элементы являются важными компонентами интегрально-оптических систем. Проведено исследование оптического логического элемента «исключающего ИЛИ» (XOR) на двухмерном фотонном кристалле. Выполнена оценка оптических свойств фотонно-кристаллической структуры от геометрических параметров (высоты) наностолбиков. В дальнейшем создание и оптимизация логических элементов на двухмерно-периодических структурах имеет потенциальное применение в области обработки оптических сигналов и интегральных оптических микросистем.

Annotation: Logic elements are important components of integral optical systems. A study of the optical logic element «excluding OR» (XOR) on a two-dimensional photonic crystal has been carried out. The optical properties of the photonic crystal structure are estimated from the geometric parameters (height) of the nanostructures. In the future, the creation and optimization of logic elements on two-dimensional periodic structures has potential applications in the field of optical signal processing and integrated optical microsystems.

Ключевые слова: фотонный кристалл, логический элемент, интегральная оптическая микросистема, фотонная интегральная схема, дифракция.

Key words: photonic crystal, logic element, integrated optical microsystems, photon integrated circuit, diffraction.

Введение

Современное развитие микросистемной техники связано с усиливающимися тенденциями интеграции микроэлектромеханических систем (далее – МЭМС) и оптических схем. Использование интегральной технологии микросхем позволяет изготовить оптические схемы различной сложности, в том числе, и фотонные интегральные схемы (далее – ФИС) [1]. Рассмотрение известных оптических схем и ФИС с позиции материального объекта, представляющего собой упорядоченную в объеме и (или) на поверхности твердого тела композицию микронных и субмикронных областей материалов с заданным составом, структурой и геометрией, обеспечивающий реализацию информационно-управляющих функций, позволяет сделать вывод о том, что данные объекты также соответствуют определению «микросистема» [2]. С учетом интегрального способа изготовления и физических принципов функционирования данные объекты можно идентифицировать как интегральная оптическая микросистема (далее – ИОМС). Введение в конструкцию ИОМС микромеханических элементов (мембрана, балка, консоль) только подтверждает данное определение, за счет усиления информационно-управляющей части функционирования.

Наиболее применяемыми материалами в процессе создания ИОМС являются кремний (Si) и диэлектрические пленки, содержащие кремний в своем составе. Как правило, диэлектрические пленки оксида (SiO_2) и нитрида кремния (Si_3N_4) применяются для создания интегральных оптических волноводов (далее – ИОВ) и оптических волноводных структур (далее – ОВС) [3, 4]. Слой Si, сформированный на диэлектрике, является составной частью структуры кремний на изоляторе (далее – КНИ) и достаточно распространен в применениях для создания ФИС [5, 6]. С другой стороны, КНИ также широко используются для создания МЭМС [7, 8, 9]. Поэтому в перспективе на КНИ в рамках одного кристалла можно будет создавать комбинацию ФИС и МЭМС. Кроме того, на КНИ можно создавать ИОВ и интегральные оптические схемы на их основе, а также и комбинацию их с МЭМС или с микромеханическими элементами (далее – ММЭ) на одном кристалле. В итоге, данная траектория развития микросистем ведет к созданию перспективных ИОМС, обладающих многофункциональностью, высоким быстродействием, энергоэффективностью и компактностью. Для реализации в составе ИОМС микропроцессорной части может использоваться блок ФИС, реализуемый на кремниевой фотонно-кристаллической структуре [10, 11]. Типовые структурные элементы, входящие в вычислительный блок ФИС, должны выполнять все основные логические функции (И, ИЛИ, НЕ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ). Поэтому одной из актуальных задач при создании ИОМС, является исследование влияния конструктивных факторов логических элементов на их функционирование. Одним из эффективных способов исследования является моделирование, которое можно выполнять как для 2D объектов, так и для 3D. В ряде случаев, когда фотонный кристалл ограничен по высоте, можно с достаточной степенью точности использовать для расчетов 2D геометрии.



Кадочкин А.С.



Генералов С.С.



Горелов Д.В.

1. Влияние толщины фотонно-кристаллической структуры на дисперсионную зависимость

На данный момент в различных источниках опубликовано достаточно большое количество работ, в которых предлагаются различные схемы реализации оптических логических элементов на основе фотонно-кристаллических структур [12–14]. В большинстве таких работ рассматриваемая геометрия является двухмерной т. е. структура фактически является бесконечной в направлении оси z (оси, перпендикулярной плоскости фотонного кристалла). Такое рассмотрение позволяет существенно экономить вычислительные ресурсы по сравнению с полноценным 3D-моделированием. Для того, чтобы в реальных условиях можно было пренебречь ограниченностью фотонно-кристаллической структуры в направлении, перпендикулярном плоскости этой структуры, нужно чтобы её высота составляла значительное количество длин волн, что при оптической (или телекоммуникационной) длине волны составляет не менее нескольких десятков мкм. Как показывают расчёты [12] типичный диаметр наностолбика составляет величину порядка ста нанометров. Таким образом, элемент, образующий фотонно-кристаллическую структуру, должен иметь аспектное соотношение (отношение продольного размера к поперечному) не менее ста, что вызывает определенные трудности при несоответствующем технологическом оснащении. Уменьшение высоты элемента фотоннокристаллической структуры (наностолбика) до приемлемой величины (несколько десятков нанометров) сталкивается с ограничением по отсечке длины волны, поэтому требует теоретического исследования влияния ограничения по толщине фотонно-кристаллической структуры на характер её взаимодействия с оптической волной. Для этого были исследованы физические свойства фотонного кристалла, представляющего собой периодический массив отверстий в кремниевой пластине, заполненных SiO_2 (структура выбрана в качестве примера). Были исследованы дисперсионные зависимости при различных толщинах фотонно-кристаллической структуры.

На рис. 1 показана структура исследованного кристалла. В кремниевой пластине (толщиной H от 300 до 1500 нм) сформирован квадратный массив с периодом (шагом) $T=300$ нм из цилиндрических отверстий радиусом $R=50$ нм, заполненных SiO_2 .

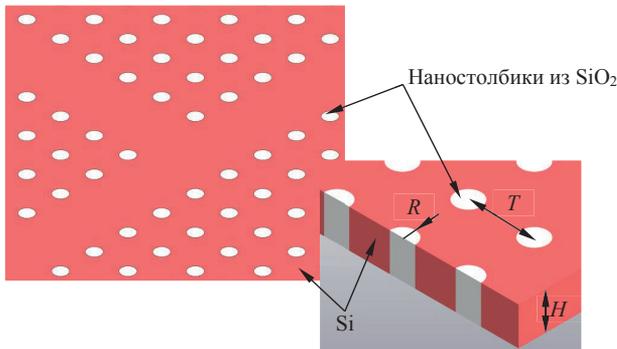


Рис. 1. Структура фотонного кристалла:

R – радиус наностолбика, T – период решетки (шаг), толщина H кремния

На рис. 2 показано распределение модового поля исследованного фотонного кристалла. Поле моды поляризовано преимущественно в плоскости (xy). Это обстоятельство позволяет заключить, что в случае ограниченных по высоте фотонно-кристаллических структур наиболее эффективным будет возбуждение волной с ТЕ-поляризацией.

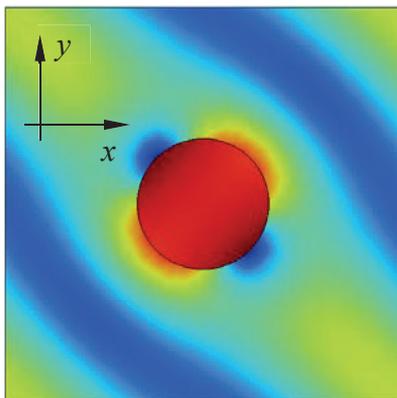


Рис. 2. Распределение модового поля элементарной ячейки фотонного кристалла в плоскости (xy)

Дисперсионные зависимости фотонного кристалла показаны на рис. 3. Из графика видно, что с увеличением толщины фотонного кристалла зонная диаграмма сдвигается в сторону меньших частот. В качестве предельного случая была исследована 2D-модель, означающая фактически бесконечную высоту столбика (жёлтая кривая на рис. 3). Кроме того, на рис. 3 дисперсионные зависимости, соответствующие толщине фотонного кристалла 1500 нм и бесконечности (2D случай), отличаются незначительно. По результатам данных, представленных на рис. 3, построена зависимость положения нижнего края запрещённой зоны в центре зоны Бриллюэна (рис. 4). Из рис. 4 видно, что при значениях толщины фотонного кристалла больше 1 мкм зависимость дисперсионных свойств фотонного кристалла от толщины имеет более плавный характер.

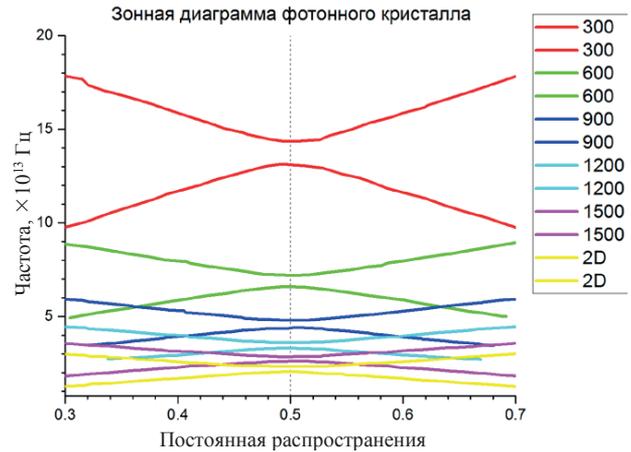


Рис. 3. Зонная диаграмма фотонного кристалла при различной высоте столбиков (значения на вставке справа – высота столбиков фотонного кристалла в нм)

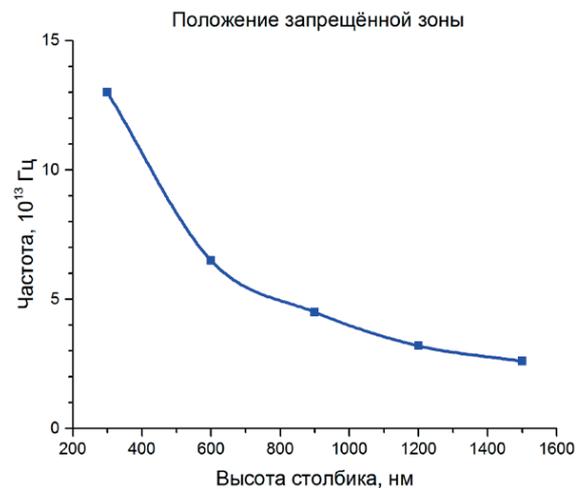


Рис. 4. Положение запрещённой зоны (в центре зоны Бриллюэна) фотонного кристалла при различной высоте столбика

2. Логический элемент XOR на основе фотонно-кристаллической структуры

При помощи численного моделирования проведено исследование логического элемента «исключающее ИЛИ» (XOR). Оптический логический элемент реализован на фотонно-кристаллической структуре, основные параметры которой аналогичны параметрам структуры в работе [13]. При этом, в отличие от авторов работы [14], проводивших исследование при помощи 2D-моделирования, т. е. фактически бесконечной в поперечном направлении структуры, был исследован логический элемент на основе фотонно-кристаллической структуры, ограниченной по высоте.

Исследованный логический элемент является логическим элементом интерференционного типа. Принцип действия логических элементов такого типа основан на использовании оптической интерференции оптических волн, интенсивность оптических волн при этом может быть малой, поскольку исключаются нелинейные процессы при их функционировании. Такие элементы могут реализовать одну заданную их конструкцией логическую функцию и не могут быть использованы для создания

оптических ключей (оптических транзисторов), для которых, как правило, необходимо использование нелинейных эффектов.

Моделирование выполнялось методом varFDTD (variational FDTD – разновидность метода FDTD (Finite Difference Time Domain)), являющегося адаптацией полноценного 3D FDTD-метода к однородным в поперечном направлении структурам [15] и позволяющего существенно сократить требования к вычислительным ресурсам по сравнению с полноценным 3D-моделированием.

Первоначально принятая в качестве прототипа модель, рассчитанная авторами работы [16] для бесконечной в направлении оси z фотонно-кристаллической структуры, была адаптирована к максимально приближенным условиям изготовления в два этапа. На рис. 5 (а) приведена геометрия моделируемой фотонно-кристаллической структуры с наностолбиками из Si. На рис. 5 (б) представлено обозначение логического элемента XOR и его таблицы истинности. На первом этапе была учтена ограниченность структуры по высоте H . Значения использованных геометрических параметров приведены в таблице 1.

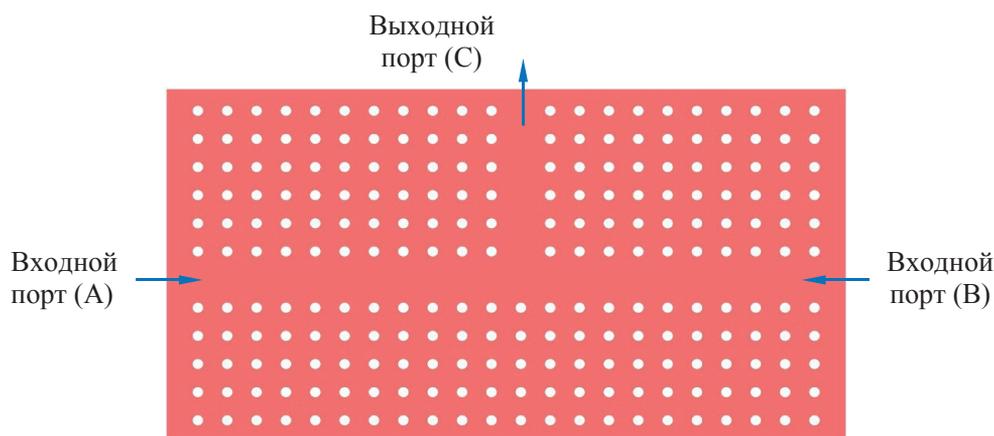
Таблица 1

Геометрические параметры исследованной фотонно-кристаллической структуры с наностолбиками из Si

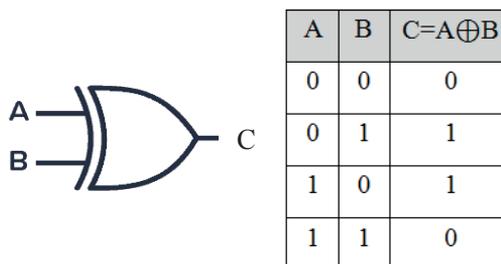
Длина волны λ , нм	Период структуры T , нм	Высота наностолбика H , нм	Радиус наностолбика R , нм	Материал наностолбиков	Материал окружающей среды
1544	519	220	100	Si ($n_{Si} \sim 3,48$)	Воздух ($n_{возд} = 1$)

Волноводная структура образована удалением одного ряда периодической структуры. Такая конструкция не является вполне реализуемой с технологической точки зрения (столбики «висят в воздухе», возможное влияние подложки и окружающей среды не учитывается),

но позволила отработать и продемонстрировать работоспособность оптического логического элемента XOR, изготовленного с учётом конечной высоты столбика. Результаты моделирования первого этапа представлены на рис. 6 (а-г).



а



б

Рис. 5. Логический элемент XOR:
а – моделируемая фотонно-кристаллическая структура;
б – обозначение логического элемента XOR с таблицей истинности

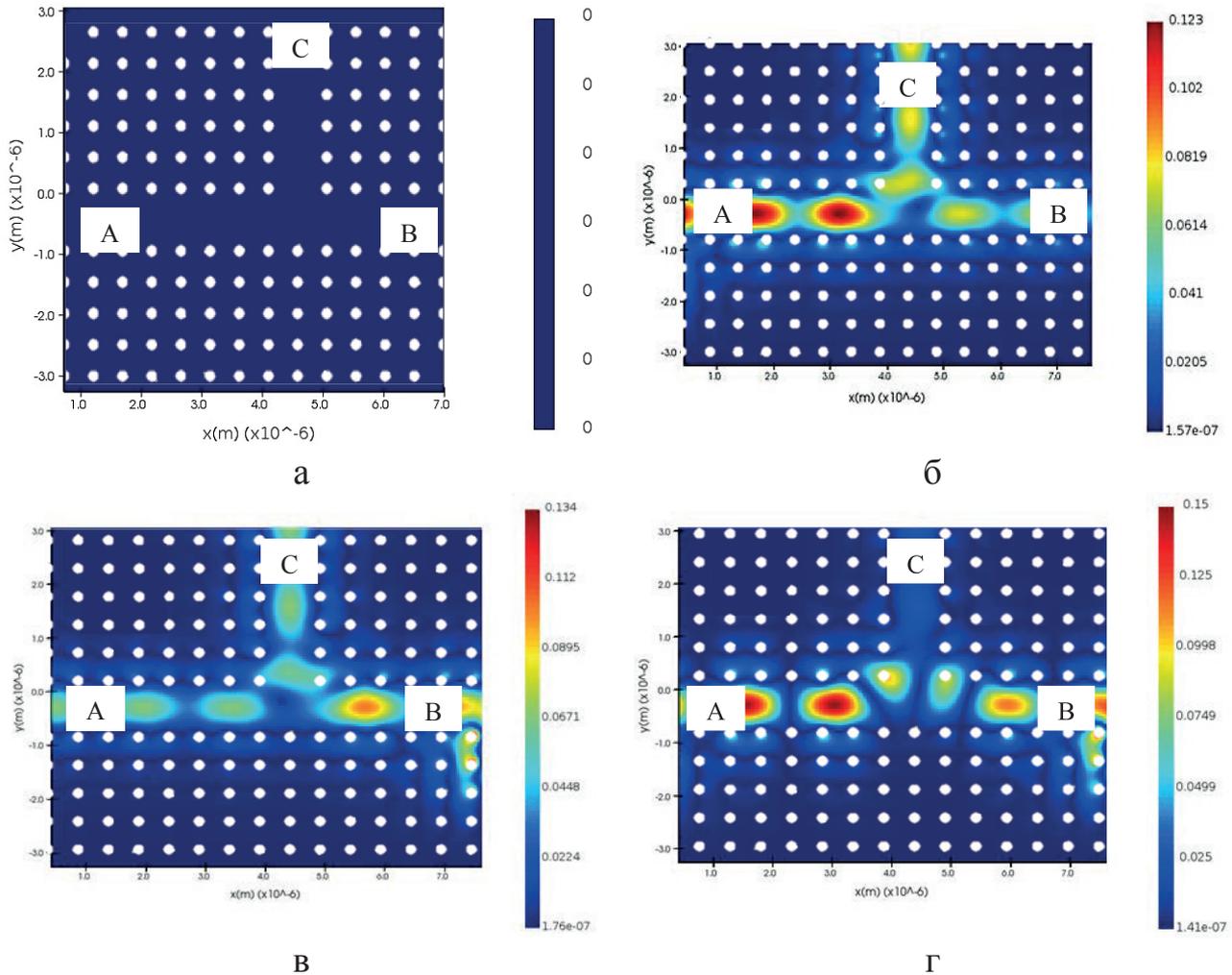


Рис. 6. Распределение электромагнитного поля при различных входных сигналах в фотонно-кристаллической структуре (с наностолбиками из Si): а – входные порты A=B=«0», выходной порт C=«0»; б – входные порты A=«1» и B=«0», выходной порт C=«1»; в – входные порты A=«0» и B=«1», выходной порт C=«1»; г – входные порты A=«1» и B=«1», выходной порт C=«0»

Из рис. 6 (а-г) видно, что логика работы элемента соответствует таблице истинности XOR, приведённой на рис. 5 (б). При одновременном значении логической «0» на входах А и В, на выходе С – логический «0» (рис. 6 (а)). При значении логическая «1» на входе А и логический «0» на входе В (на выходе В тоже есть некоторый сигнал, не влияющий на таблицу истинности), на выходе С – логическая

«1» (рис. 6 (б)). Распределение поля на рис. 6 (в) аналогично рис. 6 (б). При одновременном значении логической «1» на входах А и В, на выходе С – логический «0».

На втором этапе в качестве среды, окружающей наностолбики, был использован SiO₂. Значения использованных геометрических параметров приведены в таблице 2.

Таблица 2

Геометрические параметры исследованной фотонно-кристаллической структуры с наностолбиками из SiO₂

Длина волны λ, нм	Период структуры Т, нм	Высота наностолбика Н, нм	Радиус наностолбика R, нм	Материал наностолбиков	Материал окружающей среды
1544	519	220	100	SiO ₂ (n _{Si} ~1,46)	Si (n _{Si} ~3,48)

Результаты моделирования для фотонного кристалла с массивом наностолбиков из SiO₂ с внешней оболочкой из Si представлены на рис. 7 (а-г). Уменьшение контраста показателя преломления между материалом наностолбика

и окружающей средой в данном случае привело к уменьшению контраста между логическими «1» и «0», но при этом, как видно из рис. 7 (б-г), они остаются отчётливо различимыми.

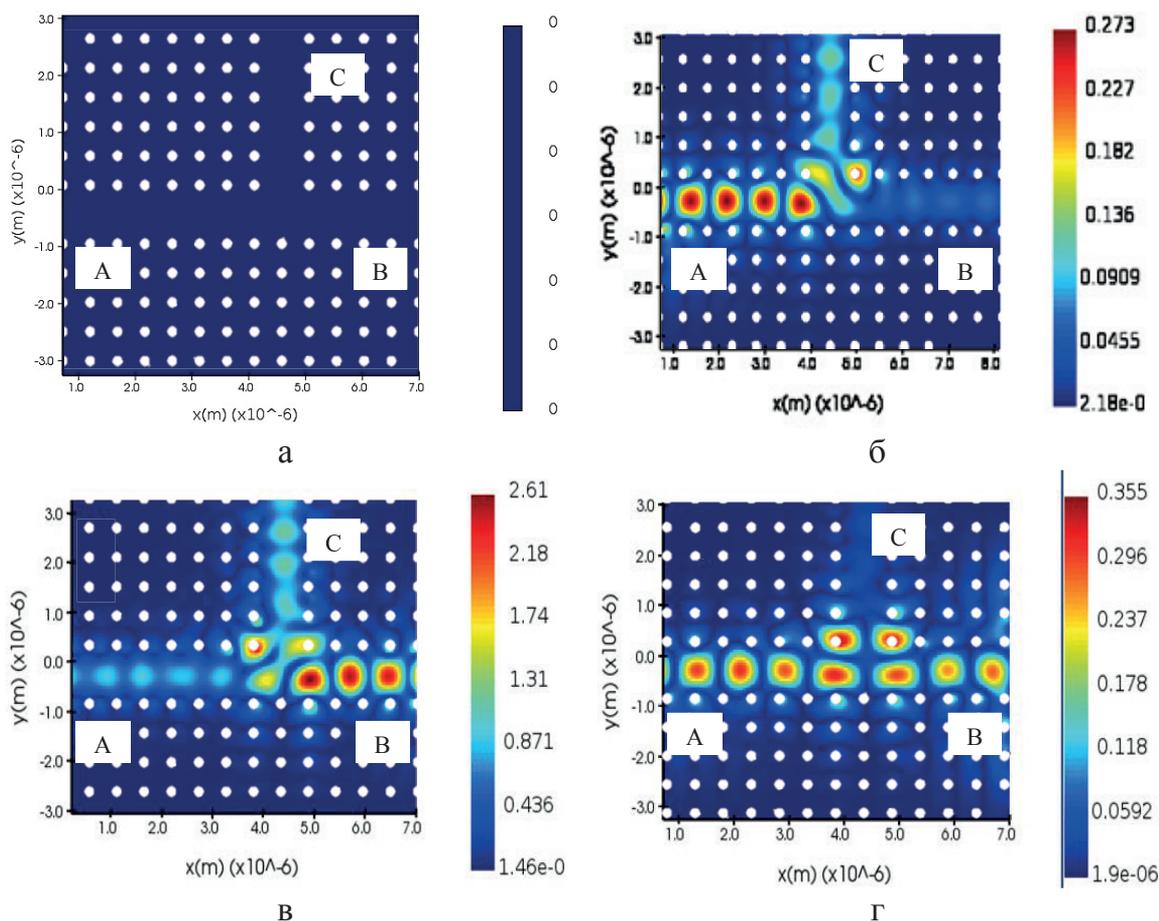


Рис. 7. Распределение электромагнитного поля при различных входных сигналах в фотонно-кристаллической структуре (с наностолбиками из SiO_2): а – входные порты $A=B=«0»$, выходной порт $C=«0»$; б – входные порты $A=«1»$ и $B=«0»$, выходной порт $C=«1»$; в – входные порты $A=«0»$ и $B=«1»$, выходной порт $C=«1»$; г – входные порты $A=«1»$ и $B=«1»$, выходной порт $C=«0»$

Аналогичным образом возможно моделирование других логических элементов, а также их комбинаций.

Заключение

Таким образом, при создании перспективных ИОМС, ФИС является одним из важных функциональных блоков, в котором может выполняться обработка оптических сигналов. Вычислительный блок ФИС, реализованный на кремниевой фотонно-кристаллической структуре, содержит логические элементы. В данной работе представлены результаты моделирования одного из конструктивных параметров логического элемента «исключающее ИЛИ» (XOR) на его функционирование.

В результате исследования показано, что ТЕ моды двумерного фотонного кристалла распространяются в структурах ограниченной толщины (до 300 нм). Также в результате исследований установлено, что при толщине фотонного кристалла порядка 1 мкм фотонные моды существенно не отличаются от мод бесконечного по высоте фотонного кристалла. Таким образом, с точки зрения экономии вычислительных ресурсов, можно выполнять 2D расчёт структуры фотонного кристалла вместо 3D расчёта.

Промоделированный оптический логический элемент XOR интерференционного типа показал соответствующее

таблице истинности функционирование. Для исследования работы данного оптического элемента использовалось излучение с ТМ-поляризацией.

Результаты исследования показывают возможность создания оптических логических элементов интерференционного типа на основе фотонно-кристаллических структур с учётом реальных параметров. Ограничение по толщине фотонно-кристаллических структур может быть связано конструктивно-технологическими возможностями применяемого производственного оборудования.

Поддержка

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, в рамках научной темы FNRМ-2022-0007.

Литература

1. Монием Т.А. Полностью оптический логический элемент «исключающее ИЛИ–НЕ» на основе двумерных фотонно-кристаллических кольцевых резонаторов // Квантовая электроника. – 2017. – Т. 47. – № 2. – С. 169–172.
2. ГОСТ РВ 0159-002-2008 «Микросистемная техника военного назначения. Термины и определения».
3. Gardes F. et al. A review of capabilities and scope for

- hybrid integration offered by silicon-nitride-based photonic integrated circuits // *Sensors*. – 2022. – Т. 22. – № 11. – С. 4227.
4. Кулинич И.В., Сомогонянец А.А., Шестериков Е.В., Моховиков Д.М. Интегральные оптические волноводы на основе пленок Si₃N₄ // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022 Т. 5, № 3 С. 318-324.
 5. Fu Y., Hu X., Gong Q. Silicon photonic crystal all-optical logic gates // *Physics letters A*. – 2013. – Т. 377. – № 3-4. – С. 329-333.
 6. Shaik E. H., Rangaswamy N. Single photonic crystal structure for realization of NAND and NOR logic functions by cascading basic gates // *Journal of computational Electronics*. – 2018. – Т. 17. – С. 337-348.
 7. Barbin E. et al. An Optical Measuring Transducer for a Micro-Opto-Electro-Mechanical Micro-g Accelerometer Based on the Optical Tunneling Effect // *Micromachines*. – 2023. – Т. 14. – № 4. – С. 802.
 8. Xiang C. et al. A resonant pressure microsensors with a wide pressure measurement range // *Micromachines*. – 2021. – Т. 12. – № 4. – С. 382.
 9. Mescheder U., Lootze M., Aljaseem K. Evaluation and Optimization of a MOEMS Active Focusing Device // *Micromachines*. – 2021. – Т. 12. – № 2. – С. 172.
 10. Jot Singh J., Dhawan D., Gupta N. All-optical photonic crystal logic gates for optical computing: an extensive review // *Optical Engineering*. – 2020. – Т. 59. – № 11. – С. 110901-110901.
 11. Sankar Rao D.G., Swarnakar S., Kumar S. Performance analysis of all-optical NAND, NOR, and XNOR logic gates using photonic crystal waveguide for optical computing applications // *Optical Engineering*. – 2020. – Т. 59. – № 5. – С. 057101-057101.
 12. Sondergaard T. et al. Designing finite-height two-dimensional photonic crystal waveguides // *Applied Physics Letters*. – 2000. – Т. 77. – № 6. – С. 785-787.
 13. Mohebzadeh-Bahabady A., Olyaei S. Proposal of a cascade photonic crystal XOR logic gate for optical integrated circuits with investigation of fabrication error and optical power changes // *Photonics*. – MDPI, 2021. – Т. 8. – № 9. – С. 392.
 14. Fu Y., Hu X., Gong Q. Silicon photonic crystal all-optical logic gates // *Physics letters A*. – 2013. – Т. 377. – № 3-4. – С. 329-333.
 15. Hammer M., Ivanova O. Effective index approximations of photonic crystal slabs: a 2-to-1-D assessment // *Optical and quantum electronics*. – 2009. Т. 14. – С. 267-283.
 16. Mohebzadeh-Bahabady A., Olyaei S. Proposal of a cascade photonic crystal XOR logic gate for optical integrated circuits with investigation of fabrication error and optical power changes // *Photonics*. – MDPI, 2021. – Т. 8. – № 9. – С. 392.

УДК 53.086

ПРИМЕНЕНИЕ СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА ОТКАЗОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

APPLICATIONS OF SCANNING ELECTRON MICROSCOPY IN SEMICONDUCTOR DEVICES FAILURE ANALYSIS

Бондаренко А.С., к. ф.-м. н., **Аскерко А.Н.**, АО «КБ «Ракета»;
bond.anton@gmail.com; aan@kbrocket.ru, +7 (812) 409-90-40

Bondarenko A.S., PhD, **Askerko A.N.**, JSC "DB "Rocket";
bond.anton@gmail.com; aan@kbrocket.ru, +7 (812) 409-90-40

Аннотация. Сканирующая электронная микроскопия (далее – СЭМ) позволяет визуализировать с нанометровым разрешением отдельные элементы интегральной схемы, локализовать дефектные элементы интегральных схем, исследовать электрическую активность дефектов кристаллической структуры в полупроводниках. Целью данной работы является обсуждение возможностей, вызовов и проблем применения сканирующей электронной микроскопии в задачах анализа отказов в полупроводниковых приборах.

Annotation. The scanning electron microscopy (SEM) allows one to visualize discrete elements of integrated circuit with nanometer resolution, localize defect elements of integral circuits, and investigate electrical activity of structural defects of crystalline semiconductor. This work aims to demonstrate applications and discuss challenges of scanning electron microscopy for the failure analysis of semiconductor devices.

Ключевые слова: сканирующая электронная микроскопия, полупроводниковые приборы, анализ отказов.

Keywords: scanning electron microscopy, semiconductor devices, failure analysis.

Введение

Сканирующая электронная микроскопия позволяет получать изображения поверхности образца с нанометровым разрешением при минимальной необходимой пробоподготовке, что обуславливает высокую производительность метода. Именно благодаря этому обстоятельству СЭМ получила широкое распространение практически во всех отраслях науки и техники. Определяющую роль СЭМ играет и в развитии микроэлектронной промышленности, в том числе и в задачах контроля, испытаний и анализа отказов полупроводниковых приборов, линейные размеры которых уже давно измеряются нанометрами.

Данная статья предлагает краткий обзор возможностей применения СЭМ (не затрагивая аналитические методы) для исследования полупроводниковых приборов, а также основных проблем и вызовов в этой области, большинство из которых связаны с непрерывным усложнением самих полупроводниковых приборов, требующим адаптации методик анализа и обновления арсенала применяемых инструментов. Современные интегральные схемы могут содержать миллионы дискретных элементов, исследовать каждый из которых за разумное время не представляется возможным, поэтому анализ отказов становится комплексной проблемой, связанной с прогнозированием и разработкой методики исследования проблемных мест, их локализацией, депроцессингом изделия, съемкой и анализом изображений.

Основная часть

Вызовы анализа полупроводниковой технологии и отказов полупроводниковых приборов при помощи СЭМ

Согласно докладом [1, 2] основной проблемой в области анализа полупроводниковой технологии и анализа отказов полупроводниковых приборов является необходимость непрерывного обновления инструментальных методов исследования полупроводников для соответствия текущему уровню технологических процессов. Этот вывод следует из перечисленных в докладе десяти основных вызовов анализа полупроводниковых приборов, семь из которых можно напрямую отнести к методам сканирующей электронной микроскопии:

1. Локализация и исследование дефектов.
2. Методики декапсуляции и депроцессинга.
3. Получение изображений малых структур и их дефектов.
4. Обнаружение и характеристика невидимых дефектов и ошибок дизайна.



Бондаренко А.С.



Аскерко А.Н.

5. Сложность и объем данных.
6. Программное обеспечение для навигации по САД данным и прогнозирования отказов.
7. Стоимость анализа.

Таким образом, проблема объединяет в себе вызовы инженерного, экономического и юридического (защита интеллектуальной собственности) плана. При исследовании достаточно большой, многослойной интегральной схемы (далее – ИС), содержащей миллионы дискретных элементов на квадратном сантиметре кристалла, анализ при помощи СЭМ возможен только в выборочном порядке в определенных местах в соответствии с утвержденной в задании исследования методикой. Методика в свою очередь должна быть составлена для достижения целей анализа, которые могут заключаться либо в поиске видимых дефектов и их последующей локализации, либо в анализе одного или нескольких слоев металлизации ИС на предмет обрывов, утонений и замыканий, или анализе технологии изготовления ИС. Возможные проблемные места могут быть найдены в справочной литературе, например, [3, 4].

Исследование ИС при помощи СЭМ

В экспресс-анализе полупроводниковых изделий при помощи СЭМ чаще всего ограничиваются исследованием верхнего слоя металлизации ИС, а также выводных проводников, соединяющих ИС с выводами корпуса. В этом случае задача по декапсуляции кристалла ИС сводится к механическому вскрытию корпуса и химическому удалению полимерного компаунда.

Рассмотрим возможности анализа полупроводникового электронного изделия на примере исследования ИС ТЛ2. После удаления крышки корпуса при помощи СЭМ можно получить обзорный снимок изделия и оценить расположение кристалла и качество его фиксации в корпусе, количество и внешний вид выводных проводников (рис. 1).

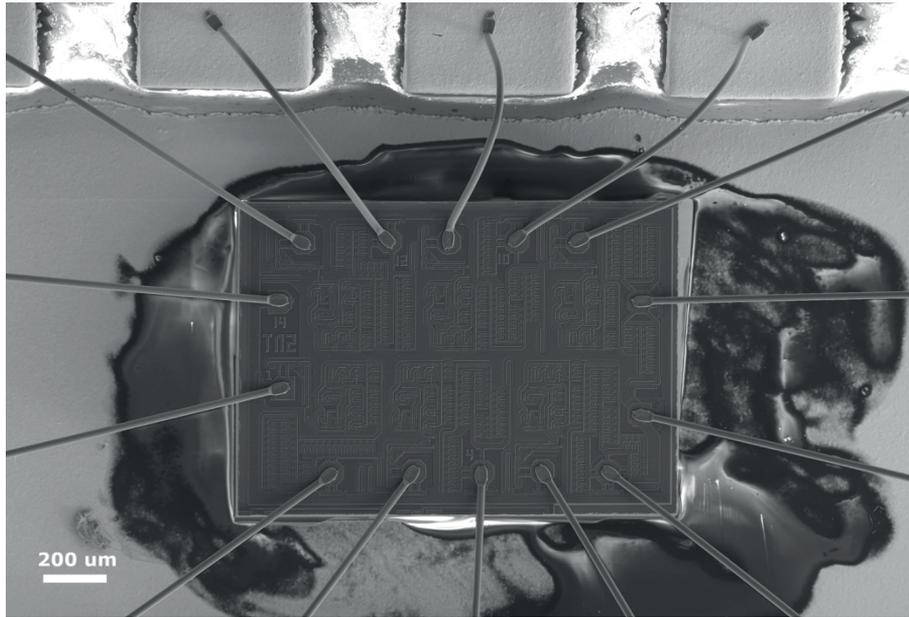


Рис. 1. Обзорный снимок ИС ТП2 в контрасте вторичных электронов

Для исследования морфологии применяется детектор вторичных электронов, энергия которых не превышает 50 эВ, вследствие чего имеющих высокую чувствительность к форме поверхности, позволяющий получать пространственное разрешение до порядка 1 нм. Малый угол сходимости электронного пучка позволяет добиваться значительной глубины фокуса, благодаря чему уже на панорамных снимках можно проводить локализацию видимых дефектов ИС [5] для их последующей съемки с большим увеличением.

На рис. 1, например, несколько контактных площадок деформированы в направлении расположения выводной проволоки, что может быть косвенным признаком дефекта ультразвуковой сварки. На увеличенном изображении одного из этих мест (рис. 2) наблюдается сдвиговая деформация части металлизации контактной площадки вследствие воздействия аппарата ультразвуковой сварки. Само сварное соединение расположено по центру контактной площадки и не имеет видимых дефектов.

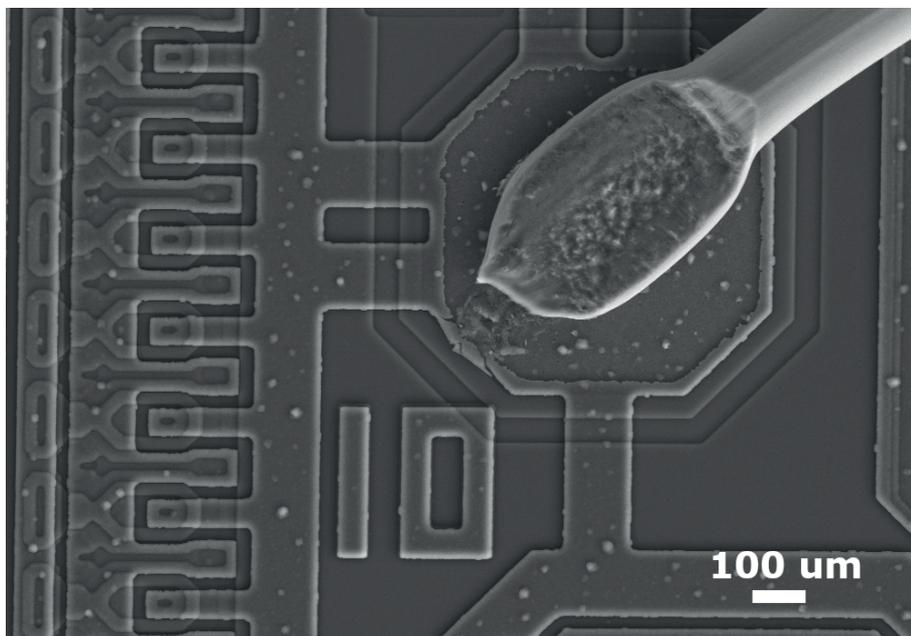


Рис. 2. Увеличенное изображение выводного проводника в месте приварки к контактной площадке ИС. Контраст вторичных электронов

Для оценки утонений в верхнем слое металлизации необходимо получить изображения поверхности ИС с большим увеличением и под наклоном к электронному пучку Рис. 3.

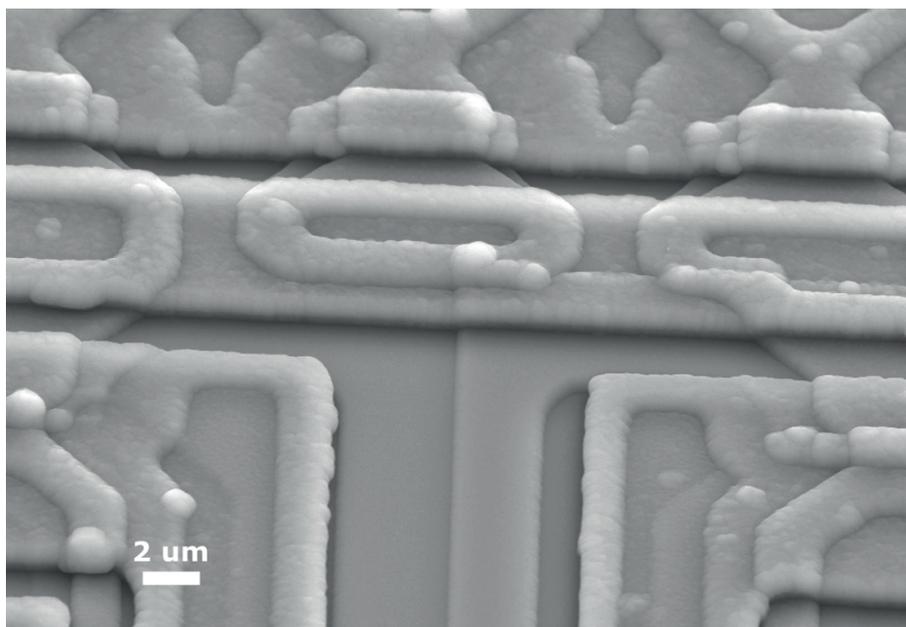


Рис. 3. Увеличенное изображение поверхности ИС в контрасте вторичных электронов под наклоном 45 градусов

Съемка под наклоном позволяет одновременно измерить проекции горизонтальных и вертикальных размеров проводников исследуемого слоя металлизации на плоскость сканирования и восстановить эти размеры по тригонометрическим формулам:

$$h = \frac{h_{proj}}{\sin \alpha},$$

$$w = \frac{w_{proj}}{\cos \alpha}$$

где: w, h – ширина и высота контактной дорожки слоя металлизации, нм;

α – угол наклона образца, индекс $proj$ обозначает проекцию размера на плоскость сканирования, град.

Кроме того, съемка под наклоном позволяет определить важный параметр – коэффициент толщины ступеньки напыления, возникающей при соединении двух слоев металлизации в один (рис. 4). Коэффициент толщины ступеньки определяется как отношение толщины металлизации на ступеньке к толщине на плоских участках ИС и может быть использован как количественный критерий оценки надежности изделия, в моделировании отказов.

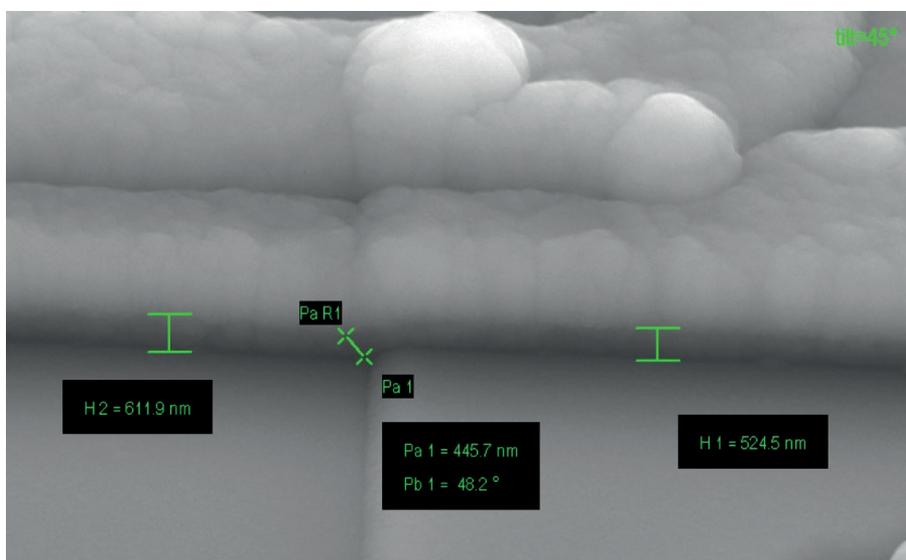


Рис 4. Измерение толщины металлизации на ступеньке.
Контраст вторичных электронов

Работа с верхним слоем металлизации имеет очевидные ограничения, анализу подлежат исключительно видимые элементы и дефекты. Для более детального анализа

качества металлизации на предмет возможных отказов требуется провести сложную процедуру депроцессинга ИС. В самом простом варианте ограниченный анализ ме-

таллизации всех слоев и межслойных соединений может быть проведен путем приготовления косо́го шлифа ИС. Для этого изделие заливается под заданным углом около 30 градусов в пластиковую шайбу и шлифуется на шлифо-

вальном станке до вскрытия нужной плоскости, после чего проводится полировка образца. Результат съемки косо́го шлифа ИС представлен на рис. 5.

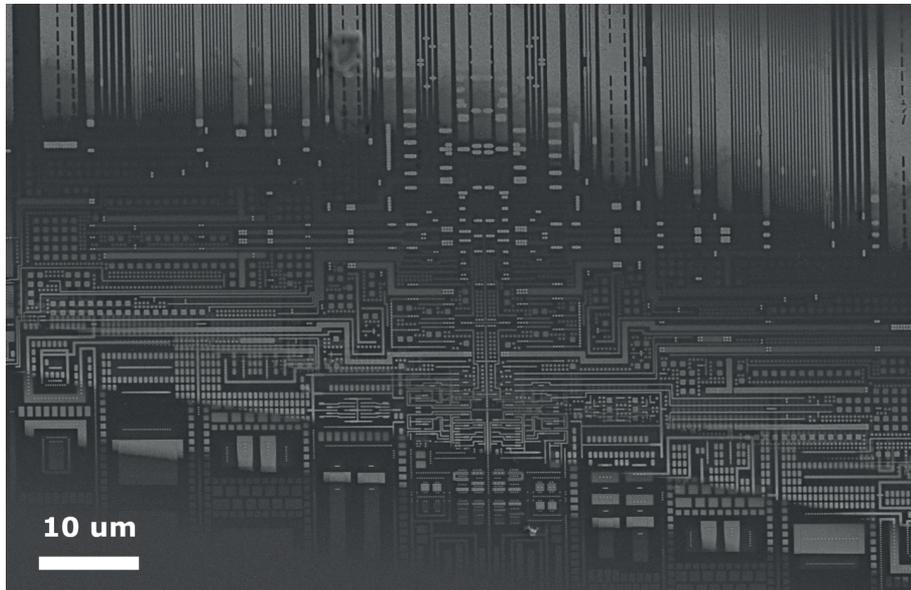


Рис. 5. Изображение верхнего слоя металлизации микросхемы RH1573.
Детектор вторичных электронов

При правильном выборе угла шлифовки ширина вскрытой полосы каждого слоя металлизации может достигать 10 мкм. При необходимости исследования ИС по всей площади или более локализовано применяются методы химического и плазмохимического избирательного травления, оставляющие каркас слоев металлизации изделия обнаженным для съемки.

Наиболее локализованную СЭМ съемку элементов ИС можно провести при помощи фокусированного ионного

пучка (далее – ФИП) [6], позволяющего выполнить точный срез приповерхностного слоя образца до нескольких десятков мкм с точностью позиционирования порядка 10 нм. На рис. 6 представлен снимок в контрасте вторичных электронов поперечного среза, выполненного сквозь пять слоев металлизации ИС точно по центру межслойных соединителей. Наблюдаются дефекты в виде пустот внутри цилиндров соединителей.

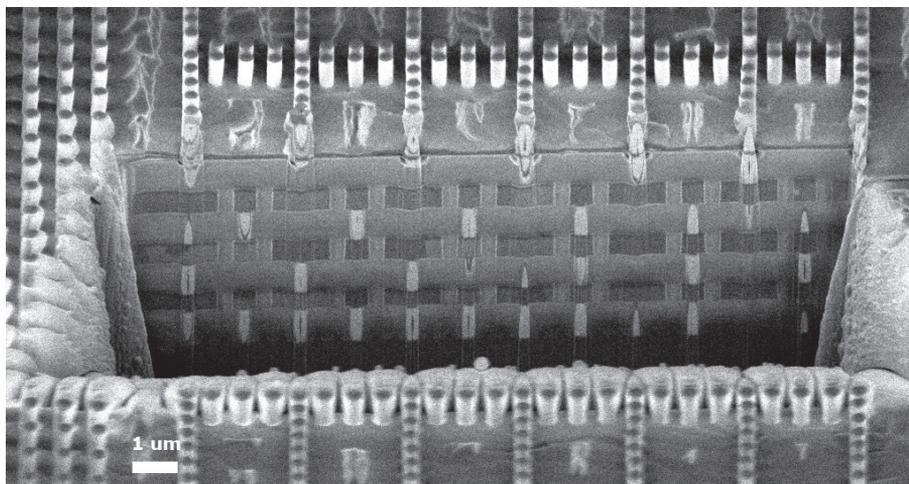


Рис. 6. Снимок траншеи, выполненной при помощи сфокусированного ионного пучка для анализа качества межслойных соединений ИС.
Контраст вторичных электронов

Применение фокусированного ионного пучка требует очень опытного специалиста и чаще всего на больших ИС требуется также наличие специального навигационного

CAD программного обеспечения с загруженной моделью полной топологии исследуемого изделия для определения точного места выполнения среза, что в свою очередь со-

пряжено с вопросами информационной безопасности.

При этом ФИП может также эффективно применяться и в более простых задачах, как например исследование механических напряжений и интерметаллидов в местах приварки выводных проводников к контактным площадкам ИС (рис. 7). Дело в том, что травление ионным пучком очень прецизионное и не оказывает механического

воздействия на образец. На рис. 7 наблюдаются трещины по границам зерен металлов на интерфейсе сварного соединения, выполненного автоматом ультразвуковой сварки. В случае распространения подобные трещины могут привести к уменьшению срока службы ИС и являются возможными причинами отказов полупроводникового прибора.

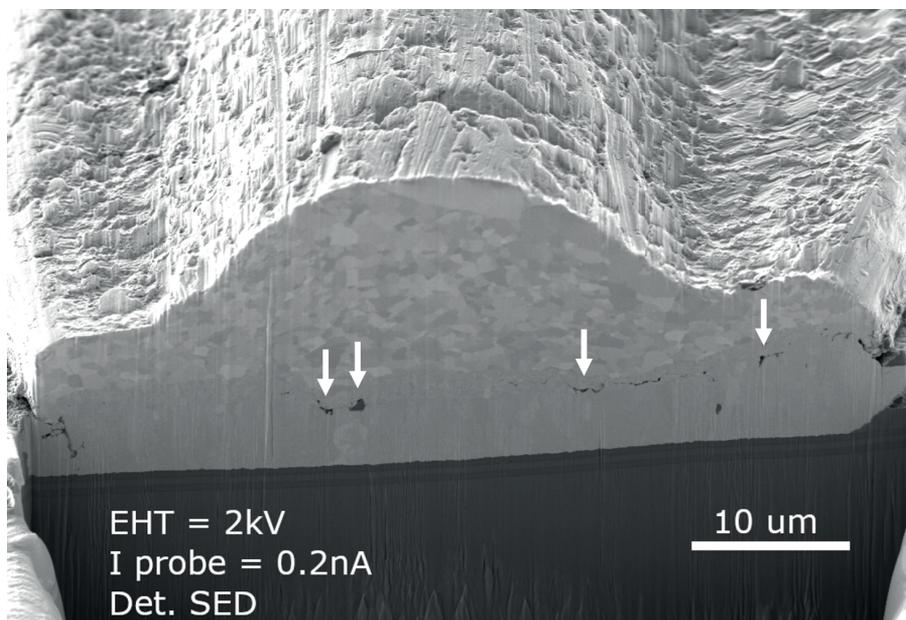


Рис. 7. Изображение поперечного среза сварного соединения выводного проводника с контактной площадкой ИС. Контраст вторичных электронов

Заключение

В статье проведен обзор применения сканирующей электронной микроскопии (не затрагивая аналитических методов СЭМ) в задачах анализа отказов ИС и стоящих вызовов в этой области. Несмотря на широкие возможности сканирующей электронной микроскопии рост сложности полупроводниковых приборов, создание микросхем типа «система на одном кристалле», приводит к тому, что арсенал дополнительных методов и инструментов, необходимых микроскописту для выполнения исследования, непрерывно расширяется, увеличивается время и стоимость исследования. Качественный и эффективный (в том числе с экономической точки зрения) анализ отказов становится возможен только в результате слаженной работы коллективов, включающих опытных исследователей, инженеров, методистов и юристов, обладающим доступом к парку оборудования и инвестирующим в обновление этого оборудования.



Литература

1. Joseph T.W., Semiconductor Product Analysis Challenges Based on the 1999 ITRS, in AIP Conference Proceedings, Vol. 550 (AIP, Gaithersburg, Maryland (USA), 2001), pp. 53–56.
2. Wagner L.C., Failure Analysis Challenges, in Proceedings of the 2001 8th International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits. IPFA 2001 (Cat. No.01TH8548) (IEEE, Singapore, 2001), pp. 36–41.
3. Christou A. and Unger B.A., editors, Semiconductor Device Reliability (Springer Netherlands, Dordrecht, 1989).
4. Ueda O. and Herrick R.W., Failure Analysis of Semiconductor Optical Devices, in Materials and Reliability Handbook for Semiconductor Optical and Electron Devices, edited by Ueda O. and Pearton S.J. (Springer New York, New York, NY, 2013), pp. 19–53.
5. Goldstein J., Newbury D.E., Joy D.C., Lyman C.E., Echlin P., Lifshin E., Sawyer L., and Michael J.R., Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis, 3rd ed. (Springer, 2003).
6. Donnet D.M. and Roberts H., FIB Applications for Semiconductor Device Failure Analysis, in Microscopy of Semiconducting Materials, edited by Cullis A.G. and Hutchison J.L., Vol. 107 (Springer Berlin Heidelberg, 2005), pp. 403–408.



ФГБУ «ВНИИР»

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР

Механические испытания
Климатические испытания
Измерения, контроль ЭКБ и РЭА
ДНК и РФА
Воздействие плесневых грибов
ЭМС



141002, Московская область,
г. Мытищи, ул. Колпакова, д. 2А
+7 (495) 586-17-21
e-mail: ic@vniir-m.ru
сайт: vniir-m.ru



С Новым 2024 годом!

Уважаемые коллеги, дорогие друзья!
Поздравляем Вас с Новым годом!
Желаем новых стремлений и
открытий, удачных стартов и больших
побед, успешных результатов в делах
и перспектив в личных интересах.
Пусть этот год станет для всех нас
добрым и счастливым!

*С уважением, учредители журнала,
редакционный совет,
редакционная коллегия*