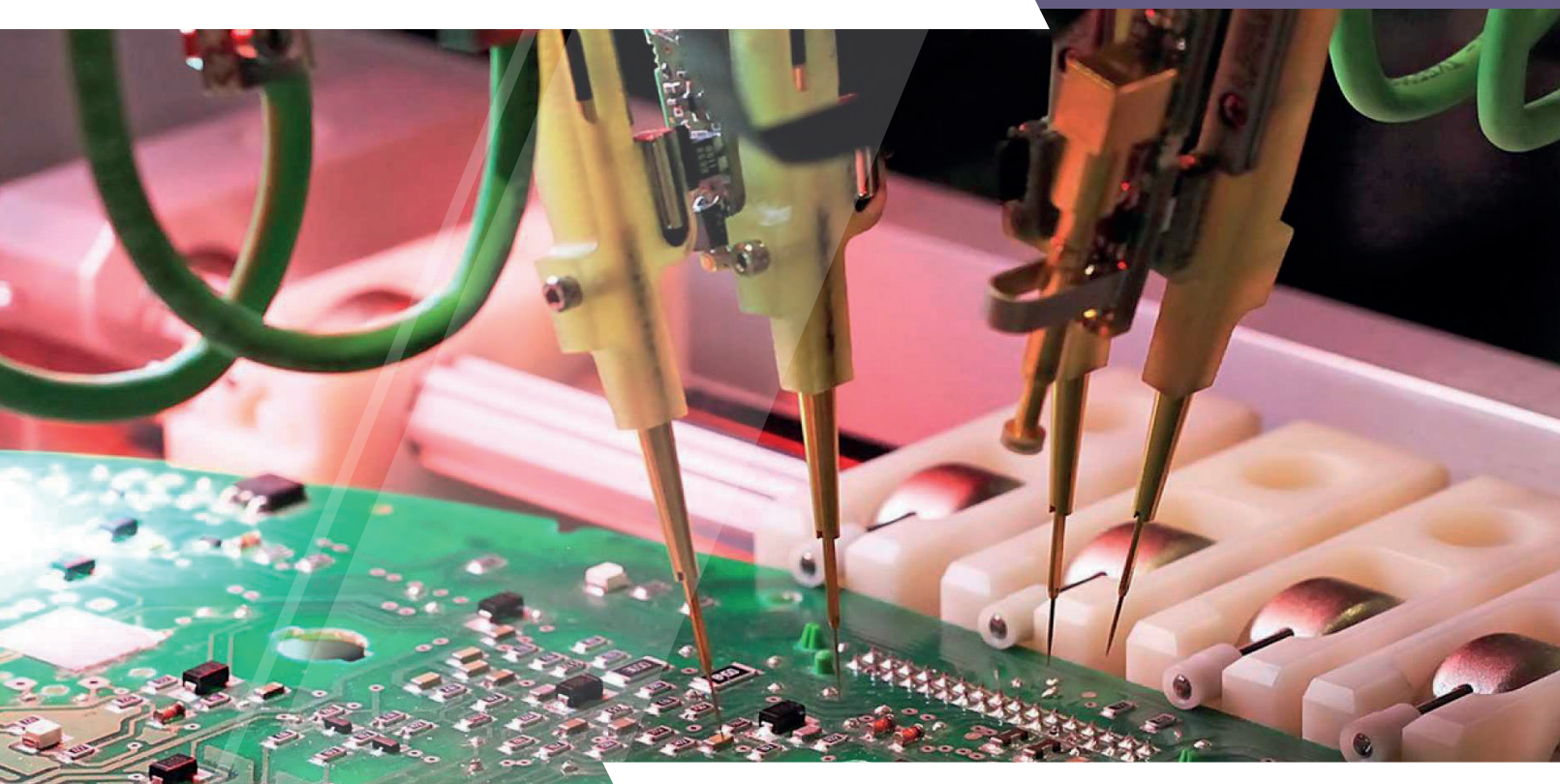


2⁽¹⁸⁾ | РАДИОЭЛЕКТРОННАЯ ОТРАСЛЬ: 2025 | ПРОБЛЕМЫ И ИХ РЕШЕНИЯ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**РАЗРАБОТКА, ПРОИЗВОДСТВО, ИСПЫТАНИЯ
ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**



Система добровольной сертификации радиоэлектронной аппаратуры, электронной компонентной базы и материалов военного, двойного и народнохозяйственного назначения «Электронсерт» (рег. № РОСС.RU.B2618.04KMHO от 07.04.2022 г.)



АВТОНОМНАЯ НЕКОММЕРЧЕСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ «ЭЛЕКТРОН СЕРТИФИКА»



СЕРТИФИКАЦИЯ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА

- ПРЕДПРИЯТИЙ И ОРГАНИЗАЦИЙ РАЗРАБОТЧИКОВ ЭКБ И РЗА
- ПРЕДПРИЯТИЙ И ОРГАНИЗАЦИЙ ИЗГОТОВИТЕЛЕЙ ЭКБ И РЗА
- ПРЕДПРИЯТИЙ И ОРГАНИЗАЦИЙ ПОСТАВЩИКОВ ЭКБ И РЗА



МЕТОДИЧЕСКИЕ УСЛУГИ

- СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ-РАЗРАБОТЧИКОВ, ИЗГОТОВИТЕЛЕЙ ЭКБ
- СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ПОСТАВЩИКОВ ЭКБ
- СИСТЕМЫ КАЧЕСТВА ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ (ЦЕНТРОВ)



ОБУЧЕНИЕ СПЕЦИАЛИСТОВ

- СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ И ОРГАНИЗАЦИЙ
- ТЕХНОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ ЭКБ В ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРИЯХ (ЦЕНТРАХ)
- МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАЗРАБОТКИ И ИСПЫТАНИЙ ЭКБ И РЗА
- ПРИМЕНЕНИЕ ЭКБ ОТЕЧЕСТВЕННОГО И ИНОСТРАННОГО ПРОИЗВОДСТВА



141008, Московская область, г.о. Мытищи, 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



ВНИИР

ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Головная научно-исследовательская испытательная
организация Минпромторга России в области ЭКБ,
научного обеспечения и межведомственной методической
координации работ по созданию и проведению
исследований (испытаний) изделий
электронной компонентной базы

БОЛЕЕ
400

ЭКЗЕМПЛЯРОВ
ПЕРЕЧНЯ ЭКБ
ИЗГОТАВЛИВАЮТСЯ И
РАСПРОСТРАНЯЮТСЯ
ЕЖЕГОДНО

110

ЕДИНИЦ СРЕДСТВ
ИЗМЕРЕНИЙ

56

ЕДИНИЦ
ИСПЫТАТЕЛЬНОГО
ОБОРУДОВАНИЯ

В ФГБУ «ВНИИР» введена в эксплуатацию обновлённая
отраслевая торгово-информационная площадка «ЭКБ-Маркет».
Площадка является наиболее актуальным и достоверным
источником информации по наличию изделий ЭКБ
отечественного производства и включает удобные сервисы
по поиску, сравнению, подбору и онлайн заказу ЭКБ ОП.

Статус института в качестве головной научно-исследовательской
испытательной организации в области ЭКБ был определён
Приказом Министра Минпромторга России № 3731 от 20.10.2016 г.
и подтверждён в отношении ФГБУ «ВНИИР» Приказом Министра
Минпромторга России № 829 от 16.03.2022 г.

Цели деятельности института предусматривают проведение
исследований, конструкторско-технологических разработок
и испытаний опытных образцов, работы по повышению
надёжности электронной компонентной базы и созданию
научно-технического задела в сфере РЗА и ЭКБ.

Сегодня на институт Минпромторгом России возлагается
задача – **СТАТЬ ЦЕНТРОМ КОМПЕТЕНЦИИ
В РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ОТРАСЛИ**

Институту предстоит сформировать новый технологический облик
русской электроники, провести исследование кооперационных
связей и оценить потенциал отраслевых предприятий, увязав
эту работу с вопросом кадрового обеспечения производителей.

Формирование ФГБУ «ВНИИР» как
ЦЕНТРА КОМПЕТЕНЦИИ ЭЛЕКТРОННОЙ ОТРАСЛИ,
предусматривает продолжение исследований
в области развития изделий ЭКБ, реализацию
стратегических и тактических задач, охватывающих
следующие обобщённые направления
исследований в области радиоэлектроники:

- мониторинг и развитие отрасли;
- интеграция технологий и производств;
- экспертиза (субсидии, параметры, проекты);
- межотраслевое взаимодействие;
- информационное обеспечение;
- нормотворчество;
- меры поддержки производителей;
- использование РИД и патенты;
- кадры и образование;
- сертификация и испытания;
- техническое регулирование.

**ПРИГЛАШАЕМ К
СОТРУДНИЧЕСТВУ!**



141002, Московская область, г.о. Мытищи, г. Мытищи, ул. Колпакова, д. 2А
+7 (495) 586-17-21 доб. 1434, 1404; e-mail: vniiir@vniiir-m.ru, сайт: vniiir-m.ru

РО Пир 2(18)/2025 (Основан в 2021 году)

Зарегистрирован в федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-80418 от 09 февраля 2021 г. и перерегистрации ПИ № ФС77-83479 от 15 июня 2022 г.

Научно-технический журнал решением Президиума ВАК включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» («Перечень ...» от 08.07.2024 года).

Статьи журнала размещаются на сайте журнала, сайте РНЖ, 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
Е.Г. Комаров, доктор технических наук
А.А. Рахманов, доктор технических наук
А.С. Сигов, академик РАН
В.Б. Стешенко, кандидат технических наук
В.А. Телец, доктор технических наук
А.В. Трусов, доктор технических наук

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

О.Ю. Булгаков, заслуженный работник связи Российской Федерации, кандидат военных наук

Заместители главного редактора:

С.Б. Подъяпольский, кандидат технических наук
С.С. Милосердов, кандидат технических наук

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

А.С. Афанасьев, кандидат технических наук
В.В. Быканов, кандидат технических наук
З.М. Гальперина, доктор экономических наук
П.С. Желтухин, доктор технических наук
И.Н. Кабанов, доктор технических наук
Р.Г. Левин, кандидат физико-математических наук
Ю.В. Рубцов, генеральный директор АО «ЦКБ «Дейтон»
Д.А. Руденко, кандидат военных наук
Т.Н. Серазетдинов, ген. директор АО «Авиаприбор»
В.А. Трусов, доктор технических наук
Л.А. Фёдорова, академик Академии проблем качества
В.Н. Храменков, доктор технических наук

РЕДАКЦИЯ:

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

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

Сдано в набор 05.06.2025 г.

Подписано к печати 25.06.2025 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 «Электронсертифика» (АНО «Электронсертифика»). Журнал выпускается при содействии Департамента радиоэлектронной промышленности Минпромторга РФ и Российского технологического университета – МИРЭА.

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗРАБОТКА, ПРОИЗВОДСТВО, ИСПЫТАНИЯ

Дормидошина Д.А., Рубцов Ю.В. Искусственный интеллект в визуальной проверке качества изделий: технологические и экономические аспекты..... 2

Дюков Д.И., Макарец И.В., Минеев С.Е., Назаров А.В., Османов Р.Р. Монолитная интегральная схема приемопередатчика 5-мм диапазона длин волн на арсениде галлия 8

Мырзахметов А., Кулинич И.В., Перин А.С. Разработка волноводной структуры на основе гибридной технологии LiNbO₃/SiN 13

Алексеев Р.П., Пролубников П.В., Куршев П.Л., Бельков В.Е. Анализ распределения ловушек на границе раздела кремний / оксид кремния, образованных в результате инъекции горячих носителей заряда в СВЧ LDMOS-транзисторах 22

Афанасьев А.С., Журиков Р.Н., Лопаткин К.С., Сенин А.А. Вместе с развитием электроники: исторический опыт, актуальные проблемы и вызовы 26

Конча М.И., Болдырев М.А. Варианты преобразования изделий электронной компонентной базы: модернизация, модификация и совершенствование 32

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Трусов А.В., Кузнецов Д.С. Применение методов машинного обучения в отраслевой системе поддержки принятия решений 37

УДК: 004.8; 621.3

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ВИЗУАЛЬНОЙ ПРОВЕРКЕ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ: ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN VISUAL QUALITY CONTROL OF PRODUCTS: TECHNOLOGICAL AND ECONOMIC ASPECTS

Дормидошина Д.А. заместитель генерального директора, эксперт по стандартизации, +7 (925) 104-77-96, dormidoshina@deyton.ru,
Рубцов Ю.В. генеральный директор, эксперт по стандартизации, +7 (926) 009-37-00, rubtsov@deyton.ru, АО «ЦКБ «Дейтон»

Dormidoshina D.A. deputy General Director, expert on standardization; +7 (925) 104-77-96, dormidoshina@deyton.ru,
Rubtsov U.V. General Director, expert on standardization; +7 (926) 009-37-00, Rubtsov@deyton.ru, JSC "Central Design Office "Deyton"

Аннотация. Уровень развития технологий искусственного интеллекта во многом свидетельствует об экономической силе, технологическом и научном потенциале государства. Для российского рынка эти технологии, в том числе в продуктах массового использования, не являются чем-то диковинным. Ежегодно на рынке запускаются десятки новых проектов на базе искусственного интеллекта. Сегодня искусственному интеллекту отводится ключевая роль в технологическом развитии и в борьбе за рынок сбыта. Влияние на производство искусственного интеллекта является одним из краеугольных камней растущей цифровизации промышленности. В настоящей статье рассмотрены особенности искусственного интеллекта в современных реалиях и показаны: результаты исследований и возникающие вопросы развития искусственного интеллекта на предприятиях радиоэлектронной промышленности в технологических процессах визуальной проверки качества изделий; составляющие искусственного интеллекта, используемые для визуальной проверки качества изделий; перспективный экономический эффект от внедрения искусственного интеллекта, а также влияние искусственного интеллекта на рынки труда и доходы работников. Результаты исследования позволяют представить влияние использования искусственного интеллекта в бизнесе, а также проблемы, возникающие при его внедрении и огромные возможности, которые предоставляет искусственный интеллект для развития бизнеса.

Annotation. The level of development of artificial intelligence technologies largely indicates the economic strength, technological and scientific potential of the state. For the Russian market, these technologies, including in mass-use products, are not something outlandish. Every year, dozens of new projects based on artificial intelligence are launched on the market. Today, artificial intelligence plays a key role in technological development and in the struggle for the sales market. The impact of artificial intelligence on manufacturing is one of the cornerstones of the growing digitalization of industry. This article examines the features of artificial intelligence in modern realities and shows: research results and emerging issues of the development of artificial intelligence at enterprises of the radio-electronic industry in technological processes of visual inspection of product quality; artificial intelligence components used for visual inspection of product quality; promising economic effect from the introduction of artificial intelligence, as well as the impact of artificial intelligence on labor markets and employee incomes. The results of the study allow us to imagine the impact of using artificial intelligence in business, as well as the problems that arise during its implementation and the enormous opportunities that artificial intelligence provides for business development.

Ключевые слова: искусственный интеллект, изделия электроники, визуальная проверка качества, производство, экономический рост, экономический эффект.

Keywords: artificial intelligence, electronics products, visual quality inspection, production, economic growth, economic effect.

Научная специальность: 2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры.

Введение

Актуальность темы исследования обусловлена тем, что искусственный интеллект (далее – ИИ) играет все более важную роль в нашей жизни и экономике и уже оказывает влияние на наш мир самыми разными способами. Мировая конкуренция за получение выгод от внедрения ИИ является жесткой и на сцену вышли мировые лидеры – США и Китай. Страны рассматривают ИИ как двигатель производительности и экономического роста. Внедрение ИИ может повысить эффективность выполнения задач и значительно улучшить процесс принятия решений о качестве изделий за счет анализа больших объемов данных. Это также способствует созданию новых изделий и технологий, тем самым повышая потребительский спрос и создавая новые потоки доходов. Однако ИИ может также оказать весьма разрушительное воздействие на экономику и общество. Имеются предупреждения исследователей о росте потенциала создания предприятий – центров знаний и данных, монополизировавших эти ресурсы, что может иметь пагубные последствия для экономики в целом.

Внедрение ИИ может также увеличить разрыв между развитыми и развивающимися странами и повысить потребность в работниках с определенными навыками, одновременно делая других излишними. Эта проблема может иметь далеко идущие последствия для рынка труда и привести к увеличению неравенства, снижению заработной платы и сокращению налоговой базы.

Хотя эти опасения остаются актуальными, нет единого мнения о том, материализуются ли соответствующие риски и если да, то в какой степени. Они не являются чем-то само собой разумеющимся, и тщательно разработанная политика сможет способствовать развитию ИИ, сохраняя при этом негативные последствия под контролем. В России есть потенциал улучшить свои позиции в глобальной конкуренции и направить ИИ на путь, который принесет пользу ее экономике и гражданам. Для достижения этой цели разработан и выполняется Федеральный проект «Искусственный интеллект» и Указ Президента Российской Федерации от 10 октября 2019 г. № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации», утвержденная Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года, которая использует сильные стороны технологий и позволяет объединить ресурсы государства наиболее эффективным способом для развития ИИ [1, 2].

ИИ и его влияние на бизнес, экономику, рынок труда являются объектом исследования работ как отечественных исследователей – Ляпина И.А., Моттаевой А. Б., Кашинцевой В. Л., Покровского О. Ю., Никитиной И.А., Потемкина А.С., Юрина М.С. и др. [3, 4, 5, 6], так и зарубежных авторов – Али Зарифонавар, Махмут Озер, Матъяз Перц, Х. Эрен Суна, Марина Мария Лаукес [7, 8, 9]. Анализ и изучение публикаций,



Дормидошина Д.А. Ю.В. Рубцов

посвященных ИИ, показали влияние ИИ на современную промышленность и экономику, а также основные принципы, цели и задачи машинного интеллекта, преимущества и недостатки данной технологии. Обоснована актуальность данного инструмента и его важность для нынешнего мира.

Основная часть

Определение и составляющие ИИ, используемые для визуальной проверки качества изделий

ИИ – это комплекс технологических решений, позволяющий имитировать когнитивные функции человека (включая поиск решений без заранее заданного алгоритма) и получать при выполнении конкретных задач результаты, сопоставимые с результатами интеллектуальной деятельности человека или превосходящие их. ИИ включает в себя информационно-коммуникационную инфраструктуру, программное обеспечение (в том числе в котором используются методы машинного обучения), процессы и сервисы по обработке данных и поиску решений.

ИИ позволяет выполнять обучение, обеспечивать понимание и взаимодействие на машинном уровне. ИИ для задач на предприятиях радиоэлектронной промышленности по визуальной проверке качества изделий принимает формы технической и программно-математической инфраструктур, части производственных процессов, направленных на проверку изделий для конечного пользователя как на предприятиях изготовителей, так и потребителей.

Внедрение ИИ способно глубоко изменить работу предприятия. Уже сегодня умные электронные помощники выполняют самые разные задачи, а в данном исследовании – это визуальную оценку качества изделий. ИИ сопоставляет дефекты с их образом и определяет их весомость, основываясь на предыдущих данных. С применением ИИ возникают важные вопросы о том, насколько он повлияет на экономику предприятия, производство, потребителей. Мир все больше интересуется тем, какое значение ИИ имеет для работников и их доходов, в то время как предприятия также стремятся найти способы извлечь выгоду из возможностей, предоставляемых этими технологиями. Во всем мире существует мнение, что технологии ИИ способны совершить революцию в производстве и способствовать решению основных глобальных проблем. Быстро растущие вычислительные мощности

и телекоммуникационные сети позволяют собирать и обмениваться большими объемами значимых данных. Это дало импульс развитию технологий ИИ.

Количество и весомость объектов интеллектуальной собственности – показатель развития искусственного интеллекта

Важно отметить, что количество объектов интеллектуальной собственности с применением ИИ растет во всем мире, при этом средний годовой темп роста составляет за последние 5 лет более 10 %, что выше, чем ежегодный темп роста, наблюдаемый для других объектов интеллектуальной собственности.

Странами, находящимися в авангарде исследований, являются США, Япония, Китай и Южная Корея, на которые вместе приходится две трети патентных заявок, связанных с ИИ. В докладе Всемирной организации интеллектуальной собственности (далее – ВОИС) об ИИ за 2023 год [2, 10, 11] показано, что с начала века наблюдается бум количества научных работ в этой области, за которым последовал всплеск патентных заявок. Это указывает на переход от теоретических исследований к практическому применению технологий ИИ. В ВОИС считают, что большое количество патентов в области машинного обучения показывает, что в настоящее время это основная область применения ИИ, а глубокое обучение (используется в распознавании дефектов изделий) и нейронные сети (вычислительные системы, созданные для моделирования аналитических действий) – самые быстрорастущие технологии. Таким образом, прогресс в области ИИ связывается с развитием глубокого обучения с использованием нейронных сетей. В отчете ВОИС показано, что наибольшее количество патентов, связанных с ИИ, приходится на такие области, как телекоммуникации, транспорт, биологические и медицинские науки, а также персональные устройства, обеспечивающие взаимодействие человека с компьютером. Умные города, сельское хозяйство, электронное правительство, банковское дело и финансы – наиболее динамично развивающиеся области применения. При этом в отчете ВОИС также показан рост числа патентов на ИИ, работающих в сфере визуальной оценки качества изделий.

Экосистема искусственного интеллекта

Исследования показывают, что в процессах внедрения ИИ на предприятиях может иметь место структурный недостаток: отсутствие большого однородного пула данных (репозиторий, который используется для получения и хранения информации, а также для обмена информацией об изделиях и их дефектах), который является важной предпосылкой для развития экосистемы ИИ [12]. В таких предприятиях уровень внедрения ИИ низок, а количество инвестиций и патентов, связанных с ИИ, отсутствует. Тем не менее, у всех есть потенциал для использования

производственной и промышленной базы с высокой добавленной стоимостью и использования высококвалифицированной рабочей силы для улучшения своих позиций.

Экосистема ИИ – это группа взаимосвязанных ресурсов и технологий, которые должны функционировать как единое целое. Для внедрения ИИ предприятию необходима карта экосистемы ИИ для понимания наличия и готовности к применению соответствующих инструментов для достижения целей, и обеспечение максимальной эффективности от их реализации.

Предприятия также должны использовать регулятивное мастерство (умение соотносить свои действия с планируемыми результатами, связанными с организацией процесса) и влияние, чтобы продвигаться в области ИИ, и использовать такие инструменты, как стандарты, нормы и правила.

Перспективный экономический эффект от внедрения искусственного интеллекта

Большинство исследований подчеркивают, что ИИ будет иметь значительный экономический эффект. Прогнозируется, что к 2035 году ИИ будет способствовать удвоению ежегодных темпов глобального экономического роста в мире. ИИ будет стимулировать этот рост тремя важными способами:

- 1) резким ростом производительности труда (до 40 %) за счет инновационных технологий, позволяющих более эффективно управлять трудовыми ресурсами;
- 2) созданием новой виртуальной рабочей силы, которую называют «интеллектуальной автоматизацией», способной решать проблемы и самообучаться;
- 3) распространением инноваций, которые повлияют на различные сектора и создадут новые потоки доходов.

По оценкам исследований мировой ВВП может увеличиться до 14 % к 2030 году в результате ускоряющегося развития и внедрения ИИ. Следующая волна цифровой революции будет развиваться с помощью данных, генерируемых Интернетом вещей (IoT), которые, вероятно, будут во много раз больше, чем данные, генерируемые в настоящее время. Это будет способствовать стандартизации и, следовательно, автоматизации, а также повышению персонализации изделий. Предполагаются два основных канала, через которые ИИ будет влиять на экономику:

- 1) ИИ в ближайшем будущем приведет к повышению производительности труда на основе автоматизации рутинных задач, что, в свою очередь, повлияет на такие капиталоемкие отрасли, как производство и транспорт. Это будет включать в себя более широкое использование таких технологий, как роботы и автономные транспортные средства. Производительность также повысится за счет того, что

предприятия дополняют и помогают своей существующей рабочей силе с помощью технологий ИИ. Это потребует инвестиций в программное обеспечение, системы и машины, основанные на вспомогательном, автономном и дополненном интеллекте; это не только позволит работникам лучше и эффективнее выполнять свои задачи, но также высвободит время, позволяя им сосредоточиться на более стимулирующей деятельности и деятельности с более высокой добавленной стоимостью. Автоматизация частично устранил необходимость в трудозатратах, что приведет к общему повышению производительности.

2) Предполагает доступность персонализированных и более качественных продуктов и услуг, улучшенных ИИ – станет еще более важным, поскольку эта доступность, вероятно, повысит потребительский спрос, который, в свою очередь, будет генерировать больше данных. В свою очередь, рост потребления создает благотворный цикл большего количества точек соприкосновения с данными и, следовательно, большего количества данных, лучшего понимания, лучших продуктов и, следовательно, большего потребления. При этом максимальную выгоду получают те предприятия, которые относительно быстро внедряют множество продуктивных технологий, а достижения будут ускорены за счет повышенной готовности к использованию ИИ (как предприятий, так и потребителей), быстрого накопления данных и более глубокого понимания потребителей.

Вероятно, для одних потребуется больше времени, чтобы ощутить полный эффект от ИИ, но в конечном итоге этот эффект будет достигнут на нескольких предприятиях радиоэлектронной промышленности, а затем переместится вверх по цепочке создания стоимости в более сложное и высокотехнологичное производство. Для других, вероятно, будет зафиксирован более скромный рост из-за более низких темпов внедрения технологий ИИ.

Ожидается, что около две трети компаний в мире к 2030 году примут хотя бы один наиболее необходимый тип ИИ, в то время как менее половины компаний будут использовать весь спектр. ИИ может обеспечить дополнительный экономический эффект, увеличивая мировой ВВП примерно на 1,2 % в год. Это произойдет главным образом за счет замены труда автоматизацией и увеличения инноваций в изделиях. С другой стороны, ИИ, скорее всего, вызовет шок на рынках труда и связанные с этим затраты, необходимые для управления переходом на рынке труда; этот шок может возникнуть в результате негативных внешних эффектов, таких как потеря внутреннего потребления из-за безработицы. ИИ окажет как прямое, так и косвенное положительное влияние на рабочие места, производительность и ВВП. Прямой эффект будет вызван увеличением доходов и занятости на предприятиях, которые разрабатывают или производят изделия, используемые в технологиях ИИ, что

также может создать совершенно новую экономическую деятельность. Косвенные будут связаны с более широким ростом производительности в секторах, использующих ИИ для оптимизации технологических процессов и принятия решений, а также расширения знаний и доступа к информации об изделиях.

Другие источники показывают, что ИИ окажет ограниченное влияние на экономический рост, о чем свидетельствуют направления промышленности, в которых наблюдаются самые высокие темпы роста производительности, но при этом наблюдается снижение их общей доли в экономике. Несмотря на прогресс, достигнутый ИИ, некоторые направления промышленности останутся важными, но их будет трудно улучшить, сохранив человеческий труд, который будет хорошо оплачиваться. В конечном итоге это ограничит влияние новых технологий на экономику в целом. ИИ может даже частично препятствовать будущим инновациям, что ограничит отдачу от них.

Искусственный интеллект и будущее производство

Согласно известному парадоксу производительности наблюдается снижение производительности в эпоху ускорения технологического прогресса. Одним из возможных объяснений этого является то, что распространение тех возможностей ИИ, которые могут стимулировать производительность, остается ограниченным. Даже при их широком распространении, их полный эффект может материализоваться только с последующими волнами дополнительных инноваций. Напротив, некоторые эксперты говорят, что революция в области информационных технологий достигла зрелости и, что продуктивность исследований резко снижается, оказывая все меньшее влияние на экономику. Принимая во внимание низкие темпы роста физического и человеческого капитала, которые могут оказать более сильное влияние на общую производительность по сравнению с инновациями, они предвидят лишь постепенную эволюцию производительности за счет ИИ. Согласно противоположным мнениям, ИИ значительно улучшит человеческий капитал, предложив новые способы обучения и подготовки рабочей силы [13]. Некоторые считают, что в действительности технологический прогресс оказывает гораздо большее влияние на производительность, чем показывают многие оценки в результате неверных измерений. Благодаря обнаружению закономерностей в огромных объемах данных ИИ значительно улучшит процесс принятия решений, сократит затраты и оптимизирует использование факторов производства и потребления ресурсов в каждом секторе экономики. В целом, вполне вероятно, что, хотя ИИ обладает значительным потенциалом для повышения производительности, конечный эффект будет зависеть от скорости рас-

пространения ИИ, а также от инвестиций в новые технологии и соответствующие навыки рабочей силы.

Влияние на производство ИИ является одним из краеугольных камней растущей цифровизации промышленности («Индустрия 4.0»). Технологии, лежащие в основе этого процесса, такие как Интернет вещей, 5G, облачные вычисления, анализ больших данных, интеллектуальные датчики, дополненная реальность, робототехника, вероятно, превратят производство в единую киберфизическую систему, в которой цифровые технологии, Интернет и производство будут объединены в единое целое. На «умных» заводах будущего производственные процессы будут взаимосвязаны, а решения ИИ будут иметь основополагающее значение для связи машин, интерфейсов и компонентов (с использованием, например, визуального распознавания). Большие объемы данных будут собираться и передаваться в устройства ИИ, что, в свою очередь, оптимизирует производственный процесс. Такое использование ИИ может применяться к большинству видов промышленной деятельности, от оптимизации многомашинных систем до расширения промышленных исследований. Внедрение ИИ в производство, вероятно, со временем увеличится благодаря развитию автоматизированных процессов обучения. По сути, это должно повысить конкурентоспособность предприятий за счет повышения эффективности и производительности, обеспечиваемой анализом данных, и цепочками трансфера данных о дефектах изделий. Увеличение объемов поставок изделий от таких предприятий будут обоснованы на этих достижениях. ИИ также повысит уровень автоматизации, обеспечит более строгий контроль качества продуктов и процессов, а также превентивную диагностику состояния оборудования, а также обеспечит своевременное техническое обслуживание, минимизирует время простоя, уменьшит количество ошибок и дефектных комплектующих, а также расходных материалов к оборудованию. Предприятия смогут получить доступ к новым рынкам, поскольку их продукция станет более персонализированной, разнообразной и более качественной. Хотя заделы уже существуют, «Индустрия 4.0» может быть реализована не раньше середины следующего десятилетия, поскольку она требует сочетания различных технологий, для внедрения которых, по мнению ученых, потребуется 20-30 лет. В долгосрочной перспективе ИИ может привести к научным прорывам, которые могут создать совершенно новые, непредвиденные направления в промышленности.

Влияние искусственного интеллекта на рынки труда

Если такие технологии, как ИИ, робототехника и автоматизация действительно будут широко применяться на предприятиях, будут как создаваться рабочие места, так и будет происходить уничтоже-

ние рабочих мест (замена людей технологиями). Как показывают исследования, среди экспертов нет единого мнения: прогнозы варьируются от оптимистических до разрушительных, различаясь на десятки миллионов рабочих мест даже при сравнении аналогичных временных рамок. Прогноз [14] показывает, что более половины рабочих мест столкнутся с вероятностью или риском компьютеризации в течение 20 лет. Эффект, вероятно, будет более нюансированным и среди исследователей существует консенсус в отношении того, что произойдут значительные изменения в рабочей силе, сопровождающиеся изменениями в характере и содержании рабочих мест, что потребует переподготовки.

Возможна поляризация рабочих мест: низкооплачиваемые рабочие места, которые обычно требуют рутинных ручных и не когнитивных навыков, могут быть заменены ИИ и автоматизацией, в то время как хорошо оплачиваемые квалифицированные рабочие места, которые обычно требуют не рутинных когнитивных навыков, будут пользоваться более высоким спросом. Изучение моделей предыдущих промышленных революций показывает, что сокращение рабочих мест будет сильнее в краткосрочной и, возможно, среднесрочной перспективе, тогда как создание рабочих мест будет преобладать в долгосрочной перспективе. Тем не менее, трудовые отношения могут измениться, с более частой сменой работы и ростом нестандартной занятости, самозанятости и контрактной работы, что, возможно, ослабит права работников.

Искусственный интеллект и доходы работников

Разрушительное воздействие ИИ может также повлиять на заработную плату, распределение доходов и экономическое неравенство. Растущий спрос на высококвалифицированных работников, способных использовать ИИ, может привести к росту их заработной платы, в то время как многие другие могут столкнуться с сокращением заработной платы или безработицей. Это может затронуть даже работников средней квалификации, чья заработная плата может быть снижена из-за того, что высококвалифицированные работники не только более продуктивны, чем они, благодаря использованию ИИ, но и способны выполнять больше задач. Таким образом, изменения в спросе на рабочую силу могут ухудшить общее распределение доходов, влияя на общую заработную плату [15]. Многое будет зависеть от темпов: более быстрые изменения создадут более нежелательные последствия из-за несовершенства рынка. Теоретически, чем больше решений ИИ заменят рутинный труд, тем больше будет расти производительность и общий рост доходов, а также тем резче будет увеличиваться неравенство. Это может привести к «парадоксу изобилия»: общество в целом станет намного богаче, но для многих людей, сообществ и регионов техно-

логические изменения только усилят неравенство. Действительно, существуют опасения, что нынешние тенденции смещения распределения национального дохода от труда, ведущие к углублению неравенства и концентрации богатства на «суперзвездных» предприятиях, действительно будут только усугублены ИИ. С другой стороны, многие экономисты настроены позитивно, заявляя, что ИИ будет сложнее всего заменить «сенсорно-моторные навыки», необходимые на нестандартных и не рутинных работах, таких как работа сотрудников службы безопасности, садовников и поваров. Другие добавляют, что автоматизация всегда оказывает неоднозначное влияние на неравенство: автоматизация с низкой квалификацией всегда увеличивает неравенство в заработной плате, а автоматизация с высокой квалификацией всегда уменьшает его.

Налогообложение роботов

Билл Гейтс – один из многих, кто утверждает, что компания, использующая роботов, забирающих чью-то работу, должна платить налоги, чтобы не допустить, чтобы новые технологии уменьшали государственные деньги, поддерживающие общество. В настоящее время отвергается идея введения налога на роботов для владельцев, чтобы финансировать поддержку переподготовки работников, уволенных с работы роботами. Однако, если автоматизация приведет к значительному сокращению поступлений налога и увеличит нагрузку на государственные финансы (например, за счет увеличения расходов на социальное обеспечение и переподготовку), появление такого налога в будущем может стать неизбежным. Южная Корея, снизила налоговые льготы на инвестиции в автоматизацию бизнеса. Этот шаг, похоже, отражает беспокойство некоторых экспертов по поводу чрезмерного стимулирования автоматизации. Дебаты по этой теме набирают обороты, но, если будет введен налог на роботов, необходимо будет ответить на некоторые фундаментальные вопросы, касающиеся четкого и согласованного определения и возможных форм налогообложения. Одна из возможностей – найти решение, которое позволило бы такому налогу быть эффективным в экономике. Это решение может лежать на непростом пути введения налогов на цифровую экономику – вопрос, который горячо обсуждается в различных странах.

Заключение

В заключении следует отметить, что отдельные последствия от внедрения ИИ обладают значительным потенциалом для стимулирования экономического роста и производительности, но в то же время создают столь же серьезные риски поляризации рынка труда, роста неравенства, структурной безработицы и появления новых нежелательных промышленных структур. Политика государства должна создать ус-

ловия, необходимые для развития потенциала ИИ, одновременно тщательно продумывая способы устранения связанных с ним рисков. Если предприятия не получают экономических выгод от ИИ, то их развитие может застопориться и ограничить рост, тем самым оказывая негативное влияние на экономику. Поэтому вопросы о распределении выгод от ИИ имеют основополагающее значение для управления его результатами. Налоговая политика могла бы помочь сбалансировать переход от труда к капиталу и защитить уязвимые группы от социально-экономической изоляции. Внутренние и внешние проблемы, связанные с этим:

1) Низкий уровень инвестиций и медленное внедрение технологий ИИ предприятиями, а также необходимость создания нормативной базы, которая не подавляла бы технологический прогресс и в то же время придерживалась ключевых принципов развития отечественной электронной промышленности.

2) Для решения этих проблем необходимо разработать благоприятную для инвестиций структуру и стать лидером в установлении глобальных стандартов качества. Предварительным условием успешного использования потенциала ИИ является развитие соответствующих навыков в образовании и работе, а также финансирование исследований и объединение ресурсов для создания добавленной стоимости.

3) Темпы развития России приведут к неизбежным победам в глобальной революции ИИ [16] на предприятиях отечественной электронной промышленности, в том числе в области визуальной проверки качества изделий. Принимая во внимание жесткую глобальную международную конкуренцию в области ИИ для продвижения усилий в этом, несомненно, многообещающем секторе необходима прочная скоординированная структура, и эта насущная необходимость должна быть признана так как ИИ является одной из самых стратегических технологий 21 века.

Литература

1. Указ Президента Российской Федерации от 10 октября 2019 года № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации».
2. «Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года». Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 10 октября 2019 года № 490.
3. Ляпин И.А. «Влияние искусственного интеллекта на рабочее место: текущее состояние и будущие перспективы» // Исследования в цифровой экономике. – 2023 – № 1 (1) – С. 137-176.
4. Моттаева А.Б., Кашинцева В.Л., Покровский О.Ю. «Влияние искусственного интеллекта на рынок труда» // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Экономика. – 2020 – № 4 – С. 82-88.

5. Никитина И.А., Потемкин А.С. «Некоторые аспекты развития и влияния на бизнес искусственного интеллекта в России» // Журнал правовых и экономических исследований – 2023 – № 2 – С. 302-310.
6. Юрин М.С. «Влияние искусственного интеллекта на экономику» // Электронный научный журнал «Дневник науки» – 2022 – № 10 – 11 с.
7. Zarifhonarvar Ali. Economics of ChatGPT: a labor market view on the occupational impact of artificial intelligence // Journal of Electronic Business & Digital Economics, United Kingdom – 2024 – 100-116 p.
8. Mahmut Özer, Matjaz Perc, H. Eren Suna. Artificial Intelligence Bias and the Amplification of Inequalities in the Labor Market // Journal of Economy Culture and Society, Turkey – 2024 – 159-168 p.
9. Marina Maria Laukes. AI is shaping tomorrow's labor market: The impact of Artificial Intelligence on the required skills in the labor market AI is shaping tomorrow's labor market // Business School Global Economics and Business Management, Bachelor's thesis, Germany – 2024 – 53 p.
10. Seventh Session of the WIPO Conversation – Intellectual Property and the Metaverse. WIPO/IP/CONV/GE/23. March 29 to March 30, 2023 (Geneva, Switzerland).
11. «Национальная стратегия развития искусственного интеллекта в России» // TADVISER Государство. Бизнес. Технологии: [сайт] – 2024. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Национальная_стратегия_развития_искусственного_интеллекта (дата обращения: 04.09.2024).
12. Alleysson D., Susstrunk S. and Herault J., Linear demosaicing inspired by the human visual system, IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 14, Nr. 4, pp. 439-449, 2005.
13. Майорова К.С. «Структура и особенности производственной системы цифровой экосистемы российской компании в условиях цифровой трансформации» // Журнал «Управленческий учет» – 2024 – № 6 – С. 335-342.
14. Тезисы лекций «Может ли быть полезен искусственный интеллект бизнесу уже сегодня», организованные клубом «Байкальские стратегии» доктора физико-математических наук, профессора, руководителя учебно-исследовательской лаборатории искусственного интеллекта и машинного обучения ИРНИТУ, профессора Института информационных технологий и анализа данных и Байкальского института БРИКС Афанасьева Александра Диомидовича. Байкальский институт БРИКС – Июнь 2024 года.
15. Нобатова Н.О. «Искусственный интеллект и его экономическое влияние на современную цифровую экономику» // Международный научный журнал «ВЕСТНИК НАУКИ» – 2024 – № 36 – С. 298-302.
16. Луценко С.И. «Искусственный интеллект – поле глобальной конкуренции» // Аналитик Института экономической стратегий Отделения общественных наук РАН. Цифровая экономика – 2019 – № 2 (6) – С. 28-34.

УДК 621.373

МОНОЛИТНАЯ ИНТЕГРАЛЬНАЯ СХЕМА ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИКА 5-ММ ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН НА АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ

MONOLITHIC INTEGRATED CIRCUIT OF A TRANSCEIVER 5-MM WAVELENGTH RANGE ON GALLIUM ARSENIDE

Дюков Д.И., Макартцев И.В., начальник отдела, АО «НПП «Салют»;

Минеев С.Е., ведущий специалист, **Назаров А.В.**, к. т. н., доцент, заместитель главного конструктора филиала – начальник научно-исследовательского отделения, **Османов Р.Р.**, начальник научно-исследовательской группы, +7 (831) 466-04-49, osmanov22ruslan@mail.ru, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

Dyukov D.I.; Makartsev I.V., head of the research department, SPE “Salyut” JSC;

Mineev S.E., leading specialist, **Nazarov A.V.**, Ph.D. of Engineering Sciences, Associate professor, deputy chief designer – head of the science research department, **Osmanov R.R.**, head of the science research group, +7 (831) 466-04-49, osmanov22ruslan@mail.ru, FSUE “RFNC-VNIIEF”

Аннотация. Основным узлом любой системы ближней радиолокации, определяющим ее основные технические характеристики, является приемопередающий модуль. Важность приемопередающего модуля заключается в том, что его параметры и характеристики в значительной степени определяют эффективность всей системы в целом (дальность действия, разрешающую способность, массогабаритные характеристики).

Наиболее перспективным подходом при разработке приемопередающего модуля является применение монолитных интегральных схем. Использование монолитных интегральных схем многократно повышает технологичность и на порядок снижает стоимость изготовления как приемопередающего модуля, так и всей системы ближней радиолокации.

При решении задачи герметизации монолитных интегральных схем приемопередающих модулей 5 мм диапазона длин волн главной проблемой является отсутствие отечественных корпусов, разработанных для указанного диапазона частот. В связи с этим становится необходимым освоение технологии применения серийно выпускаемых отечественными предприятиями корпусов, работающих в диапазонах, близких к 5 мм.

В НИИИС им. Ю.Е. Седакова разработана и экспериментально отработана технология корпусированной монолитной интегральной схемы 5 мм диапазона длин волн, изготовленной в АО «НПП «Салют», с целью обеспечения ее герметизации, проведены успешные испытания на герметичность. Отработан оптимальный режим микросварки корпусированной монолитной интегральной схемы.

Annotation. The transmitting-receiving module (TRM) is the most important unit of the short-range radar system (SRS), which determines its main technical characteristics. TRM parameters and characteristics largely determine efficiency of the whole system (range, resolution, weight and size characteristics).

Monolithic integrated circuit (MIC) using is the most promising approach in MIC development. MIC using significantly increases manufacturability and reduces the cost of TRM and whole SRS manufacturing.

Absence of the specified frequency range domestic cases is the main sealing problem of the 5-mm wavelength range TRM monolithic integrated circuits (MIC). That's why developing of serially produced domestic 5-mm wavelength cases application technology is necessary.

The 5-mm wavelength range MIC casing technology has been developed and experimentally tested for ensuring of its sealing, successful sealing tests have been carried out in NIIS named after Yu.Ye. Sedakov. The optimal microwelding mode of encapsulated MIC has been trained.

Ключевые слова: система ближней радиолокации, приемопередающий модуль, монолитная интегральная схема, металлокерамический корпус, герметизация, технология GaAs pHEMT, ЛЧМ-сигнал, миллиметровый диапазон длин волн, печатная плата, термозвуковая микросварка.

Keywords: short-range radar system, transceiver module, monolithic integrated circuit, metal-ceramic case, sealing, GaAs pHEMT technology, chirp signal, millimeter wavelength range, printed circuit board, thermal sonic microwelding.

Научная специальность: 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.



Дюков Д.И.



Макарцев И.В.



Минеев С.Е.



Назаров А.В.



Османов Р.Р.

Введение

В современном мире системы ближней радиолокации (далее – СБРЛ) находят все более широкое применение при построении систем предупреждения столкновений, охранных и военных систем, к которым предъявляются экстремальные требования по стойкости к механическим и климатическим воздействиям. Ключевые технические характеристики СБРЛ такие, как дальность действия, разрешающая способность, масса и габариты, энергопотребление,

в значительной степени определяются входящим в ее состав приемопередающим модулем (далее – ППМ).

Все ППМ СБРЛ по принципу действия можно разделить на два класса: импульсные и непрерывного действия.

Импульсный режим работы ППМ характеризуется большими значениями мощности излучаемого сигнала и дальностью действия. Однако при импульсном режиме работы имеется так называемая «мертвая» зона вблизи ППМ, и расстояние до объекта отраже-

ния может измеряться с большой погрешностью, связанной с длительностью излучаемого импульса [1]. Одним из способов устранения данных недостатков является уменьшение длительности зондирующего сигнала. Но данный способ сопровождается значительным усложнением и удорожанием схемы ППМ и, как следствие, всего изделия.

Для реализации ППМ, способных работать на предельно малых расстояниях до объекта отражения (порядка 1 м), наиболее предпочтителен метод непрерывной частотно-модулированной радиолокации.

Определение дальности до цели методом частотной модуляции основано на измерении приращения несущей частоты передатчика за время распространения сигнала до цели и обратно. В случае линейной частотной модуляции (далее - ЛЧМ) низкочастотный сигнал биений, выделяемый в ППМ, будет прямо пропорционален расстоянию до объекта [2].

Применение миллиметрового диапазона длин волн при построении ППМ позволяет существенно повысить разрешающую способность при измерении пространственных координат, обеспечить высокую помехоустойчивость радиолокационного канала и улучшить массогабаритные характеристики изделия.

Предъявляемые к СБРЛ жесткие ограничения по массогабаритным характеристикам, малым дистанциям срабатывания, высокой помехозащищенности обосновывают необходимость работы системы в 5 мм диапазоне длин волн.

Выбор 5 мм рабочего диапазона длин волн позволяет:

- обеспечить помехозащищенность за счет значительного (более 14 дБ/км) поглощения в атмосфере радиоволн указанного диапазона;
- обеспечить необходимую девиацию по частоте для измерения расстояний до цели в диапазоне до 10 м;
- сформировать необходимую диаграмму направленности антенной системы в типовых конструктивах изделий, характерных как для гражданского, так и для военного применения.

Классическим подходом при построении ППМ миллиметрового диапазона длин волн является волноводно-гибридная технология с использованием диода Ганна в качестве элемента, генерирующего колебания. Преимуществом данной технологии является строгая электродинамическая теория, большое количество технических наработок и хорошие радиолокационные характеристики волноводных изделий. Недостатками данной технологии являются повышенные массогабаритные характеристики, высокая трудоемкость изготовления и большие значения энергопотребления. В связи с этим, при построении ППМ наблюдается тенденция к переходу на интегральную (микрорешетчатую) технологию с применением бескорпусных монолитных интегральных

схем (далее – МИС) в качестве элементной базы.

Построение ППМ на базе МИС позволяет упростить топологию платы модуля, повысить технологичность изготовления, надежность и механическую прочность всей СБРЛ, снизить ее массу, габариты и стоимость изготовления, осуществить импортозамещение критически важной элементной базы, не имеющей аналогов на российском рынке.

В зависимости от объема функций, выполняемых конкретным ППМ, а также для обеспечения требуемых характеристик за рубежом с использованием различных технологий, было разработано и создано большое количество как ППМ в целом, так и его отдельных составляющих [3-11]. Однако в настоящее время, в условиях жестких санкционных ограничений, применение в отечественной продукции зарубежных разработок становится практически невозможным.

Для создания перспективных малогабаритных СБРЛ необходима разработка отечественной малогабаритной крайне высокочастотной (КВЧ) элементной базы в виде МИС.

Основная часть

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седатова» и АО «НПП «Салют» совместно разработали и изготовили опытные образцы МИС ППМ 5-миллиметрового диапазона длин волн [12, 13]. МИС спроектирована и изготовлена на основе базового технологического процесса GaAs pHEMT с минимальной длиной затвора транзистора 0,07 мкм Т-образной формы.

На рис. 1 показана топология кристалла МИС. Габаритные размеры кристалла составляют (3,37×3,2×0,08) мм.

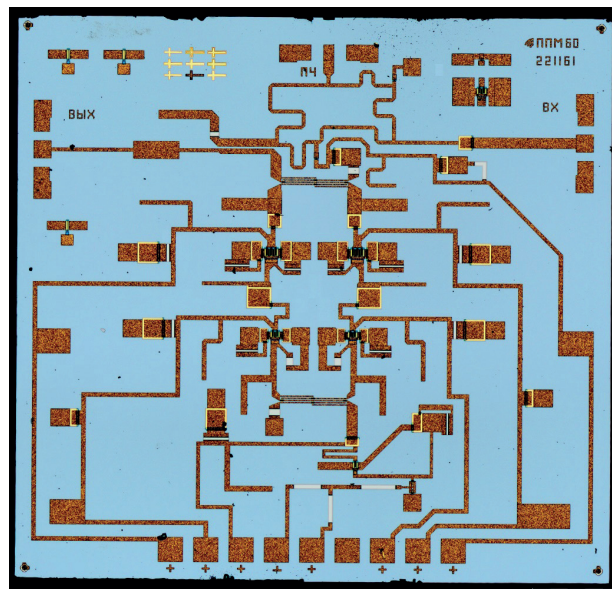


Рис. 1. Топология кристалла МИС ППМ

Электрические параметры разработанной МИС ППМ приведены в таблице 1.

Таблица 1

Электрические параметры МИС ППМ

Наименование параметра, единица измерения	Измеренное значение
Рабочий диапазон частот, ГГц	58,2 – 62,5
Диапазон электрической перестройки частоты передатчика, ГГц, не более	4,4
Энергетический потенциал на промежуточной частоте 3 МГц в полосе 1 МГц при отношении сигнал/шум 3 дБ, дБ, не менее	115,0
Перепад выходной мощности КВЧ в диапазоне электрической перестройки, дБ, не более	3,0
Полоса частот сигнала биений, МГц	0,1 – 10,0
Неравномерность АЧХ в полосе пропускания ПУПЧ, дБ, не более	3,0
Напряжение смещения варикапа ГУН, В	1,0 – 5,0
Ток потребления, мА	200,0 – 250,0
Напряжение питания, В	4,75 – 5,25

Проведенный анализ показал, что по техническим характеристикам разработанная МИС не уступает зарубежным аналогам [14, 15].

Известно, что основные технические характеристики и работоспособность интегральных схем при воздействии внешних факторов зависят от степени защиты, обеспечиваемой герметичным корпусом.

Одним из возможных путей герметизации является непосредственная установка разработанного кристалла МИС ППМ на плату (рис. 2) с последующей герметизацией всего объема ППМ (рис. 3).

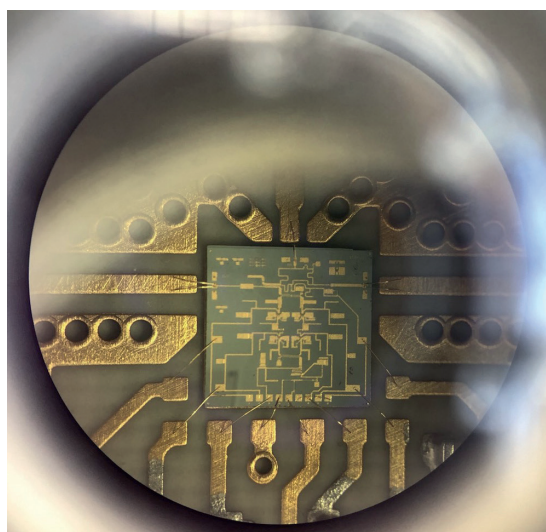


Рис. 2. Монтаж МИС ППМ на печатную плату



Рис. 3. Внешний вид герметичного ППМ

В качестве альтернативного пути обеспечения герметичности МИС ППМ была рассмотрена возможность применения металлокерамических корпусов (далее – МК) отечественного производства.

В настоящее время АО «НИИПП» (г. Томск) освоил серийный выпуск радиационностойких безвыводных корпусов с металлокерамическим основанием (КОРПУСА МК ТИПА 5) [16], предназначенных для сборки и герметизации МИС СВЧ. Корпуса выпускаются по техническим условиям ЯЮКЛ.301176.012 ТУ с габаритными размерами от (2,0×2,0) мм до (10,0×10,0) мм с шагом через 1 мм и количеством выводов от 6 до 72.

В технических условиях на корпуса нормированы их основные электрические характеристики:

- диапазон рабочих частот: не менее 40 ГГц;
- затухание СВЧ входов: не более 0,6 дБ на частотах до 20 ГГц и не более 1,1 дБ на частотах до 40 ГГц;

- КСВН СВЧ входов: не более 1,7 на частотах до 40 ГГц.

Конструктивно корпус МК 5169.32-1 размером (5×5) мм может быть использован для монтажа в него кристалла МИС ППМ 5-мм диапазона длин волн, как это показано на рис. 4.

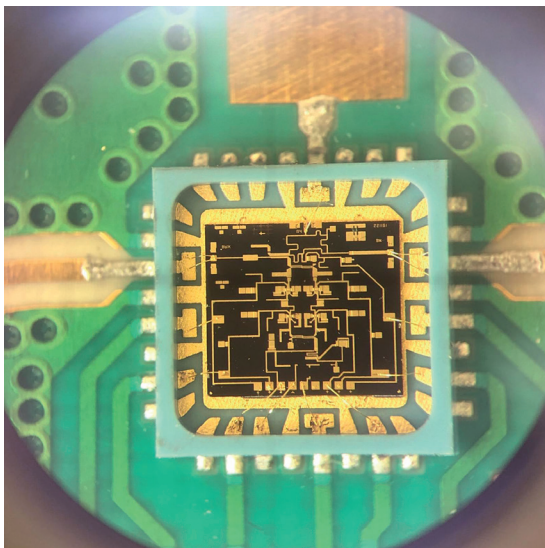


Рис. 4. Внешний вид монтажа кристалла МИС ППМ в металлокерамический корпус МК 5169.32-1

Технологический процесс сборки МИС ППМ в корпус МК 5169.32-1 ЯЮКЛ.301176.012 ТУ состоит из следующих операций:

- монтаж кристалла МИС ППМ в корпусе на токопроводящий клей ТОК-2;
- герметизация ППМ в среде инертного газа;
- контроль герметичности ППМ.

Операция монтажа кристаллов в корпус устанавливает порядок крепления кристалла МИС ППМ в МК с использованием токопроводящего клея с последующей сушкой при температуре полимеризации клея.

При монтаже кристалла в корпус предъявляются следующие требования:

- клей должен выступать на 75% длины каждой стороны кристалла;
- клей не должен заходить на лицевую сторону кристалла и на выводы корпуса;
- размер отпечатка клея на основании должен быть более 50 % размера кристалла по каждой стороне;
- толщина клеевого слоя должна быть ограничена заранее заданными величинами, так как с увеличением толщины клеевого шва его прочность уменьшается.

Технология приклеивания кристалла имеет важное преимущество перед технологией пайки: монтаж осуществляется при невысоких температурах, что исключает вредное воздействие тепловых ударов на термочувствительные элементы схемы.

После приклеивания МИС ППМ к корпусу производится микросварка проволочных перемычек от

контактных площадок (далее – КП) МИС ППМ к КП корпуса ППМ.

В ходе проведенных в «НИИИС им. Ю.Е. Седакова» работ был отработан оптимальный режим термозвуковой микросварки.

Герметизация кристалла МИС ППМ производится путем приклеивания крышки к основанию корпуса герметизирующим материалом Коминкор-1.2 в среде инертного газа (азот) в соответствии с ЯЮКЛ.301176.012 ТУ.

После окончания процесса герметизации производится контроль внешнего вида ППМ при помощи микроскопа с 16-кратным увеличением.

Контроль герметичности корпуса МИС ППМ осуществляется масс-спектрометрическим способом (малые течи) и жидкостным способом (средние и большие течи).

Общее время контроля масс-спектрометрическим способом всей партии корпусов МИС ППМ не должно превышать 3 часов с момента окончания опрессовки.

При контроле герметичности корпуса МИС ППМ жидкостным способом корпус МИС ППМ помещается в фторуглеродную жидкость камеры системы обнаружения пузырьков (далее – СОП). Температура жидкости в СОП должна составлять 125 °С. Наблюдение проводится через смотровое окно контрольной емкости системы до кратковременного звукового сигнала, обозначающего окончание времени контроля (30 с).

Корпус МИС ППМ считается герметичным, если в течение времени наблюдения из корпуса не выделялись большие единичные пузыри или цепочки мелких пузырьков. После окончания техпроцесса производится сушка корпуса МИС ППМ в течение 30 мин.

Корпусированная МИС ППМ монтируется на плату ППМ с помощью технологии поверхностного монтажа.

Заключение

В ходе выполненных работ впервые в России разработана МИС ППМ 5 мм диапазона длин волн для малогабаритных СБРЛ. Изготовлены и испытаны опытные образцы МИС ППМ. Разработана и экспериментально отработана технология корпусирования МИС с целью обеспечения ее герметизации, проведены успешные испытания на герметичность. Отработан оптимальный режим микросварки корпусированной МИС.

Применение разработанной отечественной высокотехнологичной МИС в перспективных СБРЛ позволит существенно улучшить технические и массогабаритные характеристики широкого класса изделий военного и гражданского назначения, повысить эффективность их применения помехозащищенность, стойкость к механическим перегрузкам, снизить стоимость, осуществить импортозамещение критически важной элементной базы.

Литература

1. Финкельштейн М.И. «Основы радиолокации»: Учебник для вузов – М.: Радио и связь, 1983. – 536 с.
2. Комаров И.В. «Основы теории радиолокационных систем с непрерывным излучением частотно-модулированных колебаний» – М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 392 с.
3. Hiroyuki Matsuura, Kentaro Tezuka, Ikura Aoki et al. Monolithic Rat-Race Mixers for Millimeter Waves // IEEE Trans., June 1998. – Vol. 46, NO. 6.
4. Kraemer M., Ercoli M., Dragomirescu D. and Plana R. A wideband single-balanced down-mixer for the 60 GHz band in 65 nm CMOS // In APMC 2010.
5. Heinz J. Siweris, Andreas Werthof, Harald Tischer et al. Low-Cost GaAs pHEMT MMIC's for Millimeter-Wave Sensor Applications // IEEE Trans., December 1998. – Vol. 46, NO. 12.
6. Ferndal M., Zirath H. A comparison of topology and technology of balanced VCOs intended for use in a 60 GHz WLAN system // Linkoping Electronic Conference Proceeding Linkoping, 2003.
7. Kim J.-G., Baek D.-H. et al. A K-Band InGaP/GaAs HBT Balanced MMIC VCO // IEEE Microwave and wireless components letters, November 2003. – VOL.13, NO. 11.
8. Kamfelt C., Kozhuharov R. and Zirath H. A High Purity 60 GHz-Band Single Chip x8 Multiplier with Low Phase Noise // 13 GaAs Symposium. – Paris, 2005.
9. Nicolson S.T., Tang K.A., Yau K.H.K. et al. F Low-Voltage 77-GHz Automotive Radar Chipset // IEEE 2007.
10. Floyd B.A., Reynolds S.K. et al. SiGe Bipolar Transceiver Circuits Operating at 60 GHz // IEEE journal of solid-state circuits, January 2005. – Vol. 40, NO. 1.
11. Kraemer M., Dragomirescu D. et al. Design of a Very Low-power, Low-cost 60 GHz Receiver Front-End Implemented in 65 nm CMOS Technology // International Journal of Microwave and Wireless Technologies, April 2011. –Vol. 3, Special Issue 2. – Pp. 131-138.
12. Дюков Д.И., Макарец И.В., Назаров А.В., Османов Р.Р., Царев Б.Ю. «Разработка МИС приемопередатчика миллиметрового диапазона длин волн» // Математические методы в технологиях и технике. – 2023. – № 7. – С. 67-71.
13. Dyukov D.I., Makartsev I.V., Nazarov A.V., Osmanov R.R., Tsarev B.Yu. 5 mm Wavelength Transceiver in the Monolithic Integrated Gallium Arsenide Design // Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering. – 2024. – No. 3 (148). – Pp. 104-114.
14. Bozzola S., Guermandi D. et al. A sliding IF receiver for mm-wave WLANs in 65nm CMOS // IEEE Custom Integrated Circuits Conference, September 2009. – Pp. 669-672.
15. Infineon Technologies 60 GHz radar sensors: [Электронный ресурс] // URL: <https://www.infineon.com/cms/en/product/sensor/radar-sensors/radar-sensors-for-iot/60ghz-radar/#!products>. (Дата обращения: 14.04.2025).
16. Максимов А. «Металлокерамические корпуса и материалы АО «ТЕСТПРИБОР» для изделий микроэлектроники» // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2018. – № 5. – С. 86-96.

УДК 535.93

РАЗРАБОТКА ВОЛНОВОДНОЙ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ LINBO₃/SINDEVELOPMENT OF WAVEGUIDE STRUCTURE BASED ON HYBRID LINBO₃/SIN TECHNOLOGY

Мырзахметов А., инженер, Кулинич И.В., к. т. н., старший научный сотрудник,

Перин А.С., к. т. н., заведующий лабораторией,

+7 (999) 495-72-24, aian.myrzakhmetov@tusur.ru, лаборатория ФИС ФГАОУ ВО «ТУСУР»

Myrzakhmetov A., engineer, Kulnich I.V., Ph.D. in Engineering, senior researcher,

Perin A.S., Ph.D. in Engineering, head of the laboratory,

+7 (999) 495-72-24, aian.myrzakhmetov@tusur.ru, Laboratory PIC «TUSUR»

Аннотация. Интегральная фотоника активно развивается благодаря возможности миниатюризации оптических компонентов и повышения их функциональности. Наиболее широко используемым материалом остается кремний на изоляторе, однако его ограничения – отсутствие нелинейности второго порядка и высокая нелинейность третьего порядка – мешают реализации ряда фотонных устройств. Решением этой проблемы является использование гибридных структур, сочетающих кремний на изоляторе и ниобат лития, обладающий широким спектральным окном и выраженными нелинейными свойствами. В работе рассматривается разработка волноводной структуры фотонной интегральной схемы на основе тонкопленочного ниобата лития на изоляторе с на-

грузкой из нитрида кремния, что позволяет обойти трудности, связанные с нестабильностью травления кремния на изоляторе и ниобата лития и снизить потери. Цель исследования заключалась в создании и технологической реализации пассивных элементов фотонных интегральных схем с использованием тонкопленочного ниобата лития на изоляторе и нитрида кремния. В ходе работы исследована зависимость оптических и механических свойств пленок нитрида кремния от параметров плазмохимического осаждения, разработаны одномодовые волноводы и элементы связи, реализована фазовая решетка с КПД 33 % и торцевой ввод излучения с эффективностью более 85 %. Полученные результаты подтверждают возможность создания эффективных фотонных структур без необходимости травления кремния на изоляторе и ниобата лития. Разработанные решения могут найти применение в телекоммуникациях, сенсорике и космической отрасли.

Annotation. Integrated photonics is actively developing due to the possibility of miniaturization of optical components and increasing their functionality. Silicon on insulator (SOI) remains the most widely used material, but its limitations - the absence of second-order nonlinearity and high third-order nonlinearity - hinder the implementation of a number of photonic devices. The solution to this problem is the use of hybrid structures combining SOI and lithium niobate (LiNbO_3), which has a wide spectral window and pronounced nonlinear properties. The paper considers the development of a waveguide structure of a photonic integrated circuit (PIC) based on thin-film lithium niobate on insulator (TFLIN) with a silicon nitride (SiN) load, which allows to bypass the difficulties associated with the instability of LiNbO_3 etching and reduce losses. The purpose of the study was to create and technologically implement passive PIC elements using TFLIN and SiN. In the course of the work, the dependence of the optical and mechanical properties of SiN films on the parameters of plasma chemical deposition was studied, single-mode waveguides and coupling elements were developed, a phase grating with an efficiency of 33 % and an end-face radiation input with an efficiency of more than 85 % were implemented. The obtained results confirm the possibility of creating effective photonic structures without the need for LiNbO_3 etching. The developed solutions can find application in telecommunications, sensors and the space industry.

Ключевые слова: ниобат лития, нитрид кремния, фотонная интегральная схема, интегральная фотоника, одномодовый волновод, элементы связи ФИС.

Keywords: lithium niobate, silicon nitride, photonic integrated circuit, integrated photonics, single-mode waveguide, PIC communication elements.

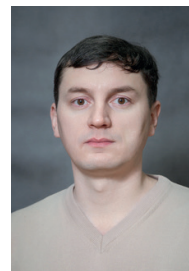
Научная специальность: 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Введение

На сегодняшний день кремний на изоляторе (далее – КНИ) является основным материалом в интегральной фотонике. Это обусловлено тем, что на момент появления первых интегрально-оптических устройств кремниевая технология производства уже была хорошо отработана и широко применялась в микроэлектронике [1]. Она стала фундаментом для развития фотонных интегральных схем (далее – ФИС), что обеспечило КНИ структурам массовое распространение. Кроме технологической зрелости, данная платформа обладает рядом достоинств: прозрачность в инфракрасном диапазоне, высокий контраст показателей преломления между кремнием и подложкой, малая топологическая норма и высокая степень интеграции. ФИС на базе КНИ успешно применяются в оптических маршрутизаторах, передатчиках, сенсорах, фотонных вычислительных модулях и других устройствах [2–4]. Однако развитие кремниевой фотоники постепенно приближается к теоретическим ограничениям. Высокая нелинейность третьего порядка приводит к значительным потерям на высоких мощностях, а отсутствие нелинейности второго порядка ограничивает возможности использования кремния в квантовой оптике и высокочастотных модуляторах [5].



Мырзахметов А.



Кулинич И.В.



Перин А.С.

Одним из наиболее перспективных направлений является интеграция кремниевых структур с ниобатом лития (далее – LiNbO_3). Данный материал обладает широкой полосой пропускания (от видимого до дальнего ИК-диапазона), высокой нелинейностью второго порядка и выраженным электрооптическим эффектом при низкой нелинейности третьего порядка [6]. Эти свойства делают его особенно привлекательным для создания высокочастотных и энергоэффективных ФИС [7]. Классические волноводы на LiNbO_3 формируются путем диффузии титана в объёмный кристалл, однако такие конструкции не поддаются интеграции на микрочип и обладают широким модовым профилем. Прорывом в этой области стало появление технологии ионной резки, позволяющей

формировать тонкопленочные структуры на базе LiNbO_3 , интегрируемые в чипы [8]. Такие структуры известны как тонкопленочный ниобат лития на изоляторе (далее – ТНЛИИ). Они позволяют ограничить диаметр моды до 1 мкм и формировать компактные элементы ФИС с высокой функциональностью [9].

Однако внедрение ТНЛИИ сопровождается рядом технологических сложностей. Основной из них является травление LiNbO_3 — процесс, требующий точного соблюдения множества параметров [10]. Это приводит к высокой шероховатости боковых стенок волноводов, что, в свою очередь, вызывает значительные оптические потери. Для обхода этого ограничения предлагается подход, при котором волновод формируется не в самом LiNbO_3 , а в дополнительном нагрузочном слое из другого материала, совместимого по оптическим параметрам и технологическим требованиям. Одним из таких материалов является нитрид кремния (далее – SiN).

Нитрид кремния обладает рядом преимуществ: оптической прозрачностью в широком диапазоне, низкими потерями, высокой термической стабильностью и возможностью формирования тонких пленок методом плазмохимического осаждения [11]. Благодаря этим свойствам, SiN активно используется в промышленной микроэлектронике и набирает популярность в фотонике как материал для пассивных компонентов [12–14]. Кроме того, его свойства могут быть варьированы путем изменения параметров осаждения, что открывает широкие возможности для проектирования и оптимизации волноводных структур [15]. Совмещение SiN с ТНЛИИ позволяет создать гибридную фотонную платформу, сочетающую в себе низкие потери, высокую степень интеграции и функциональность, недоступную на кремнии.

Таким образом, целью данной работы является разработка волноводных структур фотонной интегральной схемы на основе тонкопленочного ниобата лития на изоляторе и нагрузки из нитрида кремния. Предлагаемое решение направлено на преодоление технологических ограничений ТНЛИИ за счёт отказа от травления LiNbO_3 и использования SiN в качестве волноводного слоя. Такой подход открывает путь к созданию эффективных, масштабируемых и многофункциональных фотонных чипов нового поколения.

Основная часть

Интегральный оптический волновод – это основной элемент ФИС. Важным этапом проектирования волновода является модовый анализ. Это метод определения количества и природы электромагнитных мод, распространяющихся в волноводной структуре. Это важный этап в процессе конструирования волноводных структур, так как модовый состав напрямую влияет на их функциональность. Например, нарушение заложенного модового состава в волноводах может привести к явлению гибридизации мод,

что приводит к сильному падению пропускательной способности электрооптических модуляторов [16].

Модовый состав зависит от геометрии поперечного сечения волноводной структуры. Следовательно, для определения диапазона работы структуры в одномодовом режиме, следует исследовать зависимость модового состава от высоты и ширины волновода нагрузки.

Была построена модель поперечного сечения волноводной структуры $\text{SiO}_2/\text{ТНЛИИ}/\text{SiN}$, схематичное представление модели представлено на рис. 1. Модель имела следующие параметры: показатель преломления SiN – 2, показатель преломления SiO_2 – 1,44, обыкновенный и необыкновенный показатель преломления LiNbO_3 – 2,21 и 2,13, высота слоя тонкой пленки LiNbO_3 tLN – 0,6 мкм, высота слоя SiO_2 – 4 мкм. Относительно высоты волновода нагрузки, можно утверждать, что ТЕО мода не проникает в материал нагрузки больше, чем на эффективную глубину, которую можно рассчитать при помощи уравнения [17]:

$$h_{\text{load}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - n_{\text{load}}^2}} \approx 0,3 \text{ мкм}, \quad (1)$$

где n_{eff} , n_{load} – эффективный показатель преломления и показатель преломления материала нагрузки, для длины волны λ .

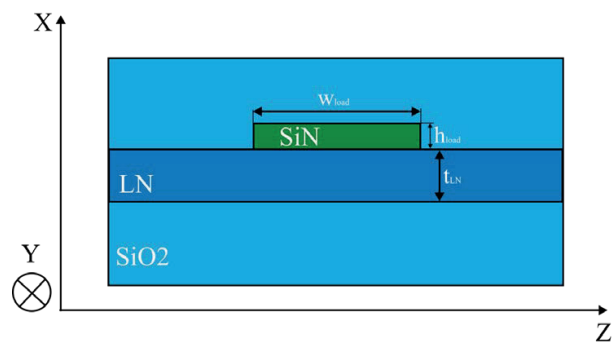


Рис. 1. Схематичное представление модели поперечного сечения нагруженного SiN волновода на основе ТНЛИИ

Для модового анализа использовался математический пакет для моделирования мультифизических процессов COMSOL Multiphysics. Был использован физический интерфейс численного расчета волновых уравнений в частотной области. В данном интерфейсе задаются граничные пространственные условия поведения электромагнитных волн. Также, в данном интерфейсе соблюдается допущение, что в исследуемой модели распространяется монохроматическая волна. Данный интерфейс позволяет делать расчет распределения электромагнитной волны в двумерной или трехмерной модели, проводить исследование по собственным частотам и получать численные результаты исследований.

Было проведено исследование модового состава волноводной структуры от ширины волновода на-

грузки w_{load} , в диапазоне от 0,1 до 4 мкм. Результат представлен на рис. 2.

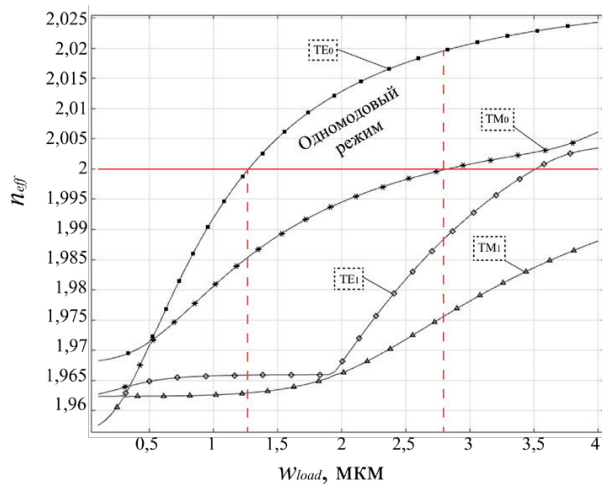


Рис. 2. Зависимость значения эффективного показателя преломления TE_0 , TM_0 , TE_1 , TM_1 мод от ширины волновода нагрузки

Красная линия на рис. 2 установлена на значении, соответствующему n_{load} . Моды выше данного уровня будут считать распространяющимися, так как они распространяются не только в пленке ниобата как в планарном волноводе, также и в нагрузке из SiN. Диапазон ширины волновода нагрузки w_{load} , при котором волноводная структура работает в одномодовом режиме составляет от 1,25 до 2,8 мкм.

Для формирования успешной фотонной интегральной платформы на основе волноводов SiN/ТНЛНИ необходимо разработать элементы связи между волноводом и внешней средой. Эффективная передача оптического излучения из внешней среды в ФИС и обратно, является одной из главных проблем интегральной фотоники [18]. Популярным решением в КНИ волноводных структур, является обеспечение передачи путем позиционирования телекоммуникационного одномодового оптоволоконна к торцам ФИС (рис. 3а). Однако такое соединение, без специализированной подготовки оптоволоконна, вносит значительные потери в полезный сигнал. Это связано с большой разницей между диаметром модового пятна оптического волокна и волновода [18]. Под специализированным волокном имеется ввиду линзовонное волокно, получаемое путем термического вытягивания, или жидкостного травления. Благодаря линзованному наконечнику волокна, удастся уменьшить модовое пятно в волокне до 2 мкм в диаметре, что повышает эффективности связи до 90 %. Но для обеспечения высокой эффективности связи, также необходимо обеспечить низкую шероховатость поверхности торца и точное позиционирование оптоволоконна относительно торца. Также, для передачи через торец, необходима на концах волноводов в ФИС сформировать конусные волноводы, которые позволяют увеличить эффективность передачи.

Также существует способ связи ФИС с окружающей средой через фазовую резонансную решетку (ФРР) (рис. 3б). Это периодическая структура, расположенная на волноводе, и при взаимодействии излучения с данной решеткой происходит дифракция с отклонением излучения в среду или в ФИС. Этот способ связи менее эффективный чем метод с позиционированием оптоволоконна на торце ФИС, однако, он более технологичный, так как решетка формируется в одном технологическом маршруте что и волноводная структура. К тому же, благодаря тому, что решетка расположена на поверхности чипа, этап тестирования полученных чипов требует меньше этапов подготовки.

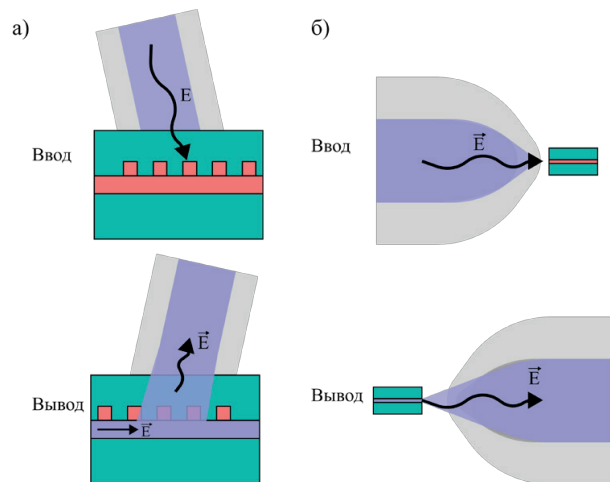
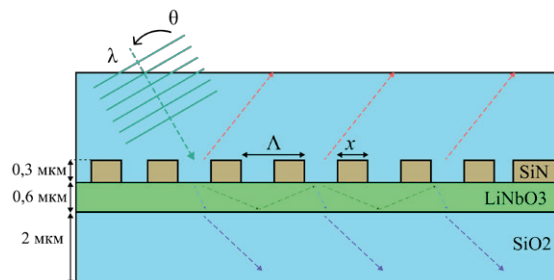


Рис. 3. Методы связи ФИС с окружающей средой а — способ связи через ФРР; б — торцевой способ связи

Была проведена разработка и исследование двух представленных элементов связи для волноводной структуры на основе нагруженного SiN волновода на ТНЛНИ.

Решеточный элемент передачи излучения на основе нагруженного SiN волновода на ТНЛНИ

Ввод света в волноводную систему реализуется благодаря разложению его на различные порядки дифракции на решетке. Часть этого направленного света дифрагирует попадая на решетку, после прохождения через решетку интерферирует с несвязанными отраженными или прошедшими волнами, как показано синими и красными стрелками на рис. 4.



Λ — период решетки; x — ширина гребня
Рис. 4. Графическое представление профиля ФРР и поведение распространения световых волн в нем

Согласно условию согласования фаз, резонансное возбуждение связанной моды происходит при выполнении условия из уравнения [19]:

$$\frac{\sin(\theta)}{\lambda} = \frac{n_{\text{eff}}}{\lambda} + \frac{q}{\Lambda}, \quad (2)$$

где q – порядок дифракции ($q = -1$);

θ – угол ввода/вывода относительно нормали плоскости чипа, град.;

n_{eff} – эффективный показатель преломления направляемой моды (TE0).

Моделирование проводилось в программном обеспечении Lumerical FDTD Solutions. Для моделирования и оптимизации использовался метод 3D-FDTD (Finite Difference Time Domain – метод конечных разностей во временной области) при условии точности расчетной сетки 10 узлов сетки на единицу длины волны. Метод FDTD, основанный на решениях векторных трехмерных уравнений Максвелла [20], использовался для моделирования распространения

электромагнитного излучения во временном диапазоне, для исчерпывающего анализа и определения геометрических параметров ФРР. Для учета поглощения излучения на границы расчетной модели, использовались граничные условия идеально подбранного слоя.

ФРР чувствителен к эффективному показателю преломления n_{eff} , который должен удовлетворять неравенству $1,44 \leq n_{\text{eff}} \leq 2,21$. Угол θ был выбран равным 8° , что позволяет избежать отражения второго порядка, которое значительно снижает эффективность связи вертикального решетчатого соединителя [21]. Диапазон периода решетки Λ , при котором будет происходить передача излучения, может быть определен с помощью уравнения (2). Подставив θ и λ в уравнение можно получить расчетный диапазон периода решетки: $0,775 \leq \Lambda \leq 1,188$ мкм. Глубина травления решетки была принята равной толщине пленки SiN 0,3 мкм. Результаты пошаговой развертки и оптимизации параметров приведены на таблице 1.

Таблица 1

Геометрические параметры ФРР нагрузкой из SiN на ТНЛНИ

	Λ , мкм	x , мкм	θ , °	λ , мкм	K_p , %
До пошаговой развертки	1	0,5	8	1,55	15
После пошаговой развертки	1,15	0,55			28
После оптимизации	1,166	0,63			33,2

На рис. 5 представлена спектральная зависимость эффективности передачи ФРР после оптимизации. Диапазон длин волн, при котором эффективность передачи по уровню 3 дБ от пикового значения, составляет от 1,497 до 1,607 мкм, то есть полоса пропускания данной конструкции ФРР равна 113 нм.

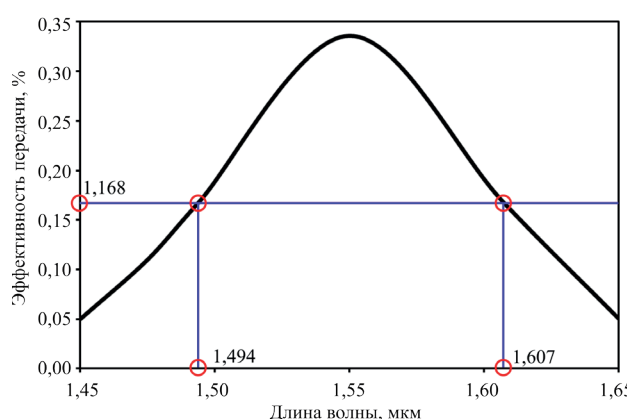


Рис. 5. Спектральная зависимость эффективности передачи ФРР после оптимизации

Также бы проведено исследование влияния каждого основного параметра модели (период решетки Λ , ширины гребня x , угла ввода θ) на эффективность передачи. Во время моделирования изменялся один параметр, остальные были зафиксированы на оптимизированных значениях.

Зависимость эффективности передачи от периода решетки представлена на рис. 6. Эффективность передачи остается выше 30 % при изменении периода решетки, от максимально эффективной ($\Lambda = 1,166$ мкм), на 0,022 мкм.

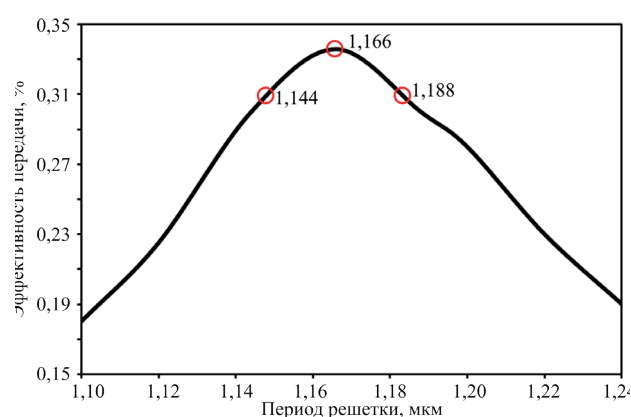


Рис. 6. Зависимость эффективности передачи от периода решетки

Зависимость эффективности передачи от ширины гребня решетки представлен на рис. 7. При изменении ширины гребня решетки, от максимально эффективной ($x = 0,6$ мкм), на 0,08 мкм эффективность связи сохраняется на уровне более 30 %.

Зависимость эффективности передачи от угла ввода/вывода представлена на рис. 8. Эффективность передачи изменяется незначительно при отклонении угла θ , от максимально эффективного ($\theta = 8^\circ$), на 1 градус, однако уже при отклонении угла на 2 и более градуса, эффективность передачи стремительно уменьшается.

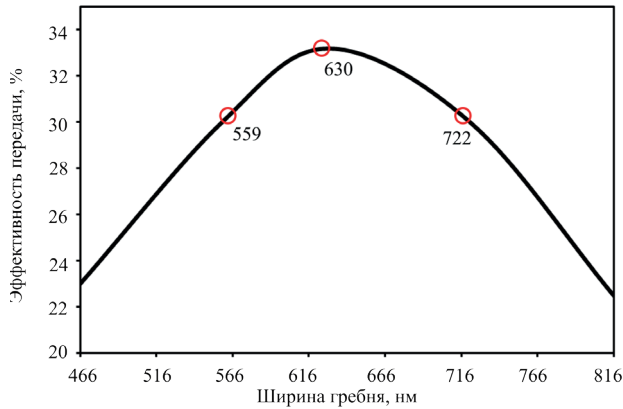


Рис. 7. Зависимость эффективности передачи от ширины гребня решетки

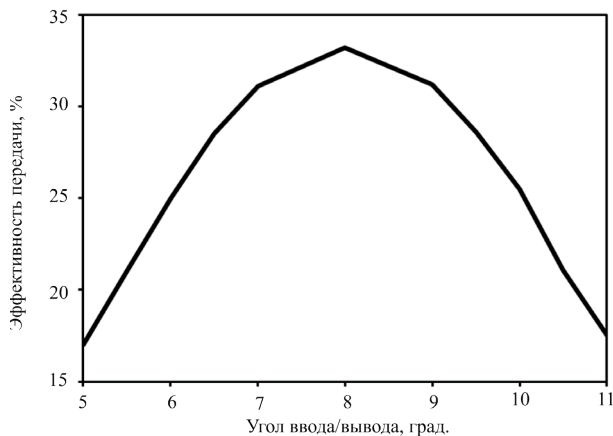


Рис. 8. Зависимость эффективности передачи от угла ввода/вывода

Полученная эффективность передачи достаточна для использования предлагаемых ФРП в целях тестирования ФИС на основе нагруженного SiN волновода на ТНЛНИ. Однако, максимальная эффективность в 33 % не позволяет использовать данный метод передачи для задач систем связи. Но существуют задачи, при которых общие потери в оптическом сигнале не так важны, и где можно использовать предлагаемые ФРП, к примеру, для оптических датчиков на основе микрорезонаторных систем.

Конусный элемент передачи излучения на основе нагруженного SiN волновода на ТНЛНИ

На рис. 9 схематично показан процесс передачи оптической мощности путем торцевой связи между волноводом и оптическим волокном. Направленная мода входного волновода E_1 сначала излучается через промежуточную область связи после частичного

отражения и передачи на конце одномодового оптического волокна. Излучаемое оптическое поле E_2 распространяется через промежуточное расстояние и на торец ФИС. Поле моды, распространяющееся волноводной структурой обозначено как E_3 .

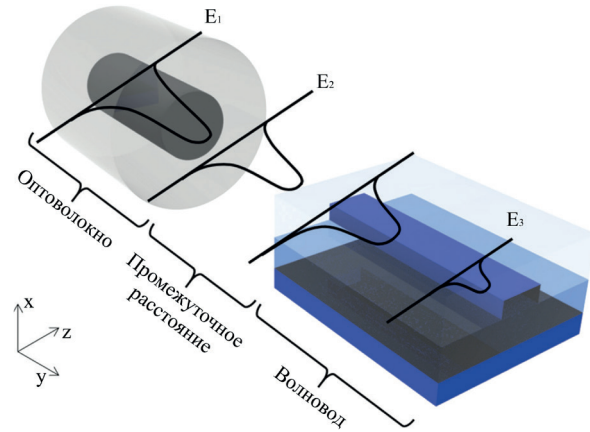


Рис. 9. Схема процесса передачи оптического сигнала торцевым методом волноводом и оптоволоком

Эффективность передачи между E_1 и E_3 может быть количественно оценена из интеграла перекрытия (η) и коэффициента пропускания (T). Для упрощения модели примем, что на границах между средой и торцом ФИС нет отражений, тогда коэффициент пропускания равен единице.

Интеграл перекрытия η между входящим полем E_1 и m -ной модой в волновode определяется при помощи уравнения:

$$\eta_m = \frac{\int E_3 \cdot H_3^* dA}{\int E_1 \cdot H_1^* dA}, \quad (3)$$

где H_1, H_3 – магнитная напряженность излучения, выходящего из оптического волокна и волноводной моды волноводной структуры соответственно.

Таким образом, общая эффективность передачи оптической мощности от входящего поля E_1 в m -ную направляемую моду для выходного волновода определяется как:

$$K_t = T^2 \cdot \eta_m = \eta_m. \quad (4)$$

В параметры излучения, выходящего из волокна, были взяты в соответствии конусному линзованному волокну, на фокусном расстоянии которого, диаметр гауссова распределения равен 2 мкм. Так, как диаметр TE_0 моды, распространяющейся в волноводной структуре, меньше, а именно равен 1,5 мкм, то для достижения максимальной эффективности необходимо увеличить диаметр поля моды. Для этого необходимо сформировать конусный волновод, представленный на рис. 10.

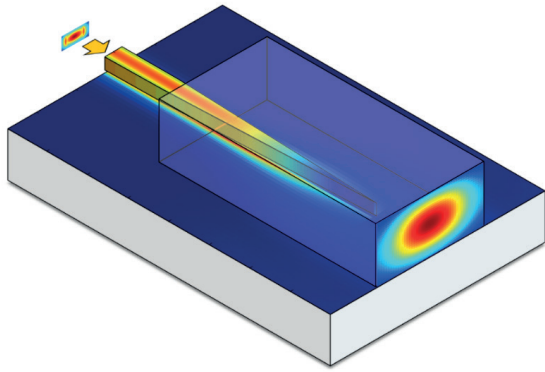


Рис. 10. Схематичное представление конусного волновода и изменения диаметра электромагнитной моды

В связи с тем, что для передачи излучения используется конусный волновод, в котором будут вноситься потери, связанные с переотражениями, то конечная эффективность передачи излучения будет определяться уравнением (5):

$$K_t = \eta_m \cdot \alpha_{\text{taper}}, \quad (5)$$

где α_{taper} — это вносимые потери на прохождении излучения через конусный волновод, дБ.

Была построена модель нагруженного конусного водовода из SiN на основе ТНЛНИ. Вид сверху данной структуры представлен на рис. 11. Ширина начала конусного волновода w_1 принята равной 2,25 мкм.

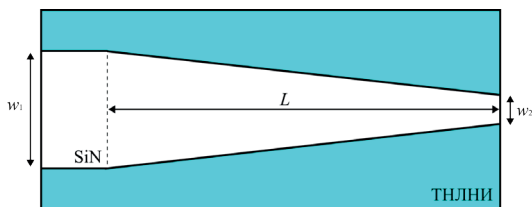


Рис. 11. Схематичное представление вида сверху нагруженного конусного водовода из SiN на основе ТНЛНИ
(w_1, w_2 — ширина начала и конца конусного волновода соответственно; L — протяженность конусного волновода)

Было проведено исследование зависимости значения вносимых потерь на прохождении через конусный волновод от его длины L и ширины w_2 . Результаты представлены на рис. 12.

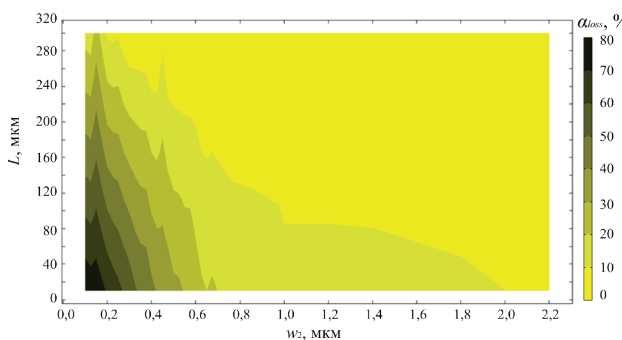


Рис. 12. Распределение вносимых потерь на прохождение через конусный волновод α_{taper} в зависимости от его длины L и ширины w_2

Как видно из рис. 12, потери составляют более 20 % при ширине конца конуса w_2 до 0,75 мкм. Это связано с нарушением фазового согласования, следовательно, это приводит к переотражениям и рассеиванию излучения в оболочке. Также, чем длиннее конус, тем меньше вносимые потери, это связано с тем, что сужение происходит более плавно. Таким образом для максимального исключения потерь следовало бы максимально увеличить длину конуса, однако это может быть не уместно при проектировании компактных ФИС, на площади которых необходимо как можно сильнее скомпоновать элементы.

Было проведено исследование интеграла перекрытия η_m от ширины конца конуса w_2 для длин конуса L . Результаты представлены на рис. 13.

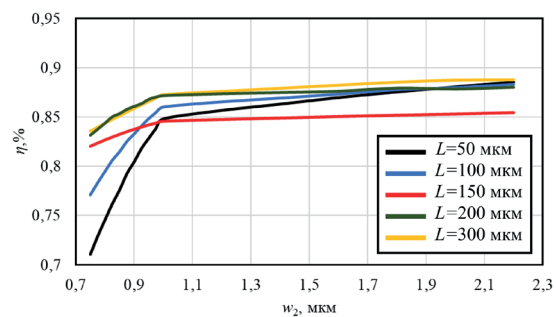


Рис. 13. Зависимость интеграла перекрытия η_m от ширины конца конуса w_2 для длин конуса L

Судя по рис. 13, интеграл перекрытия между волноводной модой на конце конуса и выходящим пучком из линзованного волокна составляет более 80 % с ширины конца конуса 1 мкм. Наибольшие значения интеграла перекрытия наблюдаются при длине конуса 300 мкм. Подставив полученные значения потерь и интеграла перекрытия в уравнение (5), была получена зависимость эффективности передачи от длины конуса и ширины его конца (рис. 14).

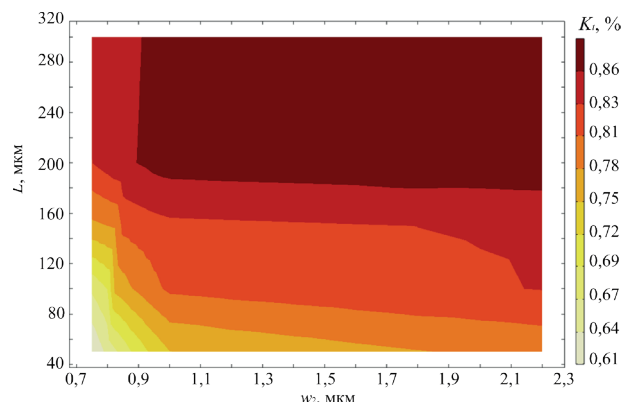


Рис. 14. Распределение эффективности передачи от длины конуса и ширины его конца

Эффективность передачи составляет более 85 % при аспектном отношении ширины конца конуса к его длине в диапазоне $0,003 \leq w_2 / L \leq 0,012$, при ширине конца конуса от 1,0 до 2,2 мкм.

Технологическая реализация ФИС на основе ТНЛНИ и нагрузки из SiN

Для образца кремниевой пластины с ТНЛНИ размером 25×25 мм, была спроектирована топология, представленная на рис. 15.

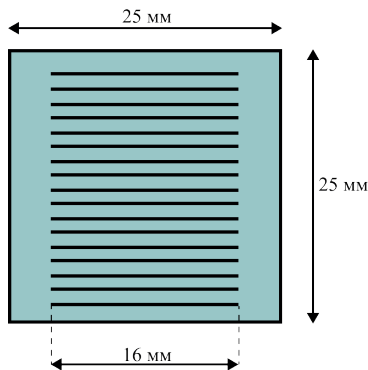


Рис. 15. Топология SiN нагруженных волноводов для образца пластины с ТНЛНИ

Для осаждения пленки SiN на ТНЛНИ, проводилась входная обработка. Образец помещался в раствор диметилформамида при температуре 45 °C в течение 20 мин, после чего проводилась обработка в изопропиловом спирте, при температуре 25 °C, в течение 5 мин, после чего производилась сушка в атмосфере азота. После чего проводилась активация поверхности путем обработки пластины в плазме кислорода O₂ при мощности источника 300 Вт в течение двух минут. Далее проводилась обработка в растворе HCl 1:9 в течение одной минуты.

Далее проводилось плазмохимическое осаждение 300 нм пленки SiN, параметры осаждения следующие: поток SiH₄ 170 см³/мин; поток N₂ 5,5 см³/мин; мощность источника ИСП 600 Вт; мощность источника ЕСП 50 Вт; давление в камере 3,6 Па; температура процесса 270 °C.

Далее проводилась фотолитография топологии на образец. Для этого осуществлялось прокаливание пластины при температуре 200 °C в течение 5 мин., после чего производилось нанесение фоторезиста AZ1505 методом центрифугирования, со скоростью 3000 об/мин, при ускорении 400. Далее выполнялась сушка резиста при температуре 100 °C в течении 75 с. Следующим этапом было экспонирование резиста. Далее выполнялось проявление резиста в проявителе AZ351B в течении одной минуты.

Далее были сформированы волноводные структуры на образце путем плазмохимического травления (далее – ПХТ). Травление SiN осуществляется при помощи установки ПХТ STEICP200E, параметры травления следующие: поток фторид серы (SF₆) 50 см³/с; давление потока гелия (He) 750 Па; мощность источника ИСП 38 Вт; давление в камере 1,35 Па; температура процесса 20 °C.

Поперечное сечение полученной волноводной структуры представлена на рис. 16.

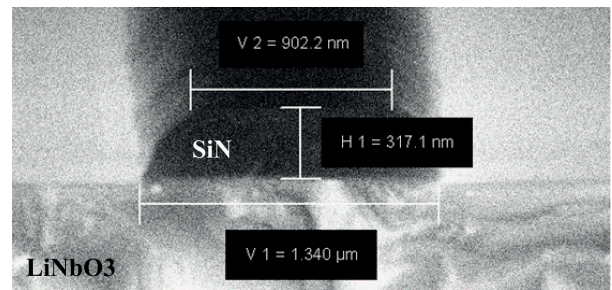


Рис. 16. СЭМ фотография поперечного сечения гибридного волновода LiNbO₃/SiN

Однако тестирование полученной ФИС затруднительно в связи с неотработанными процессами подготовки чипа к эксплуатации и подвода излучения через оптоволокну.

Заключение

В данной работе была достигнута поставленная цель – разработка и технологическая реализация волноводной структуры ФИС на основе ТНЛНИ с нагрузкой из SiN. Предложенный подход позволяет обойти критическую проблему нестабильного и сложного травления LiNbO₃, обеспечивая при этом низкие потери и высокую технологическую совместимость.

В результате численного моделирования и технологической проработки была создана одномодовая волноводная структура, обеспечивающая устойчивую работу в диапазоне ширины нагрузки от 1,25 до 2,8 мкм при высоте слоя 0,3 мкм. Это подтверждает возможность формирования эффективных одномодовых каналов передачи на гибридной платформе LiNbO₃ / SiN.

Также были разработаны два ключевых элемента связи, обеспечивающие сопряжение с внешней оптической системой:

1. Фазовая решетка, позволяющая реализовать вертикальный ввод/вывод излучения, показала эффективность передачи 33,2 % и полосу пропускания 133 нм. Проведённый анализ влияния геометрических параметров решетки позволил установить требования к технологическим допускам, критичным для практической реализации.

2. Конусный волновод, обеспечивающий торцевую связь с линзованным оптоволоком, продемонстрировал эффективность передачи свыше 85 % при соблюдении оптимального отношения ширины конца конуса к его длине. Это делает данный метод предпочтительным для телекоммуникационных применений, где критичны низкие потери.

Полученные результаты комплексно решают задачу сопряжения волноводных структур на основе ТНЛНИ с внешними источниками и приёмниками излучения, что ранее ограничивалось технологической сложностью и высоким уровнем потерь. Предложенные решения открывают путь к созданию эффективных, компактных и масштабируемых фотонных интегральных схем нового поколения, применимых

в таких областях, как оптические телекоммуникации, высокочувствительные сенсорные системы, микро-электромеханические датчики и элементы космической аппаратуры, где особенно ценны устойчивость, миниатюризация и энергоэффективность.

Таким образом, результаты данного исследования могут служить основой для практической реализации гибридных фотонных устройств в промышленной и научной среде, существенно расширяя границы применимости платформы LiNbO_3 в интегральной фотонике.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEWM-2025-0002 «Исследование и разработка чувствительных элементов сенсорных систем на основе фотонных интегральных схем»).

Литература

1. Siew S.Y. et al. Review of Silicon Photonics Technology and Platform Development // *J. Light. Technol.* 2021. Vol. 39, № 13. P. 4374–4389.
2. Mistry A. et al. Bandwidth-tunable, FSR-free, microring-based, SOI filter with integrated contra-directional couplers // *Opt. Lett.* 2018. Vol. 43, № 24. P. 6041.
3. Kanakis et al. High-Speed VCSEL-Based Transceiver for 200 GbE Short-Reach Intra-Datacenter Optical Interconnects // *Appl. Sci.* 2019. Vol. 9, № 12. P. 2488.
4. Nikitin A.A. et al. Optical bistable SOI micro-ring resonators for memory applications // *Opt. Commun.* 2022. Vol. 511. P. 127929.
5. Khazaeili B., Abdolvand R. Inadequacy of Third-Order Elastic Coefficients for Predicting Nonlinearity in Highly n-Type-Doped Silicon Resonators // *IEEE Trans. Electron Devices*. 2020. Vol. 67, № 2. P. 614–621.
6. Zhu D. et al. Integrated photonics on thin-film lithium niobate // *Adv. Opt. Photonics*. 2021. Vol. 13, № 2. P. 242.
7. Huang X. et al. Linearity-Enhanced Dual-Parallel Mach–Zehnder Modulators Based on a Thin-Film Lithium Niobate Platform // *Photonics*. 2022. Vol. 9, № 3. P. 197.
8. Bazzan M., Sada C. Optical waveguides in lithium niobate: Recent developments and applications // *Appl. Phys. Rev.* 2015. Vol. 2, № 4.
9. Henttinen K. et al. Cold ion-cutting of hydrogen implanted Si // *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*. 2002. Vol. 190, № 1–4. P. 761–766.
10. Kozlov A. et al. Reactive Ion Etching of X-Cut LiNbO_3 in an ICP/TCP System for the Fabrication of an Optical Ridge Waveguide // *Appl. Sci.* 2023. Vol. 13, № 4. P. 2097.
11. Xiong W. et al. SiN-based platform toward monolithic integration in photonics and electronics // *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 2021. Vol. 32, № 1. P. 1–18.
12. Guo Y. et al. Integrated Optical Phased Arrays for Beam Forming and Steering // *Appl. Sci.* 2021. Vol. 11, № 9. P. 4017.
13. Gallacher K. et al. Silicon nitride waveguide polarization rotator and polarization beam splitter for chip-scale atomic systems // *APL Photonics*. 2022. Vol. 7, № 4. P. 046101.
14. Subramanian A.Z. et al. Silicon and silicon nitride photonic circuits for spectroscopic sensing on-a-chip [Invited] // *Photonics Res.* 2015. Vol. 3, № 5. P. B47.
15. Fourmond E. et al. UVCVD silicon nitride passivation and ARC layers for multicrystalline solar cells // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 2001. Vol. 65, № 1–4. P. 297–301.
16. Weigel P.O. et al. Design of high-bandwidth, low-voltage and low-loss hybrid lithium niobate electro-optic modulators // *J. Phys. Photonics*. 2021. Vol. 3, № 1. P. 012001.
17. Зеленовский П.С. Основы интегральной и волоконной оптики: учебное пособие. Екатеринбург: Изд. Уральского университета, 2019. 130 с.
18. Son G. et al. High-efficiency broadband light coupling between optical fibers and photonic integrated circuits // *Nanophotonics*. 2018. Vol. 7, № 12. P. 1845–1864.
19. Schlarb U., Betzler K. A generalized sellmeier equation for the refractive indices of lithium niobate // *Ferroelectrics*. 1994. Vol. 156, № 1. P. 99–104.
20. Shibayama J. et al. A 3-D LOD-FDTD Method for the Wideband Analysis of Optical Devices // *J. Light. Technol.* 2011. Vol. 29, № 11. P. 1652–1658.
21. Vivien et al. Light injection in SOI microwaveguides using high-efficiency grating couplers // *J. Light. Technol.* 2006. Vol. 24, № 10. P. 3810–3815.

УДК 621.382.323

**АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОВУШЕК НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА КРЕМНИЙ / ОКСИД КРЕМНИЯ,
ОБРАЗОВАННЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ ИНЖЕКЦИИ ГОРЯЧИХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА
В СВЧ LDMOS-ТРАНЗИСТОРАХ**

**ANALYSIS OF TRAPS DISTRIBUTION AT THE SILICON / OXIDE INTERFACE FORMED BY INJECTION OF HOT
CARRIER INJECTION IN RF LDMOS-TRANSISTORS**

Алексеев Р.П., к. т. н., ведущий инженер, **Пролубников П.В.**, инженер-технолог I категории,
Куршев П.Л., начальник лаборатории, **Бельков В.Е.**, инженер-технолог I категории,
АО «НИИЭТ», +7 (473) 226-20-35, arp@niet.ru

Alekseev R.P., Ph.D. of Engineering Sciences, leading engineer,
Prolubnikov P.V., engineer-technologist of the 1st category, **Kurshev P.L.**, head of laboratory,
Bel'kov V.E., engineer-technologist of the 1st category, JSC «NIET», +7 (473) 226-20-35, arp@niet.ru

Аннотация. В статье приводится анализ процесса накопления ловушек на границе раздела кремний/оксид кремния в СВЧ LDMOS-транзисторах в результате инжекции горячих электронов. Для анализа использована модель HCS (hot carrier stress), встроенная в САПР Sentaurus TCAD. Для корректного моделирования модель HCS была откалибрована по результатам испытаний на безотказность реальных СВЧ LDMOS-транзисторов.

Annotation. The article analyzes the accumulation of traps at the silicon/silicon oxide interface in RF LDMOS transistors as a result of injection of hot electrons. The HCS (hot carrier stress) model built into the Sentaurus TCAD was used for the analysis. For correct simulation, the HCS model was calibrated based on the results of reliability tests of real RF LDMOS transistors.

Ключевые слова: СВЧ, LDMOS-транзистор, инжекция, горячие носители, деградация, САПР Sentaurus TCAD, термические процессы, модель, граница раздела.

Keywords: RF, LDMOS-transistor, injection, hot carrier, degradation, Sentaurus TCAD, thermal processes, model, interface.

Научная специальность: 2.2.2, электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.



Алексеев Р.П. Пролубников П.В. Куршев П.Л. Бельков В.Е.

Введение

LDMOS (Laterally Diffusion Metal Oxide Semiconductor) по сути является аббревиатурой от технологии изготовления и как изделие представляет собой кремниевый полевой МОП (структура типа – «металл-оксид-полупроводник») транзистор с боковой диффузией. По LDMOS технологии изготавливаются как силовые, так и СВЧ (сверхвысокочастотные) транзисторы. Отличительной особенностью приборов, изготовленных по данной технологии являются несколько конструктивных признаков:

- расположение истоковой области на тыльной стороне подложки, которая электрически свя-

занна с лицевой стороной кристалла при помощи глубокой диффузионной *p*-области;

- наличие протяженной области с относительно низкой концентрацией примеси, находящейся между затвором и стоком транзистора, как правило именуемой LDD-областью (Light Doped Drain – слаболегированная область стока);
- наличие конструктивного элемента, позволяющего улучшить отношение сопротивления стока к уровню напряжения пробоя сток-исток. Для СВЧ транзисторов это полевой электрод (ПЭ), для силовых транзисторов – STI-области (shallow-trench isolation – область неглубокой поверхностной изоляции).

Основной областью применения СВЧ LDMOS-транзисторов являются усилители мощности радио-передатчиков в бортовой и наземной аппаратуре связи, усилители мощности телевизионных сигналов, базовые станции сотовой связи [1]. Кроме того, СВЧ LDMOS-транзисторы по сей день претерпевают различные усовершенствования конструкции и технологии изготовления кристалла, и даже с учётом тенденции развития и распространения полупроводниковых приборов на основе соединений $A_{III}B_V$ остаются популярными и актуальными [2].

Одним из важнейших показателей качества изготовления полевых СВЧ LDMOS-транзисторов является их высокая надёжность. Под надёжностью понимается, в том числе, неизменность основных параметров и характеристик СВЧ LDMOS-транзистора после длительной наработки в его рабочем электрическом режиме. Ключевым подходом к повышению надёжности СВЧ LDMOS-транзисторов является снижение влияния деградации на основные параметры и характеристики прибора.

Главной причиной электрической деградации любых МОП транзисторов является инжекция горячих носителей (англ. HCI или HCS – hot carrier stress) в диэлектрический слой над поверхностью кремния, и LDMOS-транзисторы здесь не являются исключением [3]. HCS – негативный эффект, наблюдающийся в полупроводниковых приборах при длительном воздействии высоких плотностей тока и высоких напряжений. Физический смысл данного эффекта заключается в том, что при определенных режимах работы транзистора (под воздействием электрического поля большего определенной величины) носители заряда способны набирать такую кинетическую энергию, при которой существует высокая вероятность формирования акцепторных ловушек на границе раздела диэлектрик-полупроводник [4].

Для определения влияния элементов конструкции и технологических режимов создания СВЧ LDMOS-транзисторного кристалла на интенсивность инжекции горячих носителей заряда целесообразно провести оценку распределения ловушек, формируемых в результате инжекции горячих носителей, при помощи современных средств системы автоматизированного проектирования (далее – САПР), а именно – Sentaurus TCAD.

Основная часть

Модель деградации HCS, встроенная в Sentaurus TCAD, рассчитывает формирование ловушек путем разрушения межатомных связей на границе раздела кремния и оксида кремния на основе трех типов процессов [5]:

1. Одночастичные процессы (SP) – подразумевают под собой разрушение связей одним высокоэнергетическим носителем, именно такие процессы ассоциируются с горячими носителями.

2. Многочастичные процессы (MP) – подразумевают под собой разрушение связей под воздействием множества носителей, чьей энергии самой по себе недостаточно для разрушения связи, однако их последовательные взаимодействия со связью постепенно вводят ее во все более возбужденное состояние, что в конечном итоге способно привести к разрыву связи.

3. Термические процессы, усиленные полем (TH) – те процессы, где разрушение связей происходит в результате тепловых взаимодействий с кристаллической решеткой.

Расчет концентрации ловушек N_{it} для SP и MP производится по формулам:

$$N_{it,SP}(r, t, E_{SP}) = P_{SP} N_0 [1 - e^{-k_{SP}(r, E_{SP})t}], \quad (1)$$

$$N_{it,MP}(r, t, E_{MP}) = P_{MP} N_0 \left[\frac{P_{emi}}{P_{pass}} \left(\frac{P_d}{P_d} \right)^{N_i} (1 - e^{-P_{cmi}t}) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

$$P_d = k_{ph} + k_{MP}(r, E_{MP}), \quad (3)$$

где N_0 – максимальное количество связей на границе раздела;

P_{SP}, P_{MP} – вероятности возникновения дефектов;

E_{SP}, E_{MP} – энергии активации процессов, эВ;

$k_{SP}(r, E_{SP}), k_{MP}(r, E_{MP})$ – скорость реакции, c^{-1} ;

N_i – количество энергетических уровней осциллятора, моделирующего связь;

P_{emi}, P_{pass} – вероятности эмиссии и пассивации.

Скорости реакций для SP и MP задаются формулами:

$$k_{SP}(r, E_{SP}) = \int_{E_{SP}}^{\infty} f(r, E) g(E) v(E) \sigma_{SP}(E) dE, \quad (4)$$

$$k_{MP}(r, E_{MP}) = \int_{E_{MP}}^{\infty} f(r, E) g(E) v(E) \sigma_{MP}(E) dE, \quad (5)$$

где $f(r, E)$ – функция распределения носителей;

$g(E)$ – общая плотность состояний;

$v(E)$ – групповая скорость носителей;

$\sigma_{SP}(E), \sigma_{MP}(E)$ – сечения реакции.

Поперечные сечения реакции задаются формулами:

$$\sigma_{SP}(E) = \sigma_{SP0} \left(\frac{E - E_{SP}}{k_B T} \right)^{P_{SP}}, \quad (6)$$

$$\sigma_{MP}(E) = \sigma_{MP0} \left(\frac{E - E_{MP}}{k_B T} \right)^{P_{MP}}, \quad (7)$$

где $p_{SP}, p_{MP}, \sigma_{SP0}, \sigma_{MP0}$ – подгоночные параметры.

Расчет концентрации ловушек N_{it} для TH производится по формуле:

$$N_{it}(r, t, E_{TH}) = P_{TH} N_0 [1 - e^{-k_{TH}(E_{TH})t}], \quad (8)$$

где P_{TH} – вероятность образования дефектов.

Скорость реакции на разрыв связи определяется по формуле:

$$k_{TH}(r, E_{TH}) = v_{TH} e^{\frac{-E_{TH}}{k_B T}}, \quad (9)$$

$$E_{TH} = E_{TH0} - pE_{ox}, \quad (10)$$

где v_{TH} – частота столкновений решетки;

E_{TH0} – энергия активации тепловых процессов в отсутствие оксидного поля E_{ox} ;

p – эффективный дипольный момент.

Согласно заявлений самих авторов [5] данная модель изначально создана и откалибрована для моделирования деградации силовых LDMOS-транзисторов, отличительной особенностью изготовления которых является сформированная STI-область. В САПР Sentaurus TCAD модель включена практически в неизменном виде. При моделировании деградации СВЧ LDMOS-транзисторов в ряде электрических режимов данная модель показывает существенное расхождение с наблюдаемыми в реальных экспериментах результатами. В силу сказанного для корректного моделирования процессов деградации, происходящих в СВЧ LDMOS-транзисторах, модель Sentaurus TCAD должна быть откалибрована повторно.

Для калибровки модели была проведена серия экспериментов, в ходе которых СВЧ LDMOS-транзисторы производства АО «НИИЭТ» проходили испытания на долговечность на специализированном стенде, также разработанном и изготовленном АО «НИИЭТ». Испытания проводились в различных электрических и тепловых режимах, выбор которых был обусловлен доминированием того или иного механизма деградации (SP, MP, TH) либо их сочетанием. Для определения таких режимов использовалось предварительное моделирование в САПР Sentaurus TCAD с применением некалиброванной модели HCS (с параметрами, заданными по умолчанию). В ходе испытаний СВЧ LDMOS-транзисторы периодически снимались с испытательного стенда для измерения их электрических параметров и составления зависимости их деградации от времени наработки. Полученные зависимости использовались для калибровки модели.

Модель самого СВЧ LDMOS-транзистора была построена в приборно-технологическом модуле SProcess, который входит в состав Sentaurus TCAD. Данная модель основана на реальной технологии изготовления транзисторных кристаллов данного типа и включает в себя моделирование всех основных технологических операций создания LDMOS-структуры, начиная от эпитаксиального наращивания и заканчивая пассивацией структуры. Сама LDMOS-транзисторная структура является традиционной, за исключением системы полевых электродов. Используемый в модели трехслойный ПЭ, расположенный над затвором и LDD-областью транзистора, является наиболее современным конструктивным исполнением данного элемента [6, 7]. Доза ионной имплантации

LDD-области подбирались так, чтобы удельный ток стока насыщения модели соответствовал аналогичному параметру экспериментальных транзисторов.

Для моделирования процесса деградации использовался следующий алгоритм. Модель LDMOS-транзистора выводится в заданный режим: напряжение на стоке и затворе, задается температура истока (окружающей среды). При этом учитывается тепловое сопротивление и нагрев структуры при протекании тока. Для корректного расчета нагрева структуры тепловое сопротивление, подключенное к истоку, было подобрано в соответствии с тепловым сопротивлением экспериментальных транзисторов.

После достижения требуемого режима проводится моделирование работы прибора в течение заданного времени. Заданный промежуток времени дискредитируется в автоматическом режиме на основе внутренних алгоритмов Sentaurus TCAD. На каждом шаге по времени выполняется следующая последовательность действий. В каждом узле сетки модели LDMOS-транзистора рассчитываются физические величины, в том числе: концентрация носителей заряда, температура (кинетическая энергия) носителей заряда, плотность тока, электрическое поле. На основе этих данных рассчитывается функция распределения носителей по энергии. После этого по приведенным выше формулам рассчитывается концентрации ловушек в каждой точке границы раздела кремний / оксид кремния и захваченный на них заряд.

После завершения моделирования деградации в течение заданного времени, напряжение на стоке и затворе приводились к 0 В, а температура окружающей среды к 300 °К. Далее расчет изменения температуры в результате протекания тока исключался из системы решаемых уравнений, напряжение на стоке поднималось до 10 В и на затворе до 15 В, т. е. моделировалось построение переходной вольт-амперной характеристики (далее – BAX) в импульсном режиме. По этой BAX рассчитываются электрические параметры LDMOS-транзистора. Их значения сравниваются с аналогичными параметрами до деградации, на основе чего и определяется уровень деградации электрических параметров.

Параметры модели HCS подбирались таким образом, чтобы рассчитанные уровни деградации электрических параметров максимально соответствовали уровням деградации экспериментальных транзисторов, прошедших испытания на стенде в аналогичных условиях.

При рассмотрении деградации СВЧ LDMOS-транзисторов под воздействием горячих носителей заряда основное внимание следует уделить SP-процессам. Согласно проведенному анализу, доминирование SP-процессов накопления ловушек наступает при относительно низкой плотности тока стока, относительно низкой температуре, при высоком напряжении на стоке. Для проведения данного исследования был выбран режим $T = 300$ °К, $U_{зи} = 2.5$ В, $U_{си} = 30$ В.

Концентрация захваченного на ловушках заряда вдоль границы раздела кремний / оксид кремния после моделирования работы в приведенном режиме в течение 24 часов показана на рис. 1. Здесь и далее при рассмотрении захваченных зарядов, тока, проекций электрического поля и т. д. будут пониматься именно электронные составляющие, т. к., согласно проведенному исследованию, их вклад в инжекцию горячих носителей является доминирующим. Минимальная разница между концентрацией захваченных дырок и электронов составляет 7 порядков.

Физическими величинами, оказывающими значительное влияние на интенсивность инжекции горячих носителей заряда, выступают напряженность электрического поля, концентрация носителей заряда (плотность их тока) и температура кристаллической решетки. Проекция напряженности электрического поля на направление тока и концентрация носителей заряда вдоль границы раздела кремний / оксид кремния приедены на рис. 2. Температура кристаллической решетки вдоль границы раздела колеблется в пределах 2 °К.

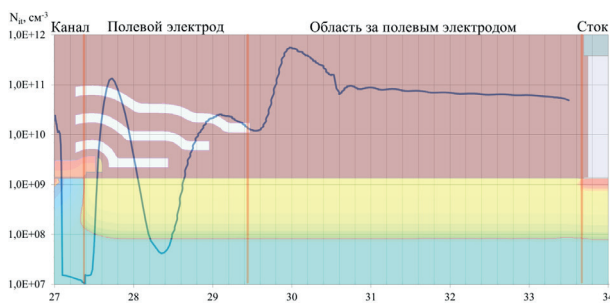


Рис. 1. Распределение захваченного на ловушках заряда на границе раздела кремний / оксид кремния вдоль LDMOS-структуры

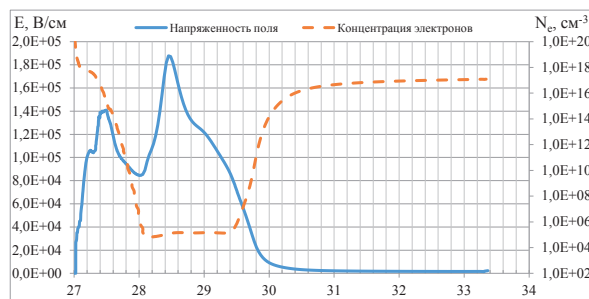


Рис. 2. Проекция напряженности электрического поля на направление тока и концентрация электронов вдоль границы раздела кремний / оксид кремния

Согласно рис. 1 концентрация ловушек в канале транзистора незначительна за исключением участка перехода от p⁺-истока к каналу. Это подтверждается реальными экспериментами, согласно которым уровень порогового напряжения остается практически неизменным.

На выходе из канала в LDD-область располагается резкий пик распределения ловушек. Причина столь резкого роста числа ловушек заключается в сочетании двух факторов. Во-первых, плотность тока у границы раздела на данном участке близка к плотности тока

в канале, соответственно, концентрация электронов здесь очень высока. Во-вторых, напряженность поля на краю затвора резко возрастает. В зависимости от конструкции LDMOS-структуры, в частности концентрации примеси в LDD-области, этот пик может стать преобладающим (рис. 3). Важность минимизации концентрации ловушек на данном участке заключается ещё и в том, что в нём, подобно каналу, ток большей своей частью сосредоточен вблизи поверхности.

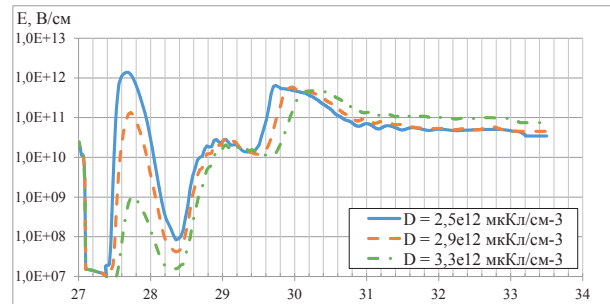


Рис. 3. Распределение захваченного на ловушках заряда на границе раздела при разных значениях дозы ионной имплантации LDD-области

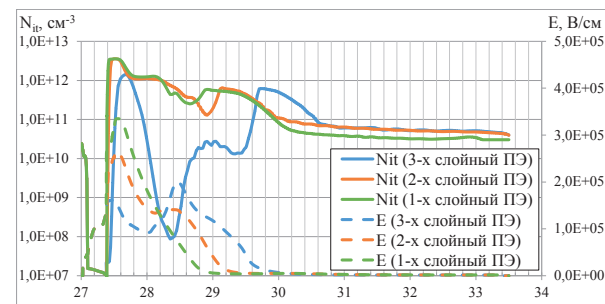


Рис. 4. Распределение захваченного на ловушках заряда на границе раздела при разных конструкциях полевого электрода

За первым пиком ловушек следует резкий провал, объясняющийся наличием низкорасположенного первого слоя ПЭ. Высокая напряженность поля под ПЭ приводит к вытеснению тока вглубь LDD-области (рис. 2). Резкий пик напряженности поля, расположенный под краем первого слоя ПЭ, приводит к формированию второго пика концентрации ловушек. Небольшой выпуклый участок на склоне пика, сформированного краем первого слоя ПЭ графика напряженности (рис. 2) создаётся краем второго слоя ПЭ. Он ответственен за третий пик концентрации ловушек (рис. 1). Ввиду относительно высокого расположения третьего слоя ПЭ его край не вызывает рост напряженности поля и, соответственно, пика концентрации ловушек.

Следует отметить, что пики концентрации ловушек смещены относительно пиков напряженности поля, это особенно видно на примере второго пика. Вероятно, это запаздывание связано с тем, что электроны разгоняются полем не мгновенно, а за конечное время, за которое те преодолевают некоторое расстояние. Вместе с тем выявлено, что высота пиков распределения ловушек определяется пиками напряженности от краёв затвора и ПЭ. Это подтверждается

моделированием LDMOS-структуры с разными высотами расположения ПЭ, в ходе которого установлена корреляция высот этих пиков. В свою очередь в структурах с двухслойным и однослойным ПЭ [6] характер распределения ловушек имеет иной вид, связанный с тем, что такие ПЭ слабо подавляют напряженность поля вблизи затвора (рис. 4).

В области за ПЭ плотность тока резко нарастает, ввиду чего, несмотря на низкую напряжённость поля, концентрация ловушек растёт. Увеличение концентрации примеси в LDD-области несколько снижает концентрацию ловушек в этой области, однако этот эффект несущественен (рис. 2).

Около p^+ -стока координата границы раздела кремний / оксид кремния смещается в силу технологических особенностей формирования LDMOS-транзисторной структуры, из-за чего концентрации ловушек на графике обрывается. В целом, величина концентрации ловушек на данном участке малозначима в силу очень высокой концентрации примеси в p^+ -стоке.

Заключение

Проведенный анализ показал, что процесс накопления ловушек на границе раздела кремний/оксид кремния в СВЧ LDMOS-транзисторах во время работы имеет сложный характер, зависящий как от режима работы прибора, так и от его конструктивно-технологических особенностей.

Задача уменьшения концентрации накапливаемых ловушек, а, следовательно, и степени деградации, может идти в разрез с получением наилучших электрических параметров. Так снижение концентрации примеси в LDD-области означает резкое снижение тока стока насыщения и увеличение сопротивления сток-исток в открытом состоянии, а уменьшение высоты расположения полевого электрода может привести снижению напряжения пробоя затвор-исток.

УДК.621.37

Литература

1. Черных М.И., Цоцорин А.Н., Семейкин И.В. Развитие конструкции и технологии создания мощных СВЧ LDMOS транзисторов // Электроника и микроэлектроника СВЧ, 2017. – том № 1 – С. 182–185.
2. Theeuwes S. et al. LDMOS technology for power amplifiers up to 12 GHz // 2018 13th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC). – IEEE, 2018. – С. 162–165.
3. Тихомиров П., Пфеффли П., Боргес Р. Моделирование деградации и обратимых отказов полупроводниковых приборов с использованием TCAD Sentaurus // Электроника: Наука, технология, бизнес, 2015. – № 10 – С. 142–149.
4. Алексеев Р.П., Пролубников П.В., Мальцев В.В. Инжекция горячих носителей заряда в СВЧ LDMOS-транзисторах // СВЧ-электроника, 2024. – № 1 – С. 12–14.
5. Reggiani S., Barone G., Poli S. TCAD Simulation of Hot-Carrier and Thermal Degradation in STI-LDMOS Transistors // IEEE Transactions on electron devices, 2013. – Vol. 60, № 2 – Р. 691–698.
6. Алексеев Р.П., Куршев П.Л., Цоцорин А.Н. Влияние многослойного полевого электрода на степень выраженности эффекта квазинасыщения вольтамперных характеристик мощных сверхвысокочастотных латеральных транзисторов // Физика и техника полупроводников, 2022. – том № 56, № 11 – С. 1088–1092.
7. Алексеев Р.П., Семейкин И.В., Цоцорин А.Н., Куршев П.Л. LDMOS: новые разработки АО «НИ-ИЭТ» // Электроника: Наука, технология, бизнес, 2023. – № 2 (00223) – С. 92–96.

ВМЕСТЕ С РАЗВИТИЕМ ЭЛЕКТРОНИКИ: ИСТОРИЧЕСКИЙ ОПЫТ, АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ВЫЗОВЫ

ALONG WITH THE DEVELOPMENT OF ELECTRONICS: HISTORICAL EXPERIENCE, CURRENT ISSUES AND CHALLENGES

Афанасьев А.С., к. т. н., доцент, **Журиков Р.Н.**, **Лопаткин К.С.**, к. т. н., доцент, **Сенин А.А.**,
РТУ МИРЭА, +7 (495) 471-34-80, alexsenin01@gmail.com

Afanasyev A.S., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, **Zhurikov R.N.**, **Lopatkin K.S.**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, **Senin A.A.** RTU MIREA, +7 (495) 471-34-80, alexsenin01@gmail.com

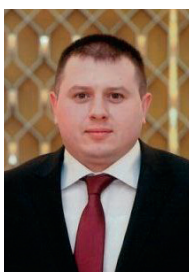
Аннотация. В статье рассмотрены этапы развития электронной и радиоэлектронной промышленности. Приводятся результаты анализа ключевых исторических событий, нормативных актов, архивных документов, определивших направления развития отрасли промышленности в Российской Империи, СССР и Российской Федерации. Проведен ретроспективный анализ предпосылок и причин проблемных вопросов развития отрасли. Рассмотрены актуальные вызовы, стоящие перед электронной и радиоэлектронной промышленностью России, проведен анализ основополагающих документов долгосрочного стратегического планирования.

Annotation. The article discusses the stages of development of the electronic and radio-electronic industry. The article presents the results of an analysis of key historical events, regulations, and archival documents that determined the directions of industrial development in the Russian Empire, the USSR, and the Russian Federation. A retrospective analysis of the prerequisites and causes of problematic issues in the development of the industry has been conducted. The current challenges facing the Russian electronics and radioelectronic industry are considered, and the fundamental documents of long-term strategic planning are analyzed.

Ключевые слова: электронная промышленность, радиоэлектронная промышленность, радиоэлектронная отрасль, электронная компонентная база, радиоэлектронная аппаратура.

Keywords: electronic industry, radio-electronic industry, radio-electronic industry, electronic component base, radio-electronic equipment.

Научная специальность: 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств. 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства.



Афанасьев А.С.



Журиков Р.Н.



Лопаткин К.С.



Сенин А.А.

Введение

Во всем мире электронной и радиоэлектронной промышленности отводят ключевую и критическую роль, поскольку изделия, являющиеся продуктом отрасли, характеризуют и напрямую определяют технологический суверенитет государства практически во всех отраслях экономики и производства. Электронная и радиоэлектронная промышленность России после распада СССР вместе с имеющимся на тот момент времени технологическим и производственным заделом унаследовала и исторически сложившиеся проблемы и противоречия подходов к совершенствованию системы управления развитием радиоэлектронной отрасли. Для понимания того, каким способом необходимо решать ту или иную задачу, важно знать ее причины и предпосылки. С этой целью был проведен целевой анализ развития отечественной электроники и радиоэлектроники в Российской Империи, СССР и Российской Федерации.

Для полного понимания того, как развивалась электронная и радиоэлектронная промышленность, этот «эволюционный» процесс необходимо обязательно рассматривать в разрезе исторического, экономического и политического аспектов. Электроника является относительно молодой отраслью промышленности, зародившаяся на рубеже XIX–XX вв. Ведущим державам мира важность новой отрасли стала понятна практически сразу. Электронная и радиоэлектронная промышленность в первую очередь работала на военные ведомства ударными темпами в годы гонки вооружений, предшествовавшие Первой мировой войне. Продукция радиоэлектронной и электронной промышленности навсегда изменила

облик сухопутных войск, флота и сделала возможным появление совершенно нового вида вооруженных сил – авиации.

Основная часть

В Российской Империи первое предприятие радиоэлектронной отрасли появилось в январе 1913 года – в составе Морского военного ведомства открыли телеграфное депо, осуществлявшее сборку аппаратуры преимущественно из иностранных комплектующих. В преддверии Первой мировой войны появилось еще несколько фабрик. Большая часть предприятий носили лабораторный характер, имелись предприятия иностранных компаний. Но недооцененные масштабы начавшейся войны предъявили ко всем отраслям военной промышленности требования, которые значительно превосходили производственные возможности существующих предприятий. Электронная промышленность не стала исключением. Важным свидетельством осознания этой проблемы является письмо председателя Центрального военно-промышленного комитета (далее – ЦВПК) А.И. Гучкова военному министру А.А. Поливанову о развитии производства телефонных аппаратов, датированное 30 августа 1915 г. В нем председатель ЦВПК отмечает следующее: «Несмотря на крупное усилие производства, существующие фабрики не в состоянии полностью удовлетворить потребности армии, и потому без сооружения новых предприятий приходится обращаться к заказам за границу. <...> С точки зрения правильного снабжения армии телефонным имуществом необходимо, во-первых, увеличить отечественное производство и, во-вто-

рых, создать новое производство в более глубоком тылу» [1, с. 523-524]. Также А.И. Гучков отмечал, что имеющиеся в комитете сведения позволяют полагать возможным взятие на себя существующими фирмами обязательств по созданию новых предприятий, главным препятствием к чему обозначал отсутствие контрактов на длительные сроки (контракты на момент написания письма выдавались на сроки до июля 1916 года).

Революционные события 1917 года привели к тому, что иностранные компании покинули территорию России. В 1918 году малочисленные оставшиеся предприятия были национализированы советским правительством. Производства передали в ведение Высшего совета народного хозяйства (далее – ВСНХ), в котором был сформирован отдел электротехнической промышленности. В подчинении отдела находился Электротрест, включавший в свой состав национализированные предприятия: Радиотелеграфный завод им. Коминтерна (бывш. Радиотелеграфный завод Морского ведомства), Петроградский государственный телеграфный завод (бывш. «Сименс и Гальске»), Петроградский телеграфный завод «Красная заря» (бывш. «Эриксон»), Нижегородский телеграфный завод (бывш. «Гейслер»), Московский электромеханический завод «Мосэлектрик» (бывш. «Морзе»). Позже в Петрограде был учрежден Государственный электротехнический трест заводов слабого тока. На базе завода Русского общества беспроволочных телеграфов и телефонов (РОБТиТ), куда ранее был перемещен Петроградский завод пустотных аппаратов, в 1923 году появляется первое предприятие электронной промышленности теперь уже советской России – электровакуумный завод [2].

Глобальные потрясения Первой мировой войны, двух революций и Гражданской войны привели к экономическому кризису и усилению отставания советской России в электронной и радиоэлектронной промышленности. Обозначаются проблемы устаревания образцов, разработанных в 1914-1917 гг., отсутствие производств, зависимость от иностранных комплектующих, отсутствие технических условий на ряд электрорадиоизделий, техника которых ушла вперед. Так в письме Главного электротехнического управления ВСНХ СССР в Комитет по де- и мобилизации промышленности о разработке современных электроизделий военных образцов отмечается невозможность производить самостоятельно исследовательские работы по разработке изделий в виду отсутствия точных технических заданий и денежных средств [3, с. 409]. Также Главэлектро приходит к выводу, что для обеспечения электрорадиоизделиями армии и флота в случае мобилизации необходимо отделить мероприятия по разработке новых образцов от текущих военных заказов, предусмотреть на эти мероприятия отдельный денежный отпуск, обеспечить взаимодействие между промышленностью и техническими ор-

ганами довольствующих учреждений. Другая часть описанных проблем обозначается в докладе старшего помощника инспектора связи РККА С.Я. Ляймберга заместителю председателя Реввоенсовета СССР И.С. Уншлихту о состоянии мобилизационной готовности радиопромышленности СССР. С.Я. Ляймберг указывал на «зависимость от zahraniчного рынка в области радио». По проблеме малого числа специалистов С.Я. Ляймберг докладывал об их разбросе по разным отраслям промышленности, а также ограниченности рабочего персонала. Относительно изысканий отмечалось, что в лабораториях Электротреста работы ведутся параллельно, «одни и те же изыскания и опыты производятся в разных лабораториях». Все это впоследствии выливалось в сложность и, соответственно, дороговизну изделий [3, с. 608-609]. В своем докладе И.С. Уншлихту о состоянии заводов Государственного электротехнического треста заводов слабого тока члены военно-технического комитета Военно-технического управления профессора В.И. Баженов и М.В. Шулейкин обозначали следующие «выводы о желательных мероприятиях»:

1. Благодаря регулярным и своевременным заказам на заводах треста удалось организовать производственных рабочих и создать кадр работников инженерной квалификации.
2. Обратить внимание на обеспечение лабораторий треста осциллографами, измерительными приборами и прочими установками для обеспечения исследований и разработки образцов.
3. Обратить внимание ВСНХ на крайнюю необходимость, граничащую со срывом снабжения по радио РККА, принятия ряда мер по обеспечению треста сырьем и побочной продукцией.
4. Обратить внимание треста на желательность поощрения работников лабораторий, в кратчайший срок создавших производство опытных образцов военных радиостанций [3, с. 609-612].

Рассмотренные документы не теряли своей актуальности весь межвоенный период. В различных докладах и протоколах отмечается необходимость закупки иностранных образцов электротехнических приборов для налаживания их производства на территории СССР [4, с. 173-174], освоения и внедрения иностранной техники на производствах, обеспечения увязки научно-исследовательской базы и производства, наращивания мощностей производства за счет строительства новых заводов, на которых в мирное время должно быть размещено производство товаров широкого потребления [5, с. 648-650], поддержки линии, взятой ВСНХ в отношении дублирования уникальных производств [4, с. 280-281].

Накануне начала Второй мировой войны в совершенно секретном докладе нарком авиационной промышленности Л.М. Каганович указывал председателю СНК СССР В.М. Молотову на отсталость сырьевых баз по производству специфических материалов для ради-

опромышленности, часть которых заводы вынуждены были производить в полукустарных условиях. В очередной раз была обозначена необходимость открытия новых заводов по всей территории страны [6, с. 323-326]. Однако, несмотря на сложившуюся ситуацию советскими конструкторами проводились разработки по созданию наземных радиолокаторов, позволяющих обнаруживать авиацию на расстоянии 150-200 км и корректировать огонь зенитной артиллерии. В результате этих работ появились станции РУС-2, РУС-2с, Гнейс-1, Гнейс-2, Гнейс-3, РИС, однако количество поступивших на вооружение станций было критически мало [7, с. 187-188, 205-206, 223-225].

Первые дни начавшейся Великой Отечественной войны обнажили все копившиеся с начала XX века проблемы. Недооценка важности отрасли неумолимо сказалась в первые месяцы Великой Отечественной войны. Руководство СССР оперативно отреагировало на сложившуюся ситуацию: И.В. Сталин подписал Приказ народного комиссара обороны СССР от 23 июля 1941 года № 0243 «Об улучшении работы связи в Красной Армии». Этот приказ отражает понимание военным руководством проблемы управления войсками, явившейся следствием организации работы связи с упором на телефонные линии и полное игнорирование радиосвязи «как наиболее надежной формы связи». «<...> Приказываю в кратчайший срок ликвидировать недооценку радиосвязи, как основного средства управления войсками <...>, обеспечить полное использование радиосредств для управления войсками с обязательным соблюдением секретности передач» [8].

Согласно постановлению Государственного комитета обороны СССР (далее – ГКО) от 4 июля 1943 года № ГОКО-3686 «О радиолокации» при ГКО открывался Совет по радиолокации. Это событие необходимо оценивать как одно из первых решений руководства страны подойти системно к управлению развитием радиоэлектронной промышленности, систематизации и обобщению всех достижений мировой науки и техники в области радиолокации, вооружению Красной армии и Военно-морского флота средствами радиолокации [9].

После войны в Советском Союзе началось масштабное, комплексное развитие электронной и радиоэлектронной промышленности, стремительное развитие научных школ по самым передовым направлениям радиоэлектроники. Широко развернулось строительство новых предприятий, так в 1950 г. действующих предприятий насчитывалось 98, а в 1955 г. – более 150 [10].

Политическое и экономическое противостояние с США, начавшееся еще до окончания Второй мировой войны, стало причиной того, что военно-политическое руководство СССР сделало ставку на развитие ракетно-ядерного оружия. Новые войска нуждались в современных, сложных и надежных электронной

компонентной базе и радиоэлектронной аппаратуре на ее основе.

С первых дней становления и развития отечественной электронной и радиоэлектронной промышленности пристальное внимание к ней и всесторонняя поддержка были проявлены со стороны Министерства обороны.

В 1955 году 27 апреля на основании приказа Министра обороны СССР Маршала Советского Союза Г.К. Жукова на базе Центральной лаборатории электровакуумных приборов в городе Мытищи Московской области во исполнение постановления Совета Министров СССР от 1 февраля 1955 г. № 156-91 о возложении на Министерство обороны СССР функций и задач по разработке сводных планов НИОКР создания элементов радиотехнической и электронной аппаратуры, межведомственных нормалей на них, полужаботок и материалов для радиоэлектронной аппаратуры, а также изучению опыта эксплуатации, проведения контрольных проверок режимов работы и проведению государственных испытаний новых изделий радиоэлектроники был образован 22 ЦНИИИ [11].

22 ЦНИИИ наряду с ЦНИИ-108 (ЦНИИРТИ), НИИ-160 (НИИ «Исток»), Бюро новой техники Минобороны и редакцией журнала «Советское Радио» был подчинен 5 Главному управлению Минобороны СССР (в/ч 25580), созданному 15 августа 1949 года [12].

После своего создания институт за всю свою многолетнюю историю претерпел не одну реорганизацию, изменение штата, наименования, формы собственности, но всегда оставалось неизменно его предназначение – научно-исследовательская и испытательная деятельность в области военной электроники и электротехники. **В 2025 году исполняется 70 лет со дня создания 22 Центрального орденов Красной звезды и Знак Почета научно-исследовательского испытательного института Министерства обороны.**

В соответствии с Указом Верховного Совета СССР от 17 марта 1961 г. был создан Государственный комитет Совета Министров СССР по электронной технике, основной задачей которого было решить проблему рассредоточенности различных направлений отрасли по пяти министерствам промышленности, что приводило к параллелизму в исследованиях и усложняло обмен результатами исследований. В 1965 году Государственный комитет был преобразован в Министерство электронной промышленности СССР.

При непосредственном участии и контроле 5 Главного управления Минобороны СССР разворачивается строительство в поселке Крюково Московской области первого в стране города микроэлектроники – Зеленограда.

Одновременно с развитием военной электроники и электротехники быстро развивалась и гражданская составляющая радиоэлектронной отрасли, и в этом

огромная заслуга легендарной личности в истории отечественной электроники – Александра Ивановича Шокина, председателя Государственного комитета Совета Министров СССР по электронной технике, Министра электронной промышленности СССР.

При непосредственном участии А.И. Шокина совместно со специалистами Министерства обороны было научно обосновано, что для опережающего развития электроники необходимо обязательное решение следующих основных задач, составляющих основу единой технической политики государства:

- унификация электронных приборов на основе функционально-параметрических рядов;
- унификация технологий, оборудования и материалов на всех заводах и фабриках отрасли;
- комплексно-целевое планирование, развитие всех видов электронных приборов;
- создание советов главных конструкторов по всем видам электронных приборов.

Благодаря совместной системной работе Министерства обороны и Министерства электронной промышленности Советский Союз вошел в тройку мировых лидеров, занимая второе место по изделиям военного назначения и третье место по изделиям народно-хозяйственного назначения.

СССР был единственной страной в мире, обеспечивающей свои потребности в изделиях электронной техники всех видов и типов. В то же время США, Европа, Япония активно практиковали международную кооперацию, недоступную на тот момент СССР. Технологический и производственный уровни развития советской электроники позволяли обеспечить потребности страны как в военной, так и в гражданской продукции мирового уровня.

Однако решение одних организационных проблем выдвинуло на передний план ряд других проблемных вопросов. *Во-первых*, существовал приоритет разработки и производства образцов военной электроники в ущерб экономической целесообразности. *Во-вторых*, высокие издержки производства, порождаемые стремлением обеспечения выхода годных изделий с контролем каждой партии. *В-третьих*, партийное руководство приняло решение о воспроизводстве импортной техники, предполагающее изготовление изделия с аналогичными потребительскими свойствами и характеристиками в ущерб развитию отечественных разработок, что заведомо приводило к увеличению отставания. *В-четвертых*, преодолеть ведомственную разобщенность промышленности так и не удалось и более того не удастся и в условиях современной России [10].

Распад СССР практически уничтожил отраслевую модель управления электронной промышленности и привел к сдаче рынков сбыта изделий, что практически на корню уничтожило отрасль, которая столкнулась со следующими вызовами:

- ведомственная разобщенность, отсутствие пре-

емственности и координации работ, проводимых различными организациями;

- практика копирования иностранных технологий в ущерб развитию отечественных уникальных технологий;
- зависимость от иностранных компаний и недостаточная защита критически важных технологий;
- низкая конкурентоспособность отечественной электроники на мировом и внутреннем рынках, обусловленная технологическим отставанием, высокими издержками производства, а также ограниченным ассортиментом продукции массового потребления.

После ликвидации профильных министерств функции управления развитием электронной техникой в полном объеме выполняло Министерство обороны, начиная с определения приоритетов развития и заканчивая вопросами утилизации. Выпуск отечественными предприятиями изделий электронной техники коммерческого и индустриального исполнения был практически прекращен, предприятия оборонно-промышленного комплекса становятся единственными потребителями отечественной электронной продукции.

Начиная с 2000-х годов, государство уделяет серьезное внимание решению проблем создания современной отечественной технологической базы разработки и производства приборных рядов унифицированной электронной компонентной базы в рамках целого ряда федеральных целевых программ (далее – ФЦП), выполненных по линии федеральных органов исполнительной власти: «Национальная технологическая база» на 2007-2011 годы», «Федеральная космическая программа», «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008-2015 годы», «Развитие оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации на 2007-2010 годы и на период до 2015 года», «Развитие оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации на 2011-2020 годы» [13] и т. д.

Однако, несмотря на значительные затрачиваемые ассигнования, в целом эффективность реализации указанных ФЦП явилась недостаточной, поскольку предусмотренные мероприятия не в полной мере были ориентированы на достижение каких-либо конкретных функциональных параметров и эксплуатационных характеристик конкретных изделий, и, как правило, завершались созданием технологий производства без привязки к конкретным приборным рядам.

Действующий порядок развития и создания электронной техники не предусматривал участие всех федеральных органов исполнительной власти, государственных корпораций, институтов развития и других заинтересованных организаций, определенных целеполагающими документами в области формирования и реализации научно-технической политики

в области электронной и радиоэлектронной промышленности в качестве исполнителей (соисполнителей) и не способствовал формированию единой системы управления развитием электронной продукции как военного, так и гражданского назначения, позволяющей оперативно и эффективно реализовывать стратегические решения в данной области [14].

В сложившейся ситуации становится очевидным, что в качестве инструмента межведомственной координации формирования и реализации мероприятий по развитию отечественной электроники и электротехники является разработка на основе главных принципов программно-целевого планирования, в том числе соответствия и опережения технического уровня развития изделий электроники и электротехники, достигнутых результатов, состояние нормативного и кадрового обеспечения, а также мирового опыта зарубежных государств в рассматриваемой области межведомственных комплексных целевых программ. Примером такого комплексного, системного подхода может служить Межведомственная комплексная целевая программа «Технологии искусственного интеллекта военного и двойного назначения».

В качестве целей, задач и приоритетных направлений реализации межведомственных комплексных целевых программы целесообразно определить:

1. Обеспечение технологического суверенитета в области разработки и производства высокотехнологичных функционально-сложных изделий, обеспечивающих внедрение технологий искусственного интеллекта и беспилотных автономных систем.

2. Обеспечение создания научно-технологического задела для разработки и производства электронной аппаратуры различного назначения на основе перспективных технологий фотоники, радиофотоники, квантовых технологий и др.

3. Реализация единой научно-технической политики государства в области создания и развития изделий военного и гражданского назначения.

4. Научно-технологическое развитие в рассматриваемой области с учетом технологических возможностей отечественной промышленности, научно-го потенциала Российской академии наук и высшей школы в интересах решения задач обеспечения обороны и безопасности государства.

5. Координация деятельности и ресурсов заинтересованных федеральных органов исполнительной власти, государственных корпораций, институтов развития и других организаций по созданию научно-технологического задела, технологий, материалов, оборудования, обеспечивающих разработку функционально-полной номенклатуры изделий военного и гражданского назначения.

Заключение

В целях парирования современных угроз, возникающих перед отечественной электронной и радиоэлек-

тронной промышленностью в условиях проведения специальной военной операции и беспрецедентного санкционного давления, руководством Российской Федерации принимается ряд судьбоносных стратегических решений, направленных на обеспечение реализации государственной политики Российской Федерации в области развития электронной и радиоэлектронной промышленности, инструментами реализации которых является целый комплекс нормативно-правовых и организационно-технических документов, утвержденных за последние 5 лет.

Анализ действующих документов стратегического планирования в сфере обеспечения национальной безопасности Российской Федерации – Стратегии развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года [15] и Основ государственной политики Российской Федерации в области развития электронной и радиоэлектронной промышленности на период до 2030 года и дальнейшую перспективу [16] – показывает, что государство, в качестве основного, определило вектор развития электронной промышленности, направленный на создание нового конкурентоспособного облика промышленности на основе развития научно-технического и кадрового потенциала, оптимизации производственных мощностей, их модернизации и технического перевооружения, создания новых технологических направлений и технологий, освоения прорывных промышленных электронных технологий, в целях обеспечения технологического суверенитета, а также совершенствования нормативно-правовой базы для удовлетворения потребностей государства и бизнеса в современной продукции электронной промышленности и, как следствие, повышение эффективности решения задач государственного управления электронной и радиоэлектронной промышленностью.

Литература

1. Военная промышленность России в начале XX в. (1900-1917) // Сборник документов под ред. Ганелина Р.Ш. М.: «Новый хронограф», 2004, 832 с.
2. Брыкин А.В. «Причины системных проблем в развитии радиоэлектронной и электронной промышленности России. Часть 1. Период 1917-1945 годы» // Электроника НТБ. 2021. № 4 (00205). С. 148-154.
3. Советское военно-промышленное производство (1918-1926) // Сборник документов под ред. Золоторева В.А. М.: «Новый хронограф», 2005. 765 с.
4. Становление оборонно-промышленного комплекса СССР (1927-1937) Ч. 1 (1927-1937) // Сборник документов под ред. Кольтюкова А.А. М.: ТЕРРА-Книжный клуб, 2008, 912 с.
5. Становление оборонно-промышленного комплекса СССР (1927-1937) Ч. 1 (1933-1937) // Сборник документов под ред. Кольтюкова

- А.А. М.: ООО «Издательство ТЕРРА», 2011, 944 с.
6. Оборонно-промышленный комплекс СССР накануне Великой Отечественной войны (1938 - июнь 1941) // Сборник документов под ред. Соколова А.К. М.: Книжный Клуб Книговек, 2015, 1120 с.
7. Оборонно-промышленный комплекс СССР в годы Великой Отечественной войны (июнь 1941-1945) Ч. 1 (июнь 1941-1942) // Сборник документов под ред. Артизова А.Н. М.: Книжный Клуб Книговек, 2020, 880 с.
8. РГВА. Ф. 4. Оп. 11. Д. 65. С. 165-169.
9. РГАСПИ. Ф. 644. Оп. 1. Д. 129. С. 195-197.
10. Брыкин А.В. «Причины системных проблем в развитии радиоэлектронной и электронной промышленности России. Часть 3. Период 1950-1990 годы» // Электроника НТБ. 2021. № 6 (00207). С. 130-138.
11. Конча М.И., Лопаткин К.С., Савельев Ю.Н. «Основные вехи развития СВЧ электроники» // Вооружение и экономика. 2022. № 3 (61). С. 198-206.
12. Вместе с развитием электроники. Исторический очерк // Ред. коллегия: Баяков А.В. Бедрековский М.А. Борисов А.А., Истомин Е.В., Критенко М.И., Ломакин В.М., Николаев В.Н., Степанов Ю.И. – Мытищи: 22 ЦНИИ Минобороны России, 2005.
13. Динамика радиоэлектроники // Под общей редакцией д. т. н. Борисова Ю.И. – М.: Техносфера, 2007, 400 с.
14. Степанов Ю.И., Критенко М.И., Баяков А.В., Бедрековский М.А. «Принципы управления развитием номенклатуры изделий электроники и электротехники» // Технологическое оборудование и материалы. 1997. №11. С. 23-25.
15. «Стратегия развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года», утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 января 2020 г. № 20-р.
16. «Основы государственной политики Российской Федерации в области развития электронной и радиоэлектронной промышленности на период до 2030 года и на дальнейшую перспективу», утвержденные Указом Президента Российской Федерации от 12 мая 2023 г. № 344.

УДК 006, УДК 621.3

**ВАРИАНТЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ:
МОДЕРНИЗАЦИЯ, МОДИФИКАЦИЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ**

**OPTIONS FOR CONVERTING ELECTRONIC COMPONENT BASE:
MODERNIZATION, MODIFICATION AND IMPROVEMENT**

Конча М.И., Болдырев М.А., +7 (495) 586-17-21 д.1356, bulgakov56@yandex.ru

Koncha M.I., Boldyrev M.A., +7 (495) 586-17-21 д.1356, bulgakov56@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматриваются сущность работ по модернизации, модификации и совершенствованию исходного (базового) изделия при внесении изменений в его конструкцию, технологию изготовления применительно к изделиям электронной компонентной базы. Приводятся качественные признаки отнесения изменений изделия электронной компонентной базы к модернизации, модификации, совершенствованию. Ставится вопрос о необходимости разработки нормативно-технического документа, устанавливающего единый порядок проведения работ при преобразовании исходного (базового) изделия электронной компонентной базы.

Annotation. The article examines the essence of work on modernization, modification and improvement of the original (basic) product when making changes to its design, manufacturing technology in relation to products of the electronic component base (ECB). Qualitative features of classifying changes to the ECB product as modernization, modification, improvement are given. The question is raised about the need to develop a normative and technical document establishing a uniform procedure for carrying out work when transforming the original (basic) ECB product.

Ключевые слова: электронная компонентная база (ЭКБ), базовое изделие, модернизация, модификация, совершенствование, типонаименование, нормативно-технический документ.

Keywords: the electronic component base (ECB), the basic product, modernization, modification, improvement, type of terminal, the normative and technical document.

Научная специальность: 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств. 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производств.

Введение

Электронная компонентная база (далее – ЭКБ) является основой для создания различных электронных устройств и радиоэлектронной аппаратуры. По оценкам специалистов, для сохранения достигнутых тактико-технических характеристик радиоэлектронной аппаратуры и поддержания тенденции совершенствования разработчикам и изготовителям аппаратуры необходимы **примерно 5 тысяч типов и типонаминалов, вариантов исполнения ЭКБ**. При этом ежегодно нужно разрабатывать и осваивать в производстве до 1,5–2 тысяч типов, типонаминалов и вариантов исполнений изделий ЭКБ [1]. Большая часть новых типонаминалов и вариантов исполнения изделий ЭКБ может «появляться» в ходе ограниченного изменения конструкции исходного (базового) изделия ЭКБ [2].

В условиях стремительного развития технологий и постоянного изменения требований к электронике, важной задачей является разработка подхода по выбору рационального варианта преобразования изделия ЭКБ, обеспечивающего достижение требуемых характеристик при минимальных затратах.

Основная часть

Преобразование исходного (базового) изделия ЭКБ может осуществляться за счет внесения незначительных изменений в конструкцию серийно выпускаемых изделий различными способами.

В соответствии с ГОСТ Р 15.000–2016 [3], распространяющегося на продукцию производственно-технического назначения, установлены три варианта



Конча М.И.



Болдырев М.А.

преобразования продукции: модернизация, модификация и совершенствование продукции, и приведены их определения, которые раскрывают сущность данных процессов (работ):

- модернизация продукции – создание продукции с улучшенными потребительскими свойствами путем ограниченного изменения исходной продукции и взамен ее;
- модификация продукции – создание продукции, однородной с исходной продукцией, но с отличной от нее областью применения, и выпускаемой одновременно с исходной продукцией;
- совершенствование продукции – доработка продукции в процессе производства, повышающая эффективность ее производства или применения без существенного изменения основных показателей.

Признаки отнесения изменений продукции к модернизации, модификации и совершенствованию в соответствии с ГОСТ Р 15.000–2016 приведены в таблице 1.

Таблица 1
Признаки отнесения изменений продукции к модернизации, модификации и совершенствованию продукции производственно-технического назначения

Признаки	Изменение признака при:		
	модернизации	модификации	совершенствовании
Область применения	Сохраняется неизменной или расширяется	Изменяется	Остается без изменений
Технический уровень	Повышается	Остается без изменений	Остается без изменений
Производство исходной продукции	Прекращается	Продолжается	Продолжается с внесенными изменениями
Взаимозаменяемость основных составных частей	Частичная	Частичная	Полная
Требования в стандартах, ТУ	Изменяются	Дополняются	Остаются без изменений, могут изменяться

В рекомендациях Р 50-601-12-89 [4] (отменены в настоящее время), были отражены вопросы практического применения государственных стандартов системы разработки и постановки продукции на производство, а также даны общие рекомендации и установлены более емкие определения терминам «модернизация», «модифицирование» и «совершенствование продукции».

Рекомендации Р 50-601-12-89 содержат методические положения, относящиеся к работам по мо-

дернизации, модифицированию и совершенствованию продукции, в частности особенности разработки технической документации, испытаний и постановки на производство.

Качественные признаки модернизации, модифицирования и совершенствования продукции, установленные рекомендациями Р 50-601-12-89, соответствуют признакам отнесения изменений продукции к модернизации, модификации и совершенствованию установленным ГОСТ Р 15.000–2016.

В Рекомендациях упоминаются два дополнительных признака, которые по сути являются следствием выбора одного из вариантов преобразования продукции: оптовая цена и обозначение изделий.

Оптовая цена при модернизации и модифицировании, как правило, может изменяться, при совершенствовании продукции остается без изменений.

Обозначение продукции при модернизации изменяется на новое путем присвоения дополнения, например, буквы М при первой модернизации, 2М – при второй и т. д., при модифицировании изменяется на новое путем присвоения дополнения букв А, Б и т. д. или цифр – 01, 02 и т. д., при совершенствовании продукции обозначение остается без изменений.

В области ЭКБ данные варианты преобразования изделия не находят широкого применения. Незначительные изменения конструкции изделий ЭКБ проводятся на основании решений о проведении типовых испытаний, направленные в том числе на «появление» нового варианта исполнения изделия ЭКБ и, как правило, связанные с изменениями технических характеристик (значений показателей целевого (функционального) назначения). Таким образом, посредством проведения типовых испытаний «появляются» новые типонамины (типоразмеры) продукции, что противоречит понятию типовых испытаний.

Типонамин (типоразмер) продукции (изделий) – это разновидность продукции (изделий) определенного типа, характеризующаяся определенными конструктивно-технологическими решениями, свойствами и конкретными значениями показателей ее целевого (функционального) назначения [5, 6].

Пытаясь применить признаки отнесения изменений продукции к модернизации, модификации и совершенствованию, указанные в таблице 1, к выбору варианта преобразования изделия ЭКБ, на практике возникают несоответствия и вопросы. Например: что является «базовым изделием ЭКБ»? что считать «областью применения» для ЭКБ? что такое «технический уровень»? что понимать под модификацией изделия ЭКБ? и т. п.

В соответствии с государственным военным стандартом ГОСТ РВ 52006–2003 [7] под базовым изделием понимается изделие, являющееся конструктивной основой для создания различных его модификаций. По своей сути данное определение для изделий ЭКБ применительно с уточнением, что базовое изделие ЭКБ и модификации на его основе должны иметь общую базовую конструкцию и одну базовую технологию изготовления.

Под областью применения изделия ЭКБ следует понимать условия эксплуатации или конкретный объект применения, отражающие специализацию изделия ЭКБ.

Под техническим уровнем понимается относительная характеристика свойств изделий ЭКБ, основанная на сопоставлении значений показателей,

характеризующих техническое совершенство оцениваемого изделия ЭКБ, с соответствующими базовыми значениями [8].

Под словом «модификация» можно понимать как процесс, так и объект.

Выше приведены определения термина «модификация» из ГОСТ Р 15.000–2016, которое устанавливает его как процесс. А определение, содержащееся в ГОСТ РВ 0015–203–202х [9], устанавливает данный термин как объект, а именно: модификация изделия (модификация) – это однородное с базовым изделие, отличающееся от него областью применения и выпускаемое одновременно с базовым изделием.

В таблице 1 признаком, изменяющимся только при модификации, является «область применения». Для изменения области применения изделие ЭКБ может различаться по конструктивному исполнению, стойкости к внешним воздействующим факторам и другим характеристикам. Следовательно, значения основных параметров изделия ЭКБ (значения показателей целевого (функционального) назначения), установленные в технических условиях, как могут оставаться без изменения, так и изменяться.

Исходя из вышеуказанного, для правильного выбора варианта преобразования изделий ЭКБ необходимо ввести дополнительный качественный признак, а именно «значения показателей целевого (функционального) назначения» с вариантами его изменения.

Как следствие, для взаимоувязки качественных признаков отнесения к модернизации, модификации и совершенствованию изделий ЭКБ и указанных терминов требуется уточнение определений: «модификация изделия ЭКБ» и «модернизация изделия ЭКБ».

Под «модификацией изделия ЭКБ» (как объекта) следует понимать однородное с базовым изделие ЭКБ, отличающееся от него конкретными значениями показателей его целевого (функционального) назначения или областью применения и выпускаемое одновременно с базовым изделием.

Под «модификацией изделия ЭКБ» (как процесса) следует понимать комплекс работ, направленный на создание изделия ЭКБ (типономинала, типоразмера, типополнения) однородного с базовым изделием путем ограниченного изменения его конструкции.

В соответствии с таблицей 1 технический уровень повышается только при модернизации исходного (базового) изделия, что является основным отличительным признаком данного процесса.

Следовательно «модернизация изделия ЭКБ» – это комплекс работ, направленный на создание изделия ЭКБ с улучшенными значениями показателей функционального (целевого) назначения с целью повышения его технического уровня путем ограниченного изменения конструкции.

В соответствии с пунктом 3.2 таблицы 1 ГОСТ РВ 0015–004–2020 [10] работы по совершенствованию изделия ЭКБ (конструкции изделия ЭКБ, технологии изго-

товления) проводятся посредством типовых испытаний с оценкой эффективности предлагаемых изменений.

Типовые испытания изделия ЭКБ проводят по программе, которая должна содержать состав необходимых испытаний из числа квалификационных в объеме достаточном для оценки влияния внесенных изменений на технические характеристики изделия ЭКБ [11, 12].

Как правило, по результатам типовых испытаний технические условия на изделия ЭКБ остаются без изменений. Совершенствование выпускаемого изделия ЭКБ не сопровождается изменением его обозначения.

Обобщение приведенной информации позволяет сформировать качественные признаки отнесения к модернизации, модификации и совершенствованию изделий ЭКБ (таблица 2).

Таблица 2

Качественные признаки отнесения к модернизации, модификации и совершенствованию изделий электронной компонентной базы

Признаки	Изменение признака при:		
	модернизации	модификации	совершенствовании
Значения показателей целевого (функционального) назначения изделия	Улучшаются	Сохраняются или изменяются	Сохраняются (как правило)
Область применения (специализация)	Сохраняется или расширяется	Изменяется	Сохраняется
Технический уровень	Повышается	Сохраняется	Сохраняется
Производство базового (исходного) изделия	Прекращается (как правило)	Продолжается	Продолжается с внесенными изменениями
Взаимозаменяемость основных составных частей	Нарушается	Нарушается	Сохраняется
Технические условия	Заменяются	Дополняются	Остаются без изменений (как правило)

Далее разберемся с особенностями обеспечения эффективности модернизации и модификации изделия ЭКБ.

Для обеспечения эффективности модернизации рекомендуется предварительно оценить:

- степень преемственности изделия ЭКБ, в пределах которых эффективность наибольшая;
- возможность повышения технического уровня в результате модернизации [4].

Степень преемственности изделия ЭКБ необходимо определять сопоставлением желаемого приращения эффекта от использования изделия и дополнительных затрат на разработку и освоение в производстве оригинальных (новых) составных частей (деталей) и технологических процессов.

Для оценки возможности повышения технического уровня изделия ЭКБ целесообразно использовать критериальную оценку минимально допустимого прироста технического уровня. Данный вопрос требует дополнительного исследования для отдельных групп (подгрупп) изделий ЭКБ. Если такой прирост недостижим с учетом сохранения преемственности с выпускаемым исходным изделием ЭКБ, то проводить модернизацию нецелесообразно. В этом случае целесообразно переходить к разработке нового оригинального изделия ЭКБ, позволяющего благодаря снятию ограничений, связанных с использованием исходного изделия ЭКБ, достичь более высокого технического уровня.

При модификации следует оценить степень преемственности с базовым изделием ЭКБ, позволяющим при минимуме дополнительных затрат обеспечить эффективность использования модификаций

в новых условиях эксплуатации (применения). На основе такой оценки решается вопрос о предпочтительности универсализации или специализации изделия ЭКБ, то есть совершенствование изделия ЭКБ или создание его модификации.

Необходимость разработки нового оригинального изделия ЭКБ вместо модификации выпускаемого изделия ЭКБ решается так же, как для модернизации.

Рассмотрим ряд особенностей при осуществлении модернизации, модификации или совершенствовании изделий ЭКБ.

Указанные варианты преобразования изделия ЭКБ состоят в ограниченном изменении его конструкции и (или) технологии изготовления, при котором сохраняется основная часть технической документации и используются основные результаты выполненной разработки и постановки выпускаемых изделий на производство.

Порядок создания модернизированной продукции и модификации, может быть упрощен по сравнению с порядком создания оригинальной продукции.

В техническом задании или другом организационно-техническом документе на модернизацию или модификацию изделия ЭКБ могут приводиться только те требования, которые отличают разрабатываемое изделие от выпускаемого.

Приемочные испытания должны обеспечивать прежде всего контроль выполнения требований, которые отличают разработанные изделия ЭКБ от выпускаемых. Испытания образцов или партии проводят в объеме, который позволяет проконтролировать или определить влияние изменений на свойства изделий ЭКБ.

Делая вывод из вышесказанного, можно утверждать, что перечисленные варианты преобразования продукции на стадии производства связаны с ограниченным изменением исходного (базового) изделия ЭКБ. Модернизация, как правило, осуществляется путем проведения опытно-конструкторской работы, совершенствование изделия ЭКБ проводится с целью оценки эффективности вносимых изменений в изделие (конструкцию, технологию изготовления) посредством проведения типовых испытаний [2]. Модификация является промежуточным вариантом преобразования изделия между модернизацией и совершенствованием, для которого в настоящее время отсутствует регламентирующая нормативно-техническая документация. Воспользовавшись сведениями в таблице 2 (качественными признаками отнесения к модернизации, модификации и совершенствованию изделий ЭКБ), в зависимости от целей и задач можно осуществить выбор варианта преобразования конкретного изделия ЭКБ, что в свою очередь поможет правильно подойти к разработке организационно-технического документа на организацию соответствующих работ.

Для обеспечения координации технической и организационной работы по модернизации, модификации и совершенствованию изделий ЭКБ необходимо продолжить исследования в данной области с целью разработки нормативно-технического документа устанавливающего:

- единый понятийный аппарат в рассматриваемой предметной области, раскрывающий сущность процессов (работ) преобразования изделий ЭКБ;
- качественные признаки отнесения к одному из вариантов преобразования исходного (базового) изделия ЭКБ;
- методики оценки эффективности и целесообразности выполнения модернизации и модификации изделий ЭКБ, исходя из их степени преемственности с исходным (базовым) изделием;
- порядок проведения работ при модернизации, модификации и совершенствовании изделий ЭКБ, в частности особенности разработки технической документации, проведения испытаний и постановки на производство.

Заключение

Таким образом, модернизация, модификация и совершенствование изделий ЭКБ являются важными процессами, способствующими развитию электроники и повышению качества продукции. Правильное и однозначное понимание этих процессов, их особенностей помогут разработчикам и производителям ЭКБ эффективно и своевременно адаптировать свои изделия к современным требованиям рынка, а организациям, осуществляющим рассмотрение организационно-технических документов на модернизацию, модификацию и совершенствование

изделий ЭКБ, выработать единые подходы при принятии решения.

Литература

1. Шиллер В.А., Шпак В.В. «Независимость российской электроники от импорта – необходима и возможна» // журнал «Электроника НТБ», выпуск № 6, 2016.
2. Конча М.И., Шакуров А.В., Ерохина Е.С. «К вопросу обоснованного выбора: проведение типовых испытаний или постановка ОКР на модернизацию электронной компонентной базы военного назначения» // сборник научных статей XVI Межведомственной научной-теоретической конференции «Вооружение и экономика» – М: ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России, 2023.
3. ГОСТ Р 15.000–2016 «Система разработки и постановки продукции на производство. Основные положения».
4. Рекомендации Р 50-601-12-89 «Система разработки и постановки продукции на производство. Модернизация, модификация и совершенствование выпускаемой продукции».
5. ГОСТ РВ 0020–39.415-2020 «Комплексные системы общих технических требований и контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Требования к построению и содержанию технических условий».
6. ГОСТ Р 58857–2020 «Ракетно-космическая техника. Электронная компонентная база. Общие положения».
7. ГОСТ РВ 52006–2003 «Создание изделий военной техники и материалов военного назначения. Термины и определения».
8. ГОСТ 15476-79 «Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения».
9. ГОСТ РВ 0015–203–202х «Система разработки и постановки на производство военной техники. Порядок выполнения опытно-конструкторских работ по созданию изделий и их составных частей. Основные положения».
10. ГОСТ РВ 0015–004–2020 «Система разработки и постановки продукции на производство военной техники. Стадии жизненного цикла изделий и материалов».
11. ГОСТ РВ 15.307–2002 «Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Испытания и приемка серийных изделий. Основные положения».
12. ГОСТ РВ 0020-57.413-2020 «Комплексная система контроля качества. Изделия Электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Контроль качества готовых изделий и правила приемки».

УДК

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ
В ОТРАСЛЕВОЙ СИСТЕМЕ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ****APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS IN AN INDUSTRY DECISION SUPPORT SYSTEM**

Трусов А.В., д. т. н., доцент, начальник Научно-методического управления, ФГБУ «ВНИИР»,
+7 (495) 586-17-21, trusov@vniir-m.ru,

Кузнецов Д.С., младший специалист отдела прототипирования прикладных систем Управления
исследований систем и процессов, ФГБУ «ВНИИР», +7 (495) 586-17-21, kuznetsov_ds@vniir-m.ru

Trusov A.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Scientific and Methodological
Department, FSBI "VNIIR", +7 (495) 586 -17-21, trusov@vniir-m.ru,

Kuznetsov D.S., Junior Specialist, Department of Prototyping of Applied Control Systems and Research of Systems
and Processes, FSBI "VNIIR", +7 (495) 586-17-21, kuznetsov_ds@vniir-m.ru

Аннотация. В данной статье рассматриваются возможности совершенствования отраслевой системы поддержки принятия решений путем применения методов машинного обучения для облегчения и углубления анализа доступных, а также восполнения недостающих данных.

Annotation. This article examines the possibilities of improving the industry's decision support system by applying machine learning methods to facilitate and deepen the analysis of available data, as well as fill in missing data.

Ключевые слова: система поддержки принятия решений, машинное обучение, анализ данных, цифровизация.

Keywords: decision support system, machine learning, data analysis, digitalization.

Научная специальность: 2.3.8. Информатика и информационные процессы.

Введение

Отраслевая система поддержки принятия решений (далее – СППР) играет ключевую роль в обеспечении возможности реализации мероприятий, направленных на достижение национальных и государственных целей в области развития электронной и радиоэлектронной промышленности. СППР должна обладать как достаточным аналитическим потенциалом, так и обширным объемом информации, которые могут быть задействованы в решении отраслевых задач, однако, текущее состояние СППР может являться ограничивающим фактором в принятии стратегически важных решений ввиду возможной недостаточности указанных компонентов системы.

Наличие вышеуказанной проблемы определило необходимость разработки методов расширения применимости предоставляемых в СППР данных. В качестве данного метода может выступать практика использования моделей машинного обучения (далее – МО), специально разработанных для анализа имеющихся и восполнения недостающих данных.

В интересах определения эффективности применения методов машинного обучения в СППР для анализа существующих и восполнения недостающих данных требуется решение следующих задач:

- анализ теоретических основ существующих систем поддержки принятия решений и характеристика значения полноты данных для их функционирования;

*Трусов А.В.**Кузнецов Д.С.*

- исследование методов МО, применяемых для анализа неполных данных, и проведение их сравнительного обзора с точки зрения применимости в СППР;

- обоснование теоретической целесообразности интеграции методов МО в СППР для повышения точности анализа и обоснованности принимаемых решений;

- конкретизация применения алгоритмов МО в СППР на примере восполнения и анализа данных.

Основная часть**Значение полноты данных в системе поддержки принятия решений**

Одним из ключевых требований к эффективности СППР выступает полнота и достоверность исходных данных [1]. Отсутствие данных может искажать структуру связей между значениями, нарушать стати-

стические закономерности и, как следствие, оказать негативное воздействие на корректность аналитических заключений должностных лиц, принимающих управленческие решения, и снижать уровень доверия к системе в целом. В этом контексте восполнение недостающих данных становится приоритетной задачей в СППР.

Методы машинного обучения для анализа неполных данных и их сравнительный обзор

Потенциал методов МО обладает наибольшей ценностью в условиях неполных данных, так как характеризуется способностью выявлять скрытые закономерности, моделировать сложные зависимости и адаптироваться к изменяющимся условиям.

Существующие методы МО, направленные на обработку пропусков в данных, можно классифицировать следующим образом:

- простые статистические методы, такие как замена средним значением, медианой или модой, отличающиеся низкой вычислительной сложностью, но игнорирующие многомерную структуру данных;
- методы ближайших соседей (KNN), применяющие эвристику схожести объектов, эффективнее учитывающие локальную структуру данных, но страдающие от проблем масштабирования и чувствительности к выбросам (точек данных, отклоняющихся от нормы в наборе данных);
- регрессионные модели, позволяющие предсказывать пропущенные значения на основе известных переменных, обеспечивая относительно высокую точность при наличии корреляций;
- ансамблевые методы, обеспечивающие устойчивость и точность предсказаний, активно используемые при наличии сложных нелинейных зависимостей;
- глубокие нейронные сети, позволяющие выявлять скрытые структуры в разреженных данных, но требующие значительных ресурсов и верификации [1];
- модели временных рядов, актуальные в задачах с ярко выраженной временной динамикой.

Выбор метода должен опираться на особенности данных, доступный объем информации, тип пропусков и цели восполнения данных.

Общая теоретическая целесообразность интеграции методов машинного обучения в систему поддержки принятия решений

Практическая польза методов МО не ограничивается возможностью вычислить недостающие данные. Интеллектуализация аналитических блоков системы позволяет проводить углублённый анализ текущих данных, а также осуществлять прогнозирование будущих с учётом алгоритмически выявленных скрытых закономерностей и оценки сопутствующих факторов, влияющих на эти данные. Работая в паре,

усовершенствованные аналитические данные и заполнение пропусков в данных могут дать более применимый и ценный в практике результат.

По результатам проведенного анализа можно констатировать, что основные теоретические преимущества интеграции алгоритмов МО в СППР позволяют обеспечивать:

- снижение влияния человеческого фактора, выраженного в субъективной интерпретации информации, за счёт автоматизации проведения анализа;
- выявление неочевидных взаимосвязей и факторов влияния с последующим использованием этих знаний в стратегическом планировании;
- устойчивость к росту объёмов и усложнению структуры данных, что особенно актуально для предприятий электронной и радиоэлектронной промышленности в условиях цифровизации, поскольку агрегированная информация, полученная путем работы алгоритмов МО, упростит восприятие общих показателей предприятий.

Конкретизация применения алгоритмов машинного обучения в системе поддержки принятия решений на примере восполнения и анализа данных

Для иллюстрации конкретных возможностей интеграции алгоритмов машинного обучения в СППР рассмотрим задачу восполнения недостающих значений в данных о чистой прибыли предприятий за 2020-2024 гг. Наличие пробелов по отдельным годам в отчетах организаций препятствует формированию корректной динамической картины. Для решения данной задачи применимы следующие подходы:

- использование модели градиентного бустинга (например, XGBoost) с обучением на выборке, содержащей следующие переменные: выручка, расходы, налоговая нагрузка, капитальные затраты;
- применение LSTM-сетей, учитывающих как долгосрочные тренды, так и краткосрочные колебания, для обработки временных рядов с выраженной сезонностью (например, квартальные отчёты);
- использование многоуровневой линейной регрессии, позволяющей учитывать влияние макроэкономических индикаторов (ставка Центрального банка Российской Федерации, инфляция, индекс деловой активности) на ключевые показатели предприятия.

Выбор указанных алгоритмов обусловлен их способностью адаптироваться к структуре отраслевых данных и учитывать как внутренние (финансовые) характеристики предприятий, так и внешние (макроэкономические) влияния. Применение моделей градиентного бустинга позволяет эффективно обрабатывать сложные нелинейные зависимости между признаками, а LSTM-сети – учитывать временные зависимости и сезонные колебания, характерные для экономических показателей. Многоуровневая регрессия, в свою очередь, дает возможность учиты-

вать иерархическую структуру данных, что особенно актуально при анализе предприятий, входящих в холдинговые структуры или подверженных влиянию региональных факторов. Комплексное использование этих методов обеспечивает повышение репрезентативности выборки и качества аналитических выводов.

Дополнительно, в результате использования данных подходов представляется возможным обеспечить следующие улучшения в аналитике:

- построение полноценных временных рядов и трендовых моделей чистой прибыли;
- анализ финансовой устойчивости на основе восстановленных показателей;
- оценка рисков и сценарное моделирование на основе генерации альтернативных траекторий развития компании при различных макроэкономических условиях;
- интеграция прогнозных моделей в блоки стратегического планирования СППР, позволяющая моделировать эффективность инвестиционных решений.

Риски интеграции методов машинного обучения в системах поддержки принятия решений

Применение методов МО в системах поддержки принятия решений сопряжено с рядом рисков, одним из которых является недостаточность данных для обучения моделей. В условиях неполных или нерепрезентативных данных модели МО могут давать искаженные прогнозы, что может привести к принятию ошибочных управленческих решений. Также существует риск избыточной сложности моделей, что требует значительных вычислительных ресурсов и может привести к переобучению, снижая обобщающую способность модели [2]. Для уменьшения этих рисков, важно обеспечить накопление данных с течением времени, что позволит моделям МО обучаться на более полных и репрезентативных выбор-

ках. Регулярное обновление данных и расширение обучающих наборов также может повысить качество прогноза. Кроме того, применение более простых и интерпретируемых моделей, таких как деревья решений или линейные регрессии, может снизить риски ошибок в интерпретации и повысить прозрачность принятия решений.

Заключение

В данной статье рассмотрены возможности применения методов МО в СППР для улучшения анализа существующих данных и восполнения недостающих. Методы МО способны выявлять скрытые закономерности в данных и адаптироваться к изменяющимся условиям, что особенно важно для принятия стратегических управленческих решений в условиях неопределенности и неполноты данных. Вместе с тем внедрение методов МО сопряжено с рядом рисков, что может привести к искажению прогнозов. Для минимизации этих рисков рекомендуется обеспечивать регулярное обновление данных, взвешенно подходить к выбору алгоритмов и моделям, а также использовать интерпретируемые подходы для повышения объективности принятых решений.

В целом, успешная интеграция методов МО в СППР создаёт условия для более обоснованного и эффективного принятия решений в условиях цифровизации и роста объёмов данных.

Литература

1. Иванов А.А., Петрова С.В. «Применение методов глубокого обучения для восстановления данных в системах поддержки принятия решений» // Искусственный интеллект и анализ данных. – 2022. – № 4. – С. 45–60.
2. Смирнов Д.К. «Риски интеграции машинного обучения в промышленные системы: методы минимизации ошибок». – М.: Издательство «Техносфера», 2020. – 180 с.



ВНИИР

ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Головная научно-исследовательская
испытательная организация
Минпромторга России в области ЭКБ,
научного обеспечения и
межведомственной методической
координации работ по созданию и
проведению исследований (испытаний)
изделий электронной компонентной базы

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР

Лаборатория МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ 15 видов испытаний

Лаборатория КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ 27 видов испытаний

Лаборатория ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ 17 видов испытаний

Лаборатория ДИАГНОСТИЧЕСКОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И РАЗРУШАЮЩЕГО ФИЗИЧЕСКОГО АНАЛИЗА 30 видов испытаний

Испытательный Центр располагает:

52 единицы аттестованного испытательного оборудования;
216 единиц поверенных средств измерений;
квалифицированный персонал.

Уникальные виды испытаний ЭКБ и РЭА:

- *определение отсутствия признаков контрафактного происхождения ЭКБ;*
- *диагностический неразрушающий контроль (акустический и рентгеновский);*
- *разрушающий физический анализ (контроль содержания паров воды внутри корпусов микросхем)*
- *испытания на виброустойчивость и вибропрочность воздействием синусоидальной или случайной широкополосной вибрации;*
- *испытаний на ударную прочность и устойчивость;*
- *испытания на электромагнитную совместимость;*
- *воздействие плесневых грибов;*
- *воздействие факторов резко континентального характера.*



141008, Московская область, г.о. Мытищи, г. Мытищи, ул. Колпакова, д. 2А
+7 (495) 586-17-21 доб. 1434, 1404; e-mail: vniir@vniir-m.ru, сайт: vniir-m.ru



ВНИИР

ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ



**СИСТЕМА ДОБРОВОЛЬНОЙ
СЕРТИФИКАЦИИ**

«ЭЛЕКТРОНСЕРТ»

Система добровольной сертификации радиоэлектронной аппаратуры, электронной компонентной базы и материалов военного, двойного и народнохозяйственного назначения «ЭЛЕКТРОНСЕРТ»

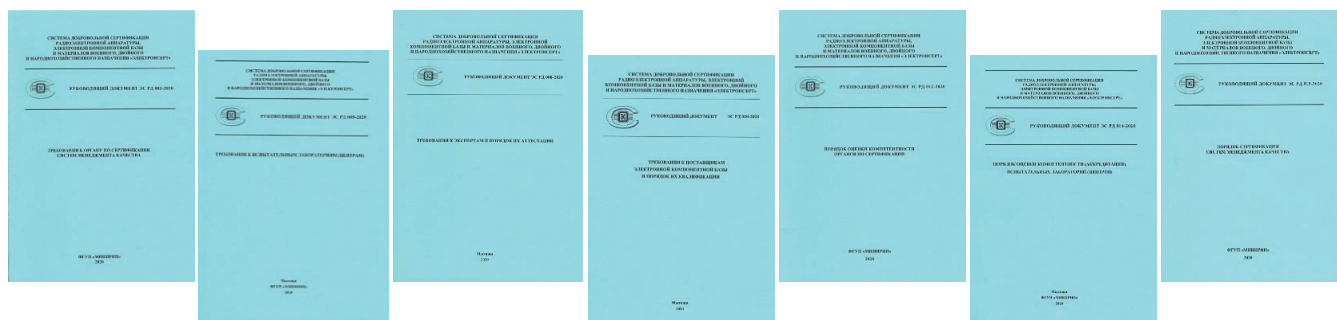
(рег. № РОСС.RU.B2618.04KMН0 от 07.04.2022)

**ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ СИСТЕМЫ ДОБРОВОЛЬНОЙ СЕРТИФИКАЦИИ «ЭЛЕКТРОНСЕРТ»
НАПРАВЛЕНА НА ОРГАНИЗАЦИЮ И ПРОВЕДЕНИЕ РАБОТ В ОБЛАСТЯХ:**

- **оценки компетентности** (аккредитации) испытательных лабораторий (центров), органов по сертификации систем менеджмента качества, органов по сертификации продукции, аттестации экспертов;
- **сертификации СМК** предприятий-разработчиков, изготовителей ЭКБ и поставщиков ЭКБ;
- **квалификации поставщиков ЭКБ** отечественного и иностранного производства;
- **подготовки экспертов** по сертификации систем менеджмента качества, аккредитации органов по сертификации систем менеджмента качества, органов по сертификации продукции, испытательных лабораторий (центров) и менеджеров по качеству.

**ПЕРСПЕКТИВА РАЗВИТИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ И НАПРАВЛЕНИЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ
СДС «ЭЛЕКТРОНСЕРТ» В ОБЛАСТИ ПРОИЗВОДСТВА И РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ГРАЖДАНСКОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ПРОДУКЦИИ:**

- **сертификация** организаций радиоэлектронной промышленности;
- **сертификация** (аттестация) **производства** продукции гражданского назначения, оценка производственных процессов;
- **технологический аудит** производства и оценка соответствия продукции национальным стандартам;
- **сертификация организаций** (квалификация поставщиков), осуществляющих распространение электронной (радиоэлектронной) продукции;
- **система ранжирования поставщиков ЭКБ** (внедрение и ведение) для упрощения потребителям поиска и выбора партнёров;
- **энергетический менеджмент и бережливое производство.**



141002, Московская область, г.о. Мытищи, г. Мытищи, ул. Колпакова, д. 2А
+7 (495) 586-17-21 доб. 1368; 1373; e-mail: vniiir@vniiir-m.ru, сайт: vniiir-m.ru



ООО «ВИАНТЕК»

РАЗРАБОТКА ПО, СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ,
МОНИТОРИНГА И АВТОМАТИЗАЦИИ

Компания «Виантек» с 2014 года разрабатывает специализированное программное обеспечение для автоматизации измерений, интеграции оборудования и анализа инженерных данных.

Основные направления:



Автоматизация сложных измерений и устранение человеческого фактора

- Высокоточная, повторяемая работа с измерительным оборудованием.

- ### Интеграция разрозненного оборудования в единую систему
- Объединение приборов с разными интерфейсами и стандартами.



Кастомизация под узкие инженерные задачи

- Разработка специализированных алгоритмов и нестандартной логики.

- ### Обработка и визуализация сложных измерительных данных
- Превращение объёмного материала предметной области в понятную аналитику в реальном времени:

фильтрация, расчеты, графики, панели.



Программное обеспечение как добавленная ценность к оборудованию клиента

- ПО усиливает продажи оборудования клиента — становится их конкурентным преимуществом.

г. Москва, ул. Тимирязевская, 1С2, офис 2502,
Тел: +7 (495) 120 24 36, e-mail: soft@viantec.ru