

На правах рукописи



Хмара Иоанн Владимирович

**СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ КОММУТАЦИОННЫЕ
МОНОЛИТНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ
ДЛЯ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ**

Специальность 2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР).

**Научный
руководитель:**

Шарангович Сергей Николаевич

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники, ТУСУР

**Официальные
оппоненты:**

Разинкин Владимир Павлович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теоретических основ радиотехники ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Ющенко Алексей Юрьевич

кандидат технических наук, начальник 4 отдела акционерного общества «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов» (АО «НИИПП»)

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Защита состоится 22 декабря 2026 года в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе ТУСУР, по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа и на сайте <https://postgraduate.tusur.ru/urls/3b67vk9u>

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент



Суровцев Роман Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На современном этапе развития радиоэлектронных технологий наблюдается стабильный рост спроса на контрольно-измерительную аппаратуру (КИА) СВЧ- и КВЧ-диапазонов, требующую обеспечения непрерывного рабочего диапазона частот от сотен герц до десятков гигагерц. В условиях необходимости достижения технологической независимости критически важной задачей является создание собственной компонентной базы, в частности – коммутационных монолитных интегральных схем (МИС), определяющих ключевые метрологические характеристики аппаратуры. Поскольку существующие технические решения зачастую не обеспечивают требуемого сочетания минимальных вносимых потерь, высокой межканальной развязки и линейности в сверхширокой полосе частот, разработка комплекса специализированных МИС, включающего SPDT-переключатели до 67 ГГц отражающего и поглощающего типов, а также диплексерные переключатели для расширения низкочастотной границы измерительных трактов без ухудшения динамического диапазона, представляет собой актуальную научно-техническую задачу.

Степень разработанности темы. Анализ актуальных научных публикаций показывает, что при смещении мирового вектора исследований сверхширокополосных коммутационных МИС в сторону кремниевых технологий (в частности, SOI), вопросы проектирования аналогичных устройств на базе технологически доступного арсенида галлия (GaAs) остаются недостаточно проработанными. Известные реализации сверхширокополосных GaAs-переключателей характеризуются критическим возрастанием вносимых потерь и ухудшением межканальной развязки на частотах до 67 ГГц. Одновременно с этим в открытых источниках и патентной базе практически отсутствуют сведения о топологической реализации интегральных диплексерных переключателей, обеспечивающих работу трактов от постоянного тока, поскольку конкретные решения составляют коммерческую тайну производителей КИА. Таким образом, существует объективная необходимость в разработке оригинальных схмотехнических и топологических решений на базе технологии GaAs, позволяющих преодолеть физические ограничения по потерям и развязке на краях рабочего диапазона и создать надежную компонентную базу для перспективной отечественной КИА.

Цель работы – разработка схмотехнических и топологических решений, обеспечивающих проектирование сверхширокополосных коммутационных монолитных интегральных схем для применения в СВЧ-модулях контрольно-измерительной аппаратуры.

Поставленная цель работы достигается путём решения следующих **задач**: провести сравнительный анализ существующих схмотехнических решений, топологий и технологических базисов СВЧ-коммутаторов с целью выявления их предельных характеристик и ограничений применительно к трактам широкополосной КИА; разработать методику проектирования, а также схмотехнические и топологические решения для сверхширокополосных МИС SPDT-переключателей на базе технологии GaAs pHEMT отражающего и поглощающего типов, функционирующих в непрерывном диапазоне частот до 67 ГГц; разработать МИС коммутаторов

мультиплексорного типа на основе структуры диплексерного переключателя, обеспечивающие коммутацию сигналов от постоянного тока до 67 ГГц с различными полосами пропускания для блоков формирования СВЧ-сигналов; разработать схемотехническое решение, спроектировать топологию и экспериментально исследовать МИС диплексерного переключателя, предназначенную для частотного разделения СВЧ-сигналов диапазонов 0–4 ГГц и 4–50 ГГц для приемных блоков КИА.

Научная новизна

1. Разработаны схемотехнические и топологические решения для переключателей миллиметрового диапазона на базе технологии GaAs pHEMT, отличающиеся применением группы переходных отверстий заземления и формированием копланарного зазора сигнальных линий.

2. Предложена структура диплексерного переключателя на основе PIN-диодов, отличающаяся интеграцией двухзвенного четвертьволнового шлейфа в единый топологический конденсатор и введением цепи запирающего смещения.

3. Разработана схема диплексерного переключателя, отличающаяся применением шунтирующих полевых транзисторов совместно с LC-фильтрами повышенного порядка и дополнительными коммутационными элементами.

Теоретическая значимость

1. Обоснована методика схемотехнического и топологического проектирования переключателей миллиметрового диапазона на базе технологии GaAs pHEMT за счет раскрытия механизма компенсации паразитных индуктивностей заземления и сигнальных линий путем применения группы переходных отверстий и емкости копланарного зазора.

2. Установлена необходимость учета частотно-зависимого фазового набега элементов СВЧ-заземления при проектировании диплексерных переключателей до 67 ГГц, что позволяет теоретически обосновать сокращение длины четвертьволнового шлейфа на 15–40 % относительно классических расчетов.

3. Обоснованы принципы схемотехнического построения сосредоточенных диплексерных переключателей на полевых транзисторах, позволяющие реализовать многооктавную полосу частот, и доказана эффективность компенсации паразитных реактивностей топологии в диапазоне до 50 ГГц за счет повышения порядка LC-фильтров совместно с применением дополнительных шунтирующих транзисторов.

Практическая значимость

1. Разработана МИС поглощающего переключателя с рабочим диапазоном частот 10 МГц – 26,5 ГГц с вносимыми потерями менее 2 дБ, возвратными потерями в открытом состоянии более 12 дБ, в закрытом – более 7 дБ и межканальной развязкой более 27 дБ.

2. Предложена методика проектирования сверхширокополосных МИС SPDT-коммутаторов, послужившая основой для разработки двух переключателей: поглощающего типа до 50 ГГц и отражающего до 67 ГГц с общим уровнем вносимых потерь менее 3,4 дБ и межканальной развязкой более 32 дБ.

3. На базе предложенной схемы и топологии создана линейка из трех МИС диплексерных переключателей на основе PIN-диодов, обеспечивающих функцио-

нирование от постоянного тока до 26, 50 и 67 ГГц для применения в блоках формирования СВЧ-сигналов КИА.

4. Разработан диплексерный переключатель на основе полевых транзисторов с рабочими диапазонами низкочастотного канала от постоянного тока до 4 ГГц и многооктавного высокочастотного канала 4–50 ГГц, обеспечивающий межканальную развязку более 21 дБ и подавление второй гармоники более 97 дБн при входной мощности –10 дБм для применения в приемных блоках КИА.

Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач применялись методы теории линейных электрических цепей, численные методы схемотехнического, электрического анализа и параметрической оптимизации, лежащие в основе специализированных систем автоматизированного проектирования и электродинамического моделирования, экспериментальные исследования проводились с использованием сертифицированного измерительного оборудования.

Реализация и внедрение результатов работы

Разработанные МИС коммутаторов используются в СВЧ-модулях КИА, таких как широкополосные приемники и формирователи СВЧ-сигнала, входящих в состав анализаторов спектра серии СК4М до 50 ГГц, векторных анализаторов цепей серий Р42, Р44 до 50 ГГц и 67 ГГц и синтезаторов частот серии Г7М до 50 ГГц фирмы АО «НПФ «Микран». Копия акта о внедрении результатов в деятельность компании приведена в приложении А. Отдельные результаты исследования использованы при выполнении НИР «Методология автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры, функционирующей в условиях деструктивных воздействий», проект FEWM-2024-0005 в 2026 г.

Положения, выносимые на защиту

1. Предложенная методика схемотехнического и топологического проектирования SPDT-переключателей на основе GaAs pHEMT с применением группы переходных отверстий заземления и компенсирующей емкости копланарного зазора сигнальных линий обеспечивает комплексную минимизацию паразитных реактивностей схемы, что позволяет реализовать сверхширокополосные МИС отражающего типа с вносимыми потерями менее 2,7 дБ при межканальной развязке более 32 дБ в диапазоне до 67 ГГц, а также поглощающего типа с потерями менее 3 дБ при развязке более 38 дБ в диапазоне до 50 ГГц.

2. Интеграция двухзвенного четвертьволнового шлейфа в единый топологический конденсатор совместно с цепью запирающего смещения в диплексерных переключателях на основе PIN-диодов обеспечивает создание унифицированного ряда МИС, работающих в диапазонах частот от постоянного тока до 26, 50 и 67 ГГц с уровнем линейности более 20 дБм.

3. Реализация диплексерного переключателя в виде сосредоточенной LC-схемы на основе шунтирующих полевых транзисторов обеспечивает работу НЧ-канала в полосе частот от постоянного тока до 4 ГГц, а повышение порядка фильтров совместно с введением дополнительных транзисторов компенсирует паразитные реактивности топологии, что в совокупности позволяет реализовать многооктавную полосу ВЧ-канала 4–50 ГГц с межканальной развязкой более 21 дБ и подавлением второй гармоники более 97 дБн при входной мощности –10 дБм.

Достоверность результатов проектирования и моделирования СВЧ-устройств подтверждается совпадением расчетных данных САПР с результатами экспериментальных исследований изготовленных опытных образцов в пределах инструментальных погрешностей и технологического разброса. Дополнительным подтверждением достоверности разработанных топологических решений на подложках арсенида галлия служит получение 7 свидетельств о государственной регистрации топологий интегральных микросхем.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационной работы представлялись на следующих конференциях: международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР» в 2022 и 2023 гг., XXI Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления – 2025».

Публикации. По результатам проведенных исследований опубликовано 15 работ, в том числе 4 статьи в журналах из перечня ВАК по специальности 2.2.14, 3 публикации в сборниках международных и всероссийских конференций, получен 1 патент на изобретение и 7 свидетельств о государственной регистрации топологий интегральных микросхем.

Личный вклад автора. Диссертация является итогом исследований и разработок, проводившихся автором совместно с соавторами опубликованных работ. Основные научные и практические результаты, выносимые на защиту, получены соискателем лично. Постановка целей исследования, определение путей их достижения и обсуждение результатов проводились совместно с научным руководителем. Личный вклад автора заключается в разработке схемотехнических и топологических решений, выборе методик исследований, проведении нелинейного и электродинамического моделирования в САПР, выполнении экспериментальных измерений опытных образцов, а также в обработке данных и подготовке материалов к публикации.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы и двух приложений. Объем работы составляет 151 страницу машинописного текста, включая 85 рисунков и 7 таблиц, список литературы содержит 102 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. СВЧ-коммутация и частотная селекция в современной контрольно-измерительной аппаратуре

В подразделе 1.1 описаны переключатели в архитектуре современных измерительных приборов. **В подразделе 1.2** проведен анализ устройств частотной селекции сигналов. **В подразделе 1.3** представлены классификация и схемотехника СВЧ-переключателей. **В подразделе 1.4** выполнен сравнительный анализ твердотельных технологий изготовления МИС коммутаторов на основе актуальных публикаций и спецификаций производителей. **В подразделе 1.5** представлены методы проектирования и моделирования сверхширокополосных МИС. **В подразделе 1.6** сформулированы выводы раздела и поставлены задачи диссертационного исследования.

2. Исследование и разработка сверхширокополосных МИС СВЧ-переключателей

В подразделе 2.1 разработана МИС SPDT-переключателя поглощающего типа для измерительных трактов КИА (10 МГц – 26,5 ГГц) на базе технологии GaAs 0,15 мкм рНЕМТ. Архитектура на основе транзисторов с различной периферией затвора позволила достичь вносимых потерь менее 2 дБ при межканальной развязке более 27 дБ.

В подразделе 2.2 представлена методика проектирования сверхширокополосных SPDT-переключателей (от 10 МГц до 67 ГГц) отражающего и поглощающего типов на базе технологии GaAs 0,1 мкм рНЕМТ. Методика базируется на концепции распределенного коммутатора (Traveling Wave Switch).

На начальном этапе, для минимизации паразитной емкости $C_{\text{ВЫКЛ}}$ и обеспечения приемлемого уровня развязки, обоснован выбор однопальцевого транзистора с шириной затвора $W_z = 75$ мкм. Последующий синтез архитектуры подтвердил оптимальность применения двух шунтирующих каскадов, что обеспечивает межканальную развязку более 27 дБ при вносимых потерях менее 2,7 дБ до 70 ГГц.

Критически важным этапом методики стала минимизация паразитной индуктивности заземляющих цепей (VIA). С повышением частоты реактивное сопротивление, обусловленное паразитной индуктивностью сквозных металлизированных переходных отверстий (L_{VIA}), стремительно растет, что увеличивает импеданс заземляющей цепи и ухудшает прохождение СВЧ-сигнала. На основе параметров эквивалентной схемы ($L_{\text{VIA}} \approx 12$ пГн, $R_{\text{VIA}} \approx 0,01$ Ом, $C_{\text{VIA}} \approx 2$ фФ) установлено, что параллельное объединение группы отверстий пропорционально снижает доминирующую эквивалентную паразитную индуктивность (рисунок 2.1).

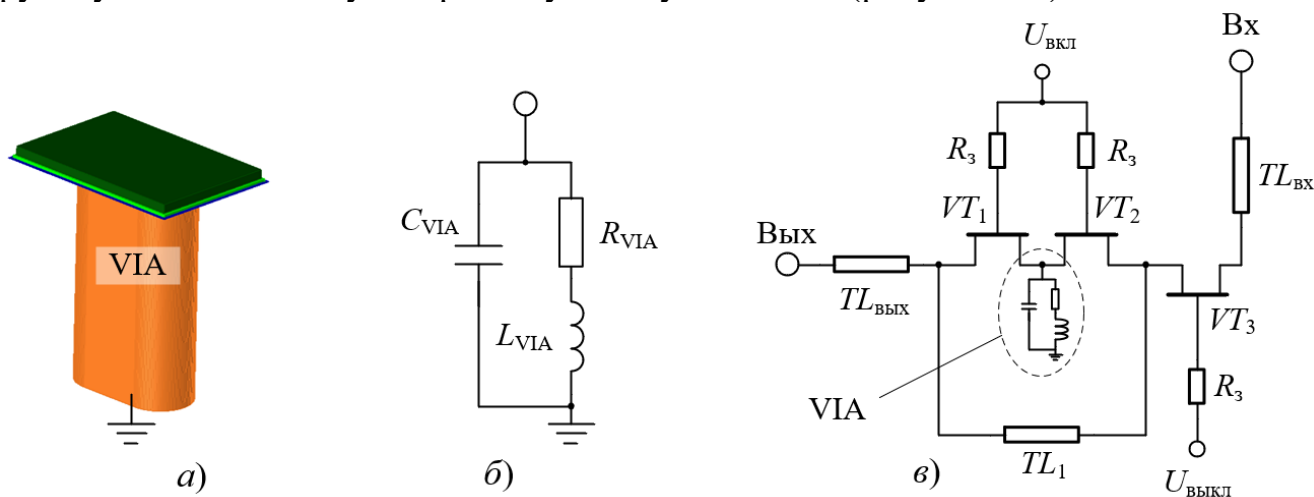


Рисунок 2.1 – Внешний вид 3D-модели (а) и эквивалентная схема VIA (б), а также принципиальная схема закрытого плеча переключателя (в)

Для оценки влияния числа заземляющих отверстий (VIA) на характеристики схемы проведено моделирование закрытого плеча переключателя (рисунок 2.2). Установлено, что использование только одного блока VIA снижает межканальную развязку на частоте 70 ГГц на 4 дБ (до 23 дБ). Добавление второго отверстия компенсирует это ухудшение, сокращая разницу с идеальным заземлением до уровня менее 1 дБ, а применение группы из 3–4 отверстий ($\text{VIA} \times 3$, $\text{VIA} \times 4$) обеспечивает параметры, близкие к идеальному короткому замыканию. Данное схемотехни-

ческое решение предотвращает ухудшение развязки переключателя в миллиметровом диапазоне 40–70 ГГц.

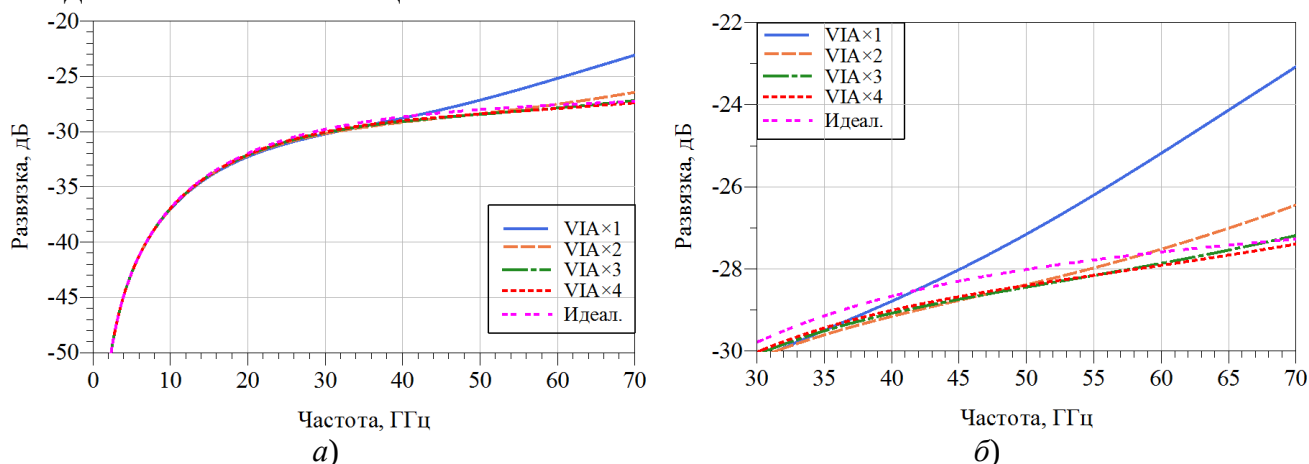


Рисунок 2.2 – Частотные зависимости межканальной развязки при различном числе блоков ВИА в диапазонах 0–70 ГГц (*а*) и 30–70 ГГц (*б*)

Для реализации МИС поглощающего типа в структуру переключателя последовательно интегрировано звено согласования, состоящее из параллельно соединенных транзистора и нагрузочного резистора R_n (на рисунке 2.3 отмечено пунктиром). В результате была синтезирована полная принципиальная схема разрабатываемых SPDT-переключателей (рисунок 2.3).

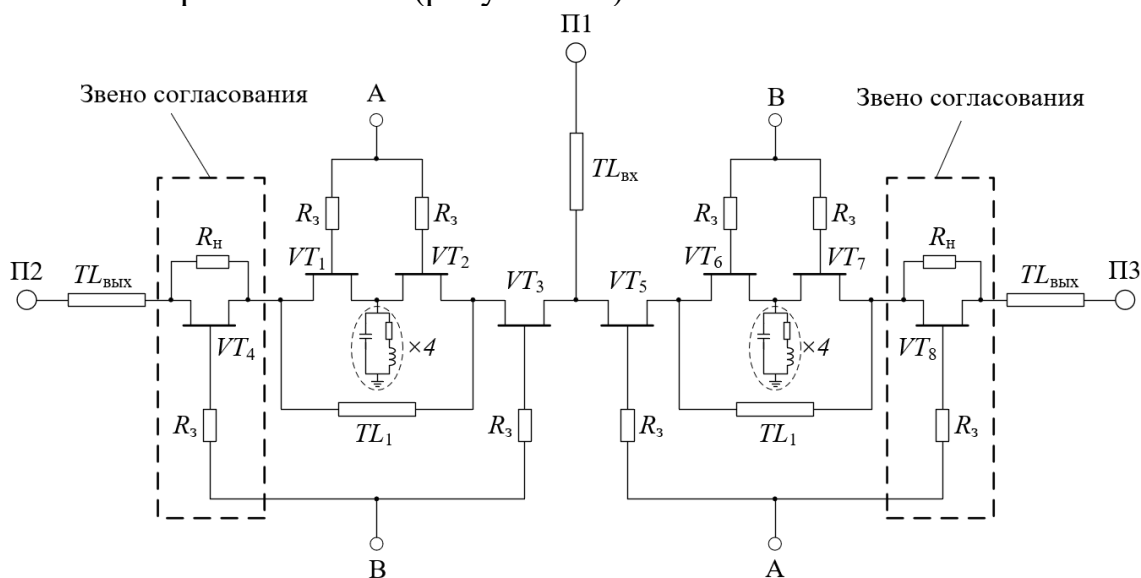


Рисунок 2.3 – Итоговая схема разрабатываемых переключателей
отражающего и поглощающего типов

Переход от схемотехнической модели к физической топологии МИС сопровождается рядом конструктивно-технологических ограничений. В частности, реализация узла заземления в виде массива VIA×4 требует выделения значительной площади на кристалле с соблюдением технологических норм (минимальное расстояние между краями отверстий 60 мкм). Это обуславливает необходимость дополнительного удлинения огибающих этот узел сигнальных линий TL_1 , что неизбежно ведет к росту их паразитной индуктивности и, как следствие, к рассогласованию тракта. С учетом данных ограничений была разработана топология плеча переключателя, в которой процесс электродинамического (ЭД) моделирования TL_1 носил итерационный характер (рисунок 2.4).

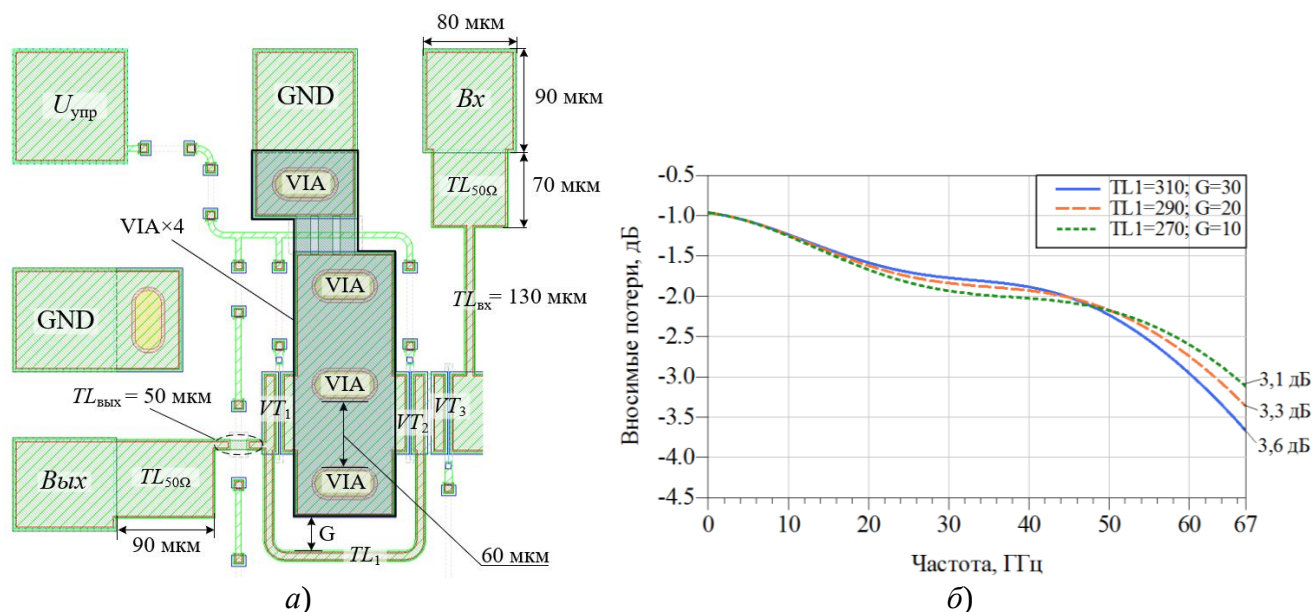


Рисунок 2.4 – Фрагмент разработанной топологии плеча переключателя (*a*) и влияние величины зазора (*G*) сигнальной линии TL_1 на уровень вносимых потерь (*б*)

Видно, что исходная топология (длина линии $TL_1 = 310$ мкм, зазор $G = 30$ мкм) обладает высокой распределенной индуктивностью, приводящей к росту вносимых потерь до 3,6 дБ на частоте 67 ГГц. Основным решением проблемы стало формирование выраженной копланарной структуры путем уменьшения зазора G до 10 мкм, что позволило сформировать погонную емкость, эффективно компенсирующую паразитную индуктивность длинной линии. Сопутствующее сокращение длины TL_1 до 270 мкм выступило дополнительным механизмом снижения общей индуктивности тракта. В результате удалось устранить рассогласование и минимизировать вносимые потери на 0,5 дБ (до 3,1 дБ) на верхней границе частотного диапазона. Найденные оптимальные топологические решения разработанной методики проектирования были применены при создании итоговых МИС переключателей отражающего (MP236) и поглощающего (MP237) типов. Размеры кристаллов составили $0,97 \times 0,93$ мм (рисунок 2.5).

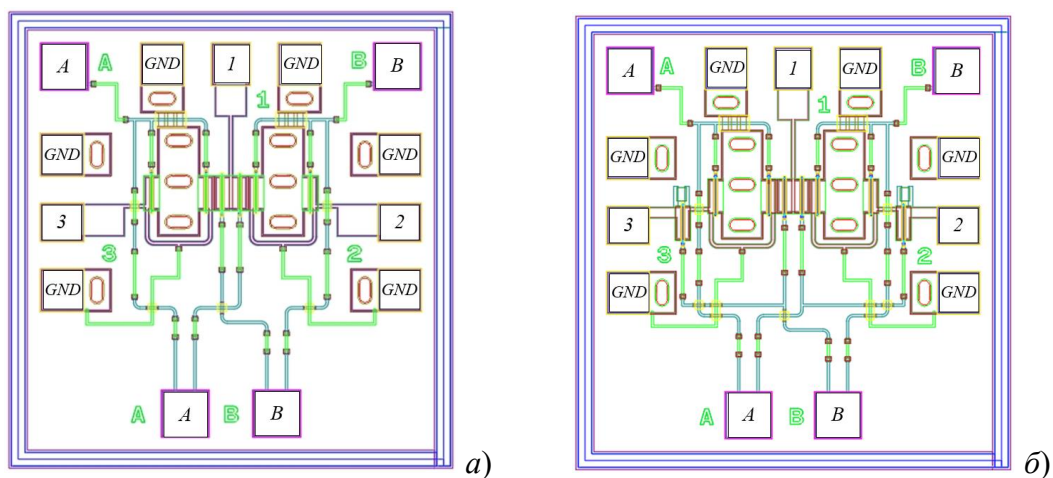


Рисунок 2.5 – Модели топологий МИС SPDT-переключателей: MP236 отражающего (а) и MP237 поглощающего (б) типов

Для верификации предложенной методики проектирования были изготовлены опытные образцы МИС (рисунок 2.5) и проведены измерения их S -параметров с использованием полуавтоматической зондовой станции и ВАЦ N5247B.

Результаты измерений характеристик переключателей в сравнении с расчетными данными ЭД-моделирования представлены на рисунке 2.6.

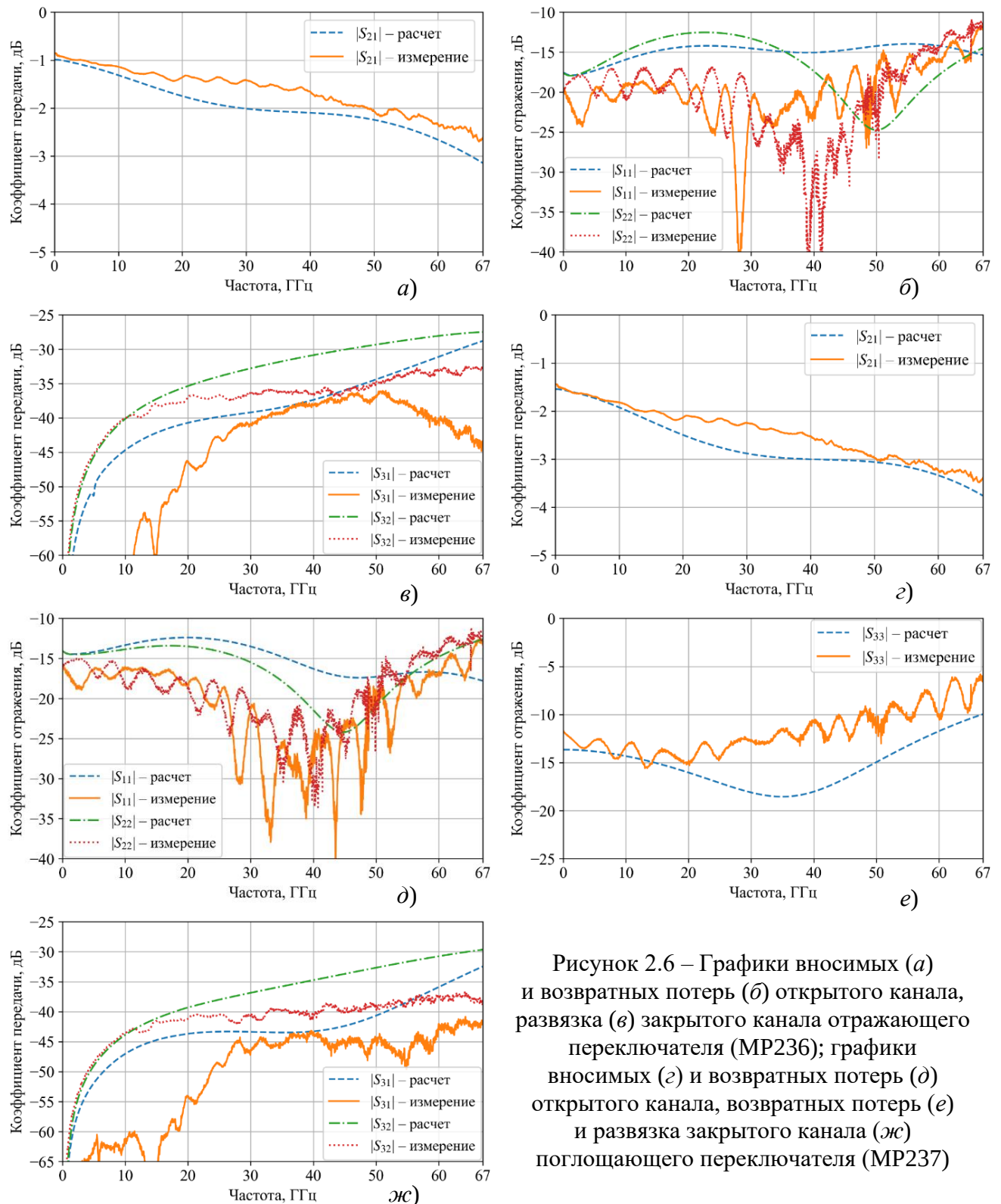


Рисунок 2.6 – Графики вносимых (а) и возвратных потерь (б) открытого канала, развязка (в) закрытого канала отражающего переключателя (MP236); графики вносимых (г) и возвратных потерь (д) открытого канала, возвратных потерь (е) и развязка закрытого канала (ж) поглощающего переключателя (MP237)

Сравнение расчетных и экспериментальных характеристик демонстрирует их общую сходимость. Измеренные значения межканальной развязки изготовленных образцов превзошли расчетные (достигнув 32–42 дБ на частоте 67 ГГц), а переключатель MP237 обеспечил полноценный режим поглощения ($K_{СВН} < 2$) в полосе частот до 50 ГГц. Объективное сравнение с мировыми GaAs-аналогами показывает,

что разработанный переключатель МР236 превосходит существующие решения в диапазоне до 67 ГГц по уровню вносимых потерь (2,7 дБ против 3,4 дБ) и межканальной развязки (более 32 дБ против 27 дБ), а коммутатор МР237 обеспечивает рекордную полосу рабочих частот до 50 ГГц с потерями менее 3 дБ и развязкой более 38 дБ на фоне аналогов, ограниченных полосой до 20–28 ГГц. Таким образом, достижение столь высоких экспериментальных характеристик в миллиметровом диапазоне стало прямым результатом применения разработанной методики комплексного схемотехнического и топологического проектирования.

3. Исследование и разработка диплексерных переключателей

В подразделе 3.1 сформулированы требования к разработке линейки диплексерных переключателей для частотного объединения в блоках формирования СВЧ-сигналов КИА. Обоснована необходимость создания трех МИС: двухканальной до 26 ГГц (частота разделения 18 ГГц), трехканальной до 50 ГГц (точки разделения 26 и 35 ГГц) и двухканальной до 67 ГГц (частота разделения 42 ГГц).

В качестве базовой схемы разработана архитектура двухканального PIN-диодного диплексерного переключателя в диапазоне частот до 26 ГГц (рисунок 3.1), ключевая особенность которой – применение разделительного конденсатора в виде распределенной структуры. Его верхняя обкладка функционирует как короткозамкнутый четвертьволновый шлейф $L_{\text{ш}}$, а нижняя выступает в роли линии передачи для низкочастотного канала, что совместно с параллельным включением двух шунтирующих PIN-диодов VD_1 и VD_2 обеспечивает достаточную межканальную развязку (S_{32}). По результатам ЭД-моделирования оптимальная физическая длина $L_{\text{ш}}$ составила 850 мкм, что существенно меньше аналитического значения (1,24 мм на частоте 22 ГГц). Такое укорочение компенсирует дополнительный фазовый набег на диодах и переходных отверстиях заземления, сохраняя работоспособность шлейфа и минимизируя габариты кристалла МИС до 1,9×1,3 мм.

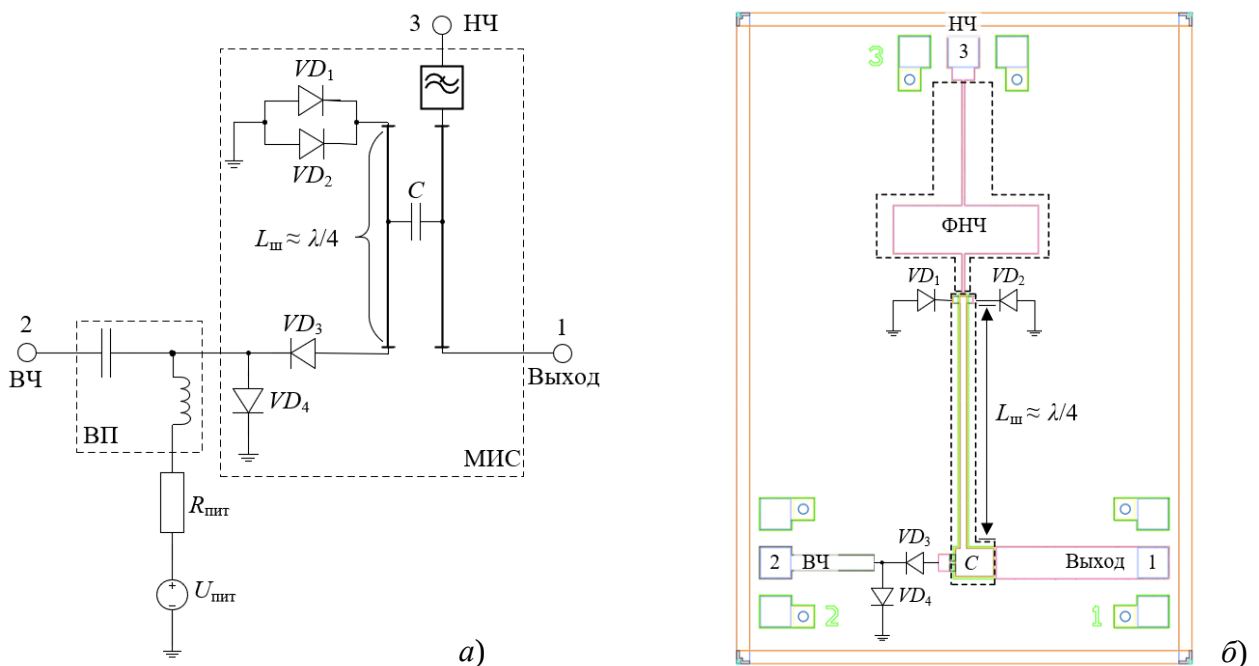


Рисунок 3.1 – Принципиальная схема (а) и электродинамическая модель топологии (б) диплексерного переключателя до 26 ГГц

На основе разработанной ЭД-модели были изготовлены опытные образцы МИС с использованием GaAs PIN-диодов с диаметром базы 26 мкм производства АО «НПФ «Микран». Экспериментальные исследования выполнялись на полупроводниковой пластине с использованием полуавтоматической зондовой станции и ВАЦ N5242A в диапазоне частот от 10 МГц до 26,5 ГГц при управляющих токах смещения ± 10 мА (рисунок 3.2). Анализ малосигнальных параметров подтверждает высокую достоверность расчетов. Измеренные вносимые потери в полосах пропускания составили 0,2–1,2 дБ для низкочастотного (НЧ) канала и 0,7–0,8 дБ для высокочастотного (ВЧ) канала. Возвратные потери активных портов превышают 9 дБ (более 20 дБ для ВЧ-канала), а межканальная развязка удерживается на уровне более 38 дБ и 25 дБ для режимов работы НЧ- и ВЧ-каналов соответственно.

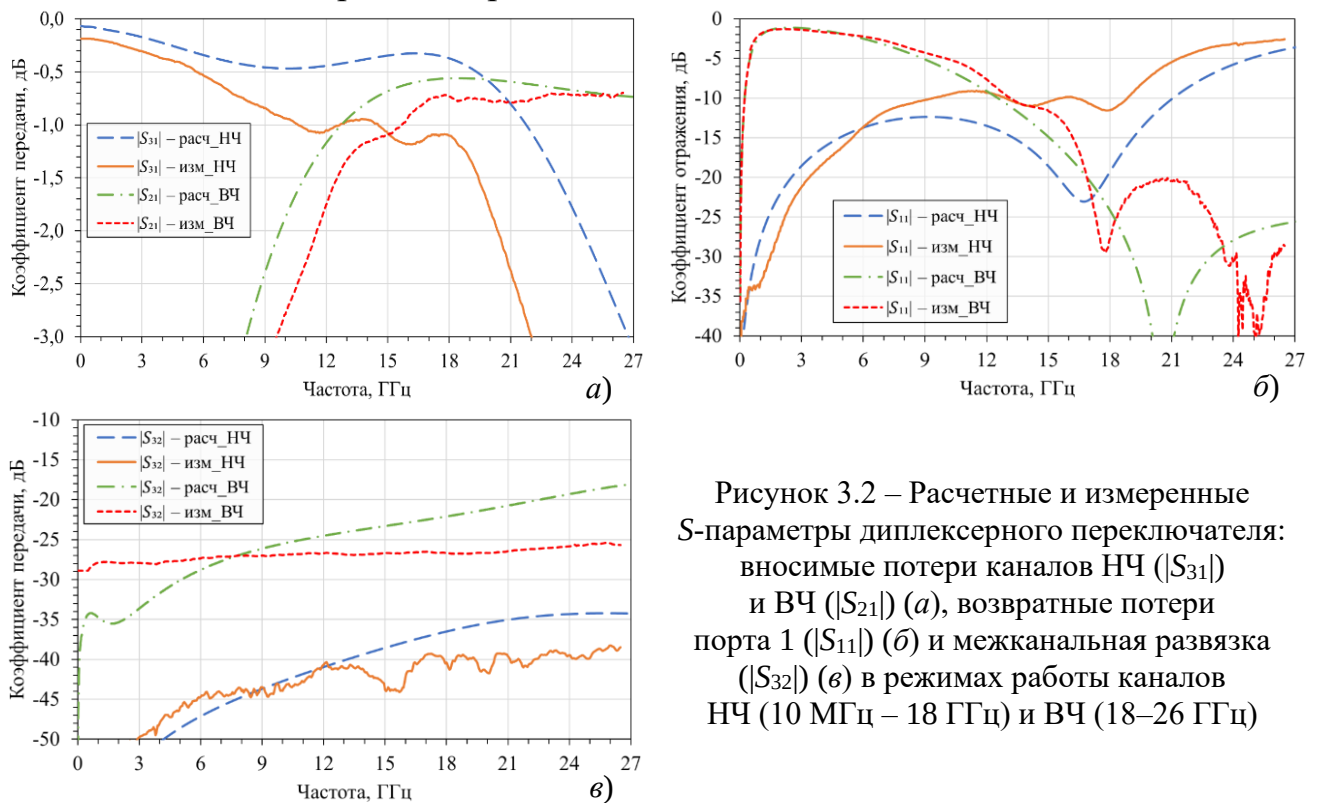


Рисунок 3.2 – Расчетные и измеренные S-параметры диплексерного переключателя: вносимые потери каналов НЧ ($|S_{31}|$) и ВЧ ($|S_{21}|$) (а), возвратные потери порта 1 ($|S_{11}|$) (б) и межканальная развязка ($|S_{32}|$) (в) в режимах работы каналов НЧ (10 МГц – 18 ГГц) и ВЧ (18–26 ГГц)

Однако экспериментальные исследования при повышенных уровнях входной мощности (15–20 дБм) выявили критический недостаток базовой топологии: мощный СВЧ-сигнал вызывает паразитное отпирание шунтирующих диодов. Данный эффект приводит к кратковременному шунтированию тракта и недопустимому снижению линейности (компрессии). Для обеспечения линейного режима работы диплексера при высоких уровнях мощности (20 дБм и выше) базовая схема была модернизирована (рисунок 3.3). Введение независимого источника напряжения U_2 и блокировочного конденсатора C_2 позволило подавать запирающее смещение на шунтирующие диоды VD_1 и VD_2 . Сформированный потенциальный барьер полностью предотвратил их паразитное отпирание мощным СВЧ-сигналом. Дополнительно, для повышения межканальной развязки, в модернизированной схеме реализован принцип двухзвенного шунтирования. Точки подключения диодов VD_1 и VD_2 разнесены вдоль четвертьволновой линии, формируя двухзвенную структуру, что обеспечивает каскадное отражение паразитного сигнала. Разработанная на базе предложенных решений топология модернизированной МИС имеет физи-

ческую длину основного шлейфа $L_{ш1}$ равную 1050 мкм. Ее сокращение относительно аналитического расчета (1240 мкм) также обусловлено влиянием заземляющей цепи, а введение дополнительного соединительного отрезка $L_{ш2}$ (100 мкм) обеспечило требуемое пространственное разнесение диодов. Размер кристалла составил $1,9 \times 1,3$ мм при диаметре базы диодов 20 мкм.

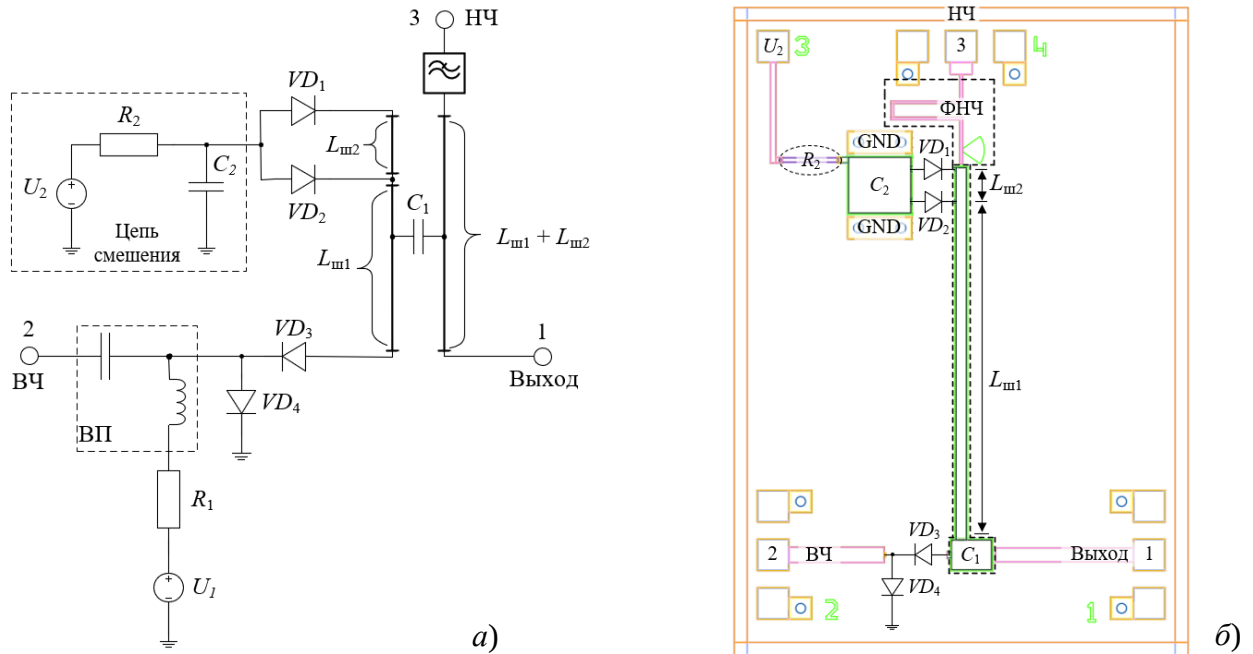


Рисунок 3.3 – Принципиальная схема (а) и электродинамическая модель модернизированной топологии (б) диплексерного переключателя до 26 ГГц

Для оценки эффективности данной модернизации было выполнено исследование нелинейных искажений переключателя в режиме большого сигнала, а также анализ улучшения межканальной развязки (рисунок 3.4). Критерием линейности выбран строгий порог входной мощности при компрессии на 0,1 дБ ($P_{0,1\text{дБ}}$).

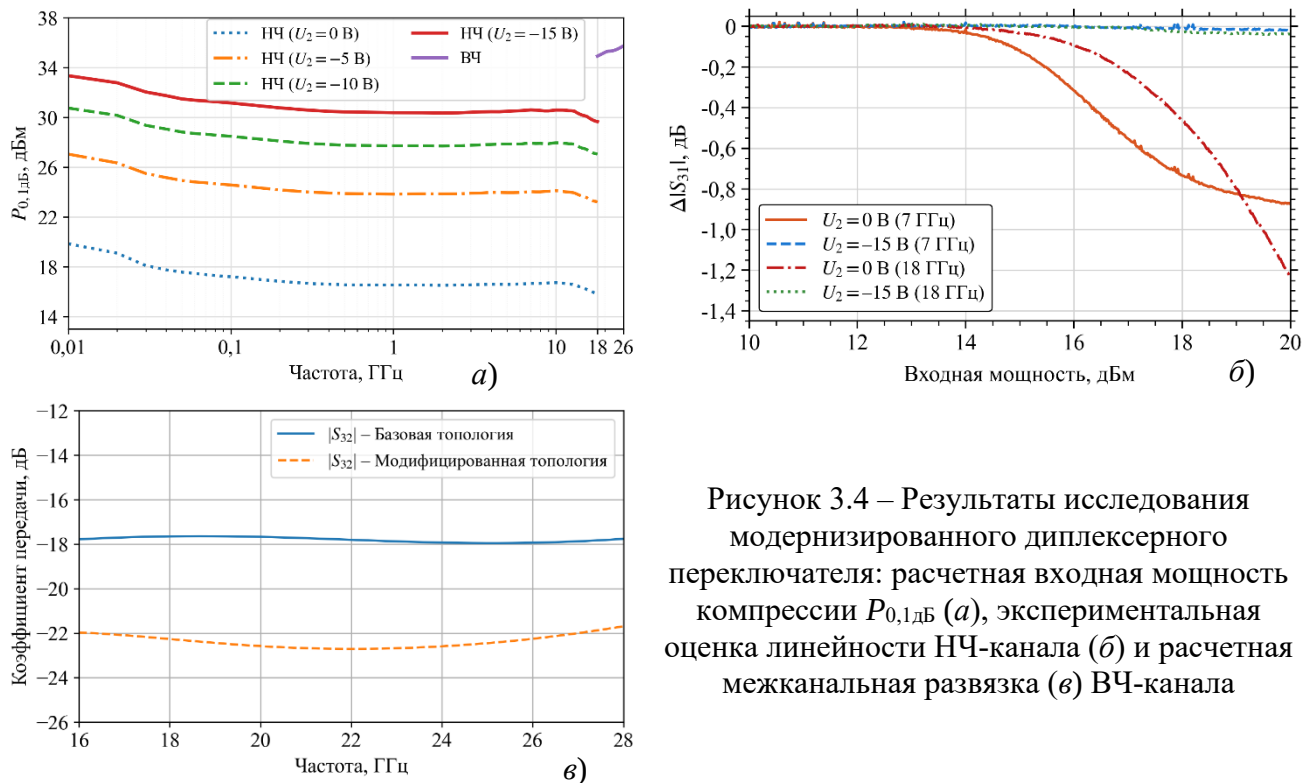


Рисунок 3.4 – Результаты исследования модернизированного диплексерного переключателя: расчетная входная мощность компрессии $P_{0,1\text{дБ}}$ (а), экспериментальная оценка линейности НЧ-канала (б) и расчетная межканальная развязка (в) ВЧ-канала

Анализ расчетных зависимостей (рисунок 3.4, а) подтверждает, что при нулевом смещении амплитуда СВЧ-сигнала приводит к паразитному детектированию, ограничивая порог $P_{0,1\text{дБ}}$ значением около 16 дБм. Подача оптимального запирающего напряжения ($U_2 = -15$ В) предотвращает отпирание шунтирующих диодов, что расширяет линейный динамический диапазон НЧ-канала до стабильного уровня ≥ 29 дБм во всей полосе частот. Экспериментальная верификация (рисунок 3.4, б) подтвердила результаты нелинейного моделирования. При нулевом смещении зафиксирована компрессия коэффициента передачи из-за паразитного отпирания диодов. В оптимальном режиме ($U_2 = -15$ В) экспериментальная характеристика сохранила строгую линейность вплоть до максимального уровня измерительного стенда (20 дБм). Отсутствие компрессии при мощности 20 дБм верифицирует адекватность модели. Дополнительно результаты ЭД-моделирования (рисунок 3.4, в) показали, что реализованная двухзвенная структура обеспечивает каскадное отражение паразитного сигнала. Это позволило равномерно повысить межканальную развязку в рабочей полосе 18–26 ГГц на 4–5 дБ (до уровня 22–23 дБ) по сравнению с базовой схемой с одной точкой шунтирования (рисунок 3.1).

Разработанная модернизированная схема послужила основой для создания унифицированного ряда МИС. С использованием той же технологии были реализованы высокочастотные варианты диплексерных переключателей – трехканальный с диапазоном частот до 50 ГГц и двухканальный до 67 ГГц.

В подразделе 3.2 представлена разработка диплексерного переключателя для приемных блоков КИА. Для объединения низкочастотного (от постоянного тока до 4 ГГц) и многооктавного высокочастотного (4–50 ГГц) каналов предложена архитектура с сосредоточенными элементами (рисунок 3.5). В качестве коммутационного элемента применены полевые транзисторы с барьером Шоттки (ПТШ) – GaAs 0,1 мкм рНЕМТ. Управление ПТШ осуществляется напряжением, что позволяет обеспечить работу НЧ-канала от постоянного тока без использования разделительных конденсаторов. Отказ от узкополосных шлейфов в пользу сосредоточенной LC-структуры обеспечивает работу ВЧ-канала в полосе частот порядка 4 октав.

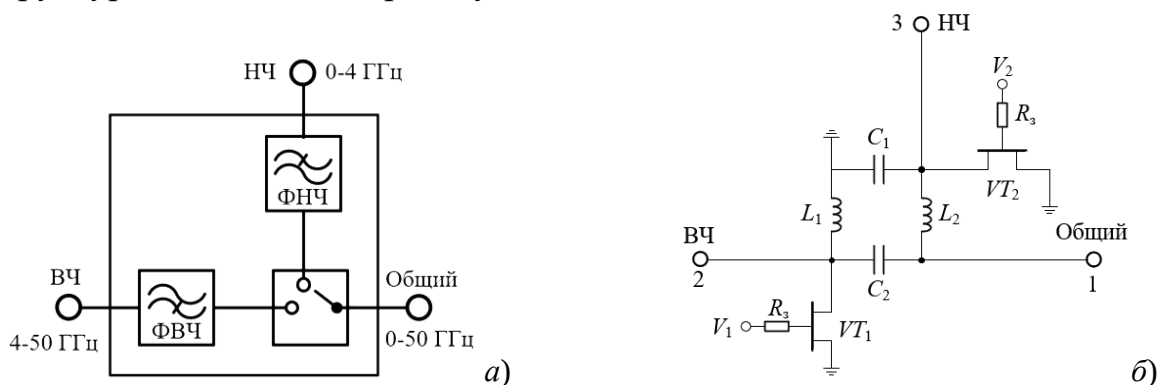


Рисунок 3.5 – Структурная (а) и принципиальная (б) схемы диплексерного переключателя

При проектировании топологии на основе библиотечных элементов выявлено ухудшение межканальной развязки из-за паразитных реактивностей ПТШ и пассивных компонентов. Для компенсации реактивностей схема была модифицирована: повышен порядок фильтров, добавлены дополнительные коммутационные ПТШ (рисунок 3.6). Критической задачей при трассировке стала реализация ВЧ-канала до 50 ГГц при низкой частоте среза 4 ГГц. Использование стандартных пла-

нарных катушек приводило к росту паразитной межвитковой емкости. Для решения этой проблемы была применена топологическая оптимизация геометрии катушек с увеличением шага между витками. Это позволило сместить их собственный резонанс за пределы 50 ГГц. Изготовленные экспериментальные образцы МИС (размер кристалла 1,26×1,14 мм) были исследованы на зондовой станции с использованием ВАЦ CEYEAR 3674L в диапазоне частот 10 МГц – 55 ГГц (рисунок 3.7).

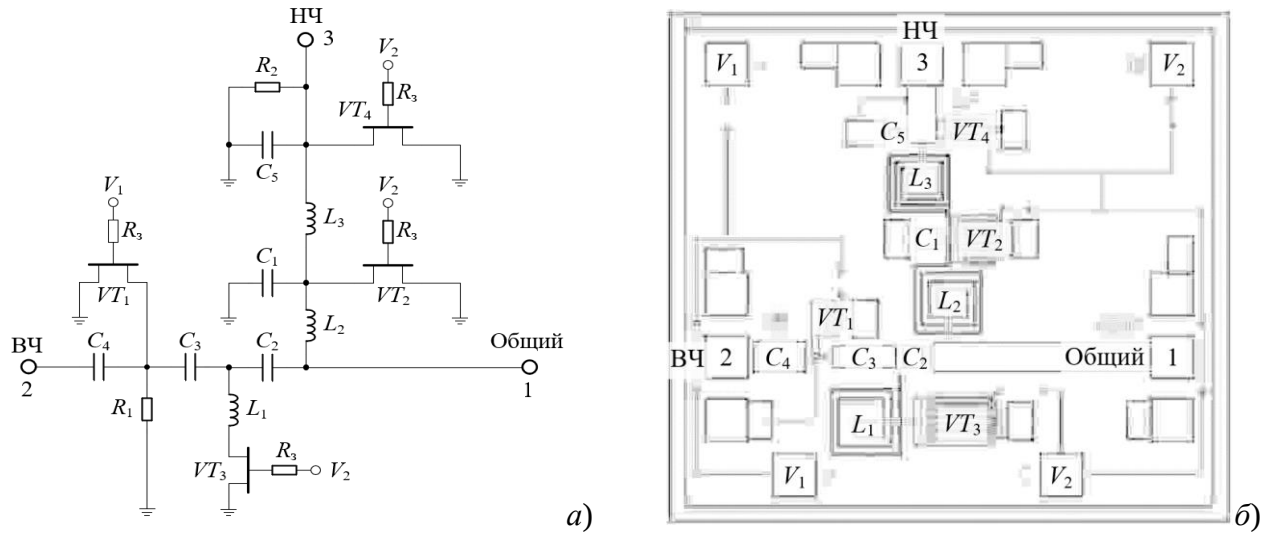


Рисунок 3.6 – Модифицированная принципиальная схема (а) и разработанная модель топологии (б) диплексерного переключателя диапазона 0–50 ГГц

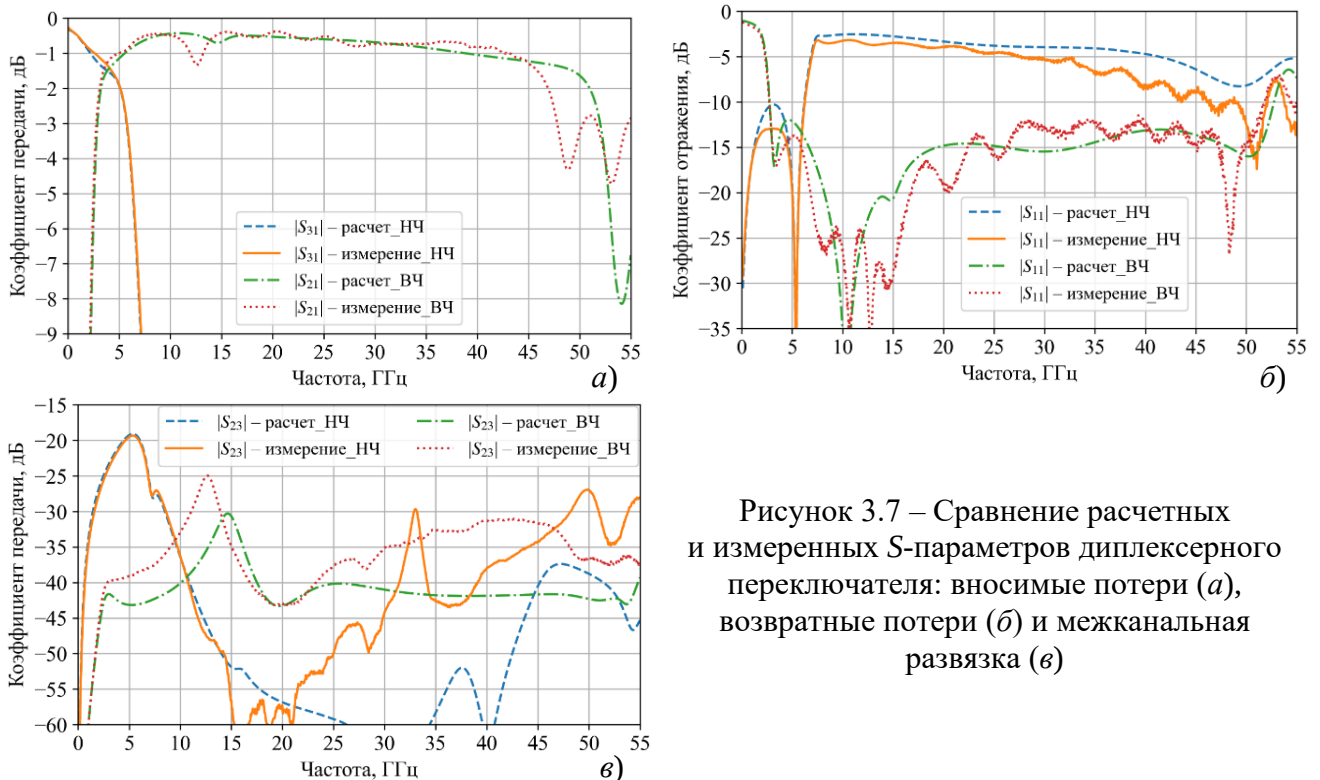


Рисунок 3.7 – Сравнение расчетных и измеренных S -параметров диплексерного переключателя: вносимые потери (а), возвратные потери (б) и межканальная развязка (в)

Результаты измерений хорошо согласуются с ЭД-моделью. Вносимые потери в НЧ-канале практически полностью совпадают с расчетными (максимум 1,4 дБ). В ВЧ-канале локальный резонанс, ожидаемый по расчету на 54 ГГц, на практике сместился к 49 ГГц (с потерями 4,3 дБ) из-за влияния неучтенных паразитных связей реальной топологии. В итоге во всем рабочем диапазоне 0–50 ГГц экспериментально подтверждены требуемые характеристики: межканальная развязка более

21 дБ, возвратные потери более 12 дБ, вносимые потери менее 4,3 дБ (в полосе частот до 45,5 ГГц – менее 1,4 дБ).

В подразделе 3.3 представлены результаты экспериментального исследования разработанной МИС диплексерного переключателя в составе приемного блока анализатора спектра. Ключевым требованием для входных цепей таких приборов является обеспечение предельно высокой линейности, поскольку вторая гармоника ($2f_0$) коммутатора напрямую ограничивает динамический диапазон прибора и создает ложные отклики при спектральном анализе. Измерительный стенд представлен на рисунок 3.8. Измерения проводились при входной мощности тестового сигнала –10 дБм в диапазоне частот основного тона 2–18 ГГц. Экспериментальные данные продемонстрировали высокую сходимость с нелинейной расчетной моделью. В НЧ-канале (2–3,5 ГГц) измеренное подавление составило от 98 до 103,2 дБн, а в ВЧ-канале (4–18 ГГц) – от 97 до 112,5 дБн. Полученные результаты подтверждают, что во всех контрольных точках разработанный диплексерный переключатель с запасом удовлетворяет строгим требованиям методики поверки измерительной аппаратуры (подавление > 90 дБн).

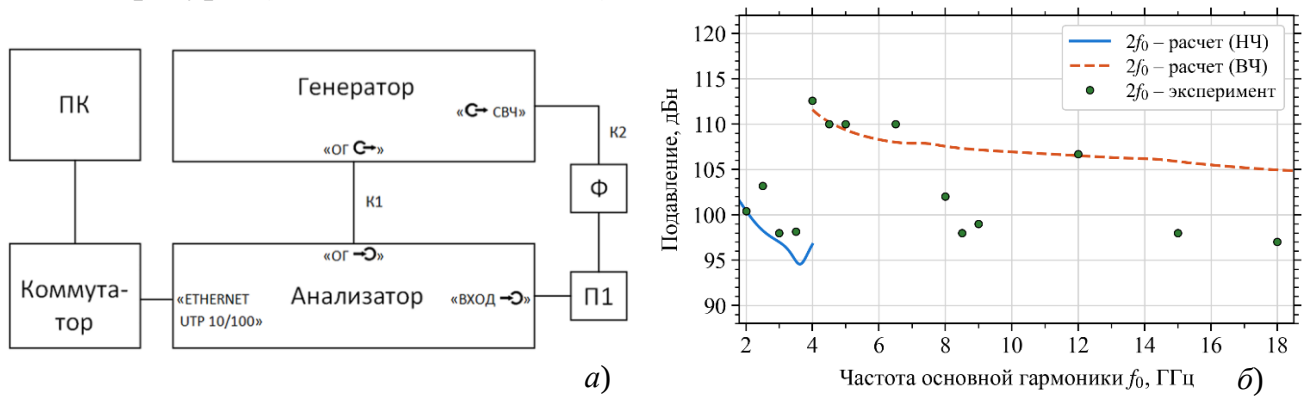


Рисунок 3.8 – Структурная схема измерительного стенда (а) и сопоставление расчетных и экспериментальных характеристик подавления второй гармоники переключателя (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача, имеющая существенное значение для развития отечественной радиоэлектронной промышленности – разработка и оптимизация схмотехнических и топологических решений для создания сверхширокополосных коммутационных МИС, обеспечивающих повышение предельных характеристик КИА нового поколения. На основании результатов проведенных исследований сформулированы следующие основные выводы:

1. Разработана МИС SPDT-переключателя поглощающего типа для диапазона частот от 10 МГц до 26,5 ГГц. Использование архитектуры на основе транзисторов с различной периферией затвора позволило снизить вносимые потери до уровня менее 2 дБ при достаточном уровне межканальной развязки более 27 дБ, сформировав схмотехнический базис для перехода к распределенным сверхширокополосным структурам с расширением рабочей полосы вплоть до миллиметрового диапазона длин волн.

2. Сформирована поэтапная методика и разработаны топологические решения для проектирования сверхширокополосных SPDT-переключателей миллиметрового диапазона длин волн на базе технологии GaAs pHEMT. За счет выбора транзисторов с минимизированной периферией для снижения паразитной емкости закрытого канала и применения распределенной архитектуры расширена верхняя граница рабочих частот. Предложен и верифицирован механизм топологической компенсации паразитных реактивностей, основанный на комплексной минимизации паразитной индуктивности сигнальных линий и цепей заземления, что позволило устранить рассогласование СВЧ-тракта в диапазоне 50–67 ГГц.

3. Экспериментально подтверждена эффективность предложенных решений на изготовленных опытных образцах МИС отражающего и поглощающего типов. Для разработанных устройств в диапазоне частот до 67 ГГц достигнут уровень межканальной развязки более 32 дБ при вносимых потерях менее 3,4 дБ, что превосходит показатели зарубежных GaAs-аналогов. Впервые для коммерческих решений на базе GaAs реализован режим согласования закрытого порта в полосе до 50 ГГц. Проведенные измерения подтвердили высокие мощностные характеристики устройств: экспериментальный уровень входной мощности компрессии при сжатии на 1 дБ в основной рабочей полосе частот составляет 21–23,5 дБм.

4. Исследована и модернизирована схемотехника диплексерных переключателей на базе PIN-диодов. Предложенный принцип с интеграцией двухзвенной структуры четвертьволнового шлейфа в единую структуру топологического конденсатора, а также введение цепи запирающего смещения диодов позволил реализовать масштабируемую линейку МИС. Разработанные устройства обеспечивают коммутацию сигналов в сверхширокой полосе частот для блоков формирования СВЧ-сигналов КИА от постоянного тока до 26, 50 и 67 ГГц соответственно с экспериментально подтвержденным уровнем линейности более 20 дБм при расчетном потенциале модели свыше 29 дБм.

5. Предложена сосредоточенная структура диплексерного переключателя на полевых транзисторах, позволившая снять ограничения на октавную полосу пропускания высокочастотного канала. На ее основе спроектирована и изготовлена МИС, обеспечивающая эффективное мультиплексирование в диапазонах 0–4 ГГц и 4–50 ГГц для приемных блоков КИА. Испытания в составе СВЧ-модуля анализатора спектра экспериментально подтвердили высокую линейность разработанного устройства с подавлением второй гармоники более 97 дБн при входной мощности –10 дБм в диапазоне частот основного тона 2–18 ГГц.

6. Практическая значимость предложенных в диссертации схемотехнических и топологических решений подтверждается их успешным внедрением в реальные образцы коммерческой аппаратуры, а их мировая новизна защищена соответствующими патентами Российской Федерации и свидетельствами о государственной регистрации топологий интегральных микросхем.

Рекомендации

1. Предложенную методику (подраздел 2.2) схемотехнического и топологического проектирования трактов переключателей, основанную на использовании заземления через группу переходных отверстий и компенсации индуктивности сиг-

нальных линий за счет емкости копланарного зазора, рекомендуется применять при проектировании и электродинамическом моделировании сверхширокополосных СВЧ-коммутаторов на частотах свыше 40 ГГц. Использование данной методики обеспечивает комплексную минимизацию паразитных реактивностей схемы, что позволяет существенно улучшить предельные характеристики МИС (снизить вносимые потери и увеличить межканальную развязку) при освоении миллиметрового диапазона длин волн.

2. При проектировании диплексерных переключателей на базе PIN-диодов с четвертьволновыми шлейфами (подраздел 3.1) в диапазоне частот вплоть до 67 ГГц необходимо учитывать выявленную при топологическом моделировании закономерность: требуемая физическая длина шлейфа оказывается меньше его теоретической расчетной длины на 15–40 % из-за дополнительного фазового набега элементов заземляющей цепи. Данные структуры целесообразно применять для коммутации сигналов в октавных полосах частот ВЧ-канала при разработке блоков формирования СВЧ-сигналов контрольно-измерительной аппаратуры.

3. Предложенную структуру диплексерного переключателя (подраздел 3.2) на основе коммутационных полевых транзисторов и сосредоточенных *LC*-фильтров рекомендуется использовать для реализации многооктавного высокочастотного канала. Отказ от узкополосных распределенных шлейфов позволяет снять ограничения на ширину полосы пропускания, в связи с чем данное топологическое решение оптимально для применения в сверхширокополосных приемных трактах измерительной аппаратуры, включая современные анализаторы спектра и векторные анализаторы цепей.

Перспективы дальнейшей разработки темы

1. Совершенствование предложенной методики для минимизации влияния паразитных реактивностей схемы на частотах свыше 50 ГГц с целью реализации МИС переключателей с поглощающим режимом работы до 67 ГГц. В более отдаленной перспективе целесообразно применение разработанных принципов синтеза коммутационных цепей для освоения W-диапазона (до 110 ГГц).

2. Адаптация предложенных диплексерных коммутационных архитектур для технологии SOI с целью интеграции СВЧ-трактов и цифровых цепей управления на едином кристалле. Кроме того, для задач кратного увеличения коммутируемой мощности в диапазоне частот до 30 ГГц целесообразна адаптация схем под технологию GaN.

3. Дальнейшее развитие предложенных базовых SPDT-структур для разработки многоканальных коммутаторов (SP4T, SP8T) с целью создания многопортовых комплексов калибровки на основе многопозиционных МИС переключателей. Исследования в этой области потребуют развития методик минимизации паразитной электромагнитной связи между плотно расположенными каналами.

4. Модернизация топологии диплексерного переключателя на основе полевых транзисторов для повышения верхней граничной частоты канала. Достижение данной цели потребует минимизации паразитных параметров топологических катушек индуктивности, в частности, за счет внедрения цепей коррекции.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах из перечня ВАК по специальности 2.2.14

1. Сверхширокополосный рin-диодный диплексерный переключатель на GaAs / **И. В. Хмара**, Д. С. Данилов, В. Н. Гребенюк, А. С. Загородний, С. Н. Шарангович // Доклады ТУСУР. – 2023. – Т. 26, № 3. – С. 27–31. – DOI 10.21293/1818-0442-2023-26-3-27-31.
2. SPDT-переключатели отражающего и поглощающего типа диапазона частот от 10 МГц до 67 ГГц на технологии 0,1 мкм GaAs-pHEMT / **И. В. Хмара**, Д. С. Данилов, А. С. Загородний, С. Н. Шарангович // Доклады ТУСУР. – 2025. – Т. 28, № 3. – С. 7–13. – DOI 10.21293/1818-0442-2025-28-3-7-13.
3. Сверхширокополосный диплексерный переключатель диапазона 0–50 ГГц для контрольно-измерительной аппаратуры / **И. В. Хмара**, Д. С. Данилов, А. С. Загородний, С. Н. Шарангович // Доклады ТУСУР. – 2026. – Т. 29, № 1. – С. 75–81. – DOI 10.21293/1818-0442-2026-29-1-75-81.
4. GaAs pHEMT усилитель распределенного усиления с диапазоном рабочих частот от 10 МГц до 35 ГГц / Д. С. Данилов, Ц. М. Батоев, Ю. А. Ламанов, **И. В. Хмара**, А. С. Загородний // Успехи современной радиоэлектроники. – 2026. – Т. 80, № 4. – С. 98–107. – DOI 10.18127/j20700784-202604-10.

Доклады в трудах международных конференций

5. Оценка параметров электронного калибратора для векторного анализатора цепей / **И. В. Хмара**, В. Г. Нечаев, Д. С. Данилов, А. С. Загородний, О. В. Кравченко // Научная сессия ТУСУР-2022: материалы междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: В-Спектр, 2022. – В 3 ч. – Ч. 1. – С. 74–78.
6. Схемное решение для сверхширокополосных переключаемых GaAs pin-диодных диплексеров / **И. В. Хмара**, В. Н. Гребенюк, Д. С. Данилов, А. С. Загородний, С. Н. Шарангович // Научная сессия ТУСУР-2023: сб. избр. ст. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – В 3 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2023. – С. 72–77.
7. **Хмара, И. В.** SPDT-переключатель поглощающего типа диапазона частот 0,01-20 ГГц на технологии 0,15 мкм GaAs-pHEMT / **И. В. Хмара** // Электронные средства и системы управления: материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2025. – № 1-1. – С. 140–142.

Патент на изобретение

8. Патент № 2832689 С1 Российская Федерация, МПК G01R 23/165, H01P 1/15. Сверхширокополосный рin-диодный диплексерный переключатель : № 2024114564 : заявл. 29.05.2024 : опубл. 27.12.2024 / Гребенюк В. Н., Данилов Д. С., Загородний А. С., **Хмара И. В.**, Парханюк А. Н. – 8 с.

Свидетельства о государственной регистрации ТИМС

9. Св-во о гос. регистрации ТИМС № 2024630079. Переключатель диплексерный MD229V02 : № 2024630074 : заявл. 16.04.2024 : зарег. в Реестре ТИМС 23.04.2024 / Данилов Д. С., Гребенюк В. Н., **Хмара И. В.**

10. Св-во о гос. регистрации ТИМС № 2024630080. Переключатель диплексерный MD230V02 : № 2024630075 : заявл. 16.04.2024 : зарег. в Реестре ТИМС 23.04.2024 / Данилов Д. С., Гребенюк В. Н., **Хмара И. В.**

11. Св-во о гос. регистрации ТИМС № 2024630271. Переключатель МР233 : № 2024630284 : заявл. 04.12.2024 : зарег. в Реестре ТИМС 11.12.2024 / **Хмара И. В.**, Батоев Ц. М., Гребенюк В. Н., Ламанов Ю. А.

12. Св-во о гос. регистрации ТИМС №2025630182. Переключатель МР236 : № 2025630180 : заявл. 14.07.2025 : зарег. в Реестре ТИМС 24.07.2025 / **Хмара И. В.**, Данилов Д. С., Загородний А. С., Гребенюк В. Н.

13. Св-во о гос. регистрации ТИМС №2025630135. Переключатель МР237 : № 2025630128 : заявл. 23.05.2025 : зарег. в Реестре ТИМС 02.06.2025 / **Хмара И. В.**, Данилов Д. С., Загородний А. С., Гребенюк В. Н.

14. Св-во о гос. регистрации ТИМС №2026630158. Калибратор электронный ЕСАЛ-67 : № 20256630152 : заявл. 01.07.2026 : зарег. в Реестре ТИМС 08.07.2026 / **Хмара И. В.**, Данилов Д. С., Батоев Ц. М., Левковский А. Е.

15. Св-во о гос. регистрации ТИМС № 2026630159. Переключатель диплексерный DIP-4 : № 2026630153 : заявл. 01.07.2026 : зарег. в Реестре ТИМС 08.07.2026 / **Хмара И. В.**, Данилов Д. С., Гребенюк В. Н.