

На правах рукописи



Коряковцев Артём Сергеевич

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА
ИНТЕГРАЛЬНЫХ ТРАНСИМПЕДАНСНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ
ДЛЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ОПТИЧЕСКИХ ПРИЕМНИКОВ**

2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Томск – 2024

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

- Научный руководитель: **Бабак Леонид Иванович**,
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры компьютерных систем в управлении
и проектировании, ТУСУР.
- Официальные оппоненты: **Разинкин Владимир Павлович**,
доктор технических наук, профессор, профес-
сор кафедры теоретических основ радиотех-
ники ФГБОУ ВО «Новосибирский государ-
ственный технический университет»;
Антипов Владимир Борисович,
кандидат физико-математических наук,
инженер-исследователь лаборатории меди-
цинских сплавов и имплантатов с памятью
формы ФГАОУ ВО «Национальный исследо-
вательский Томской государственный универ-
ситет».
- Ведущая организация: Общество с ограниченной ответственностью
«Центр инновационных разработок ВАО»
(«Инноцентр ВАО»), г. Москва.

Защита состоится 31 января 2025 г. в 09 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.02, созданного на базе ТУСУР, по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, каб. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУР и на сайте: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/pder251p>.

Автореферат разослан « ____ » декабря 2024 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



А.Е. Мандель

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и состояние проблемы. Широкополосные СВЧ трансимпедансные усилители (ТИУ) являются одним из важных блоков при построении волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) аналоговых и цифровых сигналов, которые содержат оптические приемники (ОПрм) и передатчики и используются в современных системах гражданского и специального назначения. Характеристики ТИУ во многом определяют такие важнейшие параметры ОПрм, как чувствительность, скорость передачи данных, полоса пропускания, дальность связи, энергопотребление, габариты и масса, надежность и стоимость. Для обеспечения требований по скорости передачи (до 400 Гбит/с и выше) в современных ВОСП полоса пропускания одного канала достигает нескольких десятков гигагерц, используется уплотнение каналов, новые способы модуляции и др.

На настоящий момент отечественные серийные оптические приемо-передатчики строятся на основе дискретных компонентов (лазерных диодов - ЛД, фотодиодов - ФД, оптических модуляторов и усилителей из ниобата лития, корпусированных СВЧ усилителей и др.), их скорости передачи не превышают 2,5 Гбит/с. В то же время за рубежом производятся оптические приемопередающие модули с использованием оптоэлектронных компонентов, фотонных и СВЧ интегральных схем (ИС) на базе интегральных полупроводниковых технологий. Такой подход имеет много преимуществ, включая повышение быстродействия (до 10-25-40-100-400 Гбит/с), расширение одноканальной полосы частот (до 25-50 ГГц), снижение массогабаритных характеристик, мощности потребления и др. Однако в России выпуск подобных серийных и даже экспериментальных образцов на отечественной ЭКБ отсутствует, имеется лишь производство ОПМ из готовых узлов иностранного производства.

За рубежом широко применяются ИС ТИУ на базе радиочастотных (РЧ) КМОП и SiGe БиКМОП полупроводниковых технологий, так как, помимо широкой полосы частот и высокого быстродействия (до 40 Гбит/с и более для одного канала), они имеют также низкие стоимость и энергопотребление. Наилучшими характеристиками обладают ИС ТИУ на основе SiGe БиКМОП технологии благодаря возможности применения СВЧ гетеробиполярных транзисторов (ГБТ) с очень хорошими частотными и шумовыми свойствами. К сожалению, в России РЧ технологии SiGe БиКМОП отсутствуют, а выпускаемые модули оптических приемников (ОПрм) для быстродействующих цифровых и широкополосных аналоговых систем приема-передачи данных используют готовые зарубежные микросхемы. Но в последнее время за рубежом ИС ТИУ все чаще проектируются на РЧ КМОП технологиях, что значительно дешевле SiGe при массовом выпуске чипов. Существуют также немногочисленные зарубежные реализации ИС ТИУ на базе технологий GaAs рНЕМТ полевых транзисторов (ПТ), они проигрывают в степени интеграции, габаритах и энергопотреблении. В то

же время необходимо обратить внимание на такие техпроцессы, так как они освоены на отечественных производствах.

В России имеются 180 нм и 90 нм РЧ КМОП технологии, последняя применительно к СВЧ диапазону все еще проходит стадию верификации и тестирования, но тем не менее обладает характеристиками, достаточными для получения типовых параметров СВЧ интегральных устройств в полосе частот до 15-20 ГГц. Однако до сих пор работы по созданию на базе этих КМОП технологий отечественных ИС СВЧ ТИУ с полосами пропускания выше 3 ГГц в нашей стране не проводились.

Анализ характеристик ОПрм и ТИУ рассмотрен в монографиях и публикациях А.Б. Иванова, А.С. Семенова, В.Н. Ушакова, В.Н. Урядова, В.П. Валюхова, В.Д. Купцова, Д.Ф. Зайцева, Э.А. Шевцова, М.Е. Белкина, О.А. Татаркиной, С. Персоника, Т. Муои, Дж. Агравала, Дж. Гауэра, М. Сиблея, Р. Фримана и др. Вопросы проектирования интегральных СВЧ ОПрм и ТИУ с полосами частот свыше 3-5 ГГц в основном представлены в работах зарубежных авторов Э. Сэкинджера, Б. Разави, Дж. Гао, М. Стюарта, Ф. Таверниера, Ф. Азнара, С. Войнигеску, М. Ингельса, Б. Циммермана и др.

Однако существующие подходы и методики являются либо слишком упрощенными, что ведет к большим погрешностям результатов в СВЧ диапазоне, либо ориентированы на решение отдельных частных задач проектирования СВЧ ТИУ. В известной литературе отсутствует систематический подход к анализу и проектированию СВЧ ТИУ, который, с одной стороны, был бы одинаково применим к разным схемам усилительных каскадов и, с другой стороны, обеспечил бы достаточную точность в СВЧ диапазоне.

Кроме того, анализ СВЧ ТИУ является неполным – основное внимание уделено исследованию коэффициента трансимпедансного усиления (КТУ) и шумовых параметров, но недостаточно рассмотрены групповое время запаздывания, частотные зависимости входного и выходного импедансов, а также вопросы устойчивости и чувствительности характеристик усилителей к изменению параметров элементов.

Таким образом, задачи разработки ИС СВЧ ТИУ для быстродействующих оптических приемников со скоростями передачи данных до 20 Гбит/с на современных полупроводниковых технологиях, в том числе отечественных, а также создания эффективных методик исследования и проектирования таких устройств *являются актуальными.*

В настоящее время подходы к исследованию и проектированию интегральных СВЧ ОПрм чаще всего основаны на представлении ТИУ или активных элементов в его составе в виде идеального усилительного блока, к которому могут быть подключены ФД, а также цепи коррекции и (или) отрицательной обратной связи. Однако подобный идеализированный подход не обеспечивает нужной точности анализа и расчета СВЧ ОПрм и ТИУ уже на частотах в несколько гигагерц.

Еще в 30-х годах прошлого века отечественным ученым Г.В. Брауде применительно к ламповым телевизионным видеоусилителям был предложен систематический аналитический подход, основанный на представлении активных элементов (АЭ - в данном случае ламп) эквивалентными схемами (ЭС). Он позволил с использованием аналитических выражений выполнить не только анализ, но и расчет элементов разных усилительных схем. Такой подход до 70-х годов применялся также к широкополосным транзисторным усилителям на дискретных элементах (И.Н. Пустынский и др.). Но при освоении в конце 60-х – начале 70-х годов дискретными транзисторами СВЧ диапазона их ЭС стали слишком сложными, что сделало практически невозможным применение аналитических подходов.

Изготовленные на основе современных полупроводниковых технологий с малыми технологическими нормами интегральные СВЧ транзисторы (в частности, Si МОП ПТ, SiGe ГБТ и др.) имеют малые размеры и соответственно малые величины паразитных параметров. Логично предположить, что в связи с этим они могут до определенных частот СВЧ диапазона описываться более простыми ЭС, чем дискретные приборы.

В некоторых публикациях были предприняты попытки применения при анализе СВЧ усилителей также упрощенных линейных ЭС интегральных полевых транзисторов. Однако такие модели использовались лишь для качественного анализа и оценки влияния отдельных элементов ЭС на характеристики самих транзисторов либо усилителей, в то же время окончательный анализ характеристик на частотах свыше 5-10 ГГц выполнялся на основе полных ЭС ПТ. В связи со сказанным целесообразно исследовать точность моделей СВЧ ПТ и БТ в виде упрощенных ЭС. Положительные результаты такого исследования открывают широкие возможности, которые предоставляет аналитический подход к проектированию интегральных СВЧ усилителей и, в частности, широкополосных ТИУ.

При этом в качестве единой систематической основы для проектирования широкополосных интегральных ТИУ, выполненных по разным схемам, может быть взят метод частотной коррекции Г.В. Брауде. Но этот метод Г.В. Брауде должен быть адаптирован и усовершенствован применительно к конкретным задачам анализа и расчета одно- и многокаскадных интегральных СВЧ ТИУ, в том числе на МОП-транзисторах и ГБТ.

В частности, в ОПм с многокаскадными ТИУ становится возможным дополнительно улучшить шумовые характеристики, применив противозумовую коррекцию (ПШК), тоже впервые предложенную Г.В. Брауде. Однако классический метод Г.В. Брауде позволяет рассчитать устройства с максимально-плоскими АЧХ коэффициента передачи (усиления), а применение ПШК предполагает различную форму АЧХ в разных каскадах. Поэтому целесообразно исследовать возможность применения модифицированной версии этого метода.

Аналитический подход обеспечивает представление характеристик широкополосных усилителей и ТИУ в символьном виде как явных функций частоты, параметров элементов схемы и элементов ЭС транзисторов. Для снижения трудоемкости вывода аналитических формул, описывающих характеристики СВЧ устройств, может быть использован метод автоматизированного (компьютерного) символьного анализа схем. Символьный анализ – это устоявшийся термин для обозначения современного подхода к исследованию и проектированию электрических цепей и электронных схем. Он состоит в автоматическом выводе (генерации), обработке и упрощении аналитических формул для характеристик схем на ЭВМ с использованием методов, основанных на теории графов, алгебраических или теоретико-множественных подходов либо алгоритмов компьютерной алгебры. Последние алгоритмы сейчас реализованы в нескольких программных пакетах, включая Matlab, Mathcad, Maple V и др.

Так как сам аналитический подход, а также метод частотной коррекции Г.В. Брауде и алгоритмы компьютерной алгебры являются универсальными, на базе сочетания этих компонентов открывается возможность разработки методик и программ для исследования и расчета различных схем СВЧ ТИУ на разных типах транзисторов.

На основании вышеизложенного можно сформулировать цель настоящей работы и определить основные направления исследований.

Цель работы: Разработка методик автоматизированного проектирования одно- и многокаскадных интегральных СВЧ ТИУ, построение математических моделей и исследование усилительных каскадов ТИУ на основе компьютерного символьного анализа и упрощенных малосигнальных ЭС, а также разработка и экспериментальное исследование ИС ТИУ на основе КМОП- и SiGe БиКМОП-технологий для быстродействующих оптических приемников со скоростями передачи данных до 25 Гбит/с.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Формулирование требований и выбор упрощенных линейных ЭС интегральных СВЧ ПТ и ГБТ для символьного анализа; исследование точности таких ЭС, а также упрощенных шумовых эквивалентных схем СВЧ ПТ, совместимых с линейными ЭС, в частотном диапазоне до 30 ГГц; разработка методик построения фиксированных и масштабируемых моделей СВЧ транзисторов в виде упрощенных ЭС.

2. Автоматизированное построение аналитических моделей и исследование комплекса характеристик типовых схем усилительных каскадов СВЧ интегральных ТИУ на основе малосигнальных ЭС ПТ и ГБТ, а также символьного анализа с применением алгоритмов компьютерной алгебры.

3. Разработка процедур проектирования типовых схем усилительных каскадов СВЧ интегральных ТИУ на основе полученных аналитических моделей, автоматизированное получение выражений для расчета элементов

корректирующих цепей с применением классического метода частотной коррекции Г.В. Брауде для обеспечения максимально-плоских частотных характеристик коэффициента усиления и группового времени запаздывания (ГВЗ).

4. Разработка методики проектирования усилительных каскадов СВЧ интегральных ТИУ на основе модифицированного метода Брауде для формирования заданного наклона АЧХ коэффициента усиления в выбранном частотном диапазоне.

5. Разработка методики проектирования многокаскадных ТИУ, в том числе с использованием противошумовой коррекции для снижения уровня шумов.

6. Разработка программ для исследования и расчета типовых схем усилительных каскадов СВЧ интегральных ТИУ на ПТ и ГБТ на базе оптимизированных алгоритмов автоматизированного символьного анализа с применением компьютерной алгебры, а также классического и модифицированного методов частотной коррекции Г.В. Брауде.

7. Разработка, моделирование и экспериментальное исследование ИС СВЧ ТИУ с полосами пропускания до 20 ГГц на основе отечественных 180 нм / 90 нм КМОП технологий ПАО "Микрон" и 0,5 мкм GaAs pHEMT технологии АО «Светлана-Рост», а также зарубежной 250 нм SiGe БиКМОП-технологии.

8. Разработка, моделирование и экспериментальное исследование модуля гибридного оптического приемника для скоростей передачи данных до 2,5 Гбит/с на базе отечественной 180 нм КМОП технологии

9. Разработка, моделирование и экспериментальное исследование монолитного однокристального оптического приемника со скоростью передачи до 25 Гбит/с на основе зарубежной 250 нм SiGe БиКМОП технологии.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Впервые показано, что упрощенные П-образные линейные шумовые эквивалентные схемы третьего порядка интегральных СВЧ МОП транзисторов позволяют воспроизвести частотные зависимости параметров рассеяния и стандартных шумовых параметров с достаточной для инженерной практики точностью, а также выполнить символьный анализ усилительных каскадов СВЧ ТИУ в полосе частот до 20 ГГц.

2. Впервые предложена методика проектирования усилительных каскадов интегральных СВЧ сверхширокополосных и трансимпедансных усилителей на основе автоматизированного символьного анализа и модифицированного метода Брауде, позволяющая получать семейства АЧХ коэффициента усиления с разными величинами наклона в выбранном частотном диапазоне. Это дает возможность разрабатывать усилительные каскады, корректирующие частотные искажения определенных компонентов приемной или передающей системы (компенсация спада с возрастанием частоты

АЧХ длинного входного коаксиального кабеля, влияния емкости фотодиода в оптических приемниках, взаимная коррекция АЧХ усилительных каскадов и т.п.).

3. Впервые предложена методика проектирования многокаскадных ТИУ с противошумовой коррекцией на основе автоматизированного символьного анализа, позволяющая распределить функцию компенсации влияния емкости фотодиода между усилительными каскадами и аналитически рассчитать цепи индуктивной коррекции из условия компромисса между требованиями практической реализуемости, занимаемой площадью на подложке и величиной эквивалентного входного шумового тока оптического приемника.

Практическая ценность и использование результатов работы

1. В среде математического пакета Mathcad разработан комплект программ, реализующий разработанную систематическую вычислительную процедуру исследования и проектирования усилительных каскадов СВЧ ТИУ на основе совместного применения оптимизированных алгоритмов автоматизированного символьного анализа, упрощенных линейных моделей интегральных полевых и биполярных транзисторов, классического и модифицированного методов Брауде. Программы позволяют выполнить символьный анализ и численное моделирование комплекса характеристик распространенных типов усилительных каскадов СВЧ ТИУ с целью исследования, рассчитать цепи коррекции каскадов с различной требуемой формой АЧХ коэффициента усиления, осуществить проектирование ОПРм с многокаскадными ТИУ, в том числе с применением противошумовой коррекции для снижения уровня шумов.

2. Применительно к типовым схемам усилительных каскадов СВЧ ТИУ на основе компьютерной алгебры получены аналитические выражения для определения оптимальных значений элементов корректирующих цепей, обеспечивающих максимально-плоские частотные характеристики коэффициента усиления и ГВЗ трансимпеданса, что позволяет выполнить быстрый инженерный расчет этих схем.

3. С использованием разработанных методик и комплекта программ проведено сравнительное исследование характеристик разных типов трансимпедансных усилительных каскадов, выполненных на базе 90 нм РЧ КМОП-техпроцесса ПАО "Микрон", что позволяет оценить достижимые параметры интегральных СВЧ ТИУ и ОПРм на основе отечественных технологий.

4. Разработан и запущен на изготовление комплект ИС СВЧ ТИУ на базе отечественных 180 нм и 90 нм РЧ КМОП-технологий АО "Микрон" для скоростей передачи данных от 5 Гбит/с до 20 Гбит/с.

5. Разработан и экспериментально исследован комплект ИС СВЧ ТИУ с полосой частот до 30 ГГц, изготовленных на основе 250 нм SiGe БиКМОП-технологии.

6. Разработана и экспериментально исследована корпусированная ИС СВЧ ТИУ на базе отечественной 180 нм КМОП технологии, а также модуль гибридного интегрального оптического приемника на ее основе для скоростей передачи данных до 2,5 Гбит/с.

7. Разработан и экспериментально исследован монолитный оптический приемник со скоростью передачи до 25 Гбит/с на основе 250 нм SiGe БиКМОП-технологии, интегрирующий на одном кристалле фотодиод и ТИУ. Характеристики приемника, а также входящего в его состав ТИУ находятся на уровне зарубежных аналогов.

Результаты исследований использованы в следующих научных проектах:

1. «Исследование методов построения интегрированных микроэлектронных и радиофотонных устройств на базе гетероструктурных технологий для перспективных межвидовых комплексов локации, навигации и связи с многоканальными фазированными антенными решетками» в рамках проектной части госзадания в сфере научной деятельности №8.4029.2017/ПЧ (2017-2020 гг.).

2. «Разработка фотонных интегральных схем и модулей оптических приемников для высокоскоростных систем передачи данных до 25 Гбит/с», хоздоговор № 1/21 от 25.12.2021 г.

3. «Разработка аналого-цифровых, СВЧ и фотонных интегральных схем, приемо-передающих модулей и систем на кристалле, а также их технологий», научный проект в рамках программы развития передовой инженерной школы «Электронное приборостроение и системы связи» им. А.В. Кобзева, 2022 г.

4. «Разработка ключевых элементов отечественных технологий изготовления и моделирования СВЧ, фотонных и фотонно-электронных интегральных схем на базе различных полупроводниковых материалов, а также радиочастотных и оптоэлектронных модулей на этой основе», ФП «ПРИОРИТЕТ 2030», подпроект СП1/1, 2022-2023 гг.

5. «Разработка модуля оптического передатчика на базе радиофотонных интегральных схем для широкополосных систем передачи, приема и обработки радиосигналов» в рамках проектной команды «УМНИК» №54 ГУРЭС 14/72778 от 2021 г.

6. «Разработка комплекта интегральных электронных компонентов и конструкций оптических приемопередающих модулей со скоростями не менее 5, 12 и 20 Гбит/с», РНФ, соглашение № 23-91-06207, 2023-2025 гг.

7. «Комплекс исследований, направленных на разработку на основе отечественных кремниевых и АЗВ5-технологий комплектов сложнофункциональных блоков (СФБ) радиочастотных (РЧ) аналоговых многофункциональных ИС для СВЧ приемопередатчиков в частотных поддиапазонах L, S и Ku для систем связи, радиолокации, АФАР и телекоммуникаций», молодежная лаборатория, г/б 4/22, 2022-2024 гг.

8. «Разработка комплекта интегральных электронных компонентов и конструкций оптических приемопередающих модулей со скоростями не менее 5, 12 и 20 Гбит/с», РНФ, соглашение № 23-91-06207, 2023-2025 гг.

Методы исследований. Для решения поставленных задач применяются методы компьютерного символьного анализа линейных электрических цепей и матричной алгебры, методы экстракции параметров СВЧ транзисторов, системы моделирования и автоматизированного проектирования.

Положения к защите

1. Для интегральных СВЧ МОП транзисторов упрощенные П-образные линейные эквивалентные схемы третьего порядка позволяют воспроизвести частотные зависимости параметров рассеяния S_{11} , S_{12} и S_{21} с точностью до 7 % по модулю и 6 градусов по фазе (для параметра S_{22} - до 15 % по модулю и 3 градуса по фазе) в частотном диапазоне до 20 ГГц, а для интегральных SiGe гетеробиполярных транзисторов - с точностью до 9 % по модулю и 12 градусов по фазе по всем параметрам рассеяния в частотном диапазоне до 30 ГГц.

2. Совместное применение упрощенных линейных эквивалентных схем МОП-транзисторов и оптимизированных алгоритмов символьного анализа на базе компьютерной алгебры позволяет автоматически сгенерировать аналитические модели усилительных каскадов интегральных СВЧ трансимпедансных усилителей в виде символьных выражений, с помощью этих моделей рассчитать основные характеристики каскадов с точностью не хуже 15% на частотах до 20 ГГц, удобно исследовать влияние отдельных корректирующих элементов усилителя и параметров транзисторов на сигнальные характеристики, устойчивость и чувствительность, выбрать ширину затвора МОП-транзисторов, аналитически рассчитать цепи высокочастотной (ВЧ) коррекции.

3. Предложенная методика проектирования усилительных каскадов интегральных СВЧ сверхширокополосных и трансимпедансных усилителей на основе автоматизированного символьного анализа и модифицированного метода Брауде позволяет получать семейства АЧХ коэффициента усиления с разными величинами наклона в выбранном частотном диапазоне, что дает возможность разрабатывать каскады, корректирующие частотные искажения различных компонентов приемной или передающей системы.

4. Предложенная методика проектирования многокаскадных интегральных СВЧ трансимпедансных усилителей с противозумовой коррекцией на основе автоматизированного символьного анализа позволяет распределить функцию компенсации влияния емкости фотодиода между усилительными каскадами и аналитически рассчитать цепи индуктивной коррекции для обеспечения компромисса между требованиями практической реализуемости, занимаемой площадью на подложке и величиной эквивалентного входного шумового тока оптического приемника.

Достоверность научных результатов. Степень достоверности научных результатов подтверждается: применением современных методов научных исследований, включая математическое моделирование; значительным объёмом экспериментальных данных, полученных с помощью современного измерительного оборудования; хорошим согласованием экспериментальных и расчётных данных.

Апобация результатов работы. Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на следующих конференциях: «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо), г. Севастополь, в 2018, 2021 гг.; Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», г. Томск, в 2019, 2022, 2023 гг.; Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, в 2018 г.; Международная научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин», г. Омск, в 2019 гг.; «Международная IEEE-Сибирская конференция по управлению и связи» (Sibcon), г. Томск, в 2019 г.; Международный симпозиум «IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)», г. Казань, в 2018 г.; Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ», г. Санкт-Петербург, в 2023 г.; Российский форум «Микроэлектроника 2022», г.Сочи, в 2022 г.

Публикации. По результатам проведённых исследований опубликовано 27 научных работ, в том числе 4 в журналах, рекомендованных ВАК, 5 в изданиях, индексируемых в WoS/Scopus, 11 статей в сборниках международных конференций, 6 свидетельств о регистрации топологий интегральных микросхем, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы были использованы в рамках совместного проекта ТУСУРа и АО «ОКБ «Планета» «Разработка комплекта интегральных электронных компонентов и конструкций оптических приемопередающих модулей со скоростями не менее 5, 12 и 20 Гбит/с» (соглашение РНФ № 23-91-06207).

Личный вклад автора. Все результаты, представленные в диссертационном исследовании, получены автором лично либо при его непосредственном участии. В работах, полученных в соавторстве, автором получены существенные теоретические и практические результаты.

Структура и объём диссертации. Диссертация общим объёмом 248 страниц содержит введение, три главы, заключение, список сокращений, список использованных литературных источников, включая публикации автора по теме исследования, 6 приложений. Основной текст диссертации содержит 185 страниц, в том числе 107 рисунков на 43 страницах и 32 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цели и задачи исследования, показаны научная новизна и

практическая ценность работы, излагаются положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются структурные схемы и характеристики ОПрм; линейные и шумовые модели МОП- и гетеробиполярных СВЧ транзисторов; существующие схемные решения и подходы к проектированию интегральных СВЧ широкополосных усилителей и ТИУ; достоинства автоматизированного символического анализа линейных активных цепей.

Важной составной частью современных ВОСП являются интегральные СВЧ ОПрм, которые могут быть выполнены по технологиям гибридной или монокристаллической интеграции и в качестве основных компонентов содержат кристалл ФД и ИС ТИУ. В последние несколько лет начали разрабатываться интегральные СВЧ ОПрм с ПШК, что приводит к значительному снижению уровня шума и повышению чувствительности.

В настоящее время ИС ТИУ разрабатываются и изготавливаются на основе КМОП и SiGe БикМОП, реже - GaAs технологий. К наиболее распространённым вариантам входных усилительных каскадов, применяемых в интегральных СВЧ ТИУ, относятся схемы с параллельной отрицательной обратной связью (ООС), в том числе каскад на двух полевых транзисторах (ПТ) по схеме "общий исток (ОИ)-общий сток (ОС)", каскад на основе КМОП-инвертора, каскад на одном ПТ с ОИ, а также их дифференциальные варианты. При этом для расширения полосы пропускания в цепях ООС применяются схемы ВЧ индуктивной или емкостной коррекции.

Проектирование гибридных и монокристаллических интегральных СВЧ ТИУ, как и вообще СВЧ-усилителей, сейчас выполняется, как правило, с помощью САПР с использованием численных методов моделирования и оптимизации, а также сложных точных моделей активных элементов. Однако такие методы не дают возможности быстро оценить потенциальные возможности различных схем ТИУ, влияние отдельных элементов на основные характеристики, а также выполнить быстрый инженерный расчет элементов усилителя по требованиям к характеристикам.

При совместном использовании с численным моделированием подход к исследованию и проектированию СВЧ ОПрм и ТИУ на основе символического анализа может обеспечить целый ряд дополнительных возможностей: а) наглядное аналитическое исследование характера зависимостей характеристик схемы от параметров одного или нескольких элементов; б) анализ устойчивости и чувствительности к изменению элементов классическими методами; в) разработка инженерных методик расчета конкретных вариантов ТИУ.

Однако для обеспечения точности анализа и расчетов СВЧ ТИУ при символическом подходе АЭ должны быть представлены в форме не идеализированных усилительных блоков, а ЭС с приемлемыми погрешностями в рабочем диапазоне частот. Также, поскольку ручной вывод и упрощение аналитических выражений на основе ЭС СВЧ-транзисторов даже для про-

стных схем усилителей сопряжены с большой трудоемкостью и возможностью ошибок, перспективным является использование программ и алгоритмов автоматизированного символьного анализа электронных цепей.

На самом деле обобщение результатов ряда работ, в которых используется аналитический подход к исследованию характеристик усилительных каскадов СВЧ ТИУ, показало следующее: а) в подавляющем большинстве представленных публикаций используются слишком упрощенные для СВЧ диапазона модели транзисторов в виде идеализированных активных блоков или линейных ЭС, которые, обычно не учитывают внутреннюю обратную связь в АЭ; б) полученные схемные функции в большинстве работ также сильно упрощаются до такой степени, что упрощенные функции уже не могут хорошо описывать характеристики усилительного каскада даже качественно; в) во всех рассмотренных публикациях вывод аналитических выражений выполнен вручную, хотя он может быть весьма трудоемким.

В известных работах отсутствует систематическое исследование вопросов, касающихся выбора и методик построения упрощенных эквивалентных схем СВЧ ПТ и ГБТ для символьного анализа, а также достижимой точности и частотного диапазона применимости таких моделей.

Также, предложенные в литературе немногочисленные аналитические методики исследования и расчета СВЧ усилителей не имеют единой основы и предназначены для проектирования отдельных конкретных схем широкополосных усилительных каскадов.

В интегральных ОПРм с ПШК для коррекции АЧХ применяются специальные устройства - аналоговые пассивные или активные корректоры, либо распределенная коррекция между несколькими усилительными каскадами ТИУ. Наиболее распространен последний способ в связи с меньшей чувствительностью к разбросу параметров элементов, а также минимуму дополнительных элементов. Однако в известной литературе отсутствуют систематические методики проектирования СВЧ интегральных ОПРм и многокаскадных ТИУ с ПШК, позволяющие обоснованно распределить функцию компенсации влияния емкости фотодиода между каскадами для достижения необходимого комплекса характеристик с учетом требований практической реализуемости элементов и конструктивных требований (например, к занимаемой площади на подложке).

Вторая глава посвящена исследованию, разработке и применению методик проектирования усилительных каскадов и многокаскадных СВЧ ТИУ на базе компьютерного символьного анализа. Построены и верифицированы линейные и шумовые ЭС СВЧ МОП- и гетеробиполярных транзисторов. С помощью разработанного комплекта программ в пакете Mathcad выполнены символьный анализ и исследование характеристик типовых усилительных каскадов СВЧ ТИУ на МОП транзисторах. Получены формулы для инженерного расчета элементов таких каскадов. Предложены мето-

дики проектирования каскадов с заданной формой АЧХ и многокаскадных СВЧ ТИУ с ПШК.

Построение и исследование моделей интегральных СВЧ транзисторов в виде упрощённых линейных эквивалентных схем. По сравнению с точными полными ЭС, используемыми при численном моделировании, к линейным и шумовым ЭС для автоматизированного символьного анализа предъявляются специальные требования, включая минимальное число реактивных элементов для получения схемных функций наименьшего порядка, а также достаточная для инженерной практики точность воспроизведения сигнальных и шумовых характеристик транзистора.

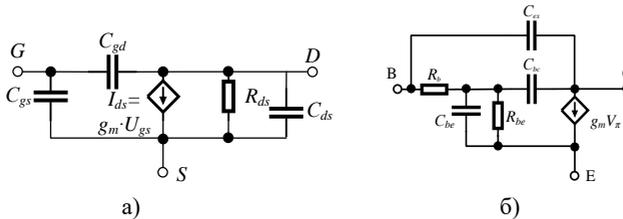


Рис. 1 – Упрощённая П-образная эквивалентная схема интегрального СВЧ полевого транзистора (а) и биполярного (гетеробиполярного) транзистора (б)

На основании анализа различных конфигураций моделей найдено, что указанным требованиям в наибольшей степени удовлетворяют линейные ЭС интегрального СВЧ ПТ и БТ (ГБТ), показанные на рис. 1. Представлены аналитические, оптимизационные и интерактивные методики построения таких ЭС (в том числе масштабируемых). Точность построенных моделей до частоты 30 ГГц исследовалась на примерах ПТ на базе отечественной 90 нм РЧ КМОП технологии АО «Микрон» с разной шириной затвора (табл. 1), а также SiGe ГБТ.

Табл. 1. Погрешности упрощённой ЭС nМОП ПТ для ширины затвора 70 мкм

f, ГГц	$\delta S_{11} $, %	$\Delta\varphi(S_{11})$, °	$\delta S_{12} $, %	$\Delta\varphi(S_{12})$, °	$\delta S_{21} $, %	$\Delta\varphi(S_{21})$, °	$\delta S_{22} $, %	$\Delta\varphi(S_{22})$, °
1	0,01	0,009	1,54	0,01	1,64	0,18	0,56	0,03
10	1,16	0,28	3,07	0,70	0,27	1,18	3,66	0,04
15	1,91	0,49	4,00	1,71	1,56	1,00	7,32	0,42
20	2,48	0,52	4,52	2,95	2,41	0,48	10,8	0,84
25	2,97	0,33	4,61	4,26	2,78	0,19	13,9	1,21
30	3,48	0,017	4,38	5,55	2,72	0,91	16,5	1,53

Для модели nМОП ПТ в диапазоне ширин затвора 35-130 мкм погрешности модулей параметров рассеяния $\delta|S_{11}|$, $\delta|S_{12}|$, $\delta|S_{21}|$, $\delta|S_{22}|$ менее 15 % до 20 ГГц, абсолютное отклонение по фазе менее 10° в полосе частот до 30 ГГц. Погрешности упрощённой ЭС выполненного по 250-нм SiGe БиКМОП технологии ГБТ (рис. 26): $\delta|S_{11}|$, $\delta|S_{12}|$, $\delta|S_{21}|$, $\delta|S_{22}|$ меньше 10 % и абсолютное отклонение по фазе менее 12° до 30 ГГц. Такой точности моделей вполне достаточно для инженерных расчетов.

Алгоритмы и программы символьного анализа и расчета усилительных каскадов СВЧ ТИУ. Имеющиеся в настоящее время алгоритмы символьного анализа аналоговых электронных цепей весьма сложны для реализации, а специализированные программы ориентированы на анализ сравнительно низкочастотных устройств. Для решения рассматриваемых в диссертации задач более эффективным является применение общих алгоритмов компьютерной алгебры, реализованных, в частности, в инструментах (toolbox) пакетов Matlab и Mathcad.

На этой основе разработан комплект программ в среде пакета Mathcad, позволяющий быстро и удобно осуществить автоматизированный символьный анализ, исследование и расчет усилительных каскадов СВЧ ТИУ, выполненных по нескольким типовым схемам. В программах используется алгоритм символьного анализа линейных электронных схем на базе формализованного метода узловых потенциалов, суть которого в принципе не отличается от алгоритмов численного моделирования цепей на такой же основе. Однако конкретная реализация этого алгоритма в пакетах компьютерной алгебры значительно влияет на максимальную сложность анализируемых схем, время вычислений, размер требуемой памяти и др. Путем экспериментов определен эффективный вариант алгоритма получения схемных функций СВЧ усилительных схем. Он предполагает формирование матрицы проводимостей не сразу для подробной модели цепи, а для укрупненной модели в виде соединения двухполюсников и управляемых источников тока, что позволяет значительно уменьшить порядок матрицы, приводит к ускорению символьных вычислений. Предложен также алгоритм упрощения схемных дробно-рациональных функций (ДРФ), ориентированный на символьный анализ СВЧ усилительных каскадов. Рассмотрены реализованные в программах алгоритмы анализа устойчивости и чувствительности к изменению параметров элементов.

Исследование комплекса характеристик усилительных каскадов СВЧ ТИУ на основе компьютерного символьного анализа.

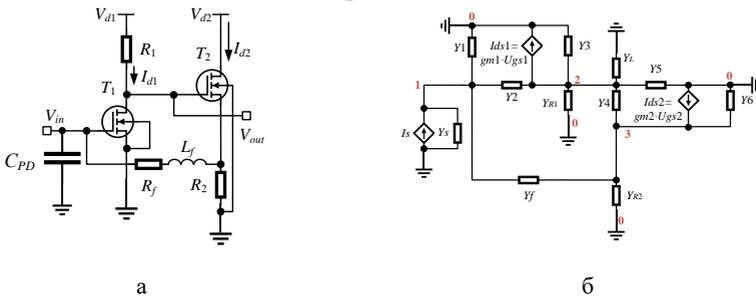


Рис. 2 – Усилительный каскад ТИУ по схеме ОИ-ОС с параллельной ООС (а), схема замещения для анализа сигнальных характеристик (б)

В диссертации подробно описана последовательность решения задач исследования и проектирования усилительных каскадов интегральных СВЧ

ТИУ на основе компьютерного символьного анализа на примере каскада по схеме ОИ-ОС с ООС (рис. 2а), выполненного на базе 90 нм РЧ КМОП технологии АО "Микрон".

С помощью программы символьного анализа по матрице узловых проводимостей автоматически сгенерированы схемные функции для трансимпеданса Z_T (формула (1)), коэффициента усиления по напряжению (КУН) K_U , входного (Z_{in}) и выходного (Z_{out}) импедансов.

$$Z_T(p) = \frac{a_0 + a_1 p + a_2 p^2}{b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + b_3 p^3 + b_4 p^4}; \quad (1)$$

$$a_0 = g_{m1}(1 + R_f G_{T2}), \quad a_1 = -g_{m1} L_f (-G_{R2} - g_{m2}) - R_f (C_{gd1} g_{m2} - C_3 g_{m1}) - C_{gd1};$$

$$a_2 = g_{m1} L_f C_3 - R_f C_{gd1} C_3; \quad b_0 = g_{m2} + g_{m1} + G_{L_{out}} G_{T2};$$

$$b_1 = R_f [g_{m1} C_{gd1} G_{T2} + C_1 (G_{R1} G_{R2} + G_L G_{ds2}) + g_{m2} C_1 G_{L_{out}}] +$$

$$+ C_2 G_{T2} - (g_{m2} - g_{m1}) (C_{gd1} + C_{gs2}) + G_{L_{out}} (C_1 + C_3); \quad b_2 = L_f (g_{m1} C_{gd1} G_{T2} + g_{m2} C_1 G_{L_{out}}) +$$

$$+ R_f [C_1 C_3 (G_L + G_{R1}) + C_{gd1} C_3 g_{m1} + C_1 C_2 g_{m2}] + C_2 (C_1 + C_3);$$

$$b_3 = L_f (C_1 C_3 G_L + C_1 C_2 g_{m2} - C_{gd1}^2 g_{m2} + C_{gd1} C_3 g_{m1}) + R_f C_1 C_2 C_3; \quad b_4 = C_1 C_2 C_3 L_f,$$

$$\text{где } G_{L_{out}} = G_L + G_D, \quad G_{T2} = g_{m2} + G_{R2} + G_{ds2}, \quad G_D = G_{R1} + G_{ds1}, \quad C_1 = C_{gs1} + C_{gd1},$$

$$C_2 = C_{gd1} + C_{ds1} + C_{gs2} + C_{ds2}, \quad C_3 = C_{gs2} + C_{ds2}.$$

С использованием этих выражений было проведено исследование влияния сопротивления ООС R_f , ширины затвора W и элементов ЭС транзисторов на частотные зависимости трансимпеданса, ГВЗ и другие характеристики усилительного каскада (рис. 3-4).

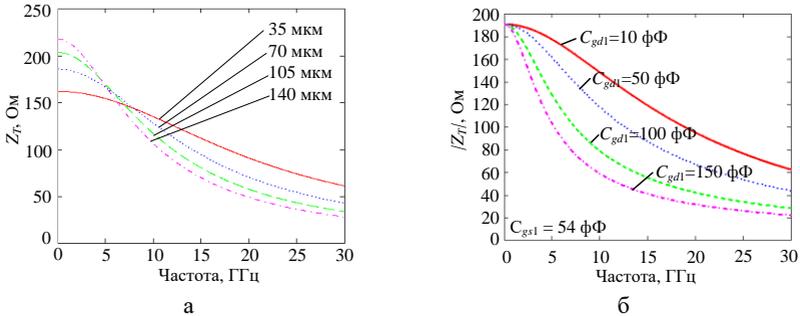


Рис. 3 – Частотные зависимости трансимпеданса $|Z_T|$ каскада ОИ-ОС с ООС при разных значениях: а) ширины затвора 1-го транзистора ($W_1=35, 70, 105; R_f=200$ Ом); б) емкости C_{gd1}

Установлено, в частности, что наибольшее влияние оказывают емкости C_{gs1} , C_{gd1} транзистора T_1 . Подобный анализ влияния отдельных элементов ЭС помогает выбрать оптимальные топологию и конструкцию МОП транзисторов для интегрального ТИУ - в частности, емкость C_{gs} прибора во

многое зависит от числа и ширины единичных затворов.

Если схема ОИ-ОС с ООС применяется во входном каскаде ТИУ, нужно учесть влияние на ее характеристики емкости ФД C_{PD} (рис. 2а). На рис. 4а представлено семейство АЧХ $|Z_T|$ для разных значений C_{PD} от 0 до 300 фФ при $L_f=0$ (для ФД с полосами пропускания 10-15 ГГц типичные значения емкости C_{PD} составляют 150-200 фФ).

Оценка адекватности и точности результатов расчета характеристик усилительных каскадов ТИУ по полученным аналитическим формулам выполнялась путем их сравнения с результатами моделирования в САПР ADS при применении полных нелинейных моделей МОП-транзисторов (см. рис. 2б). Это сравнение подтверждает достаточную точность символического анализа СВЧ ТИУ на основе приведенной на рис. 2а модели МОП-транзистора на частотах до 30 ГГц.

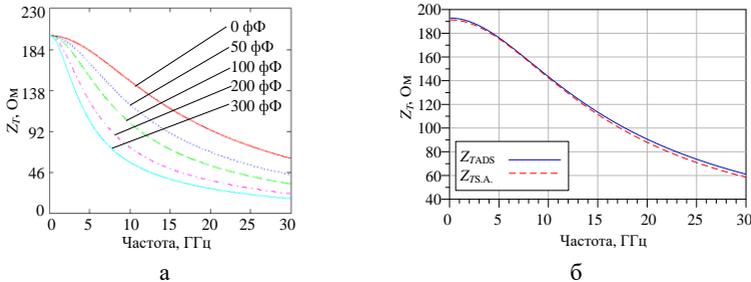


Рис. 4 – Частотные зависимости характеристик каскада ОИ-ОС с ООС:

а) АЧХ $|Z_T|$ для емкостей ФД C_{PD} от 0 до 300 фФ ($L_f=0$); б) сравнение АЧХ $|Z_T|$: — моделирование в САПР при помощи полных нелинейных моделей (ADS); - - - расчет по аналитическим формулам (S.A.)

По выражению (1) была оценена устойчивость исследуемой цепи с помощью классического метода корневого годографа, рассчитаны чувствительности характеристик схемы к разбросу элементов и технологические допуски на параметры элементов. При допустимом отклонении трансимпеданса каскада $\delta|Z_T|=3\%$ допустимые отклонения параметров g_{m1} , g_{m2} , R_f и L_f составляют $\delta g_{m1}=3,8\%$; $\delta g_{m2}=5,3\%$; $\delta R_f=4,0\%$; $\delta L_f=8,3\%$.

Расчет корректирующих цепей СВЧ усилительных каскадов для обеспечения максимально-плоских частотных характеристик коэффициента усиления и ГВЗ. В основе методики лежит классический метод частотой коррекции Г.В. Брауде. Для реализации максимально-плоской АЧХ осуществляется переход от комплексной передаточной функции $T(j\omega, \epsilon)$ к ее квадрату модуля, т.е. к вещественной функции $\Phi(\omega^2, \epsilon) = |T(j\omega, \epsilon)|^2$. Последняя представляет собой ДРФ по четным степеням ω , зависящую от вектора параметров варьируемых элементов схемы ϵ (т.е. от величин сопротивлений, емкостей и индуктивностей пассивных элементов, крутизны управляемых источников тока). Варьируемые элементы ϵ находятся в результате

решения системы уравнений, полученных приравнением последовательных производных функции $\Phi(\omega^2, \mathbf{e})$ нулю при $\omega=0$.

Получим формулы для расчета элементов R_f и L_f в цепи ООС каскада ОИ-ОС (рис. 2а). В качестве исходных данных зададим значение КТУ Z_{T0} на нулевой частоте, тогда из (1) с учетом $Z_{T0}=a_0/b_0$ найдем величину R_f :

$$R_f = \frac{Z_{T0}(G_{L_{out}} G_{T2} + g_{m1} g_{m2}) - g_{m1}}{g_{m1} G_{T2}}. \quad (2)$$

Далее из решения уравнения $\Phi'(0, \mathbf{e}) = 0$ с учетом (1) найдем выражение для расчёта корректирующей индуктивности L_f :

$$L_f = [-c_1 + \sqrt{c_1^2 - 4c_0 c_2}] / 2c_2, \quad (3)$$

где $c_0 = b_0^2 (R_f C_3 g_{m1})^2 - a_0^2 b_1^2 +$

$+ a_0^2 b_0 [2C_2(C_1 + C_3) + 2R_f [C_1 C_3 (G_L + G_{R1}) + C_{gd1} C_3 g_{m1} + C_1 C_2 g_{m2}]];$

$c_1 = 2a_0^2 b_0 [G_{L_{out}} C_1 g_{m2} + G_{T2} C_{gd1} g_{m1}] + 2C_3 b_0^2 g_{m1} (a_0 + R_f g_{m1} g_{m2});$

$c_2 = [g_{m1} (g_{m1} g_{m2} + G_{L_{out}} G_{T2})(G_{R2} + g_{m2})]^2.$

На рис. 5а представлены графики АЧХ и ЧХ ГВЗ трансимпеданса Z_T каскада ОИ-ОС для случаев оптимальной по АЧХ индуктивной коррекции ($L_f=1,8$ нГн) и без нее ($L_f=0$), рассчитанные с использованием аналитического выражения (1) и упрощенных моделей МОП-транзисторов, а также в САПР ADS на основе полных библиотечных моделей.

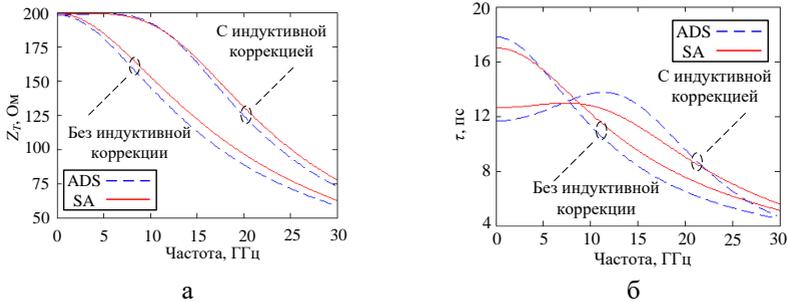
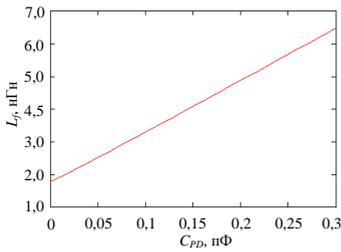


Рис. 5 – График зависимости $|Z_T|$ (а) и ГВЗ (б) от частоты, $L_f=1,8$ нГн (штриховая линия - моделирование в САПР ADS, сплошная - символьный расчёт

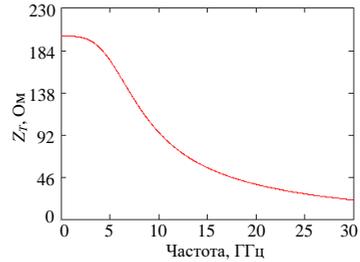
Использование индуктивной коррекции в цепи ООС позволило расширить полосу пропускания каскада ОИ-ОС с 11,8 ГГц до 18,2 ГГц и обеспечить плоскую частотную характеристику трансимпеданса. Аналогичным образом выполняется расчет корректирующей индуктивности L_f для обеспечения максимально-плоской частотной характеристики ГВЗ, что тоже сводится к решению квадратного уравнения.

Аналитический подход к расчету СВЧ усилительных каскадов представляет еще одну полезную возможность. При проектировании СВЧ ТИУ

существуют ограничения на максимальную величину L_{\max} интегральных катушек индуктивностей, связанные с собственным паразитным резонансом и площадью катушки на подложке. Применение формулы (3) позволяет быстро оценить возможность выполнения указанных ограничений, для этого с ее помощью рассчитаем зависимость L_f , соответствующей максимально-плоской АЧХ трансимпеданса ОПрм, от емкости ФД (рис. 6а). По этой зависимости легко определить необходимое значение корректирующей индуктивности для заданной ёмкости фотодиода. АЧХ трансимпеданса ОПрм при емкости ФД $C_{PD} = 200$ фФ показана на рис. 6б. Такая же связь L_f и C_{PD} может быть получена для случая максимально-плоской АЧХ ГВЗ трансимпеданса.



а)



б)

Рисунок 6 – а) Зависимость индуктивности L_f от емкости ФД C_{PD} ;
 б) максимально плоская АЧХ трансимпеданса ОПрм при $C_{PD} = 200$ фФ
 ($R_f = 223$ Ом, $L_f = 4,8$ нГн)

Методика расчета СВЧ усилительных каскадов для обеспечения частотных характеристик коэффициента усиления с требуемым наклоном. На практике встречаются задачи проектирования СВЧ усилительных каскадов с положительным наклоном АЧХ коэффициента усиления, который корректирует частотные искажения определенных компонентов приемной или передающей системы (например, компенсация спада с возрастанием частоты АЧХ длинного входного коаксиального кабеля).

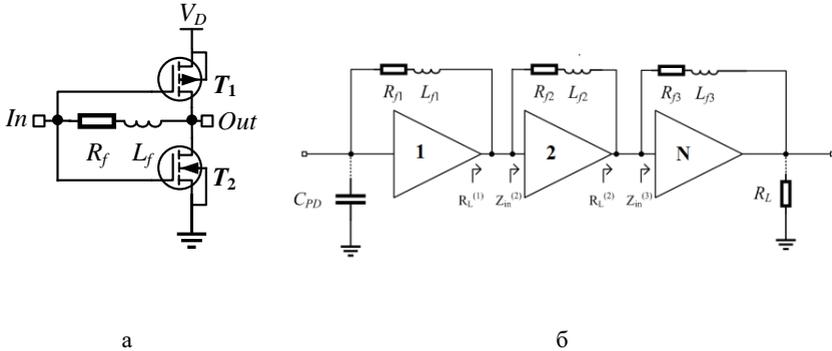


Рис. 7 – а) Принципиальная схема каскада ТИУ на основе КМОП-инвертора с ООС; б) структурная схема N-каскадного ТИУ

Аналогичная задача компенсации влияния емкости фотодиода в оптических приемниках возникает при проектировании ТИУ с ПШК. Для получения формы АЧХ усилительных каскадов с заданным наклоном применим модифицированный метод Брауде, он предложен в общем виде и математически сформулирован Л. И. Бабаком, а автор применил метод к задачам проектирования широкополосных усилительных каскадов.

Модифицированный метод рассмотрим применительно как к КТУ Z_T , так и КУН K_U , так как обе эти характеристики используются при проектировании многокаскадных ТИУ. Для удобства ДРФ $Z_T(p)$ и $K_U(p)$ запишем в следующем общем виде:

$$T(p) = \frac{a(p)}{b(p)} = \frac{a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots + a_m p^m}{b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + \dots + b_n p^n}, \quad (4)$$

где коэффициенты a_i и b_j ($i=0, 1, \dots, m; j=0, 1, \dots, n$) зависят от вектора, \mathbf{e} варьируемых параметров схемы усилителя. Как и в классическом методе, перейдем от функции $T(j\omega, \mathbf{e})$ к квадрату модуля $\Phi(X, \mathbf{e}) = |T(j\omega, \mathbf{e})|^2$. Выберем внутри рабочего интервала частот точку X_0 и приравняем к нулю значения производных первого и более высоких порядков функции $\Phi(X, \mathbf{e})$ в точке $X=X_0$, где $X=\omega^2$. В результате получим следующие условия, обобщающие условия Г.В. Брауде:

$$\Phi'(X_0, \mathbf{e}) = 0; \quad \Phi''(X_0, \mathbf{e}) = 0; \quad \dots; \quad \Phi^{(n)}(X_0, \mathbf{e}) = 0; \quad \dots \quad (5)$$

Решение системы уравнений (5) позволяет найти вектор \mathbf{e} варьируемых параметров усилителя, при котором его АЧХ в некоторой окрестности точки X_0 будет иметь максимально-плоскую форму ($X_0=0$). Задавая различные значения $f_0 = \omega_0 / (2\pi) = \sqrt{X_0} / (2\pi)$ в полосе пропускания усилителя $[f_L, f_U]$, можно получить семейство АЧХ $|T(j\omega)|$ с разным наклоном.

Методику применим к СВЧ усилительному каскаду ТИУ по схеме КМОП-инвертора с цепью ООС (рис. 7а). В этой схеме уровни КТУ Z_T и

КУН K_U зависят от сопротивления ООС R_f , а форма АЧХ КТУ и КУН зависит от величины корректирующей индуктивности ООС L_f . С помощью программы символьного анализа были определены аналитические выражения для КТУ $Z_T(p)$, КУН $K_U(p)$ и входного импеданса $Z_{in}(p)$ каскада при резистивной нагрузке и описании МОП-транзисторов упрощенными ЭС. Различные формы АЧХ КТУ $Z_T(j\omega)$ и КУН $K_U(j\omega)$ целесообразно получить для нескольких фиксированных значений R_f , отвечающих разным величинам уровня усиления (т.е. разным величинам КТУ $Z_{T0}=Z_T(0)$ и КУН $K_{U0}=K_U(0)$ на нулевой частоте). Далее выполняется вариация X_0 в заданной полосе частот, и для каждого значения X_0 при выбранном R_f вычисляется величина индуктивности L_f из условия $\Phi'(X_0, e) = 0$, которое в обоих случаях (КТУ и КУН) после упрощения приводит к уравнению 2-й степени относительно L_f . Затем для известных R_f и L_f рассчитывается отвечающая им АЧХ КТУ или КУН. В табл. 2 приведены рассчитанные для $R_L=50$ Ом и $R_f=150$ Ом значения других параметров однокаскадного усилителя для АЧХ $|Z_T(f)|$ и $|K_U(f)|$ различной формы (здесь $f_{3дБ}$ - полоса пропускания ТИУ на уровне -3 дБ; SL - наклон АЧХ в единицах %/ГГц (процент/ГГц).

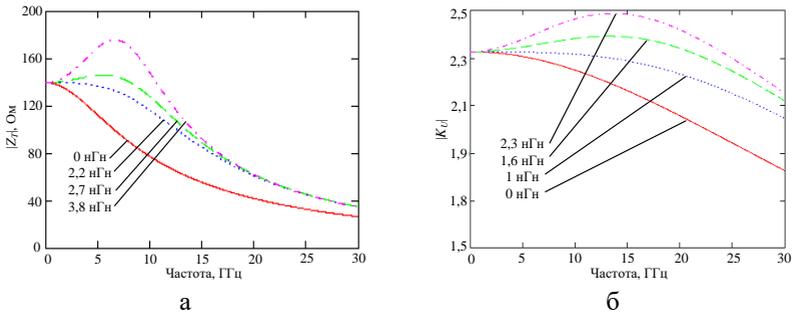


Рис. 8 - Рассчитанные АЧХ КМОП-инвертора с разным наклоном ($R_L=50$ Ом, $R_f=200$ Ом): а) $|Z_T(f)|$ ($C_{PD}=150$ фФ); б) $|K_U(f)|$ ($C_{PD}=0$)

Таблица 2 – Параметры КМОП-инвертора, соответствующие АЧХ $|Z_T(f)|$ и $|K_U(f)|$ с разным наклоном ($R_L=50$ Ом)

АЧХ $ Z_T(f) $ ($C_{PD}=150$ фФ, $R_f=150$ Ом, $Z_{T0}=100$ Ом)				АЧХ $ K_U(f) $ ($C_{PD}=0$, $R_f=150$ Ом, $K_{U0}=2,15$)			
f_0 , ГГц	L_f , нГн	$f_{3дБ}$, ГГц	SL , %/ГГц	f_0 , ГГц	L_f , нГн	$f_{3дБ}$, ГГц	SL , %/ГГц
0	1,25	17,9	-6,9	0	0,631	≈ 53	-0,2
12	1,4	18,9	-2,5	15	0,81	$\approx 53,8$	+1,1
15	1,5	19,5	+1,5	18	0,99	≈ 54	+2,6
17	1,8	20,2	+10,1	21,1	1,8	$\approx 54,3$	+9,8
18	2,2	20,8	+26,7	21,5	3	$\approx 54,2$	+18

В результате показано, что представленная методика позволяет разрабатывать усилительные каскады, корректирующие частотные искажения

определенных компонентов приемной или передающей системы, в том числе осуществляющие компенсацию влияния емкости фотодиода в оптических приемниках, взаимную коррекцию АЧХ в многокаскадных усилителях и т.п.

Методика проектирования многокаскадных интегральных ТИУ со взаимной или противошумовой коррекцией. На основе полученных результатов разработана методика проектирования многокаскадных интегральных СВЧ ТИУ (рис. 76) с ПШК, позволяющая распределить функцию компенсации влияния емкости фотодиода между усилительными каскадами и аналитически рассчитать цепи индуктивной коррекции из условия компромисса между требованиями практической реализуемости, занимаемой площадью на подложке и величиной эквивалентного входного шумового тока оптического приемника.

Идея методики состоит в следующем. Если начать расчет с 1-го каскада, то точно неизвестна его нагрузка, а именно, импеданс 2-го каскада. Поэтому расчет проводится в следующей последовательности. Вначале приближенно определим входной импеданс $Z_{in2}(f)$ 2-го каскада с целью определения нагрузки 1-го каскада. После выполняется расчет 1-го каскада, затем последнего (N -го) каскада, а далее каскады с последовательно убывающими номерами $N-1$, $N-2$, $N-3$ и т.д. рассчитываются, начиная с предпоследнего, в сторону входа усилителя, в конце более точно осуществляется расчет 2-го каскада.

В диссертации методика проектирования поясняется на примере трехкаскадного ТИУ на основе 90 нм КМОП технологии, в каждом каскаде которого используется схема инвертора с цепью параллельной ООС (рис. 7а). Итоговая полоса пропускания ТИУ равна 16,7 ГГц по уровню -3 дБ (см. рис. 9а), коэффициент трансимпедансного усиления $Z_T = 56-53$ дБ ($Z_T \geq 600$ Ом). Входной шумовой ток составляет порядка 11,5- 13 пА/ $\sqrt{\text{Гц}}$ в полосе пропускания от 0,1 ГГц до 15 ГГц (рис. 9б).

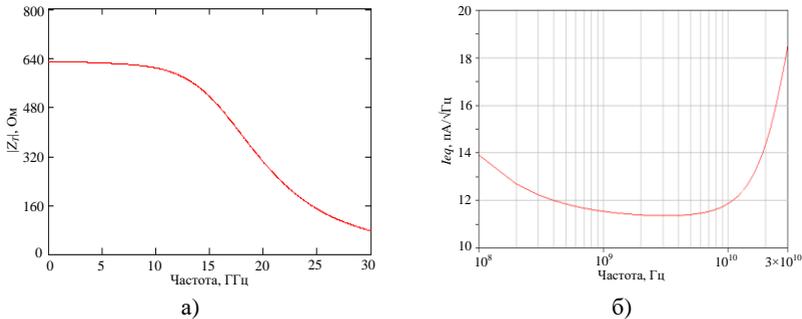


Рис. 9 – Характеристики трёхкаскадного ТИУ на основе инверторов с учетом емкости ФД: а) $|Z_T|$; б) шумовой ток

Также выполнены расчёт и сравнение характеристик трёхкаскадных ТИУ с частичной и полной коррекцией спада АЧХ, обусловленного емко-

стью ФД, в первом каскаде. При этом частичная коррекция в первом каскаде соответствует использованию ПШК в ОПрм, а полная коррекция равносильна отсутствию ПШК. Показано, что ТИУ с частичной коррекцией спада АЧХ в первом каскаде и распределенной компенсацией между каскадами даёт значительно больший коэффициент трансимпедансного усиления и меньшее значение входного шумового тока.

В **третьей главе** представлены результаты автоматизированного проектирования и экспериментального исследования ИС ТИУ на основе различных полупроводниковых технологий (КМОП, SiGe БиКМОП, GaAs). На основе разработанных ТИУ реализован и исследован ряд оптических приемников со скоростью передачи до 25 Гбит/с.

Однокаскадный СВЧ ТИУ DC-30 ГГц на основе 0,25 мкм SiGe БиКМОП технологии, разработанный с использованием представленных методик символьного анализа, был экспериментально исследован на зондовой станции (рис. 10а). Сравнение результатов расчета $|Z_T|$ при помощи символьного анализа (SA), полных моделей (ADS) и измерений однокаскадного ИС ТИУ DC-30 ГГц представлено на рис. 10б. Коэффициент трансимпедансного усиления однокаскадного СВЧ ИС ТИУ на основе 0,25 мкм SiGe БиКМОП технологии составляет 48 дБ Ω , измеренный коэффициент шума соответствует 6-7 дБ, групповая задержка 14 ± 5 пс. Выходная мощность в точке сжатия 1 дБ на частоте 20 ГГц составляет -8,3 дБм при напряжении питания 2,5 В и токе потребления 9 мА.

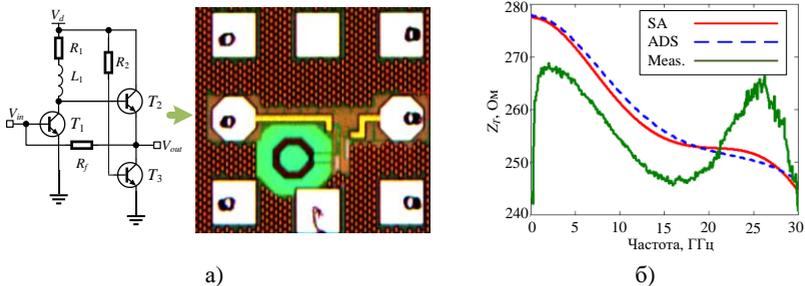


Рис. 10 – Принципиальная схема и топология (а), а также сравнение результатов расчета $|Z_T|$ при помощи символьного анализа (SA), полных моделей (ADS) и измерений однокаскадного ИС ТИУ DC-30 ГГц

С помощью представленных методик была разработана и исследована **ИС ТИУ 2,5 Гбит/с на основе отечественной 180 нм КМОП технологии**, а также гибридный оптический приемник на ее основе (рис. 11а). При этом используется InGaAs p-i-n фотодиодом 60Ф502АН5 (АО «ОКБ «Планета») с полосой пропускания до 7 ГГц и емкостью менее 300 фФ. По результатам измерений коэффициент преобразования приёмника равен -5...-8 дБ, полоса пропускания по уровню -3 дБ составила 2,1 ГГц, коэффициент отражения не хуже -10 дБ (рис. 11б).

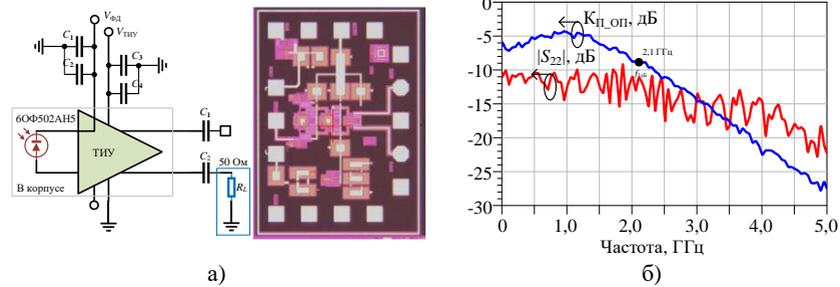


Рис. 11 – а) Структурная схема ОПРм 2,5 Гбит/с и топология ИС ТИУ на основе 180 нм КМОП технологии; б) коэффициенты преобразования и отражения

Интегральный ОПРм диапазона DC–20 ГГц с интегрированными фотодиодом, трёхкаскадным ТИУ и схемой подачи напряжения смещения на фотодиод, схема оптического приемника разработан на основе 0,25 мкм SiGe БикМОП ЕРІС технологии (рис. 12а).

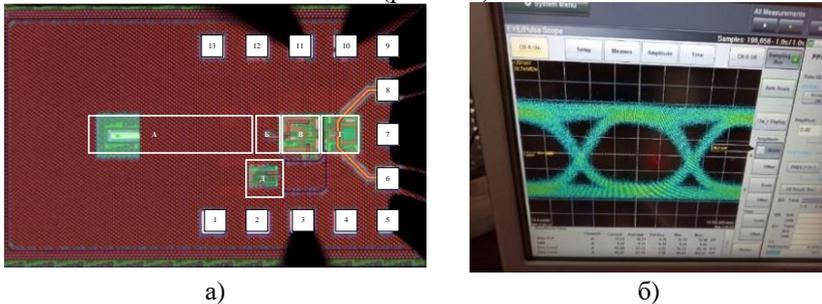


Рис. 12 – Фотография интегрального ОПРм на основе 0,25 мкм SiGe БикМОП ЕРІС технологии (б); глазковая диаграмма модуля ОПРм при скорости 11,3 Гб/с

Для ввода оптического сигнала используется дифракционная решетка, схема подачи напряжения смещения на ФД была интегрирована на микросхему. В ТИУ встроена обратная связь для компенсации смещения постоянного тока от ФД, возникающего в результате прямого детектирования модулированного оптического сигнала. Для экспериментального исследования был разработан модуль ОПРм на основе корпуса типа Butterfly (производство Куосега). В ходе эксперимента подтверждена работоспособность корпусированного ОПРм в условиях тестового сигнала.

Заключение. В результате исследования были описаны подходы к решению проблемы разработки однокаскадных и многокаскадных ТИУ. Основные результаты диссертационной работы сводятся к следующему:

1. Показано, что упрощенные линейные и шумовые ЭС интегральных СВЧ МОП ПТ и ГБТ обеспечивают достаточную для инженерных расчетов точность в полосе частот до 20-30 ГГц.

2. Разработаны алгоритмы автоматизированного получения и упрощения схемных функций электронных схем с учетом особенностей задачи символьного анализа СВЧ усилительных каскадов. Построены аналитические модели для типовых каскадов интегральных СВЧ ТИУ.

3. Получены аналитические формулы для инженерного расчета корректирующих элементов усилительных каскадов, в том числе с учетом емкости фотодиода.

4. Предложена методика проектирования СВЧ усилительных каскадов, разрешающая получать семейства АЧХ коэффициента усиления с разными величинами наклона в выбранном частотном диапазоне.

5. Предложена методика проектирования многокаскадных ТИУ с ПШК.

6. В совокупности разработанные алгоритмы и предложенные методики образуют систематическую процедуру автоматизированного символьного анализа, исследования и расчета усилительных каскадов интегральных СВЧ ТИУ и ОПРм на основе программных средств компьютерной алгебры и упрощенных ЭС транзисторов.

7. Разработан комплект СВЧ ИС ТИУ на базе отечественных 180 нм и 90 нм РЧ КМОП технологий АО "Микрон" для скоростей передачи данных от 5 Гбит/с до 20 Гбит/с.

8. Разработан и экспериментально исследован комплект СВЧ ИС ТИУ с полосой частот до 30 ГГц, изготовленных на основе 250 нм SiGe БиКМОП технологии.

9. Разработана и экспериментально исследована корпусированная ИС ТИУ, а также модуль гибридного оптического приемника на ее основе, для скоростей передачи данных до 2,5 Гбит/с на базе отечественной 180 нм КМОП технологии.

10. Разработан и экспериментально исследован монолитный интегральный оптический приемник со скоростью передачи до 25 Гбит/с на основе 250 нм SiGe БиКМОП технологии. Характеристики приемника, а также входящего в его состав ИС ТИУ, находятся на уровне зарубежных аналогов.

**Список публикаций автора диссертации, в которых отражены
основные научные результаты диссертации
Статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК**

1. Коряковцев А.С., Бабак Л.И., Коколов А.А. Компьютерный символьный анализ и исследование сигнальных характеристик СВЧ-интегрального трансимпедансного усилителя на КМОП-транзисторах // Доклады ТУСУР. – 2023. – № 26. – С. 7–15.

2. Коколов А.А. Фотонно-электронная интегральная схема на основе SiGe БиКМОП-технологии и модуль оптического приемника для систем передачи данных до 25 Гб/с / А.С. Коряковцев, Ф.И. Шеерман, Л.И. Бабак, Д.А. Конкин // Наноиндустрия. – 2021. – Т. 14. – № S7. – С. 438-439.

3. Коряковцев А.С. Разработка комплекта ис трансимпедансных усилителей на основе отечественной 90-нм КМОП-технологии для высокоскоростных оптических линий связи до 25 Гбит/с / Коколов А.А., Шеерман Ф.И., Бабак Л.И. // Наноиндустрия. – 2023. – Т. 16. – № S9-1 (119). – С. 161-165.

4. Миненко Д.Е., Коряковцев А.С., Помазанов А.В. Разработка корпуса для широкополосного радиопотонного передатчика до 25 ГГц, монтируемого по технологии поверхностного монтажа // Техника радиосвязи. – 2023. – № 1 (56). – С. 74-83.

Статья в журнале, входящем в Q2 Scopus

5. Kokolov A.A., Konkin D.A., Koryakovtsev A.S., Sheyerman F.I., Babak L.I. Microwave photonic ICs for 25 Gb/s optical link based on SIGE BiCMOS technology // Symmetry. – 2019. – Т. 11. – № 12. – С. 1453.

Статьи в изданиях, индексируемых WoS и Scopus

6. Kokolov A.A. Experimental Study and Modeling of High-Frequency Performances of Ge-Photodiode for Microwave Optical Receiver Integrated Circuits / A. A. Kokolov, F. I. Sheyerman, L. I. Babak, D. A. Konkin, A. V. Ubaichin, A. S. Koryakovtsev, E. A. Shutov // Journal PHOTONICS RUSSIA. – 2024.

7. Kokolov A.A. Differential transimpedance amplifier for 25 Gb/s optical links in a 0.25 μm SiGe BiCMOS technology / A.S. Koryakovtsev, F.I. Sheyerman, L.I. Babak // International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences, Proceedings. – 2019. – P. 233-236.

8. Koryakovtsev A.S. A DC-20 GHz integrated linear photonic receiver in a 0.25 μm BiCMOS SIGE:C technology / A.A. Kokolov, D.A. Konkin, F.I. Sheyerman, L.I. Babak // Dynamics. – 2019.

9. Koryakovtsev A.S. Design of Integrated Photonic Receiver with 20 GHz Bandwidth Based on 0.25- μm SiGe BiCMOS technolog / A.A. Kokolov, F.I. Sheyerman, L.I. Babak // EWDTs. – 2018.

Доклады в трудах международных и всероссийских конференций

10. Коряковцев А.С. Монолитный трансимпедансный усилитель диапазона DC-20 ГГц на основе SiGe BiCMOS технологии / А.В. Помазанов, Е.А. Шутов, А.А. Коколов // Научная сессия ТУСУР-2018: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2018.

11. Коряковцев А.С. Монолитный трансимпедансный усилитель диапазона DC-20 ГГц на основе SiGe BiCMOS технологии / А.В. Помазанов, А.А. Коколов // 28-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – 2018.

12. Коколов А.А. Разработка и экспериментальное исследование дифференциального трансимпедансного усилителя DC-20 ГГц на основе SiGe BiCMOS-технологии / А.С. Коряковцев, Л.И. Бабак, Ф.И. Шеерман,

Д.А. Конкин // 4-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули». – 2018.

13. Коряковцев А.С. Разработка ИС-трансимпедансного усилителя на основе отечественной 180 нм КМОП-технологии для 2,5 гбит/с оптических линий связи / А.А. Коколов, Ф.И. Шеерман // Электронные средства и системы управления: Матер. Междунар. научно-практ. конф. – 2022. – № 1-1. – С. 38-41.

14. Коряковцев А.С. Разработка и экспериментальное исследование интегрального оптического приемника на основе 0,25 мкм SIGE-БИКМОП-технологии для линий передачи со скоростью 25 гб/с / А.А. Коколов, Д.А. Конкин, Ф.И. Шеерман, Ю.С. Жидик // Электронные средства и системы управления: Матер. Междунар. научно-практ. конф. – 2019. – № 1-1. – С. 53-56.

15. Бабак Л.И. Модифицированный метод Брауде для проектирования ВЧ и СВЧ сверхширокополосных усилителей / А.С. Коряковцев // Электронные средства и системы управления: Матер. Междунар. научно-практ. конф. – 2023.

16. Коряковцев А.С. Проектирование многокаскадных СВЧ трансимпедансных усилителей с противозумовой коррекцией на основе символьного анализа и модифицированного метода Брауде / Л.И. Бабак, А.А. Коколов // Электронные средства и системы управления: Матер. Междунар. научно-практ. конф. – 2023.

17. Коряковцев А.С. Символьный анализ и расчет входного каскада СВЧ трансимпедансного усилителя по схеме КМОП-инвертора с обратной связью / Л.И. Бабак, А.А. Коколов // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2023. – Т. 1. – С. 145-150.

18. Коколов А.А. Дифференциальный трансимпедансный усилитель DC-20 ГГц на основе SIGE BICMOS технологии для интегрального оптического приемника / А.С. Коряковцев, Л.И. Бабак, Ф.И. Шеерман, Д.А. Конкин, Ю.А. Светличный // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2019. – Т. 1. – С. 218-223.

19. Коколов А.А. Экспериментальное исследование интегрального оптоэлектронного приемника на основе кремниевой технологии / А.С. Коряковцев, Ф.И. Шеерман, Л.И. Бабак, Д.А. Конкин // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2021. – № 3. – С. 413-414.

20. Коряковцев А.С. Разработка комплекта ИС трансимпедансных усилителей на основе отечественной 90-нм КМОП-технологии для высокоскоростных оптических линий связи до 25 гбит/с / А.А. Коколов, Ф.И. Шеерман, Л.И. Бабак // Микроэлектроника 2022. – 2022. – С. 249-250.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭМВ

21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭМВ № 2023685659 «Программа для символьного анализа СВЧ- трансимпедансных усилителей "Трансимпеданс"» // Коколов А.А., Коряковцев А.С.,

Бабак Л.И. – Заявка № 2023683602. Дата поступления 08.11.2023. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29.11.23.

Свидетельства о государственной регистрации топологий интегральных микросхем

22. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2018630181 «Монолитная интегральная схема Si-Ge BiCMOS трансимпедансного усилителя диапазона DC-20 ГГц с дифференциальным выходом и компенсацией постоянной составляющей» // Коряковцев А., Коколов А.А., Шеерман Ф.И., Бабак Л.И., 2018 г.

23. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2019630215 «Монолитная интегральная схема SIGE BiCMOS оптоэлектронного приемника диапазона DC-20 ГГц со встроенным трансимпедансным усилителем с дифференциальным выходом и компенсацией постоянной составляющей» // Коряковцев А., Коколов А.А., Шеерман Ф.И., Бабак Л.И., Конкин Д.А., 2019 г.

24. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2021630178 «Монолитная интегральная схема однокаскадного трансимпедансного усилителя диапазона DC-35 ГГц на основе 250 нм SIGE БИКМОП технологии» // Коколов А.А., Коряковцев А.С., Шеерман Ф.И., Бабак Л.И., 2021 г.

25. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2022630155 «Монолитная интегральная схема трансимпедансного усилителя для линий связи 25 Гб/с на основе 90 нм КМОП технологии» // Коколов А.А., Коряковцев А.С., Шеерман Ф.И., Бабак Л.И., 2022 г.

26. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2023630274 «Монолитная интегральная схема трансимпедансного усилителя для линий связи 2,5 Гб/с на основе 180 нм КМОП технологии» // Коколов А.А., Коряковцев А.С., Бабак Л.И., 2023 г.

27. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2024630158 «Монолитная интегральная схема однокаскадного трансимпедансного на основе 0,5 мкм GaAs PHEMT технологии» // Коколов А.А., Коряковцев А.С., Бабак Л.И., 2024 г.