

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

по диссертации Коряковцева Артёма Сергеевича

«Автоматизированное проектирование и разработка интегральных трансимпедансных усилителей для быстродействующих оптических приемников», на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.14 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

### **Актуальность темы диссертационной работы.**

Широкополосные трансимпедансные усилители (ТИУ) СВЧ диапазона являются важными функциональными элементами при построении волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) аналоговых и цифровых сигналов. В связи с растущим объемом передачи и приёма данных, современные ВОСП постоянно развиваются, при этом возрастают требования к характеристикам используемых компонентов, в частности к ТИУ. Кроме того активно создаются новые технологии изготовления СВЧ блоков и методов их проектирования.

Следует отметить, что в настоящее время для России разработка ИС СВЧ ТИУ на отечественных полупроводниковых технологиях (КМОП 90нм, 180 нм) является достаточно новым направлением. Это связано с тем, что комплексные работы по созданию на базе КМОП технологий отечественных ИС СВЧ ТИУ с полосами пропускания выше 3 ГГц в нашей стране пока не проводились, а выпуск подобных микросхем вообще отсутствует или ограничен применением готовых зарубежных компонентов.

Анализ отечественной и зарубежной литературы, проведенный автором в диссертации, показал, что существующие подходы и методики расчета для данного диапазона частот являются либо слишком упрощенными, либо ориентированы на решение отдельных частных задач проектирования СВЧ ТИУ. Также отсутствует систематизированный 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.

Таким образом, рассматриваемые в диссертационной работе 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 создание эффективных методик исследования и проектирования таких устройств являются актуальными. При этом важными аспектами в данном направлении является обеспечение заданной формы амплитудно-частотной

характеристики (АЧХ) и получение минимальных значений эквивалентного входного шумового тока.

#### **Содержание диссертации.**

Диссертация общим объемом 248 страниц содержит введение, три главы, заключение, список сокращений, список использованных литературных источников, включая публикации автора по теме исследования, 6 приложений.

*Во введении* обосновывается актуальность темы диссертационного исследования, формулируются цели и задачи, научная новизна, а также положения, выносимые на защиту.

*В первом разделе* рассматриваются структурные схемы и характеристики оптических приёмников; существующие схемные решения и подходы к проектированию интегральных СВЧ широкополосных усилителей и ТИУ; достоинства автоматизированного символьного анализа линейных активных цепей.

*Во втором разделе* построены и верифицированы линейные и шумовые ЭС СВЧ МОП- и гетеробиполярных транзисторов. Выполнены символьный анализ и исследование характеристик типовых усилительных каскадов СВЧ ТИУ на МОП транзисторах и получены формулы для инженерного расчета элементов исследованных каскадов. Предложены методики проектирования каскадов с заданной формой АЧХ и многокаскадных СВЧ ТИУ с ПШК.

*В третьем разделе* представлены результаты автоматизированного проектирования и экспериментального исследования ИС ТИУ на основе различных полупроводниковых технологий (КМОП, SiGe БиКМОП, GaAs). На основе разработанных ТИУ реализованы и исследованы оптические приёмники со скоростями передачи 2,5 Гбит/с и 25 Гбит/с.

*В заключении* перечислены основные результаты диссертационного исследования.

*В приложении* представлен дополнительный обзор литературы, сведения о результатах проектирования ИС ТИУ для скоростей передачи данных до 25 Гбит/с, приведены акты об использовании результатов диссертационного исследования, а также свидетельства о государственной регистрации ПО и топологии интегральных микросхем.

**Степень обоснованности и достоверность научных положений и результатов работы.** Достоверность полученных результатов и положений диссертационной работы обеспечиваются качественным сопоставлением полученных результатов с имеющимися современными теоретическими и экспериментальными данными, выполнением электромагнитного 3D моделирования на ЭВМ и экспериментального исследования разработанных устройств.

### **Научная новизна работы 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 АЧХ с возрастанием частоты, влияния 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 противозумовой 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.

4. Оригинальность работы заключается в высокой эффективности обоснованно выбранных подходов и методов исследования для указанного диапазона частот, базирующихся на использовании эквивалентных схем полевого и биполярного транзистора. Это позволило автору получить результаты, сопоставимые с современными достижениями мирового уровня в области сверхширокополосных СВЧ усилителей небольшой мощности. Данный подход целесообразно применять и для частотно-избирательных и маломощных управляемых СВЧ устройств.

### **Практическая значимость работы состоит в следующем:**

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. Разработанные программы позволяют выполнить символичный анализ и численное моделирование комплекса характеристик распространенных типов усилительных каскадов СВЧ ТИУ с целью исследования частотных свойств. Они также позволяют провести расчет цепи коррекции каскадов с требуемой формой АЧХ коэффициента усиления, а также осуществить проектирование оптических приемников с многокаскадными ТИУ, в которых использована противошумовая коррекция.

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.

**Основные результаты работы** опубликованы в 27 научных работах, среди которых 4 статьи в научных журналах, включенных в перечень ВАК, остальные статьи в сборниках трудов международных и всероссийских конференций, имеется 6 свидетельств о

регистрации топологий интегральных микросхем, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

**Замечания по диссертационной работе:**

1. Исследование устойчивости выполнено только для линейного режима работы, что не совсем верно, учитывая тот факт, что при максимальном уровне сигнала усилитель всё-таки будет работать в нелинейном режиме.

2. В работе не в полном объеме представлен анализ цифрового сигнала при прохождении через усилительный каскад.

3. Автором исследованы лишь несколько схем входных каскадов; не обоснован выбор схем входных каскадов для символьного анализа; неясно, как выполняется анализ следующих за ними дифференциальных схем.

**Заключение.** Диссертация является завершенной научной работой, соответствует критериям, установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским работам, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.14 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии».

Согласен на включение моих персональных данных в аттестационное дело соискателя А.С. Коряковцева и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,  
доктор технических наук по специальности «Антенны,  
СВЧ-устройства и их технологии», профессор кафедры  
теоретических основ радиотехники НГТУ

Разинкин Владимир Павлович

  
« 09 » январь 2025 г.

Подпись официального оппонента заверяю:  
начальник ОК НГТУ

О.К. Пустовалова

« 09 » январь 2025 г.



Контактная информация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Адрес: 630073, г. Новосибирск, пр-т. К. Маркса, 20

Тел. +7 (3833) 46-08-34, e-mail: razinkin@corp.nstu.ru