

На правах рукописи



Ерохин Виктор Валерьевич

**СИНТЕЗ И РЕАЛИЗАЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ
СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ LC-ФИЛЬТРОВ И ИХ ТОПОЛОГИЙ С
МИНИМИЗАЦИЕЙ ПОТЕРЬ В ПОЛОСЕ ПРОПУСКАНИЯ ДЛЯ
СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИСТЕМ НА КРИСТАЛЛЕ**

Специальность: 2.2.13. – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Омск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования “Омский государственный технический университет”.

Научный руководитель:

Завьялов Сергей Анатольевич,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры “Радиотехнические устройства
и системы диагностики” федерального
государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования “Омский
государственный технический университет”

Официальные оппоненты:

Шакин Олег Васильевич,
доктор технических наук, старший научный сотруд-
ник, старший научный сотрудник Отделения физики
диэлектриков и полупроводников федерального госу-
дарственного бюджетного учреждения науки Физико-
технического института им. А.Ф. Иоффе Российской
академии наук

Доберштейн Сергей Александрович,
кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник акционерного общества “Омский
научно-исследовательский институт
приборостроения”

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образова-
тельное учреждение высшего образования “Сибирский
государственный университет телекоммуникаций и
информатики”, г. Новосибирск

Защита состоится “29” февраля 2024 г. в 15:00 часов в зале заседания диссертационного совета на заседании совета 24.2.350.01, созданного на базе ОмГТУ, по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, главный корпус, П-202.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономно-го образовательного учреждения высшего образования “Омский государственный технический университет” и на сайте организации www.omgtu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направ-лять по адресу: 644050, Омск, пр. Мира, 11, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.350.01.

Автореферат разослан “___” _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.350.01,
кандидат технических наук, доцент



С.А. Завьялов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Характеристики интегральных LC-фильтров СВЧ диапазона определяют ряд параметров современных сверхширокополосных радиотехнических средств связи, радиолокации и управления, выполненных в виде устройств типа “система на кристалле” (СнК), таких как избирательность, помехозащищенность, массогабаритные показатели. Частотные фильтры СВЧ диапазона, выполненные на основе ПАВ-структур, микрополосковых линий, объемных резонаторов не отвечают требованиям, предъявляемым к сверхширокополосным устройствам типа СнК, таким как относительная ширина полос пропускания и массогабаритные показатели.

Для проектирования интегральных схем (ИС) используется библиотека базовых компонентов, или PDK (Process Design Kit), которая описывает модели активных и пассивных элементов для конкретного технологического процесса. PDK предоставляется производителем ИС. Ошибки и неточности в базовых моделях пассивных элементов ведут к несоответствию моделируемых и реальных характеристик LC-фильтров.

Диссертационная работа посвящена вопросам исследования возможностей реализации библиотеки достоверных моделей интегральных пассивных элементов технологических процессов Si, SiGe, GaAs, применяемых для реализации устройств типа СнК, вопросам минимизации потерь в полосе пропускания фильтров, вопросам конструирования интегральных фильтров в целом.

Исследования по теме диссертации проводились в ходе выполнения ПНИР № АААА-А17-117102470012-8 от 24.10.2017, проводящейся в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы». Результаты исследования были применены в ходе выполнения НИР № 122091300037-0 от 13 сентября 2022 года в рамках федерального проекта “Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности” по гос. заданию на выполнение научно-исследовательской работы “Разработка методики прототипирования электронной компонентной базы на отечественных микроэлектронных производствах на основе сервиса MPW (FSMR-2023-0008)”, и в ходе выполнения НИОКР № АААА-Б20-220122990013-5 от 29.12.2020.

Степень проработанности проблемы. В данный момент процесс синтеза принципиальных схем LC-фильтров методом аппроксимации АЧХ автоматизирован в различных ПО, таких как MatLab, Micro-Cap, FiltersSolutions и др. Однако, результаты такого синтеза напрямую не применимы к интегральным LC-фильтрам ввиду того, что при таком синтезе не учитываются физические эффекты в ИС и характеристики технологического процесса, из-за чего характеристики реальных фильтров не соответствуют исходным данным синтеза. На сегодняшний день в мире отсутствуют коммерческие системы автоматизированного проектирования топологий интегральных LC-фильтров СВЧ диапазона.

Описанные в литературе способы уменьшения потерь в полосе пропускания фильтров имеют недостатки и ограниченную область эффективного применения, а также отсутствуют методики, позволяющие оценить эффективность и найти оп-

тимальную комбинацию этих способов для реализации топологии конкретного фильтра в конкретном технологическом процессе.

Объект исследования: интегральные LC-фильтры СВЧ диапазона.

Предмет исследования: аналитические модели элементов фильтров, минимизация потерь в полосе пропускания, методика синтеза топологий интегральных LC-фильтров СВЧ диапазона.

Цель диссертационной работы: достижение соответствия результатов моделирования и реальных характеристик интегральных LC-фильтров диапазона частот 1-40 ГГц и уменьшение потерь в полосе их пропускания.

Для достижения поставленной цели диссертационной работы были поставлены и решены следующие **основные задачи:**

1. Исследованы методы моделирования СВЧ интегральных LC-фильтров.
2. Проанализированы структуры и характеристики Si, SiGe, GaAs технологических процессов отечественных и мировых полупроводниковых фабрик, вследствие чего, определен ряд характеристик и ограничений, которые должны быть учтены при проектировании интегральных LC-фильтров.
3. Разработана и экспериментально верифицирована библиотека достоверных аналитических моделей интегральных пассивных элементов (катушек индуктивности, конденсаторов, проводников)
4. Исследованы способы увеличения добротности сосредоточенных элементов и уменьшения потерь в проводниках межсоединений и разработаны алгоритмы оптимизации топологий сосредоточенных элементов по критерию получения максимальной добротности и алгоритм оптимизации топологий проводников по критерию минимальных потерь в полосе пропускания фильтров, в том числе с использованием таких способов, как дублирование слоев металлизаций, экранирование, травление подложки.
5. Разработана методика минимизации длины проводников межсоединений, основанная на поиске минимального расстояния между катушками индуктивности, исключаящего паразитные электромагнитные связи между ними.
6. Разработана методика синтеза топологий интегральных LC-фильтров с минимизацией потерь в полосе пропускания для использования их в качестве сложно-функциональных блоков сверхширокополосных систем на кристалле СВЧ диапазона.

Методы исследования:

1. Теоретические: методы теории электрических цепей для расчета LC-фильтров, моделирование численными методами: 3D методами моделирования при помощи ПО Empire XPU и САПР Advanced Design System (ADS), 2.5D методами моделирования в САПР Cadence Virtuoso, квазистатическими методами моделирования средствами системы компьютерной алгебры MathCAD.
2. Экспериментальные: векторный анализ электрических цепей для получения значений электрических параметров интегральных фильтров.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Получены новые аналитические выражения расчета индуктивности симметричных планарных катушек квадратной и восьмиугольной формы с погрешностью не более 2% для интегральных катушек номиналом 0,1 – 10 нГн.

2. Впервые предложены аналитические модели интегральных катушек индуктивности, конденсаторов, проводников отличающиеся унификацией применения во всех Si, SiGe, GaAs технологических процессах за счет учета структуры, ряда характеристик и ограничений технологического процесса, скин-эффекта, краевых эффектов, влияния экранирования и травления подложки.

3. Предложена методика и аналитические выражения минимизации длин проводников межсоединений интегральных LC-фильтров, основанные на поиске минимального расстояния между катушками индуктивности, при котором электромагнитными связями между катушками можно пренебречь.

Достоверность результатов исследования подтверждается использованием в процессе исследований адекватных физически обоснованных математических моделей, логической обоснованностью выводов, строгостью доказательств. Достоверность полученных результатов оценивалась методом сравнения экспериментальных данных с результатами моделирования.

Теоретическая значимость состоит в развитии теории синтеза аналоговых фильтров в части синтеза интегральных LC-фильтров диапазона рабочих частот 1-40 ГГц с минимизацией потерь в полосе пропускания.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

1. Конфигурируемые модели катушек индуктивности, конденсаторов, проводников реализованы в качестве программных кодов на языке программирования Spectre [6, 7, 8], что позволяет использовать их в качестве достоверных моделей элементов в САПР Cadence Virtuoso при проектировании широкого спектра интегральных устройств.

2. Разработанная программа синтеза топологий интегральных LC-фильтров [9] позволяет значительно упростить процесс проектирования и сократить время получения оптимальной топологии фильтра до десятков минут.

3. Результаты исследований применены при проектировании LC-фильтров в качестве сложно-функциональных блоков сверхширокополосных приемников с рабочим частотным диапазоном 0,8-20 ГГц, 1-18 ГГц, 18-40 ГГц [10, 11] (ПНИР № АААА-А17-117102470012-8, НИОКР № АААА-Б20-220122990013-5) и качестве сложно-функциональных блоков модулятора телевизионных сигналов с выходным частотным диапазоном 1-1,4 ГГц [12, 13] (НИР № 122091300037-0), что подтверждается актами внедрения.

4. Применение разработанной методики синтеза топологий LC-фильтров с минимизацией потерь в полосе пропускания позволило уменьшить потери в полосе пропускания фильтров на 1,9 - 2,7 дБ, увеличить крутизну АЧХ ФВЧ 1 ГГц на 54 - 56 дБ/дек, крутизну фронта АЧХ ПФ 14-18 ГГц на 56 - 58 дБ/дек, крутизну спада АЧХ ПФ 14-18 ГГц на 247 - 250 дБ/дек, уменьшить разброс частот среза в крайних точках технологического разброса по сравнению с ранее произведенными фильтрами, разработанными без оптимизации.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Новые аналитические формулы расчета индуктивности планарных симметричных катушек квадратной и восьмиугольной формы, полученные путем декомпозиции топологии катушки на части (полные витки, внутренний не полный виток, выводы) и расчетом индуктивности каждой части и взаимных индуктивностей между частями.

2. Верифицированные аналитические конфигурируемые модели интегральных катушек индуктивности, конденсаторов, проводников, учитывающие структуру и характеристики технологического процесса, скин-эффект, краевые эффекты, влияние подложки, экранирования, травления подложки.

3. Алгоритмы поиска топологий катушек индуктивности, конденсаторов с максимальной добротностью на требуемой частоте и топологий проводников, обеспечивающих минимальные потери фильтра в полосе пропускания с применением таких способов уменьшения потерь, как использование нескольких параллельных слоев металлизаций, заземленного экрана под катушками индуктивности и проводниками, травления подложки под катушками индуктивности.

4. Методика минимизации длин проводников межсоединений, основанная на поиске минимального расстояния между катушками индуктивности.

5. Методика синтеза топологий интегральных LC-фильтров с минимизацией потерь в полосе пропускания, основанная на максимизации добротностей элементов и минимизации потерь в проводниках межсоединений.

Личный вклад автора. Результаты исследований, представленные в диссертационной работе, получены автором лично. Личный вклад автора включает формулировку цели и задач исследования, выбор путей их решения, разработку методик и алгоритмов, применение результатов исследований в НИР. Практическая реализация основных результатов работы, измерения экспериментальных образцов осуществлялись при непосредственном участии автора, обработка результатов выполнена автором лично. В работах, опубликованных в соавторстве, автором получены существенные теоретические и практические результаты.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были представлены в докладах на следующих конференциях:

- всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Микроэлектроника и информатика-2023», МИЭТ, г. Зеленоград (2023 г.);

- всероссийская конференция по микроэлектронике «Школа молодых ученых» в рамках форума «Микроэлектроника-2022», Республика Крым, г. Ялта, пгт Гурзуф (2022 г.);

- международная научная конференция по моделированию и анализу комплексных систем и процессов «MACSPRO 2022», ВШЭ, г. Москва (2022 г.);

- всероссийская научно-техническая конференция «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем», ЦКБА, г. Омск (2020, 2022 г.);

- международная IEEE научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин», ОмГТУ, г. Омск (2022 г., 2023 г.);

- региональная научно-техническая конференция «Ученые Омска - региону», ОмГТУ, г. Омск (2019, 2020 г.).

Публикации. Результаты проведенных исследований опубликованы в 22 работах, в том числе: 3 в изданиях, включенных в перечень ВАК, 2 работы в издании, индексируемом в базах данных Scopus, зарегистрированы 4 программы для ЭВМ, 7 топологий интегральных микросхем, 6 публикаций в материалах конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из списка сокращений и условных обозначений, введения, пяти глав, списка литературы и приложений. Общий объем составляет 181 страницу машинописного текста, 77 рисунков, 29 таблиц, 179 формул, а также списка использованных источников, включающих в себя 85 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, приведена научная новизна и практическая значимость работы. Представлены основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1. Анализ особенностей проектирования СВЧ LC-фильтров. В разделе произведен анализ вариантов реализации пассивных СВЧ фильтров, численных методов их моделирования; исследованы модели пассивных элементов технологических процессов (ТП) отечественных и зарубежных полупроводниковых фабрик и выявлены их недостатки; выполнен анализ характеристик и ограничений Si, SiGe, GaAs технологических процессов, влияющих на характеристики LC-фильтров; исследованы способы уменьшения потерь в полосе пропускания интегральных LC-фильтров.

В результате исследований численных методов моделирования СВЧ фильтров установлено, что квазистатические методы обладают наибольшей скоростью моделирования, применение которых позволило реализовать автоматизированный синтез и оптимизацию топологий интегральных СВЧ LC-фильтров в системах компьютерной алгебры. Для устранения недостатков квазистатических методов были разработаны достоверные аналитические модели катушек индуктивности, конденсаторов, проводников (глава 2) и ограничено количество вариаций топологий фильтров (глава 4).

В результате анализа базовых моделей элементов технологических процессов отечественных и зарубежных полупроводниковых фабрик (в том числе АО «Микрон», TSMC, IHP, Silterra, HiWafer), выявлено, что модели имеют один или несколько недостатков из следующих:

- Не учитывается скин-эффект;
- Не учитываются краевые эффекты;
- Не учитывается или учитывается в упрощенном виде подложка;
- Не учитывается влияние переходных отверстий между слоями металлизаций;
- Не учитывается индуктивность проводников межсоединений;
- Номинал индуктивности не соответствует реальному.

В результате анализа документации (PDK) технологических процессов ведущих мировых и отечественных полупроводниковых фабрик определены характеристики и ограничения, которые необходимо учитывать при проектировании интегральных СВЧ LC-фильтров. Такими характеристиками являются:

- количество слоев металлизаций (n_0);
- толщины (t_i) и удельные сопротивления слоев металлизаций (ρ_i);
- сопротивление переходных отверстий (r_{via});
- толщины диэлектрических слоев между слоями металлизаций и подложкой (h_i) и их диэлектрическая проницаемость (ϵ);
- удельное сопротивление (ρ_{sub}), толщина (t_{sub}) и диэлектрическая проницаемость (ϵ_{sub}) подложки;
- наличие специализированных слоев для реализации МИМ конденсаторов.

Ограничения технологического процесса:

- минимальный угол поворота проводников (φ_{min});
- минимальная (w_{min}) и максимальная (w_{max}) ширина проводника;
- минимальный шаг изменения геометрии проводника (min_step);
- минимальный зазор между проводниками (s_{min});
- максимальный постоянный ток на единицу ширины проводника (J_{max});
- длина и ширина переходного отверстия (a), минимальное расстояние между переходными отверстиями (b), минимальное расстояние между переходным отверстием и краем проводника (c).

В ходе исследования способов уменьшения потерь в полосе пропускания интегральных LC-фильтров произведен анализ способов увеличения добротности сосредоточенных элементов и уменьшения потерь в проводниках межсоединений. В результате определены оптимальные формы планарных катушек в зависимости от разрешенного угла поворота проводников: для 90° – симметричные катушки квадратной формы, для 45° – симметричные катушки восьмиугольной формы, при отсутствии ограничения – спиральные катушки круглой формы. Выявлено, что поиск оптимальной топологии планарной катушки индуктивности сводится к поиску оптимальной комбинации трех параметров катушки: ширина витков, количество используемых слоев металлизации, наличие/отсутствие экрана или травления подложки. При этом зазор между витками устанавливается минимальным, исходя из ограничений технологического процесса, количество витков выбирается максимально возможным и зависит от ширины витков – это позволяет максимизировать индуктивность на единицу занимаемой площади катушкой, а, следовательно, и добротность. Внутренний диаметр подстраивается для получения требуемого номинала индуктивности.

В результате исследования интегральных конденсаторов выявлено, что максимальной добротностью обладают МИМ конденсаторы с отношением сторон близким к единице. Определено, что поиск оптимальной топологии встречно-штыревых конденсаторов (ВШК) сводится к одному параметру: количество используемых слоев металлизации, при котором достигается максимальная добротность. При этом ширина пальцев и зазор между пальцами выбираются минимальными для достижения максимальной плотности расположения пальцев. Длина и

количество пальцев рассчитываются исходя из равенства длины и ширины ВШК, что позволяет минимизировать влияние краевых эффектов.

Анализ потерь в проводниках межсоединений показал, что поиск топологий проводников, при которых достигаются минимальные потери фильтра в полосе пропускания сводится к поиску оптимальной комбинации параметров: ширина проводника, количество используемых слоев металлизаций. Выявлено, что при определенных конфигурациях проводника применение заземленного экрана под проводником уменьшает потери в полосе пропускания фильтров, поэтому при оптимизации оценивается эффективность применения заземленного экрана под проводником.

Глава 2. Аналитические модели элементов интегральных LC-фильтров. Раздел посвящен разработке достоверных аналитических моделей интегральных катушек индуктивности, конденсаторов и проводников, учитывающих характеристики технологического процесса и основные физические эффекты.

Наиболее точным методом расчета полной индуктивности интегральных планарных катушек индуктивности квадратной и восьмиугольной форм является метод, заключающийся в разбиении топологий катушек на прямоугольные сегменты, нахождения собственных индуктивностей сегментов и взаимных индуктивностей между каждым сегментом и всеми остальными сегментами. В литературе отсутствуют аналитические формулы расчета индуктивности планарных симметричных катушек, полученные с применением этого метода.

Для получения аналитических формул предложен модернизированный метод, который заключается в том, что предварительно топология катушки разбивается на части (полные витки, внутренний не полный виток, выводы), рассчитывается полная индуктивность каждой части путем разбиения на прямоугольные сегменты и находятся все собственные и взаимные индуктивности, далее рассчитываются взаимные индуктивности каждой части со всеми остальными.

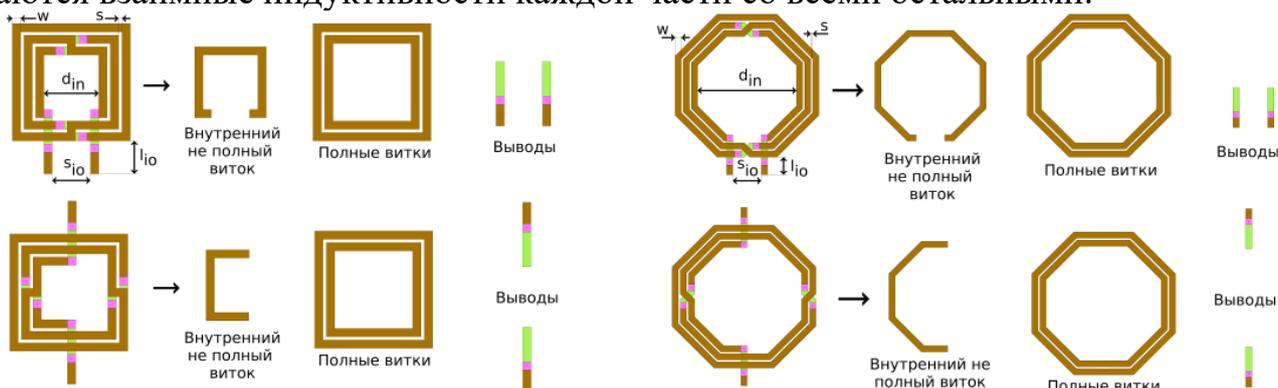


Рисунок 1 – Разбиение топологий катушек на части

Получена обобщенная формула расчета планарных катушек индуктивности квадратной и восьмиугольной форм по предложенному методу:

$$L_{ind} = L_{inner} + L_{io} + M_{io}(1) + \sum_{i=2}^{\text{ceil}(N)} \left[L_{coil}(i) + M_{inner}(i) + M_{io}(i) + \sum_{n=2}^{\text{ceil}(N)} \left(\frac{M_{coils}(i,n)}{2} \right) \right] \quad (1)$$

где N – количество витков, функция $\text{ceil}(N)$ – возвращает округленное значение N вверх до ближайшего целого, L_{inner} – индуктивность внутреннего (непол-

ного) витка, $L_{coil}(i)$ – индуктивность i -го полного витка, L_{io} – индуктивность выводов, $M_{inner}(i)$ – взаимная индуктивность i -го витка и внутреннего неполного витка, $M_{coils}(i,n)$ – взаимная индуктивность i -го и n -го полных витков, $M_{io}(i)$ – взаимная индуктивность i -го витка и выводов.

В результате применения предложенного метода декомпозиции топологий катушек индуктивности и использования ранее известных формул расчета взаимных индуктивностей прямоугольных проводников были получены аналитические формулы расчета индуктивности симметричных планарных катушек прямоугольного сечения квадратной и восьмиугольной форм, параметрами расчета которых являются: количество витков (N), ширина витков (w), зазор между витками (s), внутренний диаметр (d_{in}), количество используемых слоев металлизаций (n_{use}), длина выводов (l_{io}), характеристики технологического процесса (n_0, t_i, h_i).

Для оценки точности полученных формул расчета индуктивности были произведены 3D моделирования катушек индуктивности с различными параметрами методом конечных элементов в САПР Advanced Design System (ADS) в идеализированном технологическом процессе (слои металлизации и переходные отверстия – идеальные проводники, подложка отсутствует, в качестве диэлектрика используется воздух). В научных публикациях результаты 3D электромагнитного моделирования методом конечных элементов (МКЭ) и методом моментов (MoM) применяются в качестве эталона для верификации моделей интегральных пассивных элементов и в частности катушек индуктивности. На рисунке 2 представлено сравнение погрешностей расчета индуктивности по полученным формулам и ранее опубликованным формулам относительно результатов моделирования. Установлено, что полученные формулы расчета индуктивностей планарных симметричных катушек квадратной и восьмиугольной форм имеют погрешность не более 2%, в то время как погрешности ранее опубликованных формул достигают 10% для номиналов 100 - 500 пГн.

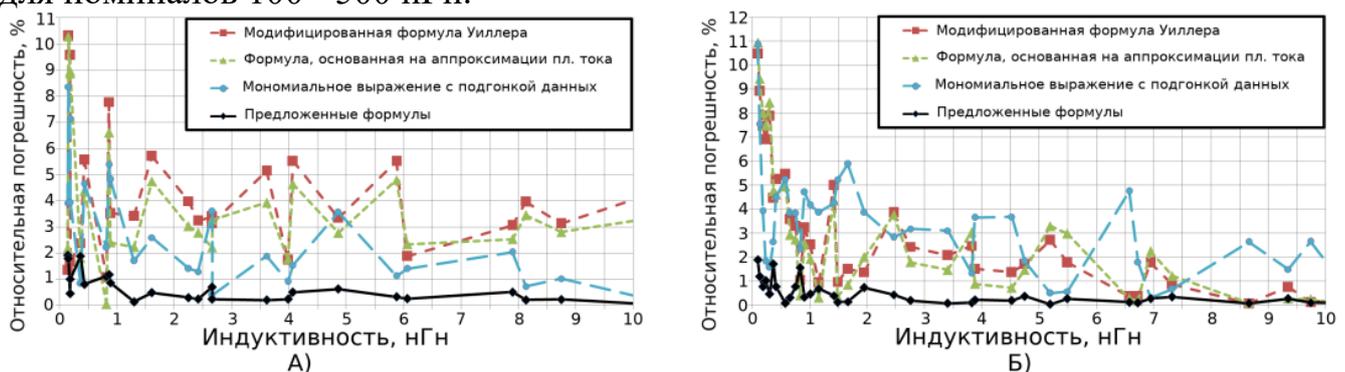


Рисунок 2 – Сравнение погрешностей расчета индуктивности катушек квадратной (А) и восьмиугольной (Б) форм

Для расчета индуктивности спиральной катушки круглой формы была использована модифицированная формула Неймана, которая была дополнена учетом собственных и взаимных индуктивностей выводов катушки. Путем сравнения с результатами 3D моделирования МКЭ установлено, что погрешность расчета индуктивности планарной катушки круглой формы при использовании предложенной формулы не превышает 4,5%.

В основе моделей интегральных катушек индуктивности, конденсаторов, проводников были использованы эквивалентные П-модели (рисунок 3).

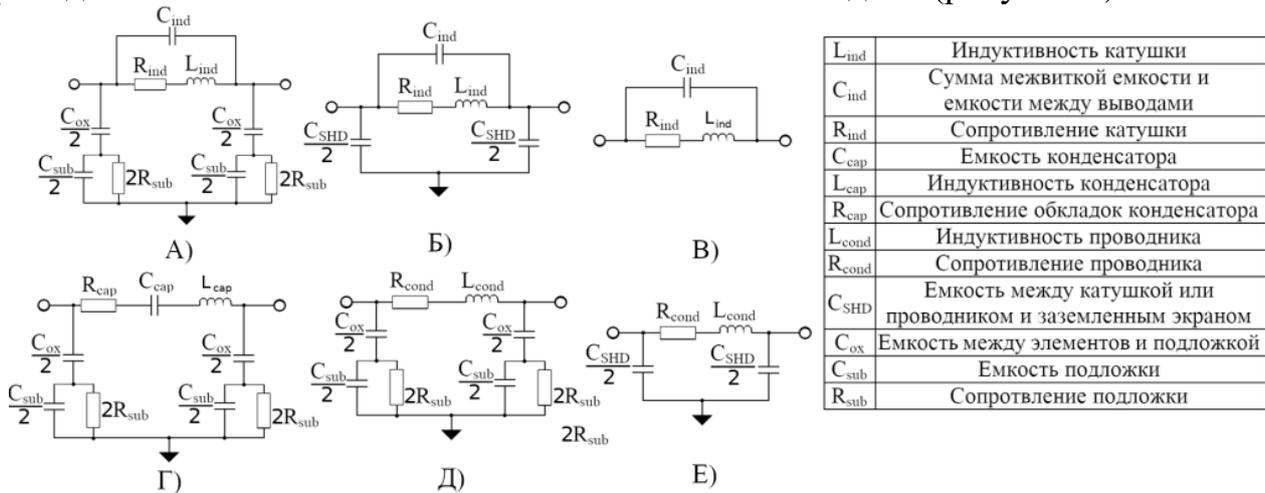


Рисунок 3 – Эквивалентные схемы элементов интегральных LC-фильтров: А) катушка индуктивности, Б) катушка индуктивности с экраном в нижнем слое металлизации, В) катушка индуктивности с травлением подложки, Г) конденсатор, Д) проводник, Е) проводник с экраном в нижнем слое металлизации

Паразитные последовательные сопротивления элементов (R_{ind} , R_{cap} , R_{cond}) в СВЧ диапазоне рассчитываются с учетом скин-эффекта и сопротивления переходных отверстий. Выявлено, что радиус сечения переходных отверстий в технологических процессах Si, SiGe составляет десятки-сотни нм, что значительно меньше толщины скин-слоя в частотном диапазоне 1-40 ГГц, поэтому скин-эффект не оказывает влияния на сопротивление переходных отверстий. Для минимизации сопротивления массива переходных отверстий разработана формула расчета максимального количества переходных отверстий квадратного сечения между слоями металлизаций:

$$N_{via}(w, l) \leq \left[\left(\frac{w - 2 \cdot c + b}{a + b} \right) \cdot \left(\frac{l - 2 \cdot c + b}{a + b} \right) \right] \quad (2)$$

где w и l – длина и ширина проводника.

Для расчета сопротивления R_{ind} катушки, выполненной в одном слое металлизации была выведена формула (3), для выполненной в нескольких слоях металлизаций выведена формула (4). N_{mas} – количество массивов переходных отверстий, которое зависит от формы катушки. Для симметричных квадратных и восьмиугольных катушек $N_{mas} = 2 \cdot (N - 1) + 4$, для спиральных круглых катушек $N_{mas} = 2$ ($N_{mas} = 0$ при $N \leq 1$). Формулы (3-4) применимы для расчета сопротивления проводника R_{cond} , при этом $N_{mas} = 0$, а l_{ind} и l_{ind_jump} равны длине проводника l_c .

$$R_{ind}(f) = R_{skin}(w, l_{ind}, t_{n_0}, \rho_{n_0}, f) + N_{mas} \cdot \frac{r_{via}}{N_{via}(w, w)} \quad (3)$$

$$\frac{1}{R_{ind}(f)} = \frac{1}{R_{skin}(w, l_{ind}, t_{n_0}, \rho_{n_0}, f)} + \sum_{i=n_0}^{n_0 - n_{use}} \frac{1}{R_{skin}(w, l_{ind}, t_{n_0 - i}, \rho_{n_0 - i}, f) + \frac{r_{via}}{N_{via}(w, l_{ind_jump})}} \quad (4)$$

где $R_{skin}(w, l_{ind}, t_{n_0}, \rho_{n_0}, f)$ – сопротивление проводника шириной w , длиной l_{ind} , толщиной t_{n_0} , с удельным сопротивлением, ρ_{n_0} , с учетом скин-эффекта на частоте f ,

n_{use} – количество слоев металлизации, используемых в катушке, l_{ind} – полная длина катушки, l_{ind_jump} – длина катушки, за вычетом перемычек. В перемычках не располагаются переходные отверстия.

Для учета краевых эффектов при расчетах емкостей C_{cap} , C_{ind} , C_{ox} , C_{SHD} была использована формула Палмера, которая имеет расхождение с моделированием методом конечных элементов не более 1,3%, при этом технологический разброс диэлектрической проницаемости SiO_2 может достигать 5%.

Для расчета емкости и сопротивления подложки были использованы формулы, учитывающие краевые эффекты, полученные авторами Гони, Пино, Гонсалес, Эрнандес методом изображений. Формулы верифицированы авторами для площадей элементов до 40000 μm^2 .

В результате анализа физических свойств элементов фильтров разработаны конфигурируемые модели интегральных катушек индуктивности, конденсаторов и проводников, реализованные в качестве программ для ЭВМ на языках программирования Spectre [6,7,8] и MathCad, рассчитываемых аналитически на основе характеристик технологического процесса и следующих параметров:

- Катушки индуктивности: ширина витка, внутренний диаметр, зазор между витками, количество витков, длина выводов, количество используемых слоев металлизации, наличие/отсутствие заземленного экрана или травление подложки;
- МИМ конденсаторы: длина и ширина обкладок;
- Встречно-штыревые конденсаторы: ширина пальцев, длина пальцев, зазор между пальцами, количество пальцев, количество используемых слоев металлизации.
- Проводники: длина, ширина, количество используемых слоев металлизации, наличие/отсутствие заземленного экрана.

Новизна моделей заключается в их параметризации и выведении полных аналитических зависимостей между указанными параметрами элементов и характеристиками реальных элементов в заданном технологическом процессе, в том числе с использованием различных комбинаций способов уменьшения потерь. Это позволяет использовать модели при оптимизации топологий элементов или для сравнения характеристик элементов в разных технологических процессах.

Для верификации моделей элементов на их основе разработаны модели ранее произведенных экспериментальных образцов интегральных микросхем в технологическом процессе SiGe 130 нм: тестовая катушка индуктивности (рисунок 4), фильтр верхних частот с частотой среза 18 ГГц (рисунок 5), полосовой фильтр с полосой пропускания 14-18 ГГц (рисунок 6).

Измерения характеристик экспериментальных образцов выполнены с использованием зондовой станции MPI TS200 и анализатора спектра Rohde & Schwarz ZVA-40. Перед измерениями микросхем измерительная установка прошла калибровку на специализированных калибровочных пластинах. 3D моделирования тестовой катушки индуктивности выполнены в САПР Empire XPU, 2.5D моделирования фильтров в САПР Cadence Virtuoso.

По графикам, изображенным на рисунке 4 видно, что измеренные эффективные индуктивность и добротность тестовой катушки индуктивности находятся в диапазоне симулированных характеристик разработанной модели.

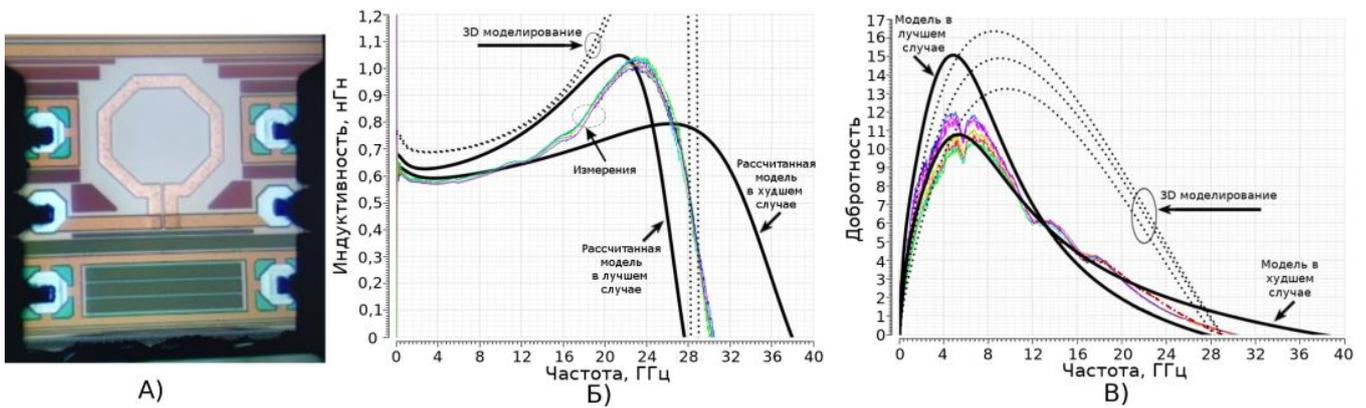


Рисунок 4 – Микрофотография (А), эффективные индуктивность (Б) и добротность (В) тестовой катушки индуктивности

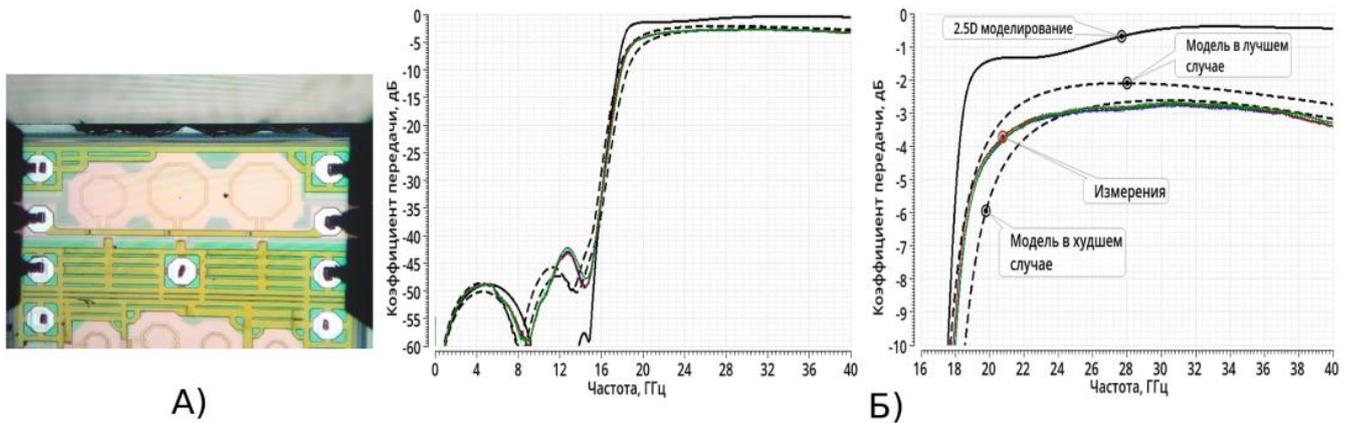


Рисунок 5 – Микрофотография (А) и АЧХ (Б) ФВЧ 18 ГГц

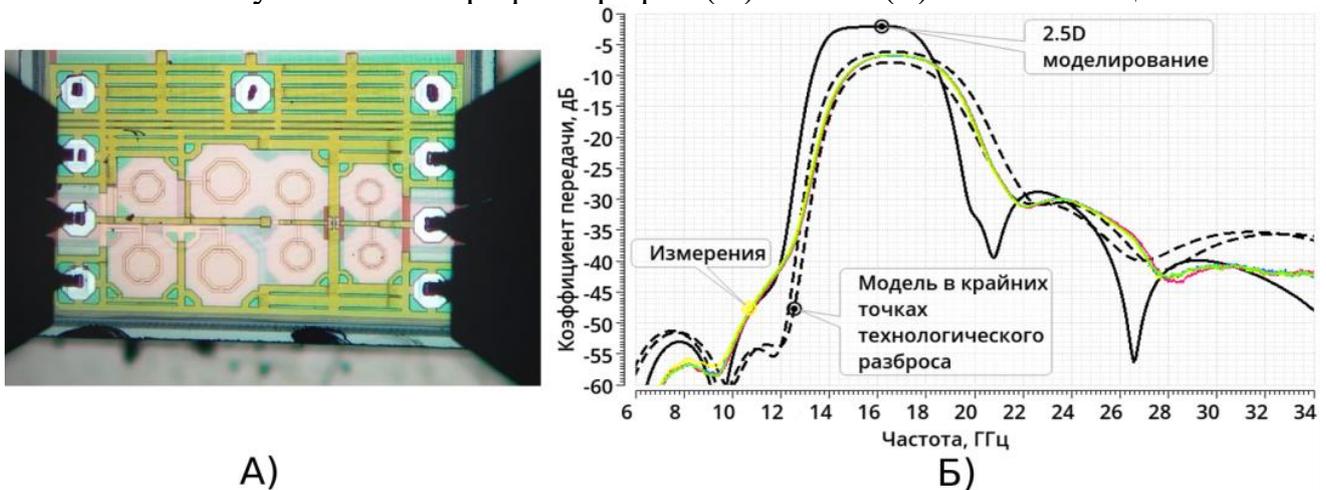


Рисунок 6 – Микрофотография (А) и АЧХ (Б) ПФ 14-18 ГГц

В результате анализа АЧХ симуляции разработанных моделей и измеренных АЧХ экспериментальных образцов фильтров установлено, что АЧХ экспериментальных образцов находятся в диапазоне АЧХ моделей фильтров в крайних точках технологического разброса. Незначительные различия в полосах задерживания обусловлены пренебрежением паразитными емкостями и взаимными индуктивностями между элементами. Стоит отметить, что результаты 2.5D моделирования, выполненного путем симуляции эквивалентной схемы, полученной путем экстракции топологических описаний по алгоритмам, предоставленным заводом-изготовителем, значительно отличаются от результатов измерений. Выяв-

лено, что алгоритмы экстракции топологии технологического процесса SiGe 130 нм не учитывают скин-эффект и не корректно учитывают влияние подложки, что приводит к ошибочным результатам 2.5D моделирования.

Установлено, что разработанные модели интегральных катушек индуктивности, конденсаторов и проводников отражают характеристики реальных элементов и определенный в работе ряд физических эффектов и характеристик технологического процесса является достаточным для проектирования интегральных LC-фильтров частотного диапазона 1-40 ГГц на основе предложенных моделей элементов.

Глава 3. Алгоритмы оптимизации топологий элементов LC-фильтров.

Глава посвящена реализации алгоритмов оптимизации топологий катушек индуктивности, конденсаторов по критерию максимальной добротности на заданной частоте и проводников по критерию минимизации потерь в полосе пропускания фильтров, на основе разработанных верифицированных моделей элементов. Алгоритмы оптимизации учитывают ограничения физической реализуемости элементов, обусловленные ограничениями проектирования технологического процесса.

Путем анализа топологий катушек индуктивности разработаны формулы минимальных внутренних диаметров симметричных квадратных и восьмиугольных катушек индуктивности, которые зависят от ширины (w) и количества (N) витков, а также от минимального расстояния между проводниками (s_{min}). Ограничение внутреннего диаметра симметричных катушек обусловлено топологией перемычек и их расположением.

Разработан алгоритм поиска оптимальной топологии катушки индуктивности по критерию наибольшей добротности на заданной частоте. Входными данными являются: характеристики и ограничения ТП, номинал индуктивности, частота, максимальный ток и расположение выводов (с одной стороны или с разных сторон), которое зависит от типа фильтра и расположения катушки в схеме фильтра (см. рис. 7). Оптимизация выполняется следующим образом:

1) Ширина витков (w) задается минимально возможной (w_{min}), количество используемых слоев металлизаций (n_{use}) – равным 1.

2) Рассчитывается максимальный ток для проводника с параметрами w и n_{use} с учетом скин-эффекта на заданной частоте и проверяется на соответствие заданному максимальному току.

3) Методом перебора находится максимальное количество витков (N), при котором можно получить требуемый номинал индуктивности с учетом ограничений внутреннего диаметра катушек (d_{in}).

4) Рассчитывается длина выводов катушки (l_{io}).

5) С точностью до минимального шага (min_step) осуществляется поиск внутреннего диаметра (d_{in}), при котором достигается наименьшее отклонение рассчитанной индуктивности от заданной.

6) Рассчитываются все паразитные элементы эквивалентной схемы катушки (см. рис. 3) и добротность катушки без экрана, с экраном (при $n_0 > 2$ и $n_0 > n_{use}$) и с вытравленной подложкой под катушкой (при наличии такой опции у производителя).

7) Изменяя ширину витков в диапазоне $[w_{min}; w_{max}]$ с шагом min_step , количество используемых слоев металлизаций в диапазоне $[1; n_0]$ и выполняя пункты 2-6 сравниваются добротности катушек, и находится топология катушки индуктивности, которая имеет заданный номинал и наибольшую добротность на заданной частоте, а также способную пропустить заданный максимальный ток.

Таким образом, разработанный алгоритм определяет оптимальную топологию катушки индуктивности путем определения конечного числа физически реализуемых топологий, расчета оптимальной ширины витков и количества используемых слоев металлизаций методом равномерного поиска, проверки эффективности травления и экранирования подложки с учетом основных физических эффектов, характеристик и ограничений технологического процесса.

Результаты исследований, проведенных в главе 1, показывают, что максимальная добротность МИМ конденсаторов достигается при отношении сторон (w_{MIM}, l_{MIM}) близким к единице за счет минимизации влияния краевых эффектов. Поэтому в первом приближении расчет ширины конденсатора производится на основе классической формулы расчета емкости без учета краевых эффектов:

$$w_{ideal} = \text{Round}\left(\sqrt{\frac{h_{MIM} \cdot C}{\varepsilon_{MIM} \cdot \varepsilon_0}}, min_step\right), \quad (5)$$

где C – заданная емкость, h_{MIM} – расстояние между обкладками, ε_{MIM} – диэлектрическая проницаемость диэлектрика между обкладками, функция $\text{Round}(X, Y)$ округляет X до ближайшего кратного Y .

Разработанный алгоритм поиска оптимальной топологии МИМ конденсатора представляет собой следующие шаги:

1) Расчет ширины и длины обкладок МИМ конденсатора без учета краевых эффектов по формуле (5): $w_{MIM} = l_{MIM} = w_{ideal}$.

2) Одновременное уменьшение w_{MIM} и l_{MIM} с шагом min_step до достижения наименьшего отклонения рассчитанной емкости МИМ конденсатора с учетом краевых эффектов по формуле Палмера от заданного номинала.

3) Корректировка l_{MIM} в пределах $\pm 5 \cdot min_step$ для максимального приближения рассчитываемой емкости к заданному номиналу.

Оптимизация топологии ВШК состоит в определении количества используемых слоев металлизации, при котором достигается максимальная добротность на требуемой частоте. В результате проведенного анализа характеристик и ограничений Si, SiGe технологических процессов, выявлено, что расположение ВШК в верхних слоях металлизаций не целесообразно ввиду того, что они имеют сравнительно большие минимальные ширины и зазоры проводников (единицы мкм), что ведет к меньшей плотности расположения и пальцев и как следствие к меньшей удельной емкости и добротности. Необходимо задать число нижних слоев металлизаций, применимых для ВШК (n_{ID}), где минимальные ширины и зазоры проводников будут составлять десятки-сотни нм. Тогда ширины пальцев в зазоры между ними будут определяться как:

$$w_{fin} = s_{fin} = \max(w_{min_ID}, s_{min_ID}),$$

где w_{fin} – ширина пальцев, s_{fin} – зазор между пальцами, w_{min_ID} и s_{min_ID} – минимальные ширины и зазоры проводников в слоях металлизации [1; n_{ID}].

Для минимизации влияния краевых эффектов отношение сторон ВШК было принято равным одному. Тогда длина пальцев рассчитывается по выведенной формуле (6), а расчет емкости ВШК в одном слое металлизации сводится к зависимости от одного параметра N_{fin} .

$$l_{fin} = w_{fin} \cdot (2 \cdot N_{fin} - 8). \quad (6)$$

Оптимизация топологии ВШК по критерию наибольшей добротности на заданной частоте осуществляется следующим образом:

- 1) Количество используемых слоев металлизаций (n_{use}) задается равным 1.
- 2) Методом перебора с шагом 1 находится число пальцев (N_{fin}) при котором достигается наименьшее отклонение рассчитанной емкости ВШК от заданного номинала. Длина пальцев при этом рассчитывается по формуле (6).
- 3) Корректировка l_{fin} в пределах $\pm 5 \cdot \min_step$ для максимального приближения рассчитываемой емкости к заданному номиналу.
- 4) Рассчитываются все паразитные элементы эквивалентной схемы и добротность конденсатора на заданной частоте.
- 5) Изменяя количество используемых слоев металлизаций в диапазоне от 1 до n_{ID} и сравнивая рассчитанные добротности, находится топология ВШК с заданным номиналом и имеющая наибольшую добротность.

В разработанном алгоритме оптимизации топологии проводника методом перебора происходит поиск ширины проводника (w_c) и количества используемых слоев металлизации (n_{use}) при которых достигается наибольший средний коэффициент передачи фильтра в частотном диапазоне 25% - 75% полосы пропускания при заданной длине проводника (l_c). Сравнивая результаты расчета среднего коэффициента передачи фильтра в полосе пропускания (в том числе с проводниками с экраном в нижнем слое металлизации) выявляется оптимальная топология.

В результате исследований разработаны алгоритмы, которые осуществляют поиск физически реализуемых оптимальных топологий для требуемого технологического процесса. Алгоритмы оценивают эффективность применения таких способов уменьшения потерь как использование параллельных слоев металлизаций, экранирование, травление подложки и позволяют найти их оптимальную комбинацию. В основе алгоритмов лежат верифицированные модели элементов, что подтверждает их корректность.

Глава 4. Методика синтеза топологий интегральных СВЧ LC-фильтров с минимизацией потерь в полосе пропускания.

Для минимизации потерь в полосе пропускания фильтров необходимо минимизировать количество элементов, в особенности катушек индуктивности ввиду того, что их добротность на 1-2 порядка меньше добротностей конденсаторов, поэтому в методике синтеза будут использоваться эллиптические фильтры, позволяющие при том же порядке фильтра обеспечить значительно большую крутизну АЧХ по сравнению с фильтрами аппроксимации Чебышева.

В результате анализа топологий интегральных эллиптических LC-фильтров разработаны типовые принципиальные схемы и топологии фильтров (рис. 7), в

которых в качестве проводников частично используются выводы катушек индуктивностей и обкладки конденсаторов, что позволяет уменьшить количество проводников межсоединений, следовательно, уменьшить потери в полосе пропускания. Разработанные топологии исключают пересечения сигнальных проводников и проводников общего вывода, что уменьшает количество паразитных емкостей.

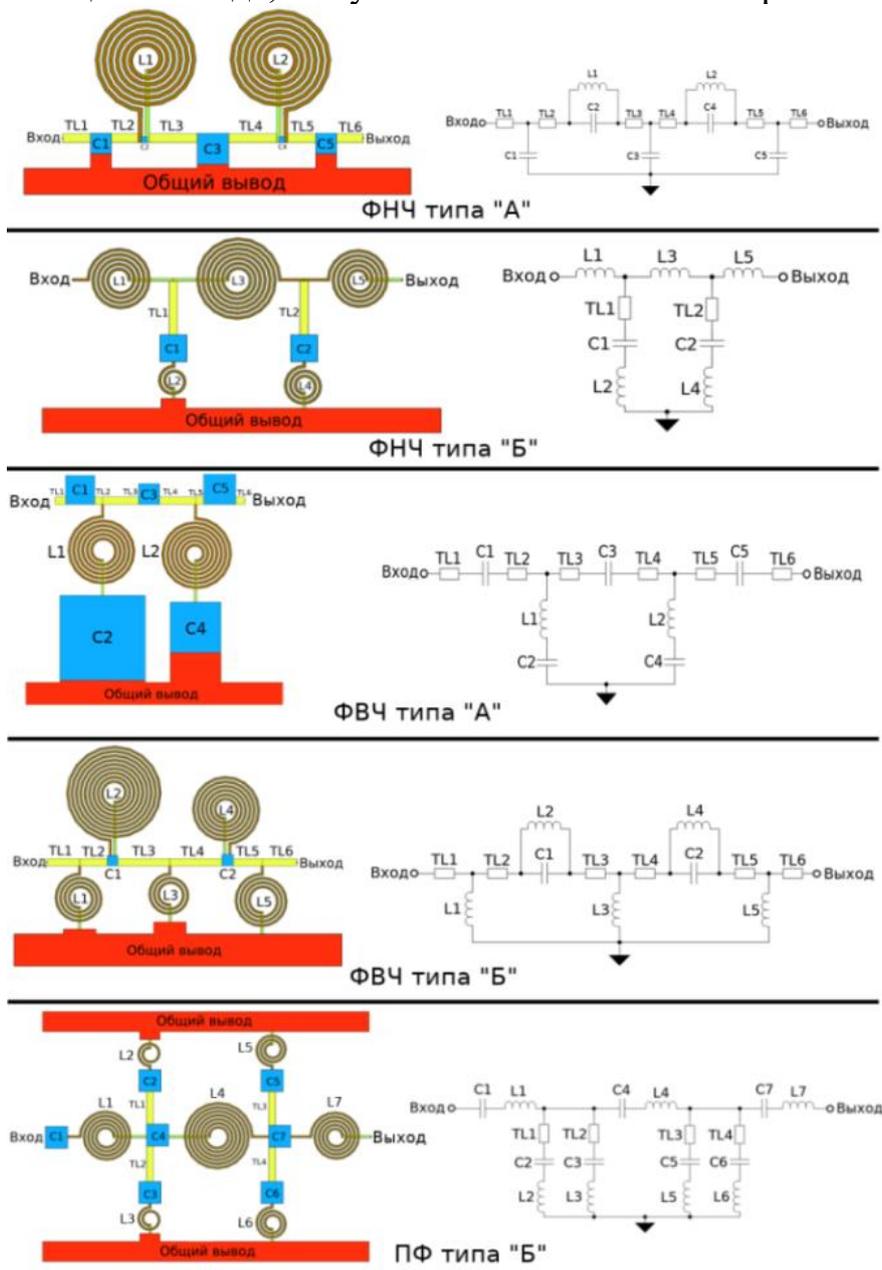


Рисунок 7 – Разработанные типовые топологии и принципиальные схемы фильтров 5-го порядка

Полосовые фильтры типа “А” предлагается реализовывать в формате каскадного соединения ФНЧ и ФВЧ. Такая структура имеет преимущества перед классической структурой полосового фильтра: меньшее количество индуктивных элементов; меньшее количество проводников за счет меньшего количества параллельных контуров; возможность использования ФНЧ или ФВЧ меньшего порядка при разных требованиях к фронту и спаду АЧХ. Длина проводников межсоединений зависит от габаритов конденсаторов и катушек индуктивности, а также от расстояний между катушками.

Так как паразитная взаимная индуктивность между катушками вызывает искажения АЧХ фильтра, то была разработана методика и аналитические выражения расчета минимальных длин проводников, при которых обеспечиваются такие расстояния между катушками, при которых искажения АЧХ будут не существенными и взаимными индуктивностями катушек можно пренебречь.

Компромиссным решением между искажениями АЧХ и потерями в полосе пропускания выбран коэффициент индуктивной связи, равный 0,8%, при котором смещения частот среза ПФ 9-го порядка не превышает 0,75%, а расстояния между катушками составляет 30 - 150 мкм (рисунок 8Б). Анализ АЧХ экспериментальных образцов фильтров показал, что при таких расстояниях можно пренебречь их взаимной индуктивностью и это не оказывает влияния на АЧХ фильтра.

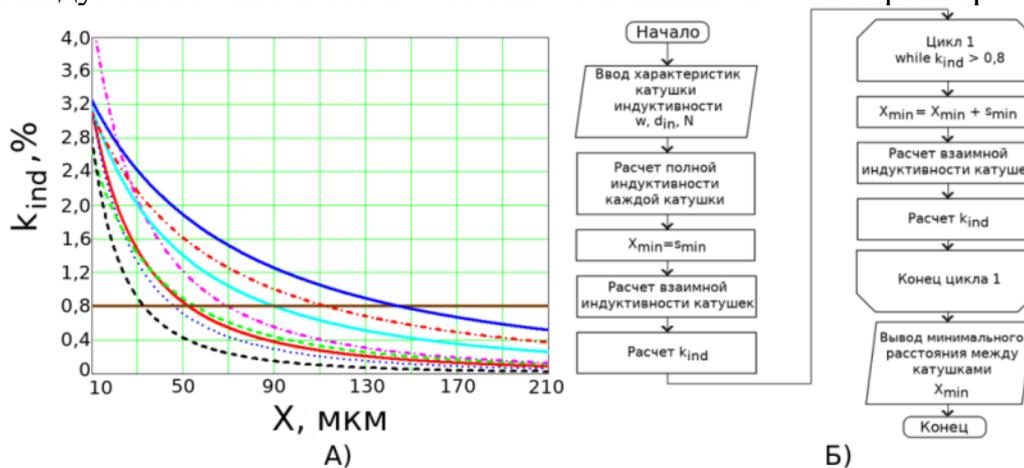


Рисунок 8 – А) Зависимости коэффициента индуктивной связи от расстояния между катушками, Б) Алгоритм поиска минимального расстояния между катушками

В результате анализа литературных источников и результатов измерений экспериментальных образцов фильтров, установлено, что в фильтрах, реализованных в технологических процессах Si, SiGe с удельным сопротивлением подложки менее 10 [Ом·м], паразитные каналы связи через подложку между сосредоточенными элементами и проводниками межсоединений оказывают значительное влияние на добротность элементов и АЧХ фильтров. Применение не замкнутых защитных колец, выполненных в нижнем слое металлизации с переходными отверстиями к подложке, подключенных к общему выводу позволяет снизить коэффициент передачи по паразитным каналам связи в подложке на 15-20 дБ. Экспериментальные исследования японских ученых А. Адан, М. Фукуми и прочих показали, что использование заземленного проводника между интегральными катушками позволило снизить коэффициент индуктивной связи между ними в 4,6 раз. Поэтому использование не замкнутых колец позволяет не только уменьшить паразитные связи через подложку, но и уменьшить паразитную взаимную индуктивность между катушками.

В результате исследований разработана методика синтеза топологии интегральных LC-фильтров с минимизацией потерь в полосе пропускания (рис. 9). В качестве основы разработанной методики была использована классическая методика синтеза эллиптических LC-фильтров с использованием нормированных табличных фильтров-прототипов, опубликованных в справочниках по расчету филь-

тров авторов Г. Ханзел, Р. Зааль и др. В блоке “А” рассчитываются номиналы элементов идеального фильтра, в блоке “Б” рассчитывается топология реального фильтра с оптимизированными топологиями катушек индуктивности, конденсаторов, проводников межсоединений на наивысшей частоте полосы пропускания.

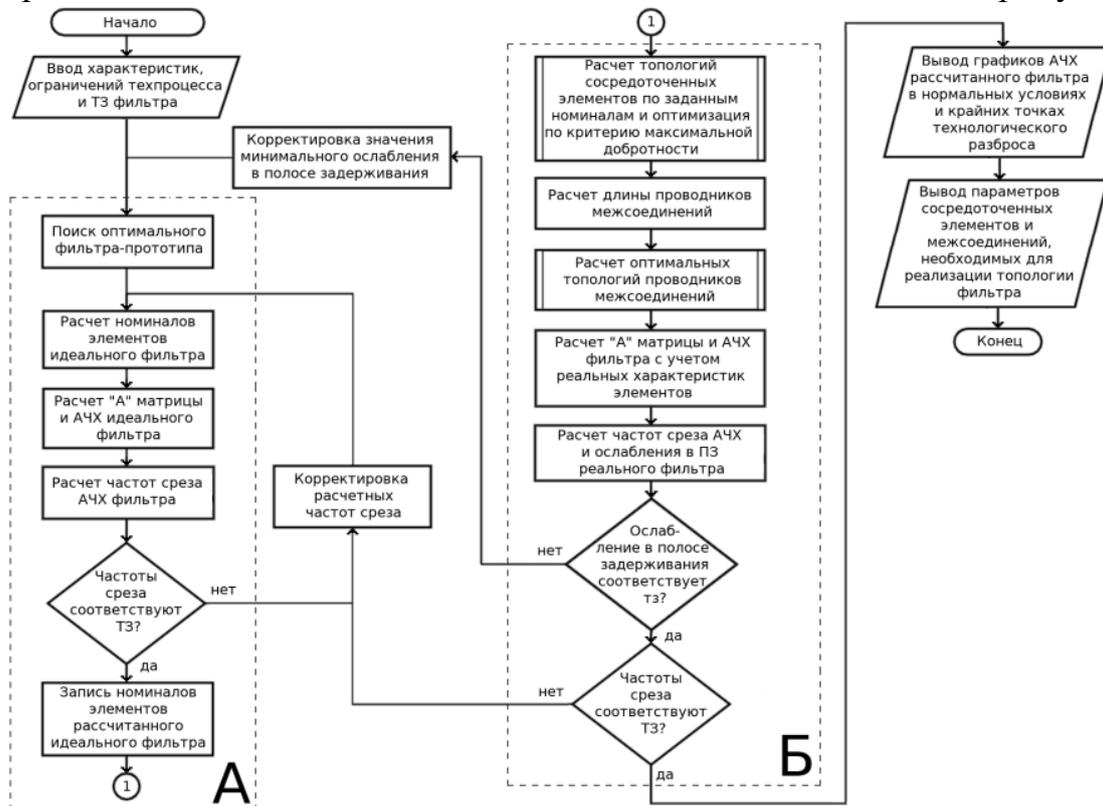


Рисунок 9 – Алгоритм синтеза интегральных LC-фильтров

Так как АЧХ реального фильтра может значительно отличаться от АЧХ идеального фильтра ввиду наличия множества паразитных элементов, в алгоритме предусмотрены корректировки частот среза и ослабления в полосе пропускания.

Корректировка частот среза осуществляется по формуле:

$$F^{**} = \frac{F_{sr} \cdot F^*}{f_{sr}}, \quad (7)$$

где F_{sr} – частота среза, заданная техническим заданием; F^* – расчетное значение частоты среза до корректировки, f_{sr} – частота среза, найденная по АЧХ фильтра до корректировки, F^{**} – расчетное значение частоты среза после корректировки.

Путем корректировки ослабления в полосе задерживания осуществляется поправка крутизны фильтра для технологического процесса, в котором синтезируется фильтр с учетом потерь в полосе пропускания.

Разработанная методика реализована в качестве программы автоматизированного синтеза оптимальной топологии СВЧ LC-фильтра в среде MathCAD [9]. Входными данными программы являются характеристики и ограничения ТП и требования к фильтру, выходными данными – таблицы с параметрами катушек индуктивности, конденсаторов и проводников, необходимых для реализации топологии фильтра. Расчет оптимальной топологии фильтра занимает единицы-десятки минут.

Глава 5. Практическое применение разработанной методики. В главе представлены характеристики синтезированных фильтров по предложенной методике. Для оценки эффективности предложенной методики синтеза оптимальных топологий фильтров были синтезированы ФВЧ 18 ГГц (рисунки 10 и 11, таблица 1) и ПФ 14-18 ГГц (рисунки 12 и 13, таблица 2), исходные данные к проектированию которых, аналогичны ранее произведенным фильтрам, описанным в главе 2. Технологический процесс – SiGe 130 нм.

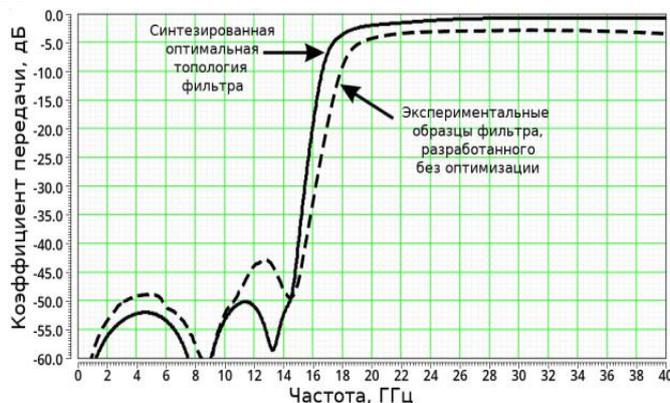
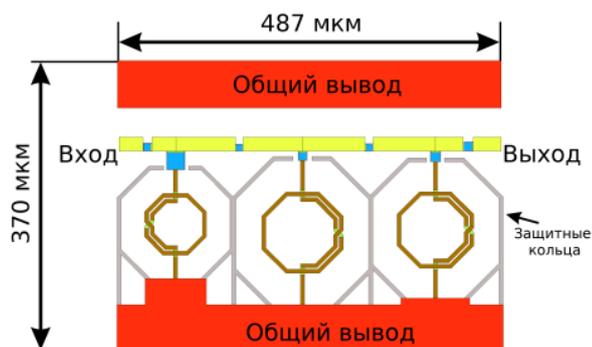


Рисунок 10 – Топология и АЧХ синтезированного ФВЧ 18 ГГц

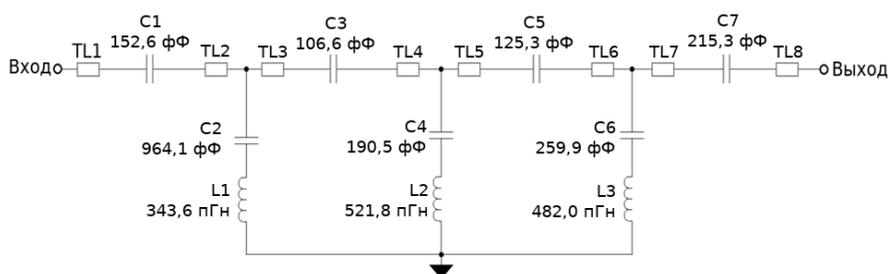


Рисунок 11 – Принципиальная схема синтезированного ФВЧ 18 ГГц

Таблица 1. Сравнение характеристик ФВЧ 18 ГГц

Характеристика	Синтезированный фильтр с оптимальной топологией	Экспериментальные образцы не оптимизированного фильтра	Модель образца фильтра (Глава 2)	ТЗ
Частота среза, ГГц	17,91 – 18,07	18,8 – 18,9	18,5 – 19,3	18 ± 0,1
Минимальное ослабление в ПП, дБ	0,7 – 0,9	2,6 – 2,8	2,1 – 2,7	-
Ослабление на частоте 15 ГГц, относительно ПП, дБ	48,0 – 48,6	43,8 – 44,0	40,0 – 41,1	≥ 40
Крутизна фронта АЧХ, дБ/дек.	402 – 407	348 – 351	319 – 324	≥ 333
Ослабление на частоте 40 ГГц, дБ	0,7 – 0,9	3,4	2,4 – 3,1	-
КСВ в ПП	1,2 – 1,6	1,3 – 1,7	1,2 – 1,9	≤ 2,0
Максимальный ток, мА	≥ 14,9	≥ 14,9	-	≥ 6,3
Занимаемая площадь, мм ²	0,18	0,29	-	-

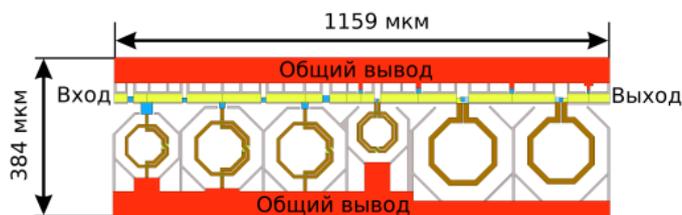


Рисунок 12 – Топология и АЧХ синтезированного ПФ 14-18 ГГц

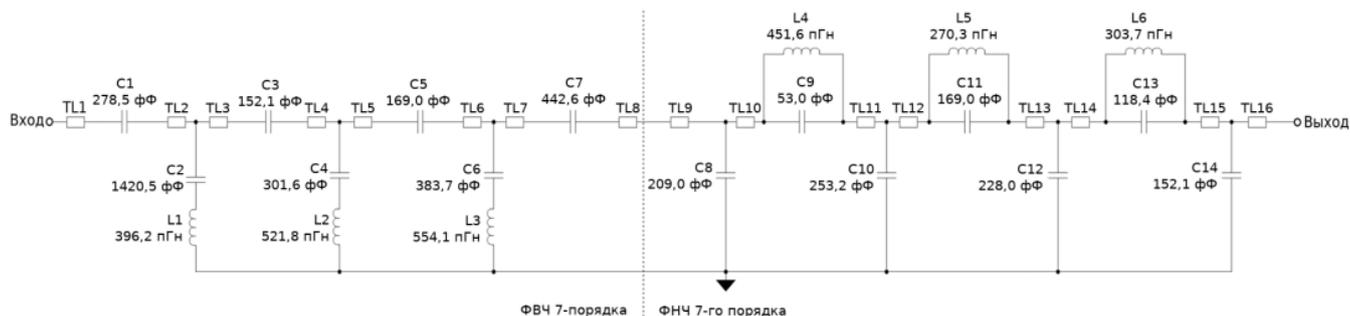
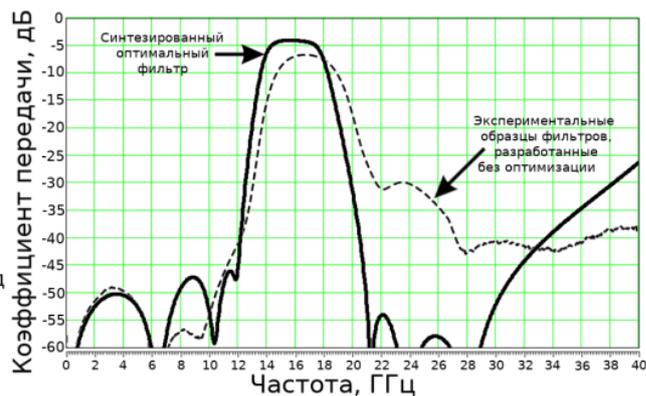


Рисунок 13 – Принципиальная схема синтезированного ПФ 14-18 ГГц

Таблица 2. Сравнение характеристик ПФ 14-18 ГГц

Характеристика	Синтезированный фильтр с оптимальной топологией	Экспериментальные образцы не оптимизированного фильтра	Модель образца фильтра (Глава 2)	ТЗ
Нижняя частота среза, ГГц	13,92 – 14,06	14,5 – 14,8	14,4 – 14,9	14 ±0,1
Верхняя частота среза, ГГц	17,95 – 18,09	18,9 – 19,1	18,6 – 19,2	18 ±0,1
Минимальное ослабление в ПП, дБ	4,0 – 4,4	6,7 – 6,9	6,2 – 6,9	-
Ослабление на частоте 11 ГГц, относительно ПП, дБ	44,4 – 44,9	39,2 – 39,4	50,8 – 51,0	≥ 40
Крутизна фронта АЧХ, дБ/дек.	327 – 331	271 – 273	354 – 365	≥ 314
Ослабление на частоте 21 ГГц, относительно ПП, дБ	49,3 – 51,0	19,4 – 20,1	16,1 – 20,3	≥ 40
Крутизна спада АЧХ, дБ/дек.	399 – 401	149 – 154	120 – 153	≥ 343
КСВ в ПП	1,2 – 1,8	1,1 – 1,3	1,1 – 1,4	≤ 2,0
Максимальный ток, мА	≥ 11,5	≥ 7,5	-	≥ 6,3
Занимаемая площадь, мм ²	0,44	0,29	-	-

В результате анализа измеренных характеристик экспериментальных образцов не оптимизированных фильтров и смоделированных характеристик синтезированных фильтров с оптимальными топологиями установлено:

- Частоты среза синтезированных фильтров соответствуют техническому заданию, в то время как частоты среза не оптимизированных фильтров отличаются от заданных на 0,5 - 1,1 ГГц;

- Фильтры с оптимальной топологией имеют потери в полосе пропускания на 1,9 - 2,7 дБ меньше;

- Оптимальный ФВЧ 1 ГГц имеет крутизну АЧХ на 54 - 56 дБ/дек больше, оптимальный ПФ 14-18 ГГц имеет крутизну фронта АЧХ на 56 - 58 дБ/дек, крутизну спада АЧХ на 247 - 250 дБ/дек больше. Столь значительное увеличение крутизны спада АЧХ ПФ 14-18 ГГц преимущественно вызвано выбором оптимального фильтра-прототипа.

Применение разработанных алгоритмов оптимизации топологий элементов, которые в свою очередь содержат разработанные и верифицированные модели элементов, позволило улучшить характеристики интегральных LC-фильтров.

Разработанные в главе 2 модели образцов фильтров имеют разброс потерь в полосе пропускания 0,5 - 0,7 дБ в крайних точках технологического разброса. Вследствие оптимизации топологии фильтров удалось уменьшить разброс потерь в полосе пропускания в крайних точках технологического разброса до 0,2 - 0,4 дБ за счет увеличения использованных слоев металлизаций в проводниках и катушках индуктивностей, что ведет к уменьшению влияния скин-эффекта. За счет этого технологический разброс частот среза уменьшился в 3-5 раз. Выявлено, что характеристики синтезированных оптимальных фильтров меньше подвержены влиянию технологического разброса, что повышает повторяемость производимых фильтров.

Топологии синтезированных интегральных фильтров имеют государственную регистрацию [15,16] и были использованы в качестве сложнофункциональных блоков сверхширокополосного приемника диапазона 1-18 ГГц.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Произведен анализ моделей катушек индуктивности, конденсаторов, проводников, разработанных отечественными и зарубежными полупроводниковыми фабриками для своих технологических процессов (в том числе АО "Микрон", TSMC, INP, Silterra, HiWafer). Выявлено, что модели имеют недостатки (такие как не учет скин-эффекта, влияния подложки, переходных отверстий и др.), которые ведут к несоответствию результатов моделирования и измерений экспериментальных образцов LC-фильтров.

2. Произведен анализ документации (PDK) технологических процессов ведущих мировых и отечественных полупроводниковых фабрик, в результате чего, определены характеристики и ограничения, которые необходимо учитывать при проектировании интегральных СВЧ LC-фильтров. Выявлено, что основными характеристиками техпроцесса являются: толщины, удельные сопротивления слоев металлизации, толщина, удельное сопротивление, диэлектрическая проницаемость подложки, диэлектрическая проницаемость и толщины диэлектриков между слоями металлизаций и подложкой. Ограничения: минимальный угол поворота, минимальная и максимальная ширина, минимальный зазор, минимальный шаг изменения геометрии проводников.

3. Исследованы известные способы увеличения добротности интегральных катушек индуктивности и конденсаторов, способы уменьшения потерь в проводниках, в результате было установлено, что они имеют недостатки, ограничивающие эффективность их применения. Использование нескольких параллельных слоев металлизаций уменьшает последовательное сопротивление, но увеличивает

паразитную емкость к подложке, использование экранирования уменьшает влияние сопротивления подложки, но увеличивает паразитную емкость к общему выводу, что ведет к уменьшению резонансной частоты. Определены оптимальные формы катушек индуктивности в зависимости от ограничения технологического процесса на минимальный угол поворота проводников: для ограничения 90° – планарные симметричные катушки квадратной формы, для 45° – планарные симметричные катушки восьмиугольной формы, при отсутствии ограничения – планарные спиральные катушки круглой формы. Определены параметры оптимизации топологий элементов фильтров. Для катушек индуктивности параметрами оптимизации являются ширина витков, количество используемых параллельных слоев металлизаций, наличие экранирования или травление подложки, при этом зазор между витками задается минимально возможным, количество витков задается максимально возможным для заданного номинала и ширины витков. Установлено, что МИМ конденсаторы имеют максимальную добротность при минимальном периметре обкладок за счет минимизации краевых эффектов паразитной емкости к подложке. Параметром оптимизации топологии встречно-штыревых конденсаторов является количество используемых слоев металлизации. Параметрами оптимизации топологий проводников являются ширина проводника, количество используемых слоев металлизации, наличие или отсутствие экранирования.

4. Предложена модификация метода расчета индуктивности катушек, заключающаяся в предварительном разбиении катушки на части (внутренний не полный виток, полные витки, выводы), расчете полных индуктивностей каждой части и взаимных индуктивностей между частями. В результате применения модифицированного метода выведены аналитические формулы расчета планарных симметричных катушек индуктивности квадратной и восьмиугольной форм, имеющие погрешности не более 2% для номиналов индуктивностей 0,1 - 10 нГн.

5. Разработаны и экспериментально верифицированы аналитические модели интегральных катушек индуктивности, конденсаторов и проводников, отличающиеся унификацией применения в любых Si, SiGe, GaAs технологических процессах и учетом характеристик технологического процесса, скин-эффекта, краевых эффектов, влияния подложки, переходных отверстий, экранирования или травления подложки. Установлено, что разработанные модели отражают характеристики реальных элементов и определенный в работе ряд физических эффектов и характеристик технологического процесса является достаточным для проектирования интегральных LC-фильтров частотного диапазона 1-40 ГГц. Модели реализованы в качестве программного кода на языке программирования Spectre, что позволяет использовать их в качестве достоверных моделей элементов при разработке широкого спектра устройств в САПР Cadence Virtuoso.

6. Разработаны алгоритмы максимизации добротности катушек индуктивности, конденсаторов и минимизации потерь проводников. Алгоритмы оптимизации учитывают ограничения физической реализуемости элементов, обусловленные ограничениями проектирования технологического процесса. В процессе оптимизации оценивается эффективность совокупности использованных способов уменьшения потерь и выбирается их оптимальная комбинация.

7. Произведен анализ топологических решений интегральных фильтров и в результате разработаны типовые топологии ФНЧ, ФВЧ и ПФ аппроксимации Золотарева-Каэура, которые обеспечивают минимизацию потерь в полосе пропускания путем использования минимального количества катушек индуктивности и проводников, разнесения в пространстве сигнальных проводников и проводников общего вывода.

8. Предложена методика минимизации длины проводников межсединений, основанная на поиске расстояния между катушками, при котором их взаимными индуктивностями можно пренебречь. Для дополнительного уменьшения коэффициента индуктивной связи и влияния паразитных связей через подложку между катушками были использованы не замкнутые защитные кольца, подключенные к общему выводу, выполненные в нижнем слое металлизации и имеющие по всей площади переходные отверстия к подложке.

9. В результате совокупности проведенных исследований разработана методика синтеза интегральных LC-фильтров с минимизацией потерь в полосе пропускания. В процессе синтеза осуществляется поправка крутизны фильтра для технологического процесса, в котором синтезируется фильтр с учетом потерь в полосе пропускания и корректировка частот среза. Методика реализована в качестве программы на языке программирования MathCad, входными данными которой являются требования к фильтру, характеристики и ограничения технологического процесса, выходными – геометрические параметры всех элементов фильтра (топологическое описание фильтра). Расчет оптимальной топологии фильтра в разработанной программе занимает единицы-десятки минут в зависимости от требований к фильтру и характеристик технологического процесса.

В результате применения методики для разработки топологий ФВЧ 18 ГГц и ПФ 14-18 ГГц и сравнения характеристик синтезированных фильтров с измеренными характеристиками экспериментальных образцов ранее произведенных фильтров, разработанных без оптимизации, установлено, что применение разработанной методики позволило:

- Получить фильтры с частотами среза в заданных пределах;
- Уменьшить потери в полосе пропускания на 1,9 - 2,7 дБ;
- Увеличить крутизну АЧХ ФВЧ 1 ГГц на 54 - 56 дБ/дек, крутизну фронта АЧХ ПФ 14-18 ГГц на 56 - 58 дБ/дек, крутизну спада АЧХ ПФ 14-18 ГГц на 247 - 250 дБ/дек. Столь значительное увеличение крутизны спада АЧХ ПФ 14-18 ГГц преимущественно вызвано выбором оптимального фильтра-прототипа;
- Уменьшить технологический разброс потерь в полосе пропускания на 0,3 дБ, технологический разброс частот среза в 3-5 раз.

10. Результаты исследований были применены при разработке ряда интегральных LC-фильтров частотного диапазона 1-40 ГГц в рамках двух научно-исследовательских работ, что подтверждается актами внедрения.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для представления основных научных результатов кандидатской диссертации:

1. **Ерохин В. В.** Верификация модели интегральной катушки индуктивности для СВЧ LC-фильтров в Si- и SiGe-системах на кристалле // Вестник СибГУТИ. – 2022 г. – №2 (58). – С. 98-109.

2. **Ерохин В. В.**, Завьялов С.А. Автоматизированный синтез топологий интегральных сверхвысокочастотных LC-фильтров с минимизацией потерь в полосе пропускания // Омский научный вестник. – 2023. – № 4 (188). – С. 152-161.

3. **Ерохин В. В.**, Завьялов С.А. Оптимизация топологий интегральных катушек индуктивности для синтеза СВЧ LC-фильтров в Si/SiGe/GaAs-системах на кристалле // Вестник СибГУТИ. – 2023 г. – Т. 17, № 3. – С. 87–105.

Статьи в рецензируемых изданиях Scopus и Web of Science:

4. **Erokhin V.V.**, Sadykov Z.B., Blinkov S.D. Ground Conductor Layout Influence on Integrated Microwave LC-Filter AFCs // 16th international IEEE scientific and technical conference “Dynamics of system, mechanism and machines”, (Dynamics 2022). – 2022. – 5 p.

5. **Erokhin V.V.**, Zavyalov S.A. New Inductance Calculating Formulas of Planar Symmetrical Square Inductors // 17th international IEEE scientific and technical conference “Dynamics of system, mechanism and machines”, (Dynamics 2023). – 2023. – 4 p.

Свидетельства о регистрации результатов интеллектуальной деятельности:

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023611991. Конфигурируемая модель интегральной катушки индуктивности / **Ерохин В.В.**, Квачев М.А., Садыков Ж.Б., и др. – Заявка №2022686524. Дата поступления 30 декабря 2022 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26 января 2023 г.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022682881. Конфигурируемая модель интегрального конденсатора / **Ерохин В.В.**, Садыков Ж.Б., Блинков Н.Д., Касмицкий М.В. – Заявка №2022682127. Дата поступления 21 ноября 2022 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29 ноября 2022 г.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022682451. Конфигурируемая модель интегрального проводника/ **Ерохин В.В.**, Квачев М.А., Садыков Ж.Б. – Заявка №2022681947. Дата поступления 21 ноября 2022 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22 ноября 2022 г.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023660979. Автоматизированный синтез топологий СВЧ интегральных высокоизбирательных LC-фильтров с минимизацией потерь в полосе пропускания / **Ерохин В.В.**, Завьялов С.А. – Заявка №2023618607. Дата поступления 03 мая 2023 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25 мая 2023 г.

10. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы №2019630201. Сверхширокополосный приемник СВЧ диапазона 0.8-20 ГГц / Косых А.В., Завьялов С.А., **Ерохин В.В.** и др. – Заявка №2019630184. Дата поступления 24 сентября 2019 г. Зарегистрировано в Реестре топологий интегральных микросхем 30 октября 2019 г.

11. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы №2019630092. Программно-конфигурируемый фильтр сигналов промежуточной частоты / Косых А.В., Завьялов С.А., **Ерохин В.В.** и др. – Заявка №2019630052. Дата поступления 20 марта 2019 г. Зарегистрировано в Реестре топологий интегральных микросхем 16 мая 2019 г.

12. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы №2022630204. Видеофильтр / Пузырев П.И., Семенов К.В., **Ерохин В.В.** и др. – Заявка №2022630204. Дата поступления 29 ноября 2022 г. Зарегистрировано в Реестре топологий интегральных микросхем 7 декабря 2022 г.

13. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы №2022630201. Фильтр верхних частот СВЧ диапазона / Садыков Ж.Б., Квачев М.А., Касмицкий

М.В., **Ерохин В.В.** – Заявка №2022630202. Дата поступления 29 ноября 2022 г. Зарегистрировано в Реестре топологий интегральных микросхем 7 декабря 2022 г.

14. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы №2022630201. Фильтр аудио- и видеосигалов / **Ерохин В.В.** Коломойцев О.Н., Лиходед Д.О., Садыков Ж.Б – Заявка №2022630201. Дата поступления 29 ноября 2022 г. Зарегистрировано в Реестре топологий интегральных микросхем 7 декабря 2022 г.

15. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы №2023630113. Высокоизбирательный фильтр верхних частот 18 ГГц / **Ерохин В.В.**, Садыков Ж.Б., Квачев М.А. и др. – Заявка №2023630120. Дата поступления 08 августа 2023 г. Зарегистрировано в Реестре топологий интегральных микросхем 17 августа 2023 г.

16. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы №2023630111. Полосовой сверхвысокочастотный фильтр 14-18 ГГц / **Ерохин В.В.**, Садыков Ж.Б., Квачев М.А. и др. – Заявка №2023630119. Дата поступления 08 августа 2023 г. Зарегистрировано в Реестре топологий интегральных микросхем 17 августа 2023 г.

Статьи, в сборниках материалов конференций:

17. **Ерохин В.В.** Фильтр верхних частот 15-го порядка для СВЧ систем на кристалле // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем. – 2020. – С. 81-89.

18. **Ерохин В.В.** Полосовой фильтр 14-18 ГГц для системы на кристалле СВЧ приемника СМ диапазона // Ученые Омска – региону. – 2020. – С. 49-51.

19. **Ерохин В.В.**, Завьялов С.А. Влияние характеристик технологического процесса на проектирование СВЧ LC-фильтров // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем. – 2022. – С. 108-117.

20. **Ерохин В.В.**, Конфигурируемая модель интегрального проводника для моделирования СВЧ устройств типа СнК в САПР Cadence Virtuoso // Международная научная конференция по моделированию и анализу комплексных систем и процессов (MacPro'2022), Москва: ВШЭ. – 2022. – 3 С.

21. **Ерохин В.В.** Модель скин-эффекта интегральных проводников для моделирования СВЧ – устройств типа СнК в Cadence Spectre Simulator // Наноиндустрия – 2023. Том 16, № S9-2 (119) – С. 524-526.

22. **Ерохин В.В.**, Завьялов С.А. Автоматизированный расчет оптимальных топологий интегральных встречно-штыревых конденсаторов для синтеза СВЧ фильтров в СнК // Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Микроэлектроника и информатика-2023». – Зеленоград: МИЭТ, 2023. – 6 С.

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 18.12.23 г. Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Отпечатано на дупликаторе. Усл. печ. л. 1,5. Уч.-изд. л. 1,5.

Тираж 100 экз. Заказ 444.

Издательство ОмГТУ. 644050. г. Омск, пр. Мира, 11; т. 23-02-12.

Типография: ОмГТУ