

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»
(СГУ)

Кафедра физики твёрдого тела

**Разработка микрополосковых сверхвысокочастотных полосно-
пропускающих фильтров с уменьшенным отражением в полосе
заграждения**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 2252 группы
направления 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»

Института физики
Курочкина Даниила Витальевича

Научный руководитель

д.ф.-м.н., профессор

должность, ученая степень, ученое звание

Консультант

к.ф.-м.н., начальник

лаборатории

должность, ученая степень, ученое звание

Зав. кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

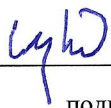
должность, ученая степень, ученое звание



подпись, дата

Михайлов А.И.

инициалы, фамилия



подпись, дата

Куликов М.Ю.

инициалы, фамилия



подпись, дата

Скрипаль А.В.

инициалы, фамилия

Саратов 2025

ВВЕДЕНИЕ

СВЧ-фильтры подавляют ненужные спектральные составляющие, отражая их обратно к источнику. Эти отражения создают различные проблемы в работе систем. Например, такие устройства, как смесители, очень чувствительны к отражениям, вызванным фильтрами. В определенных случаях это может быть проблемой, т.к. фильтры часто устанавливаются рядом со смесителями для улучшения формируемой полосы пропускания и подавления нежелательных гармоник.

Чтобы удовлетворить очевидную и распространенную потребность в устранении отражений от фильтров, разработаны фильтры с уменьшенным отражением в полосе заграждения. В этих фильтрах нежелательные сигналы полностью поглощаются, а коэффициент отражения близок к нулю на всех частотах.

В связи с этим целью данной работы является разработка СВЧ микрополоскового фильтра с уменьшенным отражением в полосе заграждения.

Для выполнения цели решались следующие задачи:

1. анализ научно-технической литературы,
2. проектирование и математическое моделирование направленных ответвителей,
3. расчет АЧХ схем, состоящих из ГППФ и направленных ответвителей,
4. измерение АЧХ созданного фильтра.

Кроме ВВЕДЕНИЯ, ЗАКЛЮЧЕНИЯ, СПИСКА ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ и ПРИЛОЖЕНИЙ, работа включает 6 разделов:

1. Типы СВЧ фильтров по конструкции;
2. Типы микрополосковых СВЧ фильтров по частотному пропусканию сигнала;
3. Направленные ответвители;
4. Современные достижения в области создания СВЧ фильтров с уменьшенным отражением в полосе заграждения;
5. Применение САПР для проектирования фильтров;
6. Разработка топологии СВЧ микрополоскового фильтра с уменьшенным отражением в полосе заграждения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В разделе 1 проведен анализ научно-технической литературы, посвященной обзору классификации СВЧ-фильтров по конструкции.

В зависимости от конструкции СВЧ-фильтров и используемых в них элементов их классифицируют на индуктивно-емкостные, микрополосковые, коаксиальные, волноводные, а также на фильтры на поверхностных акустических волнах.

LC - фильтры

Индуктивно-емкостной (LC-фильтр) – СВЧ-фильтр, включающий в себя катушку индуктивности и конденсатор.

LC-фильтр объединяет катушки индуктивности (L) и конденсаторы (C) для формирования низкочастотной, высокочастотной, мультиплексорной, полосовой или полосовой фильтрации в радиочастотах (RF) и во многих других приложениях.

ПАВ-фильтры

ПАВ-фильтр — устройство, использующее поверхностные акустические волны для фильтрации. Он основан на характеристиках пьезоэлектрических кристаллов и использует распространяющиеся по поверхности акустические волны для выбора частоты и фильтрации сигналов.

Волноводные фильтры

Волноводным фильтром называют устройство, построенное с использованием волноводной технологии. Волноводы — полые металлические трубопроводы, по которым передается электромагнитная волна. Волноводные фильтры наиболее полезны в микроволновой полосе частот, где они имеют удобный размер и низкие потери. Частотный диапазон можно менять посредством винта в волноводе. Волноводные фильтры требуют ухода за чистотой поверхности и защиты от деформаций.

Микрополосковые полосно-пропускающие фильтры

Структура микрополосковых фильтров похожа на схемы на печатной плате, однако имеется существенное различие: металлические проводники,

нанесенные на диэлектрическую подложку, образуют не только соединения между компонентами, но и сами компоненты (резонаторы).

В разделе 2 приведена классификация СВЧ-фильтров по частотному пропусканию сигнала.

Основная характеристика фильтра СВЧ – это частотная зависимость вносимого ослабления $A(\text{дБ}) = -20 \lg(S_{21})$ в тракт. Полосу пропускания называют областью частот с малым ослаблением, а область с большим ослаблением — полосой заграждения. В зависимости от того, как располагаются эти полосы различают следующие типы фильтров:

1. фильтры нижних частот (ФНЧ);
2. фильтры верхних частот (ФВЧ);
3. полосно-пропускающие фильтры (ППФ);
4. полосно-заграждающие (режекторные) фильтры (ПЗФ).

Также существует несколько видов частотных характеристик фильтров:

Тип фильтра	Особенности	Вид АЧХ
Баттерворта	Монотонная и наиболее плоская АЧХ; монотонная ФЧХ по всей полосе частот при высокой избирательности; большая неравномерность ГВЗ	
Бесселя	Монотонная АЧХ при низкой избирательности; гладкая ФЧХ; наименьшее изменение ГВЗ в полосе пропускания	
Чебышева-1	Равноволновые пульсации АЧХ в полосе пропускания, монотонное изменение АЧХ в полосе заграждения; гладкая ФЧХ; значительная неравномерность ГВЗ	
Линейная ФЧХ	Гладкая АЧХ при невысокой избирательности; высокая линейность ФЧХ в полосе пропускания; небольшие пульсации ГВЗ	
Эллиптический (фильтр Кауэра, SELF)	Задаваемые уровни равноволновых пульсаций АЧХ в полосах пропускания и заграждения; значительные нелинейность ФЧХ и неравномерность ГВЗ	

Рисунок 1 – Виды аппроксимации АЧХ фильтров

В разделе 3 рассмотрены направленные ответвители и их основные характеристики.

Направленные ответвители (НО) — это важные компоненты в радиоэлектронике, которые могут использоваться как отдельные устройства или как элементы измерительных приборов. Как самостоятельное устройство их применяют в качестве делителей мощности сигнала, а также для контроля в линии параметров сигнала и согласования. Как составной элемент измерительной аппаратуры они применяются в таких приборах, как СВЧ-

ваттметры, векторные и скалярные анализаторах цепей, радиометры и ряде других приборов.

НО — четырехплечее устройство, предназначенное для направленного ответвления части электромагнитной энергии из основной линии передачи в одно из плеч вторичной линии. Направленные ответвители бывают нескольких типов: сонаправленные и противонаправленные. Также направленный ответвитель, осуществляющий равное деление мощности между выходными плечами первичной и вторичной линии, называется 3дБ-ым направленным ответвителем.

В разделе 4 обзревается конструктивные решения в области создания СВЧ фильтров с уменьшенным отражением в полосе заграждения, такие как однокаскадный микрополосковый направленный фильтр, полосно-пропускающий RLC-фильтр с уменьшенной связью, режекторный фильтр на основе резонатора бегущей волны, связанного с нагруженным отрезком линии.

В разделе 5 приведены различные САПР-ы для моделирования моделирования СВЧ-компонентов, такие как Advanced System Design (ADS), AWR Microwave Office, CST Studio Suite, имеющие индивидуальные удобства проектирования.

В разделе 6 описывается процесс проектирования микрополоскового СВЧ-фильтра с уменьшенным отражением в полосе заграждения, а также измерение АЧХ изготовленного макета.

В разделе для подавления отраженного от фильтра сигнала была спроектирована схема, состоящая из 2 тандемных ответвителей, делящих сигнал напополам, а также 2 микрополосковых фильтров:



Рисунок 2 – Блок-схема фильтра с уменьшенным коэффициентом отражения за пределами полосы пропускания

В ней подаваемая волна, при прохождении через тандемный ответвитель, делится пополам, и половина сигнала уходит на ППФ, другая половина ответвляется на второй ППФ, изменяя свою фазу на 90° . Сигнал, находящийся вне частотной полосы пропускания фильтра, отражается от него и уходит обратно. Отраженный сигнал от второго ППФ проходит снова через тандемный ответвитель, вследствие чего его фаза меняется на 90 градусов, и итоговая фаза отличается на 180 градусов от отраженного сигнала от первого ППФ. Сложение отраженных сигналов, из-за противоположенности их фаз, происходит подавление конечного сигнала.

Для проектирования микрополоскового фильтра материалом диэлектрика бралась поликоровая пластина, толщиной 500мкм, проводящим материалом – золото, толщиной 20 мкм.

Для фильтра были спроектированы несколько направленных ответвителей:

- Кольцевой ответвитель
- Тандемный ответвитель
- Второе исполнение тандемного ответвителя.

Кольцевой ответвитель не подходил по требуемым параметрам: фаза ответвленного сигнала отличалась на более, чем 90 градусов.

Тандемный ответвитель подходил по ФЧХ, однако ответвляемая часть, уходящая на согласованную нагрузку, была велика, вследствие чего был спроектировано второе исполнение тандемного ответвителя.

Для достижения более лучших характеристик фильтра было спроектировано второе исполнение тандемного ответвителя, у которого паразитная связь подавляется сильнее, чем при предыдущим варианте тандемного ответвителя.

Подаваемый сигнал отличается от ответвленного на 90 градусов. Данный ответвитель подходит для схемы с подавлением отраженного сигнала.

Была построена модель фильтра с уменьшенным отраженным сигналом:

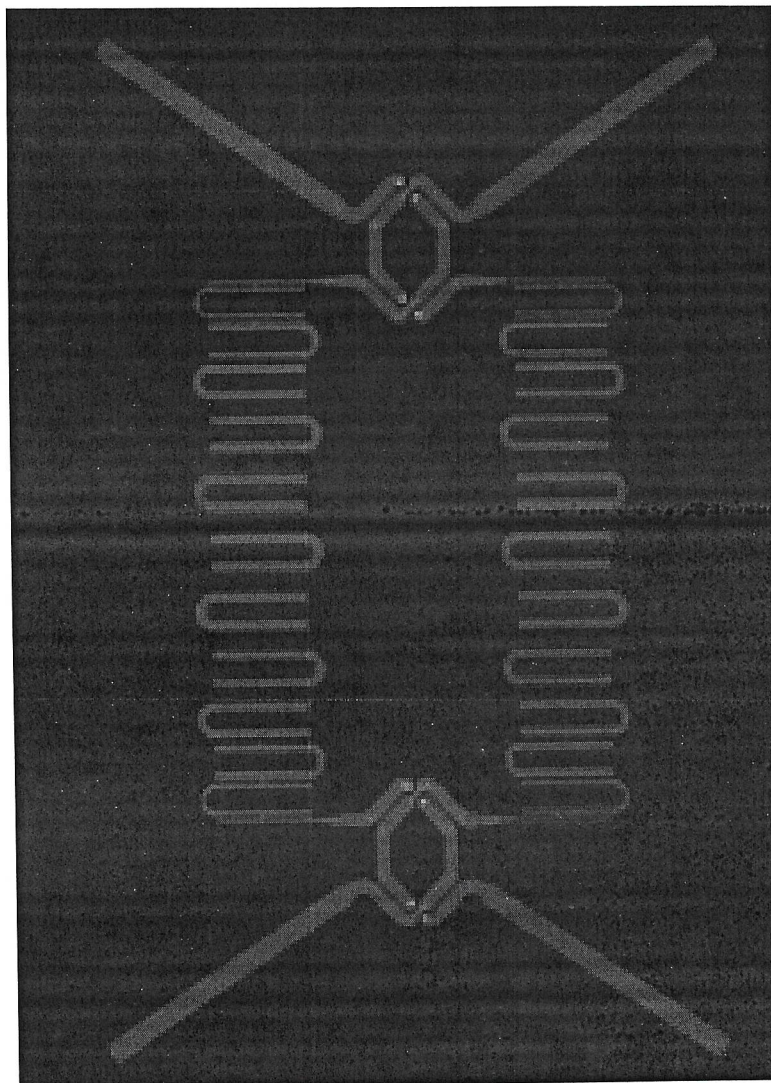


Рисунок 3 – Топология фильтра с уменьшенным отражением на конечном варианте тандемного ответвителя

Анализ АЧХ показал, что при данной топологии происходит подавление паразитного сигнала, минимум подавления равен -14,8дБ. Данная топология была выбрана для изготовления и последующего измерения.

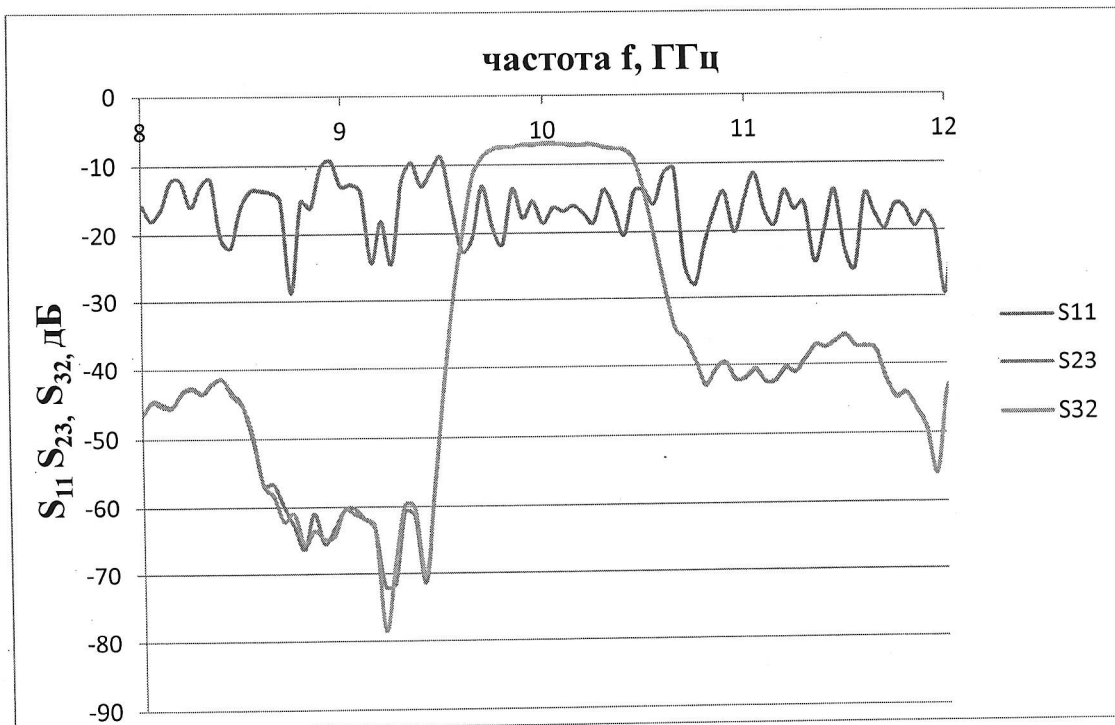


Рисунок 4 – Экспериментально измеренное АЧХ фильтра с уменьшенным отражением со вторым исполнением тандемного ответвителя (точками изображены центральная, нижняя, верхняя частота полосы пропускания фильтра)

При рассмотрении экспериментально измеренного АЧХ видно, что данный фильтр подавляет отраженный сигнал. Нижняя граница полосы пропускания равна $f=9,7$ ГГц, верхняя $f=10,45$ ГГц. Минимум подавления равен -9 дБ в диапазоне 2 ГГц от центральной частоты $f=10,05$ ГГц, что отличается от расчетной величины минимума на 5,8 дБ. Полученные данные не сошлись с расчетами предположительно из-за точности литографии. Однако исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что данная схема гарантирует подавление отраженного сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполнения выпускной квалификационной работы была выполнена задача проектирования фильтра с уменьшенным отражением в полосе заграждения. Исходя из результатов, полученных математическим моделированием и проведением экспериментальных измерений, можно сделать следующие выводы:

1. Был создан фильтр с уменьшенным отражением в полосе заграждения с минимумом подавления отраженного сигнала в -9дБ.
2. Уменьшение отражения в полосе заграждения ППФ возможно с использованием схем, содержащих 2 тандемных ответвителя и 2 полосно-пропускающих фильтра.
3. Для улучшения направленности тандемного ответвителя на частотах выше 7 ГГц требуются конструктивные решения, уменьшающие паразитные связи.
4. Смещать полосу пропускания фильтра с уменьшенным отражением по частоте можно посредством изменения длины микрополосков полосно-пропускающих фильтров, находящихся в его конструкции.