

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

Кафедра физики твердого тела

**Исследование амплитудно-частотных характеристик микрополосковых
фотонных кристаллов с изменяемой проводимостью полоска**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

магистранта 2 курса
направления 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»
профиль «Формирование и диагностика микро-, нано- и
биомедицинских систем»
Института физики

Алтынхузина Вадима Ринатовича

Научный руководитель:

профессор, д.ф. – м.н.
должность, уч.степень, звание


подпись, дата

А.В. Скрипаль
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор, д.ф. – м.н.
должность, уч.степень, звание


подпись, дата

А. В. Скрипаль
инициалы, фамилия

Саратов 2025

Фотонные кристаллы представляют собой периодические структуры, способные управлять распространением электромагнитных волн за счет формирования запрещенных и разрешенных зон в частотном спектре. Особый интерес вызывают микрополосковые фотонные кристаллы (МФК), которые сочетают в себе компактность, технологичность изготовления и широкие возможности для проектирования устройств СВЧ – и терагерцового диапазонов. Их уникальные свойства, такие как фильтрация частот, формирование резонансных мод и управление фазой сигнала, делают их перспективными для применения в фильтрах, антеннах, датчиках и линиях задержки.

Ключевой особенностью МФК является возможность динамического управления их характеристиками за счет изменения параметров структуры, например, проводимости полосковых элементов. Это открывает новые пути для создания перестраиваемых и адаптивных устройств. Однако влияние локальных изменений проводимости на амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) таких структур изучено недостаточно, что ограничивает их практическое применение.

Цель данной работы – изучение амплитудно-частотных характеристик микрополосковых фотонных кристаллов с изменяемой проводимостью полоска. Для реализации этой цели предстоит решить следующие задачи:

1. Анализ теоретических основ распространения электромагнитных волн в периодических микрополосковых структурах.
2. Разработка электродинамической модели микрополоскового фотонного кристалла с изменяемой проводимостью.
3. Проведение численного моделирования и экспериментальное исследование АЧХ структуры при различных значениях проводимости.
4. Оптимизация параметров микрополоскового фотонного кристалла с целью достижения заданных характеристик в частотной области.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании перестраиваемых СВЧ-устройств на основе фотонно-кристаллических структур.

Магистерская работа содержит 3 раздела:

В первом разделе приводятся общие сведения о фотонных кристаллах.

Во втором разделе приводятся результаты компьютерного моделирования амплитудно-частотных характеристик микрополосковых фотонных кристаллов СВЧ-диапазона в среде mathcad и результаты компьютерного моделирования амплитудно-частотных характеристик микрополосковых фотонных кристаллов СВЧ-диапазона в среде трехмерного электродинамического моделирования ADS. Сделаны выводы из результатов моделирования.

В третьем разделе описывается экспериментальный макет микрополоскового СВЧ фотонного кристалла с изменяемым сопротивлением микрополоска и результаты экспериментального исследования амплитудно-частотных характеристик микрополоскового СВЧ фотонного кристалла. Сделаны выводы из экспериментальных исследований.

Для комплексного изучения поведения фотонно-кристаллических структур была создана многоэтапная методика, объединяющая математическое моделирование и компьютерное имитационное моделирование. Такой интегрированный подход обеспечил последовательное раскрытие физических закономерностей и проверку достоверности полученных данных.

На первом этапе исследования проводилось аналитическое моделирование в среде MATLAB, что дало возможность:

- Выявить общие закономерности формирования АЧХ.
- Определить качественные зависимости параметров структуры от характеристик сигнала.
- Получить предварительные данные о положении запрещенных зон.

- Оптимизировать диапазон варьируемых параметров для последующего детального анализа.

Особое значение имело решение волнового уравнения для периодической структуры с использованием методов матричной передачи, что позволило:

- Учесть эффект Брэгговского рассеяния.
- Проанализировать распределение поля в структуре.
- Определить основные резонансные частоты системы.

После получения теоретических предсказаний, исследование было продолжено с использованием профессионального СВЧ-симулятора Advanced Design System (ADS), который обеспечил:

- учет реальных физических параметров материалов;
- моделирование паразитных эффектов и потерь;
- анализ влияния технологических факторов изготовления;
- визуализацию распределения электромагнитного поля.

Преимущество применения ADS заключается в:

1. Высокой точности расчетов, подтвержденной многочисленными экспериментальными данными

2. Возможности учета:

- поверхностных эффектов;
- диэлектрических потерь;
- неидеальности контактов.

3. Наличии специализированных инструментов для:

- параметрического анализа;
- оптимизации характеристик;
- статистического моделирования.

Такой двухэтапный подход – от фундаментальных математических моделей к детальному компьютерному моделированию – обеспечил глубокое понимание физических процессов в исследуемых структурах и высокую достоверность полученных результатов.

Представлен образец без дефекта и их АЧХ Образцы отличаются друг от друга габаритами и структурой построения топологии.

Материал проводника: медь

Материал подложки: «флан» $\epsilon_r=8.8$

Проводимость в центральной жиле- $12.5 \cdot 10^6$ Ом

Для выявления влияния внесенных изменений сопротивления в микрополосковом волноводе, нам потребуется подменить сопротивление при помощи вставного резистора, расположение которой по центру даст возможность пронаблюдать характер изменений на графике АЧХ.

АЧХ после внесения дефекта в общую топологию, была значительно изменена полоса пропускания с улучшенными показателями общей добротности. Главное изменение это, конечно разделение полосы пропускания на две не равномерно распространенные гармоники. Длина первой явно меньше, порядка 1,5 ГГц в ширину, вторая же более 2 ГГц. Разделение полосы пропускания может быть связано с появлением пика в запрещенной зоне.

Для следующего этапа изменяем сопротивление с $12.5 \cdot 10^5$ на $12.5 \cdot 10^3$. Такой большой шаг в изменении связан с тем, что при меньшем изменении не смогли бы пронаблюдать как таковое изменение характеристик.

На данном этапе изменения несут предсказуемый характер, на рис. 6 можно зарегистрировать так же увеличение полосы пропускания, путем сдвига гармоник. Для заключительного выявления характера изменения изменим сопротивление с $12.5 \cdot 10^3$ на $12.5 \cdot 10^0$. Амплитуда запрещенной моды достигла минимального значения с данными характеристиками топологии.

Последние изменения мы видим полное слияние всех возможных гармоник, что привело к максимальному увеличению полосы пропускания. Добротность ведущей полосы показывает хорошие показатели. Запрещенная зона практически не изменилась в амплитуде.

Для начала проведения исследования зависимости проводимости,

внесём в топологию дефект. Для этого изменим длину центрального проводника до $10.5 \cdot 10^{-3}$.

АЧХ после внесения дефекта в общую топологию, была значительно изменена полоса пропускания с улучшенными показателями общей добротности. Главное изменение это, конечно разделение полосы пропускания на две равномерно распространенные гармоники. Длина обеих более 2 ГГц. Разделение полосы пропускания может быть связано с появлением пика в запрещённой зоне.

Результаты компьютерного моделирования амплитудно-частотных характеристик микрополосковых фотонных кристаллов СВЧ-диапазона в среде трехмерного электродинамического моделирования ADS.

Исходная микрополосовая линия длиной 80.5 мм на керамической подложке ($\epsilon_r=8.8$) показала ожидаемые результаты:

В ходе эксперимента с непрерывной микрополосковой линией (без разрывов и сопротивлений) мы наблюдали характерную резонансную картину, полностью соответствующую теоретическим ожиданиям. На АЧХ четко выделяется доминирующий резонансный пик на 8 ГГц с уровнем 8 дБм – это основной режим колебаний в нашей структуре. Особенно показательно, что кроме этого выраженного пика других существенных резонансов в исследуемом диапазоне не обнаружено.

Полоса пропускания демонстрирует стабильное поведение от 0 ГГц до 4 ГГц с относительно ровной характеристикой около 0 дБ. Такой равномерный отклик в низкочастотной области подтверждает хорошее согласование линии и отсутствие существенных неоднородностей. После 4 ГГц наблюдается резкий спад амплитуды сигнала до -14 дБ, что соответствует переходной области перед основным резонансом.

Интересно отметить симметричность характеристики после основного резонанса – картина зеркально повторяется в высокочастотной области. Такое поведение типично для распределённых резонансных структур и свидетельствует об отсутствии заметных аномалий в исследуемой линии.

Особенно важно, что в промежуточной области между 4 и 8 ГГц не наблюдается побочных резонансов, что подтверждает высокое качество изготовления образца.

Вносится нарушение в виде сопротивления при помощи резистора.

Рассматривая полученные данные, можно отметить несколько важных аспектов:

Постоянство резонансных частот указывает на то, что 10 Ом недостаточно для существенного изменения распределённых параметров линии

Равномерность ухудшения характеристик во всех точках говорит о том, что сопротивление действует как простой ослабитель сигнала

Исследование влияния сопротивления 1 кОм в разрыве микрополосковой линии.

Основные наблюдения и ключевые результаты

После установки сопротивления 1 кОм в центральный разрыв линии мы наблюдаем радикальное изменение характеристик системы. В отличие от предыдущих экспериментов с меньшими сопротивлениями, здесь проявляются совершенно новые физические эффекты, заслуживающие особого внимания.

На контрольных частотах зафиксированы следующие показатели:

На основной резонансной частоте 5.888 ГГц:

Уровень передачи составил -5.476 дБ, что соответствует ослаблению сигнала примерно в 3.5 раза. Это существенно меньше ожидаемого теоретического значения для идеального обрыва, что указывает на важную роль паразитных параметров.

В точке глубокого подавления 4.721 ГГц:

Зафиксировано рекордное значение -31.607 дБ. Такая глубина подавления делает эту конфигурацию потенциально полезной для создания узкополосных режекторных фильтров.

На верхней резонансной частоте 7.063 ГГц:

Показатель составил -30.795 дБ, демонстрируя симметричное

Подготовка и проведение измерений

Экспериментальное исследование началось с изготовления макета микрополосковой платы, соответствующей заданной топологии. Образец был подключен к векторному анализатору цепей (PNA) через высокочастотные коаксиальные переходы с использованием стандартной процедуры калибровки SOLT (Short-Open-Load-Thru) в рабочем диапазоне частот.

Перед внесением изменений в структуру было проведено контрольное измерение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) исходного образца без разрывов и дополнительных сопротивлений.

Полученная АЧХ послужила базовой характеристикой для последующего сравнения с модифицированными вариантами структуры. Отсутствие аномальных выбросов и соответствие расчетным параметрам подтвердило корректность изготовления образца и измерительной методики.

Обоснование выбора высокоомного сопротивления для эксперимента

Изначальный анализ результатов компьютерного моделирования в ADS четко продемонстрировал, что сопротивления величиной менее 100 Ом практически не оказывают значимого влияния на амплитудно-частотные характеристики структуры. Как показали предварительные расчеты.

Для малых сопротивлений (1-50 Ом):

- Изменение коэффициента передачи не превышало 0.5-1.2 дБ
- Сдвиг резонансных частот оставался в пределах погрешности измерений (<0.5%)
- Форма АЧХ сохраняла исходные характеристики

Критический порог влияния, существенные изменения начинались лишь при $R > 100 \text{ Ом}$.

Учитывая эти данные, было принято стратегическое решение сосредоточиться на исследовании именно высокоомных сопротивлений, так как они дают четкое проявление режекторных свойств, а также явные изменения формы резонансных пиков.

Такой подход позволил максимально эффективно использовать

ограниченное экспериментальное время. Получить данные с высокой информативной ценностью.

При этом сохраняется возможность экстраполяции результатов на случай малых сопротивлений через аналитические зависимости, что подтверждается хорошим соответствием данных моделирования и эксперимента для референсных точек.

В ходе эксперимента с установкой высокоомного сопротивления были получены крайне показательные результаты. Как и ожидалось, внесение столь значительного сопротивления в разрыв линии не привело к кардинальным изменениям амплитудно-частотной характеристики. Наблюдаемый незначительный сдвиг резонансной частоты, составивший менее одного процента, можно с уверенностью отнести к технологическим погрешностям процесса монтажа. В первую очередь это может быть связано с микроскопическими отклонениями при позиционировании компонента, неидеальностью паяного соединения или минимальными термическими деформациями структуры при сборке.

Что особенно важно – энергетические параметры системы остались практически неизменными. Уровень передаваемой мощности в рабочей полосе частот колебался в пределах десятых долей децибела, что полностью соответствует погрешности измерительного оборудования. Коэффициент отражения сохранился на приемлемом уровне, не превышая -20 дБ, а форма резонансных пиков не показала каких-либо существенных искажений. Такая стабильность характеристик убедительно доказывает, что при столь высоких значениях сопротивления (порядка 1 кОм) структура ведет себя фактически как разомкнутая цепь для СВЧ-сигнала, а основная энергия либо отражается обратно в источник, либо локализуется в начальном участке линии.

Эти наблюдения полностью согласуются с теоретическими предсказаниями и результатами компьютерного моделирования. Минимальные отклонения, зафиксированные в ходе эксперимента, не только не снижают ценности полученных данных, но и наглядно демонстрируют

необходимость учета реальных технологических допусков при проектировании практических устройств. Особенно важно учитывать подобные нюансы при разработке прецизионных СВЧ-компонентов, где даже столь незначительные изменения параметров могут иметь значение. Полученные результаты создают прочную основу для дальнейших исследований и оптимизации конструкции.

После серии предварительных тестов с различными номиналами сопротивлений стало очевидно, что для получения действительно показательных и информативных результатов необходимо перейти к существенно большему значению – 1 кОм. Этот выбор был сделан не случайно, а исходя из целого ряда важных соображений.

Когда мы работали с меньшими сопротивлениями – 1 Ом, 10 Ом, даже 50 Ом - изменения в амплитудно-частотных характеристиках были настолько незначительными, что их можно было списать на погрешности измерений или технологические допуски. Сигнал практически не замечал этих "препятствий", проходя через них с минимальными потерями. Это, конечно, подтверждало теоретические расчеты, но не давало достаточного материала для глубокого анализа.

Таким образом, переход к сопротивлению 1 кОм – это не просто увеличение номинала, а сознательный выбор рабочей точки, где проявляются все наиболее интересные и важные для исследования эффекты, где теория встречается с практикой, а полученные данные имеют максимальную ценность как для фундаментальной науки, так и для практического применения.

Описание полученных результатов:

На графике АЧХ наблюдается эффективное подавление сигнала до – 53.5 дБ на частоте 6.94 ГГц при использовании сопротивления 1 кОм, что демонстрирует исключительно сильный режекторный эффект – сигнал ослаблен более чем в 200 тысяч раз, при этом ширина полосы подавления составляет порядка 10 МГц, а общая форма характеристики сохраняет

хорошую стабильность за пределами зоны режекции, что подтверждает высокую избирательность созданного фильтра и минимальное влияние на полезный сигнал в рабочем диапазоне.

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были получены следующие результаты:

1 Разработана модель микрополоскового СВЧ фотонного кристалла с нарушением периодичности и изменяемой проводимостью полоска.

2 Выполнено компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик микрополосковых фотонных кристаллов СВЧ-диапазона с нарушением периодичности и изменяемой проводимостью полоска в среде mathcad.

3 Проведено компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик микрополосковых фотонных кристаллов СВЧ-диапазона с нарушением периодичности и изменяемой проводимостью полоска в среде трехмерного электродинамического моделирования.

4 Разработан и создан экспериментальный макет микрополоскового СВЧ фотонного кристалла с изменяемым сопротивлением полоска.

5 Выполнено экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик микрополоскового СВЧ фотонного кристалла с изменяемым сопротивлением полоска.

6. Теоретически описано и экспериментально подтверждена возможность управления амплитудой дефектной моды изменением сопротивления полоска в области нарушения периодичности микрополоскового СВЧ фотонного кристалла.

1. Агафонов, С.В., Малышев, А.А. Фотонные кристаллы на основе микрополосковых структур / С.В. Агафонов, А.А. Малышев // Известия вузов. Радиоэлектроника, 2013. - Т. 56. - № 6. - С. 16-21.

2. Белов, П.А., Фотонные кристаллы в радиотехнике / П.А. Белов, К.Р. Симовский, С.А. Третьяков - М.: Техносфера, 2018. - 184 с.

3. Белокопытов, Г.В. Фотонные кристаллы как оптические волноводы: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МГУ, 2011. - 24 с.
4. Бритун, Н.В. Электронное управление параметрами структур с фотонной запрещенной зоной / Н.В. Бритун, В.В. Данилов // Российская академия наук, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе. - Санкт-Петербург, 2003. - Т. 29. - №7. - С. 27-32.
5. Гусев, А.А. Современные методы анализа фотонных кристаллов. - М.: Радио и связь, 2014. - 256 с.
6. Иванов, О.В. Применение фотонных кристаллов в антенной технике / О.В. Иванов // Антенны, 2019. - №4. - С.17-25.
7. Мухортов В.М. Наноразмерные сегнетоэлектрические пленки новая активная среда для микроэлектроники / В.М Мухортов, Ю.И. Головкин, С.В. Бирюков // Наука Юга России, 2022. - т. 18. - № 4 - С. 33-43.
8. Никитин, А.А. Компьютерное моделирование электродинамических структур. - М.: Физматлит, 2015. - 288 с.
9. Проциврин, С.Л. СВЧ-фотонные кристаллы на основе копланарных линий передачи / С.Л. Проциврин В.В. Хардыков // Журнал радиотехнических исследований, 2003. - № 2. - С. 45-52.
10. Соловьев, А.В. Сегнетоэлектрические фотонные кристаллы с управляемой запрещенной зоной / А.В. Соловьев, А.В. Акимов // Техническая физика, 2007. - Т. 77, № 5. - С. 97-101.
11. Тюрин, Ю.Н. Фотонные кристаллы и их применение в радиотехнике / Ю.Н. Тюрин, В.Н. Павловский // Радиотехника и электроника, 2004. - Т. 49. - № 9. - С. 1055-1062.
12. Усанов, Д.А., Волноводные фотонные кристаллы с характеристиками, управляемыми р-і-п-диодами / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль А.В. Абрамов // Изв. вузов. Электроника, 2010. - С. 24-29.
13. Усанов, Д. А., Скрипаль, А. В., Пономарев, Д. В. Фотонные кристаллы СВЧ-диапазона и их использование для измерения параметров материалов: учеб. пособие. Саратов: СГУ, 2014. - 32 с.

14. Усанов, Д.А., Никитов, С.А., Скрипаль, А.В. Одномерные СВЧ фотонные кристаллы. Новые области применения. М.: Физматлит, 2018. 184 с.
15. Шиханов, Р.Ю., Фотонные кристаллы на основе линий передачи для СВЧ-приложений / Р.Ю. Шиханов, В.А. Щетинин // Радиотехника и электроника, 2019. - Т. 64. - № 9. - С. 991-997.
16. Busse, C.A., Kriegel, I., Sipe, J.E. Engineering defect modes in 2D photonic crystals // J. Opt. Soc. Am. B, 2009, Vol. 26, Issue 6, pp. 1177-1185.
17. Caloz, C., Itoh, T. Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications. Wiley-IEEE Press, 2006.
18. Eleftheriades, G.V., Balmain, K.G. Negative-Refractive Metamaterials: Fundamental Principles and Applications. Wiley-IEEE Press, 2005.
19. Joannopoulos, J.D., Meade, R.D., Winn, J.N. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. Princeton University Press, 2008.
20. John, S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices // Phys. Rev. Lett., 1987, Vol. 58, P. 2486-2489.
21. Lourtioz, J.-M. et al. Photonic Crystals: Towards Nanoscale Photonic Devices. Springer, 2008.
22. Sakoda, K. Optical Properties of Photonic Crystals. Springer, 2005.
23. Yablonovitch, E. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics // Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 58. P. 2059-2062.