

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра физики твердого тела

**Характеристики СВЧ фотонных кристаллов на микрополосковых
шпильковых резонаторах
АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ**

магистранта 2 курса

направления 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»

профиль «Формирование и диагностика микро-, нано- и биомедицинских систем»

Института физики

Асьянова Валерия Тагировича

Научный руководитель:

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч.степень, уч.звание

подпись, дата

Ал.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Зав.кафедрой:

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч.степень, уч.звание

подпись, дата

Ал.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Консультант:

Начальник лаб. 2 ИКО

должность, уч.степень, уч.звание

подпись, дата

Д.В. Григорьев

инициалы, фамилия

Саратов 2025

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире технологии беспроводной связи и радиоэлектроники развиваются стремительными темпами. Одним из ключевых направлений исследований в этой области является разработка новых материалов и структур, которые могут улучшить характеристики радиоэлектронных устройств и систем. Фотонные кристаллы, особенно в СВЧ диапазоне, представляют собой перспективные структуры, способные значительно расширить возможности существующих технологий. Они находят применение в антеннах, фильтрах, резонаторах и других элементах радиоэлектронной аппаратуры. Микрополосковые шпильковые резонаторы, как элементы фотонных кристаллов, позволяют создавать компактные и эффективные устройства с уникальными электрическими и волновыми характеристиками.

Актуальность темы «Характеристики СВЧ фотонных кристаллов на микрополосковых шпильковых резонаторах» обусловлена несколькими факторами:

1) Развитие технологий. Фотонные кристаллы являются одним из наиболее перспективных направлений в области оптики и электроники. Они обладают уникальными свойствами, которые позволяют создавать новые устройства и системы с улучшенными характеристиками.

2) Применение в различных областях. Фотонные кристаллы могут быть использованы в таких областях, как телекоммуникации, радиолокация, навигация, медицина и другие. Это делает их исследование актуальным и востребованным.

3) Создание новых устройств. Исследование характеристик СВЧ фотонных кристаллов позволяет создавать новые устройства, такие как фильтры, мультиплексоры, модуляторы и другие. Эти устройства могут найти широкое применение в различных системах и устройствах.

Таким образом, актуальность темы обусловлена развитием технологий, применением фотонных кристаллов в различных областях и созданием новых устройств на их основе.

Целью магистерской работы по теме «Характеристики СВЧ фотонных кристаллов на микрополосковых шпильковых резонаторах» является исследование характеристик СВЧ фотонных кристаллов на микрополосковых шпильковых резонаторах.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ современного состояния исследований СВЧ фотонных кристаллов.
2. Изучить теоретические основы работы фотонных кристаллов в СВЧ диапазоне и особенности микрополосковых шпильковых резонаторов.
3. Провести анализ характеристик микрополосковых шпильковых резонаторов как элементов фотонных кристаллов.
4. Исследовать влияние геометрических параметров резонаторов на характеристики фотонного кристалла.
5. Собрать экспериментальную установку для измерения характеристик СВЧ фотонных кристаллов и провести эксперименты для подтверждения теоретических выводов.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются СВЧ фотонные кристаллы на микрополосковых шпильковых резонаторах. Предметом исследования являются их частотные характеристики, а также влияние геометрических параметров на эти характеристики.

Методологическая база и структура работы

Методологической базой исследования являются теоретические основы электродинамики, теории фотонных кристаллов, а также методы математического моделирования и экспериментального исследования. В работе используются методы численного анализа, моделирования в программных пакетах для электромагнитного моделирования, а также экспериментальные методы измерения частотных характеристик.

Структура работы включает введение, три главы, заключение, список использованных источников и приложения. В первой главе проводится анализ современного состояния исследований СВЧ фотонных кристаллов, во второй — теоретическое описание СВЧ фотонных кристаллов на микрополосковых шпильковых резонаторах, в третьей — экспериментальное исследование. Работа выполнена при поддержке АО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон».

ГЛАВА 1 Анализ современного состояния исследований СВЧ фотонных кристаллов

Брэгговские структуры — это искусственно созданные структуры, которые имеют периодическое строение. Период этих структур сопоставим с длиной волны электромагнитного излучения, которое распространяется в них [1-4]. В СВЧ-диапазоне на основе структур с брэгговской запрещённой зоной создаются разнообразные СВЧ-устройства, такие как полосовые фильтры, направленные ответвители, перестраиваемые резонаторы, миниатюрные антенны и согласованные нагрузки, а также СВЧ-сенсоры [5–10].

Эти структуры, называемые СВЧ фотонными кристаллами, имеют ряд преимуществ: они просты в изготовлении, их элементы имеют микроскопические размеры, а сами кристаллы могут быть созданы на основе упорядоченных массивов элементов различной формы и конфигурации.

Важно подчеркнуть, что многие экспериментальные и теоретические работы, посвящённые изучению электромагнитных свойств фотонных кристаллов, направлены на создание запрещённых зон с определёнными амплитудно-частотными характеристиками. В таких исследованиях фотонные кристаллы рассматриваются как сложные структуры, состоящие из повторяющихся элементов различной формы и размера. Эти структуры обычно отличаются своей геометрией, например, разной пространственной симметрией, наличием локальных дефектов или частичным беспорядком.

Более сложными с точки зрения электродинамики являются фотонные кристаллы, в которых диэлектрические и магнитные параметры составляющих могут регулироваться внешними магнитными или электрическими полями.

Разработка СВЧ фотонных кристаллов с заданными амплитудно-частотными характеристиками представляет собой инновационное направление, обладающее значительным потенциалом для расширения спектра их практического применения.

СВЧ-фотонные кристаллы представляют собой инновационный класс электродинамических систем, которые находят широкое применение в создании

резонансных структур с регулируемыми характеристиками и реализации СВЧ-методик для анализа параметров материалов и структур. СВЧ-методы, основанные на использовании данных фотонных кристаллов, характеризуются высокой чувствительностью, что позволяет получать результаты измерений, усредненные по пространственным масштабам, сопоставимым с длиной волны излучения.

Для модификации характеристик фотонных кристаллов применяются специальные элементы, интегрированные в структуру кристалла и нарушающие его периодичность. Свойства этих элементов могут быть модулированы посредством внешнего сигнала, что открывает широкие возможности для управления характеристиками фотонных систем. В практическом аспекте наиболее перспективными являются элементы, управляемые электрическими сигналами, которые могут быть реализованы с использованием полупроводниковых структур, обладающих электрически контролируемой проводимостью.

Теоретическая база исследований фотонных кристаллов достигла значительного прогресса. Теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение возможности использования фотонных кристаллов в различных конфигурациях демонстрирует их высокий потенциал для практического применения.

Экспериментальные результаты показали, что фотонные кристаллы обладают уникальными свойствами, такими как:

- Высокий коэффициент отражения в запрещенной зоне
- Возможность создания дефектных мод
- Способность работать как узкополосные фильтры
- Перспективность использования в качестве электрически управляемых устройств

Технологические преимущества фотонных кристаллов, включая высокую технологичность производства и возможность реализации различных

конфигураций, открывают широкие перспективы для их применения в современной радиоэлектронике.

Таким образом, современное состояние исследований СВЧ фотонных кристаллов характеризуется высоким уровнем развития теоретических основ и успешным практическим применением полученных результатов, что создает прочную базу для дальнейших исследований и разработок в этой области.

ГЛАВА 2 Теоретическое описание полосковых фотонных кристаллов на шпильковых резонаторах

2.1 Модель фотонного кристалла на шпильковых резонаторах

Численный анализ амплитудно-частотных характеристик СВЧ-фильтра, базирующегося на микрополосковом фотонном кристалле с использованием встречных шпильковых резонаторов, был выполнен с применением программного обеспечения для трехмерного моделирования электромагнитных полей методом конечных элементов ANSYS HFSS. Данный метод позволил с высокой точностью воспроизвести сложные электродинамические процессы, происходящие в исследуемой структуре, и определить ее частотные свойства.

Исследовался фотонный кристалл на основе керамической подложки (Al_2O_3) толщиной 1 мм со встречными шпильковыми резонаторами, выполненными из золотого проводника. Топология резонаторов с обозначениями геометрических размеров представлена на рисунке 1. С целью минимизации габаритов такого фотонного кристалла было выбрано минимальное количество элементов (шпильковых резонаторов), обеспечивающих получения ярко выраженной зонной структуры в заданном частотном диапазоне.

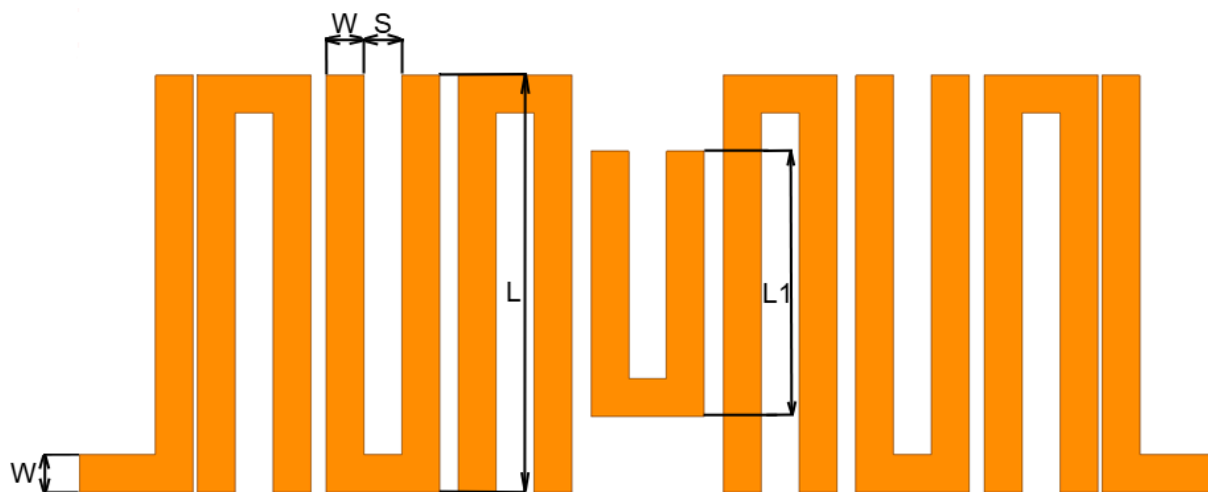


Рисунок 1 - Топология резонаторов с обозначениями геометрических размеров

В рассматриваемой системе реализовано семь резонаторов, каждый из которых характеризуется шириной W , равной 1 мм. Зазоры S между

резонаторами также имеют идентичную ширину в 1 мм. Длина L каждого резонатора составляет 11 мм, в то время как длина L_1 составляет 7 мм.

Фотонный кристалл проектировался на основе керамической подложки (Al_2O_3) толщиной 1 мм. Топология микрополоскового СВЧ-фильтра, основанного на встречных шпильковых резонаторах, представлена на рис. 2.

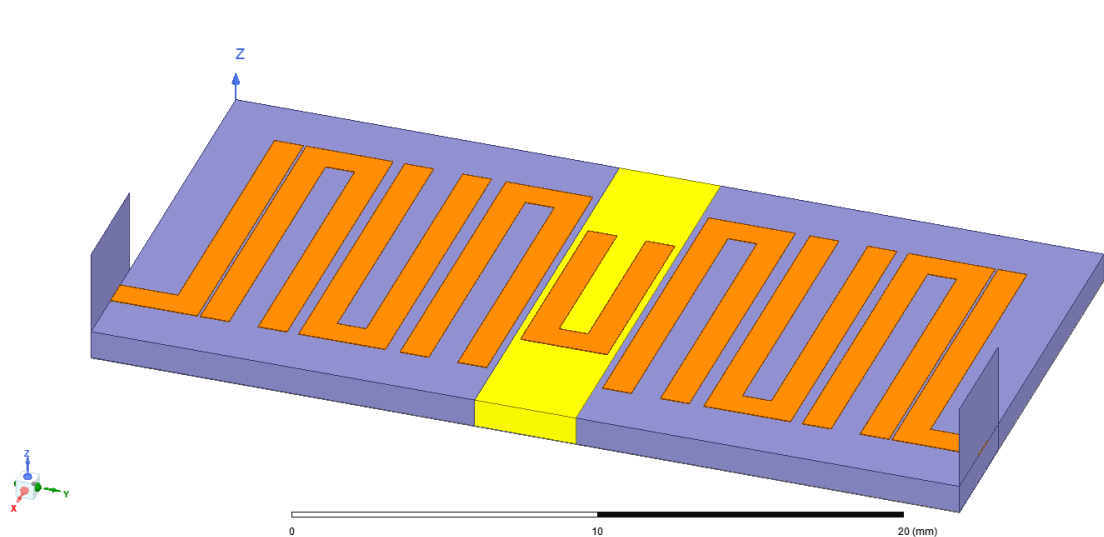


Рисунок 2 - Топология микрополоскового СВЧ-фильтра, основанного на встречных шпильковых резонаторах

2.2 АЧХ фотонного кристалла на шпильковых резонаторах

Для определения возможности управления амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) исследуемого фотонного кристалла был проведен детальный анализ влияния его топологической структуры. В частности, объектом исследования являлась длина третьего резонатора, которая была систематически варьирована в диапазоне от 7 до 9 мм с шагом в 0,5 мм, что позволило охватить весь спектр потенциальных изменений данного параметра (см. Рис. 3).

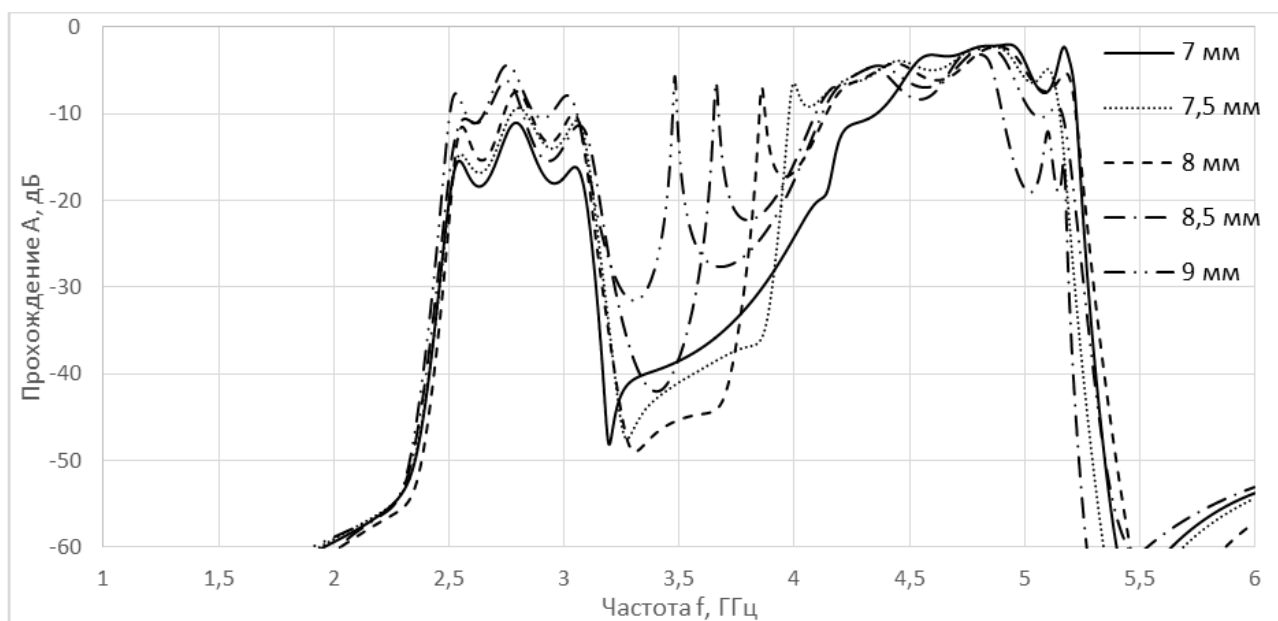


Рисунок 3 - АЧХ фотонного кристалла на встречных шпильковых резонаторах с увеличением длины третьего резонатора от 7 до 9 мм

Как следует из результатов расчета, увеличение длины третьего резонатора приводит к появлению дефектной моды между первой и второй разрешенной зоной и её монотонному сдвигу к области более низких частот, а также уменьшению глубины запрещенной зоны. При этом происходит увеличение прохождения первой разрешенной зоны и уменьшается крутизна АЧХ на краях низкочастотной разрешённой зоны.

ГЛАВА 3 Экспериментальное исследование характеристик СВЧ фотонных кристаллов

В рамках исследования была проведена серия измерений для определения характеристик СВЧ фотонного кристалла на микрополосковых шпильковых резонаторах. Основной целью являлось сравнение экспериментальных данных с теоретической моделью, разработанной на основе идеальных параметров.

На рисунке 4 представлено семейство амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) экспериментального фотонного кристалла, реализованного на базе встречных шпильковых резонаторов. Исследование проводилось с варьированием длины третьего резонатора в диапазоне от 7 до 9 мм с интервалом 0,5 мм.

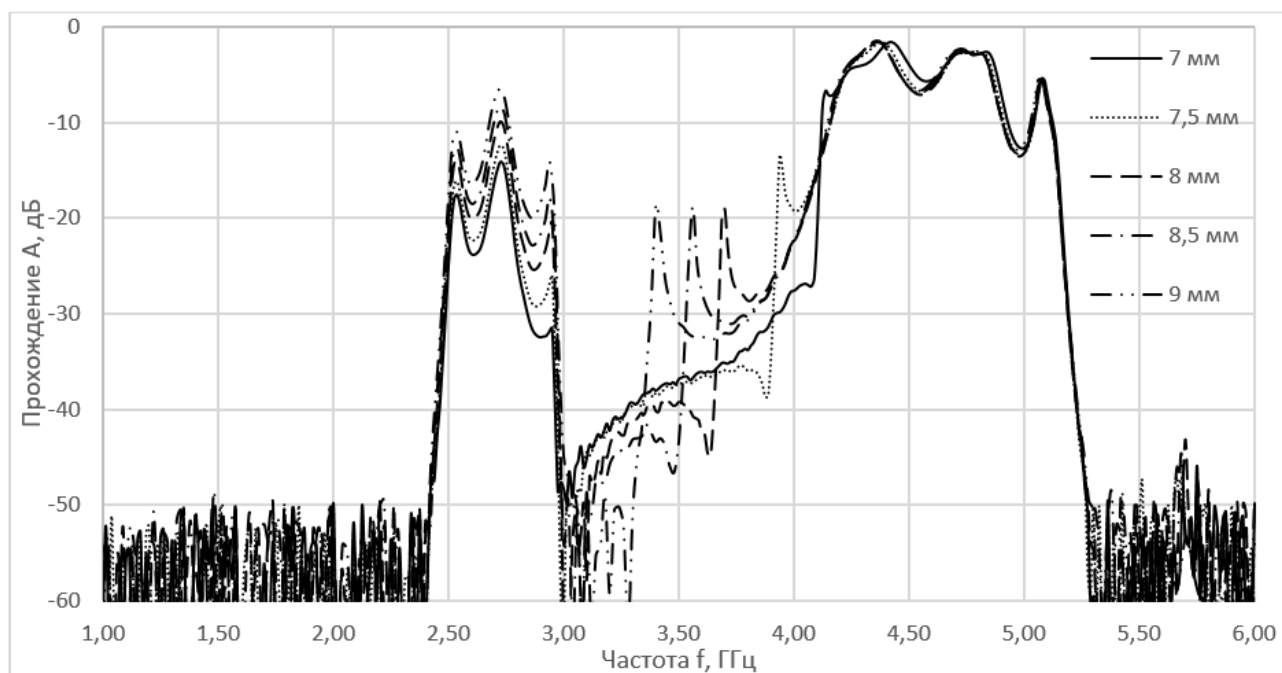


Рисунок 4 - АЧХ фотонного кристалла на встречных шпильковых резонаторах с увеличением длины третьего резонатора от 7 до 9 мм

В результате проведенного эксперимента установлено, что удлинение третьего резонатора инициирует возникновение дефектной моды в интервале между первой и второй разрешенными зонами, сопровождающееся её монотонным смещением в область более низких частот (Рис. 17). Это также приводит к уменьшению глубины запрещенной зоны. В свою очередь, наблюдается увеличение прохождения первой разрешенной зоны и уменьшение

крутизны амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) на краях низкочастотной разрешенной зоны. Данные наблюдения свидетельствуют о существенном влиянии геометрии резонаторной системы на спектральные характеристики и динамическое поведение системы в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы магистра было проведено компьютерное моделирование и экспериментальное исследование СВЧ фотонного кристалла на микрополосковых шпильковых резонаторах в виде полосно-пропускающего фильтра.

Анализ результатов исследования продемонстрировал, что при длине резонатора 7 мм дефектная мода отсутствовала в обоих случаях, что свидетельствует о стабильности системы в данном диапазоне. Дефектная мода начинает проявляться при длине резонатора 7,5 мм, и её выраженность возрастает с увеличением длины.

Результаты моделирования и эксперимента по определению частоты дефектной моды показали высокую степень корреляции. При длине 7,5 мм расчётная частота составила 4,00 ГГц, а экспериментальная — 3,94 ГГц, разница составила 1,5 %. При длине 8,0 мм расчётная частота была 3,862 ГГц, а экспериментальная — 3,968 ГГц, разница — 2,7 %. При длине 8,5 мм расчётная частота составила 3,66 ГГц, а экспериментальная — 3,563 ГГц, разница — 2,6 %. При длине 9,0 мм расчётная частота была 3,48 ГГц, а экспериментальная — 3,403 ГГц, разница — 2,2 %. Таким образом, наблюдается удовлетворительное соответствие между теоретическими и экспериментальными данными.

Однако результаты моделирования и эксперимента по оценке прохождения сигнала продемонстрировали значительное расхождение. При длине 7,5 мм расчётный коэффициент прохождения составил 6,38 дБ, а экспериментальный — 13,73 дБ, разница — 7,35 дБ. При длине 8,0 мм расчётный коэффициент прохождения был 6,99 дБ, а экспериментальный — 19,11 дБ, разница — 12,12 дБ. При длине 8,5 мм расчётный коэффициент прохождения составил 6,37 дБ, а экспериментальный — 19,93 дБ, разница — 13,56 дБ. При длине 9,0 мм расчётный коэффициент прохождения был 5,66 дБ, а экспериментальный — 19,23 дБ, разница — 13,57 дБ. Это указывает на существенную недооценку моделью величины прохождения, особенно при увеличении длины резонатора,

что может быть обусловлено недостаточной точностью используемых методов моделирования.

Для более точного описания процессов, происходящих в резонаторе, необходимо учитывать конструктивные особенности резонатора. Эти факторы могут существенно влиять на характеристики системы и должны быть учтены при разработке более точных моделей.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на глубокое изучение механизмов возникновения дефектной моды и усовершенствование существующих методов моделирования для более точного прогнозирования характеристик резонатора. Это позволит улучшить качество и надёжность разрабатываемых устройств, а также расширить их функциональные возможности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics// Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 58, no. 20. pp. 2059—2062.
2. Yablonovitch E. Photonic Crystals: Semiconductors of Light// Scientific American. 2001. Vol. 285, no. 6. pp. 47–55.
3. Yablonovitch E. Photonic band-gap structures// Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics. 1993. Vol. 10, no.2. pp. 283–295.
4. Yablonovitch E. Photonic band-gap crystals// Journal of Physics-Condensed Matter. 1993. Vol.5, no.16. pp. 2443–2460.
5. Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль Ал. В., Пономарев Д. В. Одномерные СВЧ фотонные кристаллы. Новые области применения. 2-е изд., доп. и перераб. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2020. 236 с.
6. Усанов Д. А. Волноводные фильтры загораждения на основе свехвысокочастотных фотонных кристаллов с характеристиками, управляемыми p-i-p-i-диодами./ Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Мерданов М. К., Евтеев С. Г., Пономарев Д. В. // Радиотехника и электроника, 2019, Т. 64, № 4. С. 375-386.
7. Усанов Д. А., СВЧ-умножители высокой кратности. / Усанов Д. А., Посадский В. Н., Скрипаль А. В., Тяжлов В. С., Григорьев Д. В. // Изв. вузов России. Радиоэлектроника, 2014, № 4. С. 48-50.
8. Беляев Б. А. Исследование частотно-селективных устройств, построенных на основе микрополоскового двумерного фотонного кристалла. / Беляев Б. А., Ходенков С. А., Шабанов В. Ф. // Доклады Академии наук, 2016, Т. 467, № 4. С. 400-404.
9. Мухортов В. М. Электрически перестраиваемый фотонный кристалл на основе копланарного волновода с наноразмерной сегнетоэлектрической пленкой. / Мухортов В. М., Масычев С. И., Маматов А. А., Мухортов Вас. М. // Письма в ЖТФ, 2013, Т. 39, №. 20. С. 70-76.
10. Никитин Ал. А. Сверхвысокочастотный фотонный кристалл на целевой линии передачи с сегнетоэлектрической пленкой / Никитин Ал. А.,

Никитин Ан. А., Устинов А. Б., Lahderanta E., Калиникос Б. А. // Журнал технической физики, 2016, Т. 86, №. 6. С.115-120

11. Скрипаль, А. В. Волноводные фотонные кристаллы на основе металлodieлектрических структур / А. В. Скрипаль, Е. В. Латышева, А. А. Логинов // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Сборник статей одиннадцатой Всероссийской научной школы-семинара, Саратов, 22 мая 2024 года. – Саратов: "Саратовский источник", 2024. – С. 170-173. – EDN SBRJIP.

12. Скрипаль, А. В. Использование сверхвысокочастотного фотонного кристалла для измерения параметров полупроводников / А. В. Скрипаль, Е. В. Латышева, С. Д. Дударев // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами : Сборник статей десятой Всероссийской научной школы-семинара, Саратов, 25 мая 2023 года / Под редакцией Ал.В. Скрипаля. – Саратов: Издательство "Саратовский источник", 2023. – С. 259-263. – EDN ANBHYS.

13. Михайлов, А. И. Оценка возможностей 3D-печати для изготовления волноводных фотонных кристаллов / А. И. Михайлов, Е. А. Рябов, С. А. Сергеев // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2022. – Т. 25, № 3. – С. 29-35. – DOI 10.18469/1810-3189.2022.25.3.29-35. – EDN HQZDNT.

14. Динамика релаксации люминесценции планарных и свернутых нанокристаллов CdSe в матрице фотонного кристалла / А. С. Селюков, М. И. Данилкин, С. П. Елисеев [и др.] // Квантовая электроника. – 2020. – Т. 50, № 3. – С. 252-255. – EDN YSLOWY.

15. Магнитооптический планарный волновод на основе трехпериодического фотонного кристалла / И. А. Глухов, Н. Н. Дадоевкова, Ю. С. Дадоевкова [и др.] // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники : Материалы 27-й Всероссийской молодежной научной конференции в рамках празднования 300-летия Российской академии наук,

Ульяновск, 22–24 октября 2024 года. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2024. – С. 311-313. – DOI 10.61527/APPFE-2024.311-313. – EDN ANIIMG.

16. Новиков, В. Б. Гибридный метод конечных разностей в частотной области для расчета дифракции излучения в планарных фотонных кристаллах / В. Б. Новиков, Т. В. Мурзина // IX Международная конференция по фотонике и информационной оптике : Сборник научных трудов, Москва, 29–31 января 2020 года. – Москва: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2020. – С. 169-170. – EDN JWUNFW.

17. Планарные (латеральные) светоизлучающие диоды с Ge(Si)-наноостровками, встроенными в фотонный кристалл / В. Б. Шмагин, А. В. Новиков, А. Н. Яблонский [и др.] // Письма в Журнал технической физики. – 2023. – Т. 49, № 22. – С. 12-15. – DOI 10.61011/PJTF.2023.22.56592.19713. – EDN MIBYVF.

18. Планарный p-i-n-светодиод с Ge(Si) наноостровками и фотонным кристаллом, встроенным в i-область светодиода / В. Б. Шмагин, А. В. Новиков, А. Н. Яблонский [и др.] // Нанопизика и наноэлектроника : Труды XXVIII Международного симпозиума, Нижний Новгород, 11–15 марта 2024 года. – Нижний Новгород, 2024. – С. 873-874. – EDN LYTZLZ.

19. Скрипаль, А. В. СВЧ-фильтр на основе микрополоскового фотонного кристалла на встречных шпильковых резонаторах / А. В. Скрипаль, Д. В. Пономарев, Д. В. Григорьев // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами : Сборник статей десятой Всероссийской научной школы-семинара, Саратов, 25 мая 2023 года / Под редакцией Ал.В. Скрипаля. – Саратов: Издательство "Саратовский источник", 2023. – С. 251-255. – EDN LDRVSV.

20. Амплитудно-частотные характеристики микрополоскового фотонного кристалла на встречных шпильковых резонаторах / А. В. Скрипаль, М. Л. Шихалов, Д. В. Пономарев, Д. В. Григорьев // Радиолокация, навигация,

связь : Сборник трудов XXX Международной научно-технической конференции. В 5-ти томах, Воронеж, 16–18 апреля 2024 года. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2024. – С. 90-95. – EDN VWCJVI.

21. Скрипаль, А. В. Микрополосковые СВЧ фотонные кристаллы с изменяемой проводимостью полоска / А. В. Скрипаль, Д. В. Пономарев, Н. П. Рыбкина // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами : Сборник статей одиннадцатой Всероссийской научной школы-семинара, Саратов, 22 мая 2024 года. – Саратов: "Саратовский источник", 2024. – С. 177-180. – EDN HOGJAG.

22. Полосовой СВЧ-фильтр на основе микрополоскового фотонного кристалла на встречных шпильковых резонаторах / А. В. Скрипаль, Д. В. Пономарев, М. Л. Шихалов, Д. В. Григорьев // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами : Сборник статей одиннадцатой Всероссийской научной школы-семинара, Саратов, 22 мая 2024 года. – Саратов: "Саратовский источник", 2024. – С. 181-184. – EDN FRVANК.

23. Скрипаль, А. В. Характеристики СВЧ-фильтра на основе микрополоскового фотонного кристалла со сложным нарушением периодичности / А. В. Скрипаль, Д. В. Пономарев, А. Н. Кузнецова // VII научный форум телекоммуникации: Теория и технологии ТТТ-2024 : Материалы XXI Международной научно-технической конференции, Самара, 06–08 ноября 2024 года. – Самара: Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2024. – С. 143-144. – EDN ZDJEYN.

24. Мухортов, В. М. Фотонный кристалл на основе периодически нанесенной на диэлектрическую подложку наноразмерной сегнетоэлектрической пленки / В. М. Мухортов, С. И. Масычев // Наука Юга России. – 2024. – Т. 20, № 2. – С. 20-26. – DOI 10.7868/S25000640240203. – EDN RJVLOF.

25. Скрипаль, А. В. Волноводный фотонный кристалл на основе волноводно-щелевой линии передачи / А. В. Скрипаль, Е. В. Латышева // VII научный форум телекоммуникации: Теория и технологии ТТТ-2024 : Материалы XXI Международной научно-технической конференции, Самара, 06–08 ноября 2024 года. – Самара: Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2024. – С. 139-140. – EDN PIUYMP.

26. Никитин Ал.А., Никитин Ан.А., Устинов А.Б., Lähderanta E., Калиникос Б.А. Сверхвысокочастотный фотонный кристалл на щелевой линии передачи с сегнетоэлектрической пленкой// Журнал технической физики, 2016, том 86, вып. 6, стр.115–120

27. СВЧ коаксиальные фотонные кристаллы / А. В. Скрипаль, Д. В. Пономарев, О. М. Рузанов [и др.] // IV Научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2020. "Физика и технические приложения волновых процессов ФиТПВП-2020" : Материалы XVIII Международной научно-технической конференции, Самара, 17–20 ноября 2020 года. – Самара: Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2020. – С. 178-179. – EDN ORDMHF.

28. Скрипаль, А. В. Характеристики СВЧ коаксиального фотонного кристалла с периодическим изменением диаметра Центрального проводника и диэлектрическим заполнением / А. В. Скрипаль, Д. В. Пономарев, И. О. Тимофеев // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами : Сборник статей девятой Всероссийской научной школы-семинара, Саратов, 24 мая 2022 года / Под редакцией Ал.В. Скрипаля. – Саратов: Издательство "Саратовский источник", 2022. – С. 213-218. – EDN FMEYET.

29. Скрипаль, А. В. Исследование микрокоаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором в виде штыревой металлической структуры и коаксиального фотонного кристалла / А. В. Скрипаль, А. П. Фролов, О. М. Рузанов // Взаимодействие

сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами : сборник статей седьмой Всероссийской научной школы-семинара, Саратов, 01–02 июня 2020 года / Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского. – Саратов: Издательство "Саратовский источник", 2020. – С. 153-157. – EDN ATNNKI.

30. Лоткова Е.Д. Фильтры на шпилечных резонаторах // Техника средств связи. Сер. Техника радиосвязи. – 1976. – вып. 1. – С. 159-170.

31. Newman N., Lyons W.G. High-Temperature Superconducting Microwave Device: Fundamental Issues in Materials, Physics, and Engineering // Journ. Of Supercond. – 1993. – V. 6. – No 3. – p. 119-160.

32. Беляев Б.А., Лексиков А.А., Трусков Ю.Н. и др. Миниатюризованные микро полосковые СВЧ фильтры // Препринт № 730Ф, ИФ СО РАН, Красноярск. – 1993. – 64 С.

