

На правах рукописи



Евтеев Сергей Геннадиевич

СВЧ ФОТОННЫЙ КРИСТАЛЛ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИ
УПРАВЛЯЕМЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ И ВОЗМОЖНОСТЬ
ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В БЛИЖНЕПОЛЕВОМ СКАНИРУЮЩЕМ
СВЧ-МИКРОСКОПЕ

01.04.03 – Радиофизика

05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компонен-
ты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Саратов – 2018

Работа выполнена на кафедре физики твердого тела федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

Научные руководители:

доктор физико-математических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ

Усанов Дмитрий Александрович

доктор физико-математических наук, профессор

Скрипаль Александр Владимирович

Официальные оппоненты:

Макеева Галина Степановна, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», г. Пенза, профессор кафедры «Радиотехника и радиоэлектронные системы»

Коломейцев Вячеслав Александрович, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, АО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон», г. Саратов, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж

Защита диссертации состоится « 25 » декабря 2018 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 на базе Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, III корпус СГУ, Большая физическая аудитория.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. В.А. Артисевич Саратовского государственного университета им. Н.Г.Чернышевского (Саратов, ул. Университетская, 42).

Автореферат разослан « 23 » октября 2018 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Аникин Валерий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

СВЧ периодические структуры, называемые СВЧ брэгговскими структурами или СВЧ фотонными кристаллами, привлекают интерес исследователей в связи с перспективой создания устройств с уникальными характеристиками в СВЧ диапазоне: измерительных устройств, согласованных нагрузок, различного типа фильтров и других [1, 2].

Для объяснения физики распространения электромагнитных волн используется описание, математически аналогичное для описания свойств кристаллов в квантовой теории твердого тела и твердотельной электронике. Таким образом, физика волноводных фотонных кристаллов представляет собой стык радиофизики и твердотельной электроники. Искомыми и исследуемыми характеристиками являются характеристики, принятые в радиофизике, а в качестве модельных представлений используются понятия, принятые в твердотельной электронике.

Для создания СВЧ фотонных кристаллов использовались прямоугольные и коаксиальные волноводы, микрополосковые, копланарные, щелевые и волноводно-щелевые линии. Периодические структуры на основе резонаторов в качестве замедляющих систем для вакуумных СВЧ-приборов и СВЧ-фильтров были описаны еще в 60-е годы прошлого века [3]. Они предназначались для использования в качестве замедляющих систем в этих приборах, обеспечивающих оптимальное взаимодействие электронного потока с электромагнитной волной.

Известно, что резонансные волноводные диафрагмы являются часто применяемыми элементами конструкции аттенуаторов и выключателей на $p-i-n$ -диодах. Малые геометрические размеры щели обеспечивают эффективное взаимодействие полупроводниковых элементов, имеющих малые габариты, с полем волновода, а использование резонансной диафрагмы в измерительных системах позволяет повысить локальность измерений, поэтому рассмотрение свойств фотонных кристаллов на волноводных резонансных диафрагмах является актуальным. Использование резонансной диафрагмы в качестве элемента фотонного кристалла может позволить установить новые специфические свойства такого рода систем и возможности их практического использования.

Наличие явно выраженных запрещенных зон на характеристиках СВЧ фотонных кристаллов позволяет использовать их в качестве полосовых фильтров заграждения, однако вне полосы заграждения, то есть в области разрешенных зон, коэффициент прохождения имеет «изрезанную», то есть частотно зависимую характеристику. Фотонные кристаллы с нарушением периодичности структуры позволяют реализовать узкополосные фильтры пропускания, однако при реализации узкополосных фильтров заграждения на основе фотонных кристаллов с малой шириной запрещенной зоны коэффициент ослабления в полосе заграждения незначителен.

Важным свойством фотонного кристалла является высокий коэффициент отражения электромагнитной волны от фотонного кристалла в диапазоне частот, соответствующем запрещенной зоне, то есть фотонный кристалл обладает свойствами зеркала для электромагнитного излучения СВЧ-диапазона. Именно отражательные свойства фотонного кристалла и могут быть использованы для реали-

зации системы на основе фотонного кристалла, обладающей разрешенной зоной с частотно-независимым коэффициентом прохождения близким к единице.

Фотонный кристалл с нарушением периодичности становится зеркалом, неотражающим электромагнитное излучения на отдельной частоте, соответствующей частоте дефектной моды [4]. Использование отражательных свойств такого фотонного кристалла позволяет вырезать из широкополосного спектра отражения узкие области частот, в которых отсутствует электромагнитное излучение, что позволяет создавать узкополосные фильтры заграждения, характеризующиеся значительным подавлением сигнала в полосе заграждения и обладающие вне полосы заграждения частотно-независимым коэффициентом прохождения близким к единице.

Поскольку отличительной особенностью фотонных кристаллов СВЧ-диапазона является высокая технологичность их производства, то реализация системы на основе фотонных кристаллов с примесной модой затухания колебаний в разрешенной зоне фотонного кристалла, обеспечивающей создание как широкополосных, так и узкополосных фильтров заграждения с электрически управляемыми в широком диапазоне значений амплитудно-частотными характеристиками, представляет несомненный научный и практический интерес.

Одним из важнейших этапов в технологии производства современных устройств микро- и нанoeлектроники является контроль электрофизических параметров входящих в их состав полупроводниковых и металлodieлектрических структур.

Среди методов, обеспечивающих контроль электрофизических параметров структур, в состав которых входят полупроводниковые и нанометровые металлические слои, можно выделить СВЧ-методы. При этом в качестве современных электродинамических систем, обеспечивающих реализацию СВЧ-методов измерения параметров материалов и структур, могут быть использованы одномерные СВЧ фотонные кристаллы.

Однако, обладая высокой чувствительностью к измеряемым параметрам материалов и структур, СВЧ-методы, основанные на использовании измеряемых структур в качестве элементов, вносящих нарушение в периодичность фотонного кристалла, как правило, позволяют получить результат измерений, усредненный по размеру, сравнимому с длиной волны излучения.

Одним из современных методов контроля параметров материалов и структур твердотельной микро- и нанoeлектроники является метод ближнеполевой СВЧ-микроскопии [5, 6], обеспечивающий достижение высокой локальности измерений. Важнейшим элементом ближнеполевого СВЧ-микроскопа является зонд с размером апертуры, намного меньшим длины волны СВЧ-излучения. Необходимым элементом ближнеполевого СВЧ-микроскопа, обеспечивающим повышение его чувствительности, является СВЧ-резонатор, связанный с зондом. С увеличением чувствительности резонатора повышается чувствительность и разрешающая способность СВЧ-микроскопа в целом.

В качестве зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа может быть использована резонансная диафрагма, обеспечивающая повышение локальности волноводных методов измерений параметров материалов и структур. Для повышения чувствительности ближнеполевого СВЧ-микроскопа с зондом в виде резонанс-

ной диафрагмы можно использовать фотонный кристалл с нарушением периодичности, однако ни теоретического рассмотрения этой возможности, ни ее экспериментальной реализации ранее проведено не было.

Цель диссертационной работы:

Создание нового типа СВЧ фотонного кристалла на основе резонансных диафрагм с электрически управляемыми характеристиками с помощью $n-i-p-i-n$ -структур и его использование для совершенствования параметров ближнеполевого СВЧ-микроскопа.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

Компьютерное моделирование и экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа в виде резонансной диафрагмы с резонатором на основе волноводного фотонного кристалла с диэлектрическим заполнением с нарушением периодичности.

Теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение возможности использования предложенного зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа в виде резонансной диафрагмы с резонатором на основе волноводного фотонного кристалла с диэлектрическим заполнением с нарушением периодичности для достижения чувствительности ближнеполевого СВЧ-микроскопа при измерениях диэлектрической проницаемости материалов, превышающей 100 дБ на единицу диэлектрической проницаемости.

Компьютерное моделирование и экспериментальное исследование частотных зависимостей коэффициентов пропускания и отражения СВЧ фотонных кристаллов без нарушения периодичности на основе резонансных диафрагм на диэлектрических подложках.

Теоретическое и экспериментальное исследование влияния нарушения периодичности на амплитудно-частотные характеристики фотонного кристалла на резонансных диафрагмах на диэлектрических подложках.

Расчет электрически управляемых амплитудно-частотных характеристик СВЧ фотонных кристаллов на основе резонансных диафрагм с нарушением периодичности в виде $n-i-p-i-n$ -диодной матрицы, выполняющей роль проводящего слоя.

Теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение существования примесных мод колебаний на двух частотах в запрещенной зоне фотонного кристалла при изменении тока в $n-i-p-i-n$ -диодной матрице, выполняющей роль нарушения в виде проводящего слоя в фотонном кристалле на резонансных диафрагмах.

Исследование амплитудно-частотных характеристик фотонного кристалла на резонансных диафрагмах, в котором размер центральной диафрагмы, выполняющей роль нарушения, электрически управляется с помощью $n-i-p-i-n$ -диодной структуры.

Исследование возможности использования отражательных свойств фотонных кристаллов с диэлектрическим заполнением и на основе резонансных диафрагм в схеме с Y -циркулятором для реализации системы, обладающей разрешенной зоной с частотно-независимой передаточной характеристикой при коэффициенте прохождения близком к единице.

Исследование возможности использования отражательных свойств фотонных кристаллов с резонансными диафрагмами в схеме с Y -циркулятором для создания фильтров заграждения с управляемыми $n-i-p-i-n$ -диодами характеристиками, обладающих высоким уровнем запирания в полосе заграждения и низкими потерями вне её.

Новизна исследований, проведенных в ходе диссертационной работы, состоит в следующем:

Теоретически обоснована и экспериментально показана возможность использования предложенного зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа в виде резонансной диафрагмы с резонатором на основе волноводного фотонного кристалла с диэлектрическим заполнением с нарушением периодичности для достижения чувствительности ближнеполевого СВЧ-микроскопа при измерениях диэлектрической проницаемости материалов, превышающей 100 дБ на единицу диэлектрической проницаемости.

Обосновано теоретически и подтверждено экспериментально чередование «разрешенных» и «запрещенных» зон на амплитудно-частотных характеристиках структуры, представляющей собой периодически расположенные в волноводе металлические резонансные диафрагмы на диэлектрических подложках. В этом случае в частотной области, соответствующей запрещенной зоне, наблюдаются ярко выраженные пики пропускания, количество которых на единицу меньше числа диафрагм, образующих фотонный кристалл.

Установлено, что при увеличении ширины щели резонансной диафрагмы при фиксированной диэлектрической проницаемости подложки и увеличении диэлектрической проницаемости подложки при фиксированной ширине щели, увеличивается ширина и глубина запрещенной зоны фотонного кристалла на основе резонансных диафрагм. В этом случае, низкочастотная граница запрещенной зоны остается практически неизменной, а увеличение ширины запрещенной зоны происходит за счет смещения её высокочастотной границы в сторону высоких частот.

Показано, что введение нарушения в фотонном кристалле в виде уменьшенного расстояния между центральными диафрагмами приводит к возникновению в запрещенных зонах пиков пропускания.

Обосновано теоретически и подтверждено экспериментально существование примесных мод колебаний на двух частотах в запрещенной зоне фотонного кристалла при изменении тока в $n-i-p-i-n$ -диодной матрице, выполняющей роль нарушения в виде проводящего слоя в фотонном кристалле на резонансных диафрагмах.

Показана возможность создания электрически управляемого модулятора и переключателя СВЧ-сигнала, работающего как в прямом, так и в инверсном режимах, с динамическим диапазоном более 40 дБ на основе фотонного кристалла на резонансных диафрагмах при изменении тока в $n-i-p-i-n$ -диодной матрице, выполняющей роль нарушения.

Предложен, теоретически и экспериментально исследован фотонный кристалл на резонансных диафрагмах, в котором размер центральной диафрагмы, выполняющей роль нарушения, электрически управляется с помощью $n-i-p-i-n$ -диодной структуры.

Показана возможность использования отражательных свойств фотонных кристаллов с диэлектрическим заполнением и на основе резонансных диафрагм в схеме с Y -циркулятором для реализации системы, обладающей разрешенной зоной с частотно-независимой передаточной характеристикой при коэффициенте прохождения близком к единице.

Показана возможность использования отражательных свойств фотонных кристаллов с диэлектрическим заполнением и резонансными диафрагмами в схеме с Y -циркулятором для создания фильтров заграждения с управляемыми $n-i-p-i-n$ -диодами характеристиками, обладающих уровнем запираения в полосе заграждения более 43 дБ и потерями вне полосы менее 0.8 дБ.

Новизна проведенных исследований подтверждается также полученным патентом РФ на изобретение №2 658 113 С1 «СВЧ фотонный кристалл».

Достоверность результатов диссертации обеспечивается обоснованностью выбранного метода теоретического описания исследованного фотонного кристалла, использованием современной измерительной аппаратуры и апробированных методов измерений при выполнении экспериментальных исследований, обработкой экспериментальных данных с использованием стандартных методов, качественным и количественным соответствием выводов теории основным результатам, полученным экспериментально.

Практическая значимость полученных результатов заключается в следующем:

Предложено использование зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа в виде резонансной диафрагмы с резонатором на основе волноводного фотонного кристалла с диэлектрическим заполнением с нарушением периодичности для достижения чувствительности ближнеполевого СВЧ-микроскопа при измерениях диэлектрической проницаемости материалов, превышающей 100 дБ на единицу диэлектрической проницаемости.

Показано, что изменением апертуры зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа в виде резонансной диафрагмы с резонатором на основе волноводного фотонного кристалла с нарушением периодичности обеспечивается выбор диапазон значений диэлектрической проницаемости с максимальной чувствительностью коэффициента отражения к изменению диэлектрической проницаемости исследуемого образца.

Предложен и экспериментально реализован СВЧ фотонный кристалл, выполненный в виде периодически расположенных в волноводе металлических резонансных диафрагм на диэлектрических подложках и характеризующийся наличием разрешенных и запрещенных зон на АЧХ фотонного кристалла, размеры которых определяются расстоянием между диафрагмами и их числом, размерами щелей и величиной диэлектрической проницаемости диэлектрической подложки.

Реализован электрически управляемый модулятор и переключатель СВЧ-сигнала на основе фотонного кристалла на резонансных диафрагмах, в котором размер центральной диафрагмы, выполняющей роль нарушения, электрически управляется с помощью $n-i-p-i-n$ -диодной структуры.

Реализована система, обладающая разрешенной зоной с частотно-независимой передаточной характеристикой при коэффициенте прохождения

близком к единице, использующая отражательные свойства фотонных кристаллов с диэлектрическим заполнением и на основе резонансных диафрагм в схеме с Y -циркулятором.

Предложены фильтры загораждения с управляемыми $n-i-p-i-n$ -диодами характеристиками на основе фотонных кристаллов с диэлектрическим заполнением и резонансными диафрагмами с плоской разрешенной зоной, формируемой в схеме на отражение с Y -циркулятором, обладающие уровнем запираения в полосе загораждения более 43.0 дБ и потерями вне полосы менее 0.8 дБ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Использование предложенного зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа в виде резонансной диафрагмы с резонатором на основе волноводного фотонного кристалла с диэлектрическим заполнением с нарушением периодичности позволяет достигнуть чувствительности ближнеполевого СВЧ-микроскопа при измерениях диэлектрической проницаемости материалов, превышающей 100 дБ на единицу диэлектрической проницаемости и открывает возможность реализации измерений в режиме модуляции генерируемого сигнала.

2. Изменением апертуры зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа в виде резонансной диафрагмы с резонатором на основе волноводного фотонного кристалла с нарушением периодичности обеспечивается выбор диапазона значений диэлектрической проницаемости с максимальной чувствительностью коэффициента отражения к изменению диэлектрической проницаемости исследуемого образца.

3. Увеличение ширины щели резонансной диафрагмы при фиксированной диэлектрической проницаемости подложки и увеличении диэлектрической проницаемости подложки при фиксированной ширины щели, приводит к увеличению ширины и глубины запрещенной зоны фотонного кристалла на основе резонансных диафрагм, причем низкочастотная граница запрещенной зоны остается практически неизменной, а увеличение ширины запрещенной зоны происходит за счет смещения её высокочастотной границы в сторону высоких частот.

4. При размещении $n-i-p-i-n$ -диодной матрицы в фотонном кристалле на резонансных диафрагмах, выполняющей роль нарушения в виде проводящего слоя, в запрещенной зоне фотонного кристалла наблюдаются примесные моды колебаний на двух частотах, причем при изменении тока в $n-i-p-i-n$ -диодной матрице в диапазоне от 0.5 мкА до 200 мА на частоте примесной моды, с меньшим значением частоты, наблюдается рост коэффициента отражения от -25 дБ до -0.6 дБ, то есть исчезновение примесной моды колебаний, а на частоте примесной моды, с большим значением частоты, при изменении тока от 0.0 до 8.15 мА наблюдается уменьшение коэффициента отражения от -0.1 до -48 дБ, то есть возникновение примесной моды колебаний.

5. При использовании в качестве нарушения в фотонном кристалле центральной диафрагмы, размер которой электрически управляется с помощью $n-i-p-i-n$ -диодной структуры, расположенной около одной из узких сторон прямоугольного отверстия центральной диафрагмы, при увеличении протекающего тока реализуется прямой режим переключения коэффициента отражения на частоте примесной моды в запрещенной зоне фотонного кристалла.

6. Использование отражательных свойств фотонных кристаллов с диэлектрическим заполнением и на основе резонансных диафрагм в схеме с Y -циркулятором позволяет реализовать систему, обладающую разрешенной зоной с частотно-независимой передаточной характеристикой при коэффициенте прохождения близком к единице.

7. Использование отражательных свойств фотонных кристаллов с резонансными диафрагмами в схеме с Y -циркулятором позволяет создать фильтры загораждения с управляемыми $n-i-p-i-n$ -диодами характеристиками, обладающими уровнем запираения в полосе загораждения более 43 дБ и потерями вне полосы менее 0.8 дБ.

Апробация работы:

Основные результаты диссертационной работы доложены на:

- XIV, XV и XVI Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов». 22-24 ноября 2016 г. Самара 2016., 20 – 24 ноября 2017 г. Казань, 10-14 сентября 2018 г. г. Миасс.
- IV и V Всероссийской научной школе-семинаре «Взаимодействие сверхвысоко-частотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами»: Саратов, 18–19 мая 2017 г., Саратов, 16–17 мая 2018 г.
- 27-ой и 28-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2017). Севастополь, 10—16 сентября 2017 г., (КрыМиКо'2018). Севастополь, 9–15 сентября 2018 г.

Исследования выполнялись в рамках государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности (базовая часть) 8.7628.2017/БЧ, код проекта 7628 по теме «Разработка новых типов функциональных устройств СВЧ, КВЧ и терагерцового диапазонов и методов диагностики с использованием ближнеполевой СВЧ-микроскопии на основе фотонных кристаллов», проектной части государственного задания в сфере научной деятельности Министерства образования и науки Российской Федерации по теме «Исследование эффектов резонансного взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысоко-частотного и терагерцового диапазонов с неоднородными микро- и наноструктурами и композитами» №16.1575.2014/К, шифр: «Наноскоп-2»; государственного задания Министерства образования и науки РФ НИР «Разработка на основе фотонных кристаллов СВЧ-методов контроля высокого разрешения параметров наноструктур и нанокомпозитов» на 2012–2014 годы, шифр «Наноконкомплекс».

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, 1 статья в научных изданиях, входящих в международные наукометрические базы (Scopus, Web of Science), получен 1 патент РФ на изобретение.

Личный вклад автора выразился в проведении всего объема экспериментальных работ, в создании теоретических моделей, описывающих результаты экспериментов, проведении компьютерного моделирования и анализе полученных результатов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка литературы. Работа изложена на 129 страницах, содержит 79 рисунков и список литературы из 153 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулирована цель работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, описана структура и объем работы.

В первом разделе проведен критический анализ современного состояния исследований СВЧ-фотонных кристаллов.

Во втором разделе теоретически обоснована и экспериментально описана возможность использования предложенного зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа в виде резонансной диафрагмы с резонатором на основе волноводной брэгговской структуры с диэлектрическим заполнением с нарушением периодичности для достижения чувствительности ближнеполевого СВЧ-микроскопа при измерениях диэлектрической проницаемости материалов, превышающей 100 дБ на единицу диэлектрической проницаемости.

Компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа в виде резонансной диафрагмы с резонатором на основе волноводного фотонного кристалла с нарушением периодичности выполнялся с применением программного обеспечения для трехмерного моделирования электромагнитных полей методом конечных элементов ANSYS HFSS.

Исследовался волноводный фотонный кристалл, состоящий из одиннадцати слоев, в диапазоне частот 8–12 ГГц. Нечетные слои были выполнены из керамики (Al_2O_3 , $\epsilon=9,6$), четные – из фторопласта ($\epsilon=2,0$). Толщина нечетных слоев $d_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 1$ мм, четных $d_{\text{tef}} = 7$ мм. Слои полностью заполняли поперечное сечение волновода. Размеры слоев были подобраны таким образом, чтобы запрещенная зона фотонного кристалла находилась в исследуемом диапазоне частот (8–12 ГГц). Нарушение периодичности фотонной структуры создавалось изменением толщины $d_{6\text{tef}}$ центрального (шестого) слоя фторопласта, его толщина составляла 4.12 мм и 6.12 мм.

В исследуемой модели зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором на основе волноводного фотонного кристалла с нарушением периодичности резонансная диафрагма располагалась на фиксированном расстоянии l перед волноводным фотонным кристаллом.

Как следует из результатов расчета, представленных на рис. 1, изменение расстояния между резонансной диафрагмой и волноводным фотонным кристаллом не приводит к изменению положения дефектной моды волноводного фотонного кристалла, а изменяет её добротность. При этом изменение толщины центрального нарушенного слоя приводит как к изменению частоты, так и добротности резонанса зонда, выполненного в виде резонансной диафрагмы, с резонатором на основе волноводного фотонного кристалла.

Результаты экспериментальных исследований АЧХ зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа в виде резонансной диафрагмы с резонатором на основе волноводного фотонного кристалла с нарушением периодичности, выполненные с помощью векторного анализатора цепей Agilent Microwave Network Analyzer N5242A PNA-X в диапазоне частот 8...12 ГГц, подтвердили выводы, сделанные из расчетных данных.

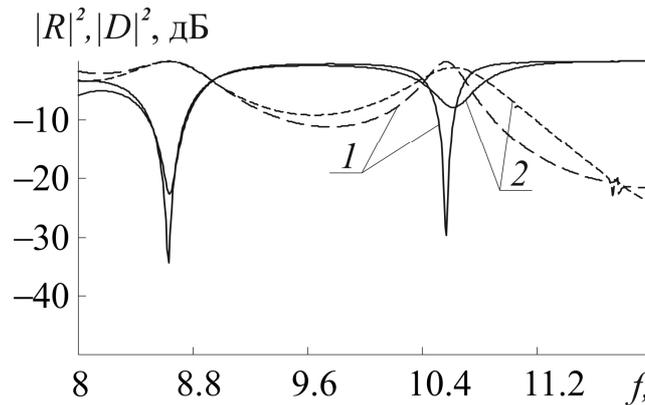


Рис.1 АЧХ коэффициента отражения (сплошные кривые) и прохождения (штриховые кривые) фотонного кристалла с нарушением $L=4.12$ мм для двух значений расстояний между резонансной диафрагмой и волноводным фотонным кристаллом l , мм: 1–2.0, 2–5.0

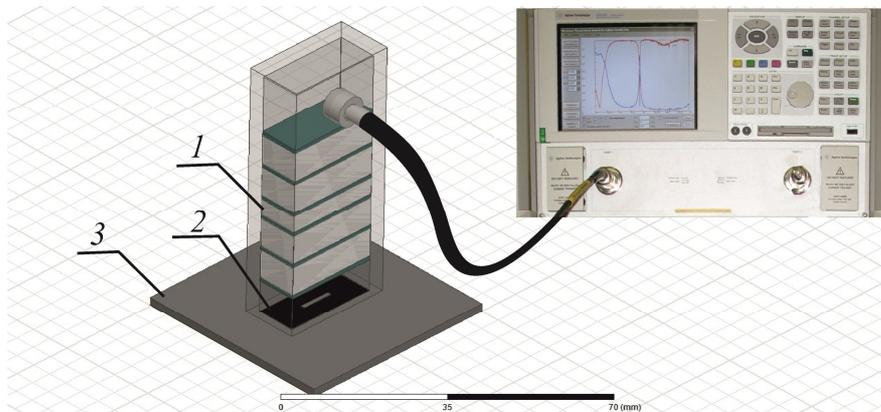


Рис. 2. Зонд в виде резонансной диафрагмы с резонатором на основе волноводного фотонного кристалла с нарушением периодичности с измеряемым образцом. 1 – фотонный кристалл, 2 – резонансная диафрагма, 3 – измеряемый образец

Была исследована возможность использования исследуемого зонда в виде резонансной диафрагмы с резонатором на основе волноводного фотонного кристалла с нарушением периодичности для измерения параметров диэлектрических слоев. На рис. 2 представлена модель зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа в виде резонансной диафрагмы с резонатором на основе волноводного фотонного кристалла с нарушением периодичности с измеряемым образцом.

Результаты компьютерного моделирования АЧХ зонда в виде резонансной диафрагмы с резонатором на основе волноводного фотонного кристалла с нарушением периодичности с измеряемыми образцами с различной диэлектрической проницаемостью представлены на рис. 3. Изменение относительной диэлектрической проницаемости образцов от 1.9 до 1,95 приводит к частотному сдвигу резонансной кривой на $-2,0$ МГц (минимум кривой смещается от 10.845 МГц до 10.843 МГц), при этом величина коэффициента отражения в минимуме резонансной кривой изменяется в диапазоне значений от $-24,141$ дБ до $-41,755$ дБ.

Как следует из представленных результатов (см. рис. 4), при выборе частоты измерений, соответствующей минимуму коэффициента отражения при диэлектрической проницаемости исследуемого образца $\epsilon=1.95$, диапазон изменений коэффициента отражения максимален и составляет от $-41,755$ дБ до -2.05

дБ при изменении величины диэлектрической проницаемости от $\varepsilon=1.95$ до $\varepsilon=3.5$. Чувствительность $\partial|R|^2/\partial\varepsilon$ монотонно убывает с ростом величины ε в диапазоне значений от 1.95 до 3,5. При этом в диапазоне значений $\varepsilon=1.8-2.0$ расчетная величина $\partial|R|^2/\partial\varepsilon$ превышает 100 дБ/ε.

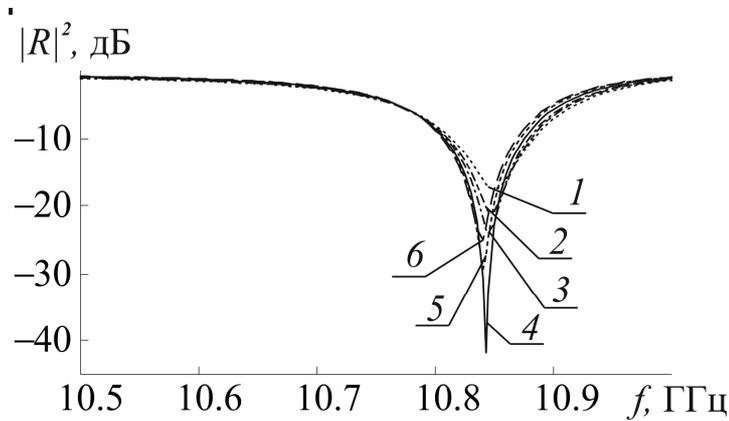


Рис. 3 АЧХ зонда в виде резонансной диафрагмы с резонатором на основе волноводного фотонного кристалла с нарушением периодичности с измеряемыми образцами с различной диэлектрической проницаемостью ε , отн.ед.: 1–1.8, 2–1.85, 3–1.9, 4–1.95, 5–2.0, 6–2.05. $a_1=17$ мм

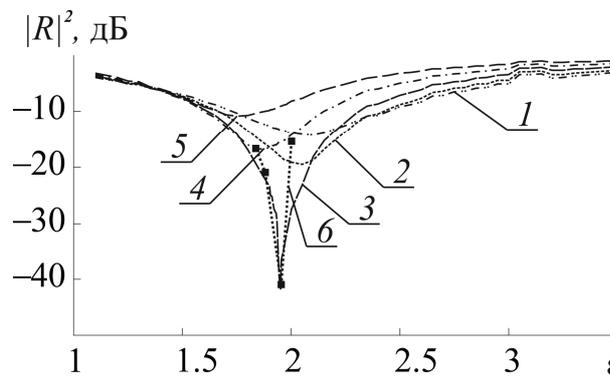


Рис. 4 Расчетные зависимости коэффициента отражения СВЧ-волны, измеренные на различных фиксированных частотах в окрестности минимума коэффициента отражения, от величины диэлектрической проницаемости исследуемых образцов, f , ГГц: 1– 10.82, 2 – 10.83, 3 – 10.843, 4 – 10.86, 5 – 10.88, 6–10.843 (эксперимент)

Была исследована возможность использования зонда в виде резонансной диафрагмы уменьшенной ширины с резонатором на основе волноводного фотонного кристалла с нарушением периодичности для измерения параметров диэлектрических слоев. Ширина диафрагмы исследуемого зонда a_1 составляла 6.8 мм. Как следует из результатов расчета при выборе частоты измерений, соответствующей минимуму коэффициента отражения при диэлектрической проницаемости исследуемого образца $\varepsilon=7.00$, диапазон изменений коэффициента отражения максимален и составляет от $-48,438$ дБ до -1.8366 дБ при изменении величины диэлектрической проницаемости от $\varepsilon=7.0$ до $\varepsilon=10.0$. Чувствительность $\partial|R|^2/\partial\varepsilon$ монотонно убывает с ростом величины ε в диапазоне значений от 7.0 до

10.0. При этом в диапазоне значений $\varepsilon=6.75-7.25$ расчетная величина $\partial|R|^2/\partial\varepsilon$ превышает 100 дБ/ ε .

Для проведения измерений диэлектрической проницаемости образцов был использован зонд в виде резонансной диафрагмы с резонатором на основе волноводного фотонного кристалла с нарушением периодичности, изготовленный в соответствии описанной выше моделью (см. рис. 2).

В качестве образцов с различной диэлектрической проницаемостью в диапазоне значений $\varepsilon=1.8-2.0$ были использованы пластины из фторопласта размерами 23x10x2 мм. Для изготовления образцов с изменяющейся диэлектрической проницаемостью во фторопластовых пластинах были созданы отверстия диаметром 1 мм.

Величина эффективной диэлектрической проницаемости ε_{ef} фторопластовых образцов с воздушными включениями (отверстиями) рассчитывалась с использованием ряда известных моделей «эффективной» среды, описываемых соотношениями:

$$\text{Максвелла-Гарнетта} \quad \frac{\varepsilon_{ef} - \varepsilon_2}{\varepsilon_{ef} + 2\varepsilon_2} = x_1 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2},$$

$$\text{Бруггемана} \quad x_1 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{ef}}{2\varepsilon_{ef} + \varepsilon_1} + x_2 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_{ef}}{2\varepsilon_{ef} + \varepsilon_2} = 0,$$

$$\text{Брауна} \quad \varepsilon_{ef} = x_1\varepsilon_1 + x_2\varepsilon_2,$$

где x_1, x_2 – объемные доли матрицы и включений с относительными диэлектрическими проницаемостями $\varepsilon_1, \varepsilon_2$, соответственно.

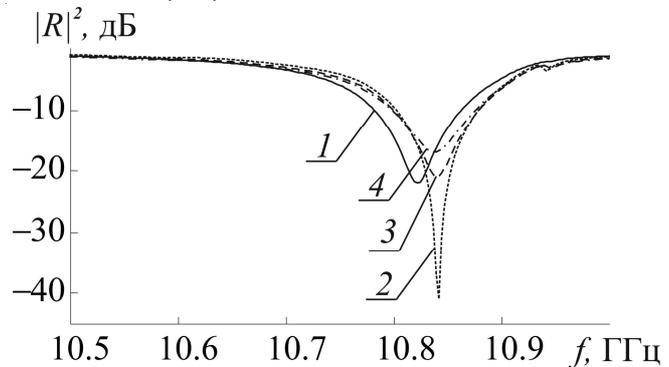


Рис. 5 Экспериментальные АЧХ зонда в виде резонансной диафрагмы с резонатором на основе волноводного фотонного кристалла с нарушением периодичности с измеряемыми образцами с различной эффективной диэлектрической проницаемостью ε , отн.ед.: 1–2.0, 2–1.956, 3–1.881, 4–1.837.

Были изготовлены образцы, которые характеризовались следующими значениями эффективной диэлектрической проницаемости: образец 1– $\varepsilon=2.00$, образец 2– $\varepsilon=1.956$, образец 3– $\varepsilon=1.881$, образец 4– $\varepsilon=1.837$.

Как следует из результатов измерений АЧХ, представленных на рис. 5, изменение эффективной диэлектрической проницаемости образцов от 2.0 до 1,956 приводит к частотному сдвигу резонансной кривой на 20,0 МГц (минимум кривой смещается от 10.823 МГц до 10.843 МГц), при этом величина коэффициента отражения в минимуме резонансной кривой изменяется от –21,972 дБ до –40,954 дБ.

Экспериментально измеренная зависимость коэффициента отражения СВЧ-волны для частоты $f=10.843$ ГГц, соответствующей минимуму коэффициента отражения кривой 4 на рис. 3, от величины диэлектрической проницаемости исследуемых образцов, представлена на рис. 4 (кривая б).

Как следует из представленных результатов, при выборе частоты измерений, соответствующей минимуму коэффициента отражения при диэлектрической проницаемости исследуемого образца $\epsilon=1.956$, диапазон изменений коэффициента отражения максимален и составляет от $-40,954$ дБ до -1.7 дБ при изменении величины диэлектрической проницаемости от $\epsilon=1.956$ до $\epsilon=4.5$. При этом в диапазоне значений $\epsilon=2.0-1.837$ величина $\partial|R|^2/\partial\epsilon$ превышает 100 дБ/ ϵ .

В третьем разделе теоретически и экспериментально исследованы АЧХ характеристики структуры, представляющей собой периодически расположенные в волноводе металлические резонансные диафрагмы на диэлектрических подложках. Описано возникновение в таких фотонных кристаллах на резонансных диафрагмах чередующихся «разрешенных» и «запрещенных» зон на его АЧХ.

На основе численного моделирования с использованием метода конечных элементов в программе ANSYS HFSS исследовались АЧХ одномерных волноводных СВЧ фотонных кристаллов, созданных на основе периодически расположенных металлических резонансных диафрагм, нанесенных на диэлектрические подложки и расположенных на расстоянии l друг от друга вдоль оси прямоугольного волновода (см. рис. 6).

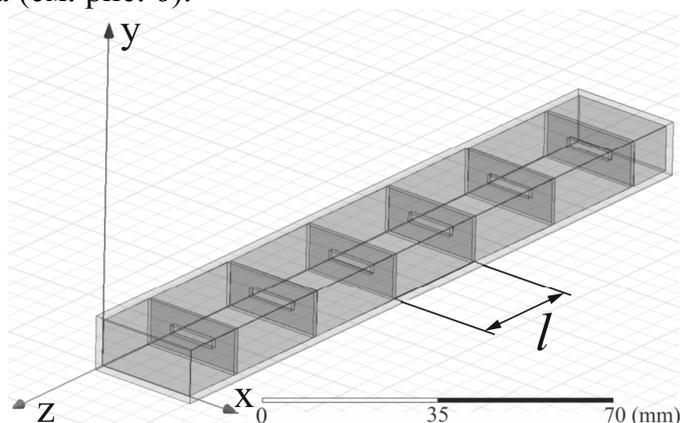


Рис. 6. Схема СВЧ фотонного кристалла, где l – расстояние между диафрагмами

АЧХ такого фотонного кристалла состоят из характерных чередующихся «разрешенных» и «запрещенных» зон. Проанализированы АЧХ фотонного кристалла, составленного из металлических диафрагм, нанесенных на диэлектрическую подложку со сквозной щелью, при различной ширине щели a и АЧХ фотонного кристалла из диафрагм на диэлектрических подложках со щелями, заполненными материалом с диэлектрической проницаемостью ϵ_2 . Как следует из результатов расчета увеличение ширины щели a_1 , при фиксированной диэлектрической проницаемости подложки (рис. 7, а), приводит к увеличению ширины и глубины запрещенной зоны. Причем, низкочастотный край запрещенной зоны ~ 9 ГГц остается практически неподвижным, а расширение запрещенной зоны происходит за счет смещения высокочастотного края запрещенной зоны в высо-

кочастотную область. Такая же тенденция наблюдается, при увеличении диэлектрической проницаемости диэлектрика, заполняющего щель диафрагмы (рис. 7, б).

Экспериментально исследовались фотонные кристаллы, созданные из периодически расположенных металлических резонансных диафрагм на расстоянии l друг от друга, нанесенных на диэлектрические подложки и без подложек с параметрами, выбранными в соответствии с моделью, используемой для расчета АЧХ фотонного кристалла на резонансных диафрагмах.

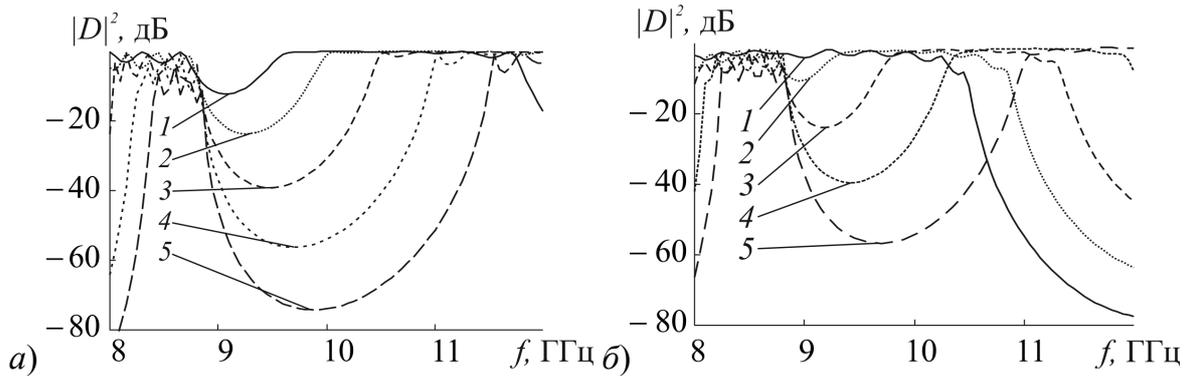


Рис. 7. Частотные зависимости $|D|^2$ для фотонного кристалла из диафрагм на подложках с $\epsilon_1=4.15$, высотой щели $b_1 = 2$ мм, толщиной диэлектрика $d = 1$ мм: а) сквозная щель различной ширины a_1 , мм: 1 – 10; 2 – 11; 3 – 12; 4 – 13; 5 – 14. б) щель шириной $a_1 = 10$ мм, заполненной диэлектриком с различной величиной диэлектрической проницаемости ϵ_2 : 1 – $\epsilon_2 = 1$; 2 – $\epsilon_2 = 2$; 3 – $\epsilon_2 = 3$; 4 – $\epsilon_2 = 4$; 5 – $\epsilon_2 = 5$

Экспериментальное исследование АЧХ исследуемых фотонных кристаллов проводилось с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA_L Network Analyzer N5230A в диапазоне частот 8–12 ГГц.

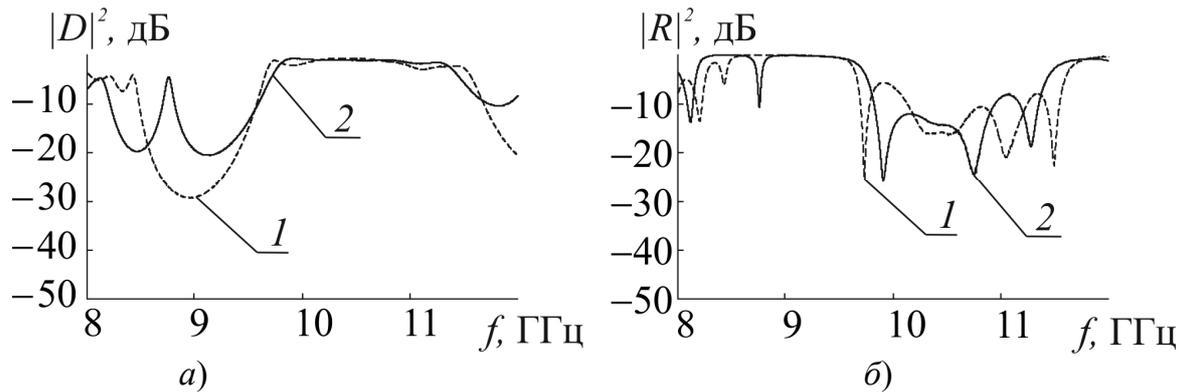


Рис. 8. Экспериментальные АЧХ коэффициента прохождения (а) и отражения (б) фотонного кристалла на основе диафрагм без диэлектрических подложек без нарушения (кривая 1) и с нарушением периодичности (кривая 2). Расстояние между диафрагмами $l = 27$ мм, длина щелей $a_1 = 14$ мм, размер нарушения в центральном слое $L=20$ мм

Фотонный кристалл на основе диафрагм без диэлектрических подложек состоял из шести алюминиевых диафрагм толщиной 10 мкм, зафиксированных двумя слоями пенопласта толщиной 2 мм, размещенных в прямоугольном волноводе. Ширина и высота щелей диафрагм фотонного кристалла выбирались

равными 14 мм и 1 мм, соответственно, это обеспечивало возникновение в диапазоне частот 8–12 ГГц одной разрешенной и одной запрещенной зон на частотных зависимостях коэффициентов прохождения $|D|^2$ и отражения $|R|^2$ (штриховые кривые на рис. 8, а и рис. 8, б, соответственно). На этих же рисунках представлены результаты измерений АЧХ фотонного кристалла с нарушением периодичности (сплошные кривые) в виде измененного расстояния L между центральными диафрагмами.

Сравнение экспериментальных зависимостей с результатами расчета свидетельствует об их хорошем качественном и количественном соответствии.

Показано экспериментально и теоретически, что, как и в случае фотонного кристалла на резонансных диафрагмах без диэлектрических подложек, создание нарушения в фотонном кристалле из резонансных диафрагм, нанесенных на сплошные диэлектрические подложки и диэлектрические подложки со сквозными щелями, в виде уменьшенного расстояния между центральными диафрагмами приводит к возникновению пиков пропускания в каждой из двух наблюдаемых запрещенных зон и увеличению ширины этих зон.

Следует отметить, особенность АЧХ фотонных кристаллов на основе резонансных диафрагм в области разрешенных зон, а именно: АЧХ фотонных кристаллов на основе диафрагм без диэлектрической подложки и с диэлектрической подложкой со сквозной щелью обладают более плоской, то есть слабо частотнозависимой, характеристикой в отличие от АЧХ фотонных кристаллов на основе диафрагм со сплошной диэлектрической подложкой, характеризующейся наличием ярко выраженных пиков пропускания.

В четвертом разделе представлены результаты исследований волноводных фотонных кристаллов на резонансных диафрагмах с управляемыми $n-i-p-i-n$ -диодами характеристиками. Исследуемый фотонный кристалл представлял собой структуру, состоящую из периодически расположенных прямоугольных металлических резонансных диафрагм на расстоянии $L=20$ мм друг от друга в прямоугольном волноводе трехсантиметрового диапазона. Ширина и высота щелей диафрагм фотонного кристалла выбирались равными 20 и 2 мм, соответственно. Расчет АЧХ исследуемого фотонного кристалла проводился на основе численного моделирования с использованием метода конечных элементов в ANSYS HFSS.

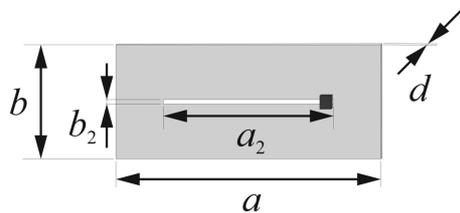


Рис. 9. Центральная диафрагма с $n-i-p-i-n$ -структурой

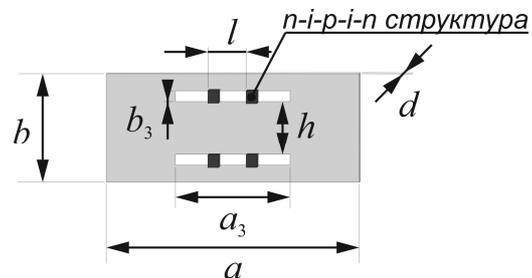


Рис. 10. $n-i-p-i-n$ -диодная матрица

Для создания фотонного кристалла на резонансных диафрагмах с электрически управляемым размером щели диафрагмы, выполняющей роль нарушения, может быть использована конструкция, в которой вблизи одного из краев цен-

тральной диафрагмы со щелью уменьшенной ширины ($b_2=1$ мм) расположена $n-i-p-i-n$ -структура (см. рис. 9).

При протекании прямого тока через $n-i-p-i-n$ -диодную структуру происходит обогащение i -слоя свободными носителями и $n-i-p-i-n$ -диодная структура при больших прямых токах выполняет роль проводящего включения, уменьшающего ширину щели диафрагмы и смещающего положение примесной моды колебаний фотонной структуры из девяти резонансных диафрагм на величину, равную 0.5 ГГц, в сторону высокочастотного края запрещенной зоны при изменении удельной электропроводности $n-i-p-i-n$ -диодной структуры в диапазоне от 0 до 10^7 См/м. При этом на частоте примесной моды колебаний 10.40 ГГц наблюдается уменьшение коэффициента прохождения от -1.0 дБ при $\sigma=0$ См/м до -33.0 дБ при $\sigma=5 \cdot 10^7$ См/м.

Удельная электропроводность σ определялась как средняя величина удельной электропроводности полупроводниковой структуры и вычислялась с учетом координатной зависимости распределения неравновесных носителей заряда в i -области с помощью выражения:

$$\sigma = \frac{1}{l_i} \int_0^{l_i} \sigma(x) dx = q \left(\mu_n n_0 + \mu_p p_0 + \mu_p \frac{b+1}{l_i} \int_0^{l_i} p(x) dx \right).$$

Для увеличения эффекта перестройки резонансной особенности в запрещенной зоне была предложена структура фотонного кристалла, включающая центральную диафрагму с двумя $n-i-p-i-n$ -диодами, расположенными на противоположных краях этой диафрагмы.

Для эффективного управления характеристиками фотонного кристалла на резонансных диафрагмах может быть использована $n-i-p-i-n$ -диодная матрица, состоящая из четырех диодных элементов, размещенных в центральной диафрагме, выполненной в виде двух прямоугольных щелей, размером 10.5×1.0 мм² (см. рис. 10).

Фотонный кристалл без нарушений, созданный на основе резонансных диафрагм, характеризуется наличием запрещенной зоны в диапазоне частот 8.53...10.23 ГГц. Введение в фотонный кристалл $n-i-p-i-n$ -матрицы в качестве нарушения центрального слоя приводит к возникновению примесной моды колебаний в запрещенной зоне фотонного кристалла на частоте $f_{1\text{теор}} = 8.91$ ГГц. Изменение величины удельной электропроводности i -слоя $n-i-p-i-n$ -структуры от 0 до 10^4 См/м приводит к монотонному уменьшению коэффициента прохождения на частоте примесной моды колебаний от -0.65 дБ до -40.6 дБ.

Увеличение удельной электропроводности i -слоя $n-i-p-i-n$ -структуры до значений, больших 20.0 См/м, приводило к исчезновению примесной моды колебаний на частоте $f_{1\text{теор}}$ и возникновению ее на частоте $f_{2\text{теор}} = 9.47$ ГГц, отличной от $f_{1\text{теор}}$. При этом на частоте $f_{2\text{теор}}$ с увеличением удельной электропроводности i -слоя в диапазоне 0.0...270.0 См/м коэффициент отражения уменьшался от -0.1 до -30.66 дБ. Дальнейшее увеличение удельной электропроводности приводило к монотонному росту коэффициента отражения на частоте $f_{2\text{теор}}$.

Исчезновение примесной моды колебаний на частоте $f_{1\text{теор}}$ и возникновение её на частоте $f_{2\text{теор}}$ при увеличении до определенной величины удельной электропроводности i -слоя $n-i-p-i-n$ -структуры обусловлено эффектом измене-

ния типа резонансного отражения электромагнитного излучения от, так называемого, полуволнового резонанса к четвертьволновому.

Экспериментальный макет фотонного кристалла был создан в соответствии с моделью, описанной выше, и состоял из семи алюминиевых резонансных диафрагм толщиной 10 мкм, расстояние между которыми выбиралось равным 20 мм. В фотонном кристалле в центральной диафрагме в качестве нарушения с управляемыми характеристиками была размещена $n-i-p-i-n$ -матрица из диодов типа 2A505.

Выбор размеров щелей диафрагм в соответствии с описанной выше моделью фотонного кристалла обеспечивал возникновение в диапазоне частот 8–12 ГГц одной разрешённой и одной запрещённой зон на частотных зависимостях коэффициентов прохождения $|D|^2$ и отражения $|R|^2$.

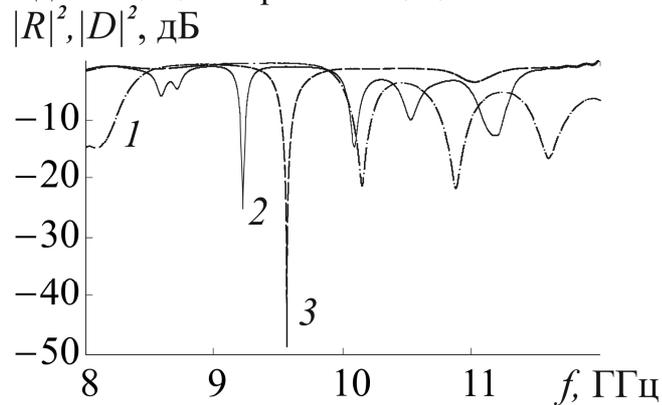


Рис. 11. Экспериментальные частотные зависимости коэффициента отражения фотонного кристалла, 1 – фотонный кристалла без нарушений, состоящий из семи диафрагм без $n-i-p-i-n$ -матрицы, 2,3 – фотонный кристалл с управляющей $n-i-p-i-n$ -матрицей в качестве нарушения центрального слоя при различных значениях управляющего тока I , мА: 2 – 0.0005, 3 – 8.15

Введение в фотонный кристалл $n-i-p-i-n$ -матрицы в качестве нарушения центрального слоя приводит к возникновению примесной моды колебаний в запрещённой зоне фотонного кристалла на частоте $f_{1\text{эксп}} = 9.22$ ГГц.

Увеличение тока, протекающего через $n-i-p-i-n$ -структуру, до значений, больших 1.0 мА, приводило к исчезновению примесной моды колебаний на частоте $f_{1\text{эксп}}$ и возникновению ее на частоте $f_{2\text{эксп}} = 9.56$ ГГц, отличной от $f_{1\text{эксп}}$ (кривая 3 на рис. 11). При этом на частоте $f_{2\text{эксп}}$ с увеличением протекающего через $n-i-p-i-n$ -структуру тока в диапазоне от 0.0 до 8.15 мА коэффициент отражения уменьшался от -0.1 до -48.64 дБ. Дальнейшее увеличение управляющего тока приводило к монотонному росту коэффициента отражения на частоте $f_{2\text{эксп}}$. При этом коэффициент прохождения во всем диапазоне управляющих токов монотонно уменьшался от -3.42 дБ до -35.0 дБ.

Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с результатами численного расчета и свидетельствуют о возможности создания на основе фотонного кристалла на резонансных диафрагмах электрически управляемого модулятора и переключателя СВЧ-сигнала. При этом на частоте $f_{1\text{эксп}}$ возможна реализация прямого режима переключения, т.е. увеличение коэффициента отражения при пропускании тока через $n-i-p-i-n$ -структуру, и на частоте

$f_{2\text{эксп}}$ прямого и инверсного, сопровождающегося уменьшением коэффициента отражения при протекании тока, режимов переключения.

В пятом разделе представлены результаты исследований возможности использования отражательных свойств фотонных кристаллов с диэлектрическим заполнением и на основе резонансных диафрагм в схеме с Y -циркулятором для реализации системы, обладающей разрешенной зоной с частотно-независимой передаточной характеристикой при коэффициенте прохождения близком к единице. Измерение передаточной характеристики $|D|^2$ исследуемых фотонных кристаллов проводились в схеме с Y -циркулятором с помощью векторного анализатора цепей Agilent Microwave Network Analyzer N5242A PNA-X в диапазоне частот 8...12 ГГц.

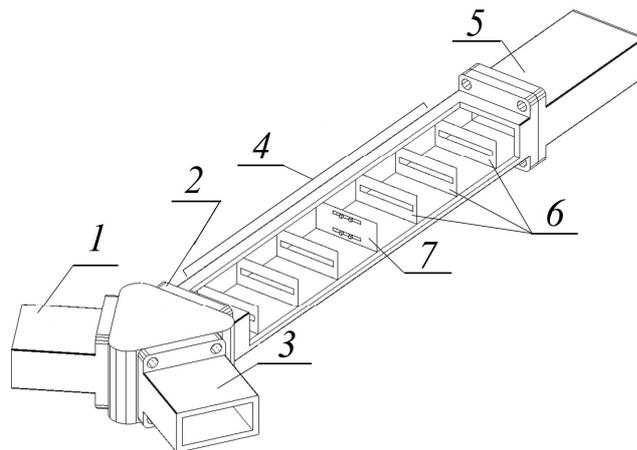


Рис. 12. Фотонный кристалл на резонансных диафрагмах в схеме на отражение с Y -циркулятором. 1 – вход Y -циркулятора, 2, 3 – выходы Y -циркулятора, 4 – фотонный кристалл, 5 – согласованная нагрузка, 6 – резонансные диафрагмы, 7 – центральная диафрагма фотонного кристалла с $n-i-p-i-n$ диодными структурами

Экспериментально и теоретически исследовался фотонный кристалл, состоящий из пятнадцати слоев в диапазоне частот 8...12 ГГц. Нечетные слои 6 были выполнены из тефлона ($\epsilon = 2.1$), четные 7 выполнены из пенопласта ($\epsilon = 1.03$). Длина центрального нарушенного слоя l выбиралась равной 5 мм и 27 мм. Реализация фотонного кристалла с диэлектрическим заполнением с нарушением периодичности в схеме на отражение с Y -циркулятором позволило создать фильтр заграждения на частоте $f_{1\text{эксп}} = 9.294$ ГГц с полосой заграждения ~ 123 МГц на уровне -3 дБ и уровнем запираения не хуже -40 дБ и с коэффициентом прохождения вне полосы заграждения не менее $-0.2...-0.3$ дБ.

Исследованы возможности использования отражательных свойств фотонных кристаллов с резонансными диафрагмами в схеме с Y -циркулятором (см. рис. 12) для создания фильтров заграждения с управляемыми $n-i-p-i-n$ -диодами характеристиками, обладающих высоким уровнем запираения в полосе заграждения и низкими потерями вне её.

Как следует из результатов расчета частотная зависимость коэффициента прохождения сигнала из плеча 1 в плечо 3 циркулятора с фотонным кристаллом в схеме на отражение с Y -циркулятором характеризуется наличием практически плоской разрешенной зоны в диапазоне частот 8.53...10.23 ГГц. Введение в фотонный кристалл $n-i-p-i-n$ -матрицы в качестве нарушения центрального слоя приводит к возникновению примесной моды затухания колебаний в разрешен-

ной зоне фотонного кристалла в схеме на отражение с Y -циркулятором на частоте $f_{1\text{теор}}=8.91$ ГГц. При изменении величины удельной электропроводности i -слоя $n-i-p-i-n$ -структуры от 0 до 0.4 См/м коэффициент прохождения $|D|^2$ уменьшается от -11.3 дБ до -47.5 дБ, а в диапазоне от 0.4 до 10^4 См/м монотонно увеличивается от -47.5 дБ до -0.3 дБ.

Увеличение удельной электропроводности i -слоя $n-i-p-i-n$ -структуры до значений больших 20 См/м приводит к исчезновению примесной моды затухания колебаний на частоте $f_{1\text{теор}}$ и ее возникновению на частоте $f_{2\text{теор}}=9.47$ ГГц, отличной от $f_{1\text{теор}}$. При этом на частоте $f_{2\text{теор}}$ с увеличением удельной электропроводности i -слоя в диапазоне от 0 до 270 См/м коэффициент прохождения уменьшается от -0.1 дБ до -30.66 дБ.

Экспериментально исследовался фотонный кристалл, созданный в соответствии с описанной выше моделью и состоящий из 7-ми алюминиевых резонансных диафрагм толщиной 10 мкм. В фотонном кристалле в центральной диафрагме в качестве нарушения с управляемыми характеристиками была размещена $n-i-p-i-n$ -матрица из диодов типа 2A505 (см. рис. 12). Изменение величины управляющего тока $n-i-p-i-n$ -структуры от 0 до 0.5 мкА приводит к уменьшению коэффициента прохождения на частоте примесной моды затухания колебаний $f_{1\text{эксп}}$ от -29.7 дБ до -39.7 дБ. Дальнейшее увеличение управляющего тока от 0.5 мкА до 193.5 мА приводит к монотонному увеличению коэффициента прохождения на частоте $f_{1\text{эксп}}$ от -39.7 дБ до -0.8 дБ (кривая 1 на рис. 13).

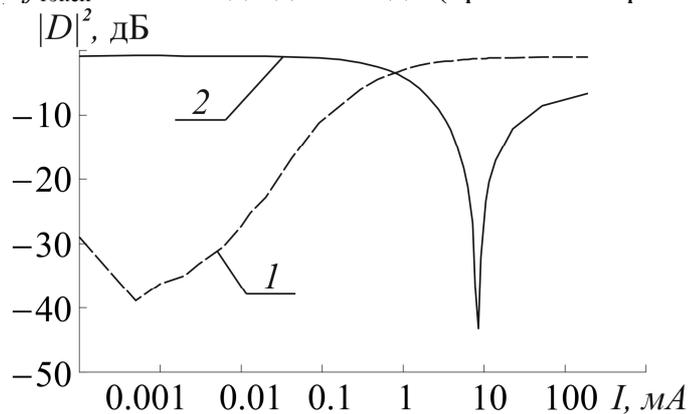


Рис. 13 Зависимости коэффициента прохождения от величины протекающего через $n-i-p-i-n$ -структуру тока на частотах примесных мод колебаний фотонного кристалла $f_{1\text{эксп}}=9.22$ ГГц (1) и $f_{2\text{эксп}}=9.56$ ГГц (2)

Увеличение тока, протекающего через $n-i-p-i-n$ -структуру, до значений больших 0.66 мА приводит к возникновению примесной моды затухания колебаний на частоте $f_{2\text{эксп}}=9.56$ ГГц, отличной от $f_{1\text{эксп}}$. При этом на частоте $f_{2\text{эксп}}$ с увеличением протекающего через $n-i-p-i-n$ -структуру тока в диапазоне 0...8.15 мА коэффициент прохождения уменьшается от -0.82 дБ до -43.27 дБ. Дальнейшее увеличение управляющего тока приводит к монотонному росту коэффициента прохождения на частоте $f_{2\text{эксп}}$ (кривая 2 на рис. 13).

В схеме с Y -циркулятором при включении в структуру фотонного кристалла на резонансных диафрагмах центральной диафрагмы с электрически управляемым размером, выполняющей роль нарушения, в разрешенной зоне передаточной характеристики СВЧ фотонного кристалла возникает примесная мо-

да затухания колебаний на частоте $f_{1\text{эксп}}=9.03$ ГГц, которая смещается по частоте на величину, равную 160 МГц, в сторону высокочастотного края запрещенной зоны при пропускании через $n-i-p-i-n$ -диодную структуру прямого тока, равного 550 мА. При этом на частоте примесной моды колебаний 9.03 ГГц наблюдается увеличение коэффициента прохождения от -20.35 дБ при $I=0$ мА до -1.65 дБ при $I=550$ мА.

В заключении приведены основные результаты и сформулированы выводы диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Проведено компьютерное моделирование и экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа в виде резонансной диафрагмы с резонатором на основе волноводного фотонного кристалла с диэлектрическим заполнением с нарушением периодичности.

2. Теоретически обоснована и экспериментально показана возможность использования предложенного зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа в виде резонансной диафрагмы с резонатором на основе волноводного фотонного кристалла с диэлектрическим заполнением с нарушением периодичности для достижения чувствительности ближнеполевого СВЧ-микроскопа при измерениях диэлектрической проницаемости материалов, превышающей 100 дБ на единицу диэлектрической проницаемости.

3. Показано, что изменением апертуры зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа в виде резонансной диафрагмы с резонатором на основе волноводного фотонного кристалла с нарушением периодичности обеспечивается выбор диапазон значений диэлектрической проницаемости с максимальной чувствительностью коэффициента отражения к изменению диэлектрической проницаемости исследуемого образца.

4. Обосновано теоретически и подтверждено экспериментально чередование «разрешенных» и «запрещенных» зон на амплитудно-частотных характеристиках структуры, представляющей собой периодически расположенные в волноводе металлические резонансные диафрагмы на диэлектрических подложках. В этом случае в частотной области, соответствующей разрешенной зоне, наблюдаются ярко выраженные пики пропускания, количество которых на единицу меньше числа диафрагм, образующих фотонный кристалл.

5. Установлено, что увеличение ширины щели резонансной диафрагмы при фиксированной диэлектрической проницаемости подложки и увеличение диэлектрической проницаемости подложки при фиксированной ширине щели, приводит к увеличению ширины и глубины запрещенной зоны фотонного кристалла на основе резонансных диафрагм, причем низкочастотная граница запрещенной зоны остается практически неизменной, а увеличение ширины запрещенной зоны происходит за счет смещения её высокочастотной границы в сторону высоких частот.

6. Теоретически обосновано и подтверждено экспериментально создание СВЧ фотонных кристаллов с электрически управляемыми амплитудно-частотными характеристиками на основе резонансных диафрагм с нарушением

периодичности в виде $n-i-p-i-n$ -диодной матрицы, выполняющей роль проводящего слоя.

7. Обосновано теоретически и подтверждено экспериментально существование примесных мод колебаний на двух частотах в запрещенной зоне фотонного кристалла при изменении тока в $n-i-p-i-n$ -диодной матрице, выполняющей роль нарушения в виде проводящего слоя в фотонном кристалле на резонансных диафрагмах.

8. Показана возможность создания электрически управляемого модулятора и переключателя СВЧ-сигнала, работающего как прямом, так и в инверсном режимах, с динамическим диапазоном более 40 дБ на основе фотонного кристалла на резонансных диафрагмах при изменении тока в $n-i-p-i-n$ -диодной матрице, выполняющей роль нарушения.

9. Предложен, теоретически и экспериментально исследован фотонный кристалл на резонансных диафрагмах, в котором размер центральной диафрагмы, выполняющей роль нарушения, электрически управляется с помощью $n-i-p-i-n$ -диодной структуры, выполняющей роль нарушения периодичности.

10. Реализована система, обладающая разрешенной зоной с частотно-независимой передаточной характеристикой при коэффициенте прохождения близком к единице, использующая отражательные свойства фотонных кристаллов с диэлектрическим заполнением и на основе резонансных диафрагм в схеме с Y -циркулятором.

11. Показана возможность использования отражательных свойств фотонных кристаллов с диэлектрическим заполнением и резонансными диафрагмами в схеме с Y -циркулятором для создания фильтров заграждения с управляемыми $n-i-p-i-n$ -диодами характеристиками, обладающих уровнем запираения в полосе заграждения более 43 дБ и потерями вне полосы менее 0.8 дБ.

12. На основании выполненных исследований получен патент РФ на изобретение №2 658 113 С1 «СВЧ фотонный кристалл».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

В научных изданиях, входящих в международные наукометрические базы (Scopus, Web of Science)

1. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Евтеев С.Г. Волноводные фотонные кристаллы на резонансных диафрагмах с управляемыми $n-i-p-i-n$ -диодами характеристиками// Радиотехника и электроника. 2018. № 1. С. 65–71.

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

2. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Евтеев С.Г. Волноводные фотонные структуры на резонансных диафрагмах// Радиотехника. 2015. № 10. С. 108–113.

3. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Пономарев Д.В., Евтеев С.Г. СВЧ фотонные кристаллы – новый тип функциональных структур, применяемых в радиоэлектронике// Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2016. Т. 19. №3. С. 17–24.

4. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Евтеев С.Г., Фролов А.П. СВЧ фотонные кристаллы с электрически управляемыми характеристиками// Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2017. Том: 20. № 3. С. 43–51.

В других изданиях

5. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Пономарев Д.В., Евтеев С.Г. СВЧ фотонные кристаллы–новый тип функциональных структур, применяемых в радиоэлектронике//Материалы XIV Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов». 22-24 ноября 2016 г. Самара 2016. Казань: Изд-во ООО «16ПРИНТ», 2016. С. 110–113 (272 с.) ISBN 978-5-9907911-3-8

6. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Евтеев С.Г. Характеристики СВЧ фотонных кристаллов на основе резонансных диафрагм с нарушением периодичности в виде $n-i-p-i-n$ -диодной матрицы// Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Материалы четвертой Всерос. научной школы-семинара / под ред. проф. Д. А. Усанова. – Саратов: изд-во Саратовский источник, 2017. С.84–86.

7. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Евтеев С.Г. Волноводные фотонные кристаллы с управляемыми $n-i-p-i-n$ -диодами характеристиками// Материалы 27-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2017). Севастополь, 10—16 сентября 2017 г.: материалы конф. в 8 т. Т. 4, С. 894—900. УДК 621.3.029.62+621.39 ББК 32я431. Proceedings of the 27th Int. Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo'2017). Sevastopol, Russia, 10—16 September, 2017

8. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Евтеев С.Г., Фролов А.П. СВЧ фотонные кристаллы с электрически управляемыми характеристиками// II НАУЧНЫЙ ФОРУМ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ: ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ТТТ-2017. Физика и технические приложения волновых процессов ФиТПВП-2017: материалы XV Международной научно-технической конференции «Физика волновых процессов и радиотехнические системы». Казань, 20 – 24 ноября 2017 года / под ред. О.И. Антипова. –Казань: КНИТУ-КАИ, 2017. – 304 с. ISBN 978-5-7579-2257-7 (отд.кн.) ISBN 978-5-7579-2251-5. С.158–162.

9. Евтеев С.Г., Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Пономарев Д.В. Полосовые СВЧ-фильтры на волноводных фотонных кристаллах с плоской частотной характеристикой в рабочей полосе// В сборнике: Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами. Материалы пятой Всероссийской научной школы-семинара, Под редакцией профессора Д.А. Усанова. Саратов: изд-во Саратовский источник, 2018. 152 с. С. 31–35.

10. Евтеев С.Г., Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Использование резонансной диафрагмы в качестве зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором на основе волноводного фотонного кристалла с нарушением периодичности// В сборнике: Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами. Материалы пятой Всероссийской научной школы-семинара, Под редакцией профессора Д.А. Усанова. Саратов: изд-во Саратовский источник, 2018. 152 с. С. 35–39.

11. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Евтеев С.Г., Пономарев Д.В. Волноводные системы на основе СВЧ фотонных кристаллов с плоскими электрически управляемыми амплитудно-частотными характеристиками// Материалы 28-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2018). Севастополь, 9—15 сентября 2018 г.: материалы конф. в 8 т. Т. 4, С. 884—890. УДК 621.3.029.62+621.39 ББК 32я431. Москва ; Минск ; Севастополь, 2018. —1951 с. Proceedings of the 28th Int. Conference “Microwave

& Telecommunication Technology” (CriMiCo’2018). Sevastopol, Russia, 9—15 September, 2018.

Патенты на изобретения РФ

12. Патент РФ 2 658 113 С1 МПК H01P СВЧ фотонный кристалл Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Евтеев С.Г. 19.06.2018 Бюл. № 17. Заявка: 2017124293, 10.07.2017 Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В. Одномерные СВЧ фотонные кристаллы. Новые области применения. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. 184 с.
2. Беляев Б. А., Волошин А. С., Шабанов В. Ф. Исследование микрополосковых моделей полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах // Доклады Академии Наук. 2005. Т. 400, № 2. С. 181–185.
3. Силин Р.А., Сазонов В.П. Замедляющие системы. М.: Сов. радио, 1966, 631с.
4. Yablonovitch E., Gmitter T.J., Meade R.D. Donor and acceptor modes in photonic band structure // Phys. Rev. Lett. 1991. Vol. 67, no. 24. P. 3380–3383.
5. Усанов Д.А. Ближнеполевая сканирующая СВЧ-микроскопия и области ее применения. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2010. 100 с.
6. Near-field microwave microscopy of materials properties” in Microwave Superconductivity / S.M.Anlage, D.E.Steinhauer, B.J.Feenstra et al. / Eds. H. Weinstock and M. Niseno. Amsterdam. The Netherlands: Kluwer, 2001. P. 239–269.

Евтеев Сергей Геннадиевич

СВЧ ФОТОННЫЙ КРИСТАЛЛ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ И ВОЗМОЖНОСТЬ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В БЛИЖНЕПОЛЕВОМ СКАНИРУЮЩЕМ СВЧ-МИКРОСКОПЕ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Подписано в печать 16.10.2018 г. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная.

Усл. – печ. л. 1.0

Тираж 100 экз. Заказ № ____.

Типография «Техно-Декор»

Саратов, Московская, 160, тел.: 77-08-48, www.sar-print.ru