

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

**Особенности взаимодействия сверхвысокочастотного излучения с
брэгговскими структурами на волноводно-щелевых линиях**

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)

аспиранта 4 курса 401 группы

направления 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи»

факультета nano- и биомедицинских технологий

Рязанова Даниила Сергеевича

Научные руководители
профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание



Д.А. Усанов

инициалы, фамилия

профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание



А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2017

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

В настоящее время одной из наиболее интенсивно развивающихся областей науки является направление по созданию и исследованию свойств метаматериалов [1]. Метаматериалы представляют собой искусственно созданные гетерогенные среды, в которых геометрические размеры и электрофизические параметры специально подобранных составляющих элементов периодически изменяются вдоль одного или нескольких пространственных направлений. Уникальные радиофизические, оптические, магнитные и акустические свойства метаматериалов, обусловленные резонансным взаимодействием электромагнитной волны с периодической структурой, позволяют создавать на их основе новые типы структур и устройств с управляемыми параметрами.

К метаматериалам относится класс фотонных кристаллов – искусственных периодических структур с периодом, сравнимым с длиной волны распространяющегося в них электромагнитного излучения [2]. По аналогии с реальными кристаллами, в которых существуют разрешенные и запрещенные энергетические состояния для электронов в периодическом потенциале кристаллической решетки, в фотонном кристалле существуют разрешенные и запрещенные для распространения электромагнитного излучения частотные области [3]. Появление нарушения периодичности фотонного кристалла, в виде изменения геометрических размеров и/или электрофизических параметров одного или нескольких слоев, приводит к возникновению в запрещенной зоне фотонного кристалла узкого «окна прозрачности» – частотной области с минимальным значением коэффициента отражения электромагнитной волны. При изменении электрофизических параметров и геометрических размеров нарушения периодичности происходит частотный сдвиг и изменение формы «окна прозрачности» в фотонной запрещенной зоне фотонного кристалла. Для теоретического описания взаимодействия электромагнитного излучения с подобного рода периодическими структурами применяются численные методы электродинамического моделирования и матричные методы [4].

Модификация пространственной структуры и электрофизических свойств фотонных кристаллов предоставляет огромные возможности по созданию новых материалов с заранее заданными свойствами и устройств с управляемыми характеристиками, функционирующими в различных частотных диапазонах электромагнитного спектра [5]. По сравнению с фотонными кристаллами оптического диапазона, производство которых отличается высокими стоимостью и трудоемкостью, в СВЧ-диапазоне фотонные кристаллы обладают высокой технологичностью производства, конструктивно состоят из макроскопических объектов и могут быть реализованы на основе стандартных элементов СВЧ схем [6]. Результаты исследований особенностей взаимодействия СВЧ-излучения с фотонным кристаллом могут быть использованы для перехода в более высокочастотные диапазоны.

В СВЧ-диапазоне фотонные кристаллы создаются на основе упорядоченных массивов элементов различной формы и конфигурации, волноводов с диэлектрическим заполнением и планарных линий передачи. Фотонные кристаллы применяются в качестве структурных и управляющих элементов различного рода фильтров, усилителей, антенн и резонаторов. Изменением параметров периодичности и создаваемых нарушений СВЧ-фотонных кристаллов возможно осуществлять управление шириной и глубиной фотонной запрещенной зоны, частотным положением ее границ, появлением и частотными положениями «окон прозрачности» [7]. Внешние воздействия, оказываемые на отдельные структурные части фотонного кристалла, также приводят к изменениям параметров и конфигурации фотонной запрещенной зоны.

Исследование СВЧ фотонных кристаллов имеет важное практическое значение для разработки современных телекоммуникационных систем, высоконаправленных антенн, СВЧ-фильтров, улучшения характеристик СВЧ-детекторов, усилителей, приемо-передающих

устройств и контрольно-измерительного оборудования для проведения высокоточных бесконтактных неразрушающих измерений электрофизических параметров материалов.

В связи с этим является актуальным проведение исследований особенностей взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного диапазона с брэгговскими структурами на основе волноводно-щелевых линий передачи, определение чувствительности частотной зависимости «окон» прозрачности в запрещенной зоне фотонного кристалла к параметрам нарушения периодичности, установление возможности управления характеристиками получаемых «окон» прозрачности.

Цель работы:

Выявление особенностей взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного диапазона с брэгговскими структурами на основе отрезков волноводно-щелевой линии передачи, и проведение на этой основе теоретического и экспериментального обоснования возможности создания брэгговских структур на основе отрезков волноводно-щелевой линии передачи с характеристиками, управляемыми встраиваемыми $n-i-p-i-n$ -структурами.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

Разработка компьютерной модели нового типа брэгговской структуры в СВЧ-диапазоне, выполненной на основе отрезков волноводно-щелевой линии передачи.

Исследование частотных зависимостей коэффициентов отражения и прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с брэгговской структурой, выполненной на основе отрезков волноводно-щелевой линии передачи при различных параметрах диэлектрической подложки и различных длинах и количестве периодов структуры, а также при различной ширине щели отрезков волноводно-щелевых линий передачи.

Исследование частотных зависимостей коэффициентов отражения и прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с брэгговской структурой, выполненной на основе отрезков волноводно-щелевой линии передачи, содержащей нарушения периодичности в виде измененной длины центрального отрезка регулярного волновода, измененной длины центрального отрезка волноводно-щелевой линии передачи, а также измененной ширины щели центрального отрезка волноводно-щелевой линии передачи.

Исследование характеристик $n-i-p-i-n$ -структуры с целью использования её в качестве управляющего элемента брэгговской структуры на основе отрезков волноводно-щелевой линии передачи.

Исследование возможности электрического управления характеристиками резонансных особенностей в запрещенных и разрешенных зонах брэгговской структуры на основе отрезков волноводно-щелевой линии передачи при помощи встраиваемых $n-i-p-i-n$ -структур.

Исследование частотных зависимостей коэффициентов отражения и прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с брэгговской гетероструктурой, образованной из двух групп периодически расположенных отрезков волноводно-щелевой линии передачи, имеющих разные размеры.

Исследование возникновения таммовских поверхностных состояний в брэгговской гетероструктуре, образованной из двух групп периодически расположенных отрезков волноводно-щелевой линии передачи, имеющих разные размеры.

Новизна исследований, проведенных в ходе научной квалификационной работы, состоит в следующем:

Теоретически обосновано и экспериментально показано, что брэгговская структура на основе отрезков волноводно-щелевой линии передачи образует разрешенные и запрещенные зоны в диапазоне частот 8...12 ГГц.

Установлен характер распределения напряженности электрического поля в стоячей волне, возникающей в брэгговской структуре, в качестве элементов которой используются отрезки волноводно-щелевой линии передачи.

Описано теоретически и установлено экспериментально возникновение резонансной особенности – «окна прозрачности» в запрещенной зоне исследуемой брэгговской структуры при внесении нарушения в виде измененной длины центрального отрезка регулярного волновода, измененной длины центрального отрезка волноводно-щелевой линии передачи, а также измененной ширины щели центрального отрезка волноводно-щелевой линии передачи.

Теоретически обоснована возможность управления коэффициентом пропускания в резонансной особенности брэгговской структуры на основе отрезков волноводно-щелевой линии передачи с помощью $n-i-p-i-n$ -структуры, помещенной в щель центрального отрезка волноводно-щелевой линии передачи.

Теоретически обосновано и экспериментально показано возникновение таммовских поверхностных состояний в брэгговской гетероструктуре, образованной из двух групп периодически расположенных отрезков волноводно-щелевой линии передачи, имеющих разные размеры.

Установлено, что таммовские поверхностные состояния возникают при наличии на границе двух брэгговских структур интерфейсного элемента с характеристиками, отличными от характеристик как одной, так и другой брэгговских структур.

Достоверность результатов научной квалификационной работы обеспечивается качественным и количественным соответствием результатов теоретического анализа и компьютерного моделирования, с использованием численных методов, результатам, полученным экспериментально. Достоверность экспериментальных результатов обеспечена применением современной измерительной аппаратуры, обработкой экспериментальных результатов с использованием стандартных методов.

Практическая значимость полученных результатов заключается в следующем:

Предложен новый тип брэгговской структуры на основе отрезков волноводно-щелевой линии передачи, характеризующийся наличием запрещенных и разрешенных зон в СВЧ-диапазоне частот.

Показано, что введение в конструкцию нарушений в виде измененной длины центрального отрезка регулярного волновода, измененной длины центрального отрезка волноводно-щелевой линии передачи, а также измененной ширины щели центрального отрезка волноводно-щелевой линии передачи приводит к возникновению резонансной особенности – «окна прозрачности» в запрещенной зоне исследуемой брэгговской структуры.

Показано, что помещение в щель центрального отрезка волноводно-щелевой линии передачи электрически управляемого элемента в виде $n-i-p-i-n$ -структуры обеспечивает возможность создания управляемого СВЧ-устройства на волноводно-щелевых линиях передачи.

Показано возникновение таммовских поверхностных состояний в брэгговской гетероструктуре, образованной из двух групп периодически расположенных отрезков волноводно-щелевой линии передачи, имеющих разные размеры, при наличии на границе двух брэгговских структур интерфейсного элемента с характеристиками, отличными от характеристик как одной, так и другой брэгговских структур.

Основные положения, выносимые на защиту

Брэгговская структура на основе отрезков волноводно-щелевой линии передачи характеризуется наличием разрешенных и запрещенных зон пропускания в диапазоне частот 8...12 ГГц. Амплитудно-частотные характеристики смещаются в область низких частот как с увеличением толщины и диэлектрической проницаемости подложки, так и ширины щели.

Введение в брэгговскую структуру на основе отрезков волноводно-щелевой линии передачи нарушений в виде измененной длины центрального отрезка регулярного волновода, измененной длины центрального отрезка волноводно-щелевой линии передачи, а также измененной ширины щели центрального отрезка волноводно-щелевой линии,

приводит к возникновению резонансной особенности – «окна прозрачности» в запрещенной зоне брэгговской структуры.

Помещение в щель центрального отрезка волноводно-щелевой линии передачи измененной длины, выступающего в качестве нарушения, электрически управляемого элемента в виде $n-i-p-i-n$ -структуры обеспечивает регулировку коэффициента пропускания в резонансной особенности и возможность создания управляемого СВЧ-устройства на волноводно-щелевых линиях передачи.

Брэгговская гетероструктура, образованная из двух групп периодически расположенных отрезков волноводно-щелевой линии передачи, имеющих разные размеры, при наличии на границе двух брэгговских структур интерфейсного элемента с характеристиками, отличными от характеристик как одной, так и другой брэгговских структур, характеризуется наличием таммовских поверхностных состояний.

Апробация работы:

Основные результаты научной квалификационной работы доложены на:

1. XIII-ой международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов» «The physics and technology of wave processes», г. Казань, 21 – 25 сентября 2015 года
2. Всероссийской научной школе-семинаре «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами», г. Саратов, 18-20 мая 2017 года

Исследования выполнялись в рамках проекта «Разработка технологии формирования нанокompозитов на основе диэлектрических матриц с включениями в виде углеродных нанотрубок с управляемыми характеристиками в СВЧ-диапазоне и создание сканирующего зондового ближнеполевого СВЧ-микроскопа, обеспечивающего локальное измерение СВЧ-характеристик нанокompозитов» Государственный контракт № 16.740.11.0512 от 16 мая 2011 г. и Дополнению от 07 октября 2011 г. № 1, Дополнению от 15 марта 2013 г. № 2 Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.2.1 Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук.

Публикации. По материалам научной квалификационной работы опубликовано работ 4, в том числе 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК; 2 работы опубликованы в трудах международных и Всероссийских конференций;

Публикации по теме научной квалификационной работы в изданиях, индексируемых в базе SCOPUS:

1. D. A. Usanov, S. A. Nikitov, A. V. Skripal', and D. S. Ryazanov Bragg Microwave Structures Based on Waveguide-Slot Lines // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2016. – V. 61, – No. 4, – P. 379–384.

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

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первом разделе проведен анализ современного состояния исследований брэгговских структур СВЧ-диапазона, их характеристик и возможностей применения.

Во втором разделе приведены результаты исследования брэгговских структур на основе отрезков волноводно-щелевой линии передачи.

Приведены результаты исследований создания волноводных структур, обладающих как запрещенной, так и разрешенной зоной пропускания, на основе чередующихся отрезков волноводно-щелевой линии передачи и регулярных отрезков волновода.

Разработана модель такого устройства, на основе численного моделирования с использованием метода конечных элементов в САПР HFSS Ansoft и экспериментально проведено исследование СВЧ-характеристик созданного устройства.

Отрезок волноводно-щелевой линии передачи представлял собой отрезок прямоугольного волновода сечением 22.86×10.16 мм с размещенной в E -плоскости в центре поперечного сечения волновода щелевой линией передачи (рис. 1). Щелевая линия была выполнена на поликоровой (Al_2O_3 , $\varepsilon = 9,6$) пластине длиной 23 мм, шириной 10.16 мм и толщиной 1 мм. На одну сторону пластины было нанесено алюминиевое покрытие толщиной 0.012 мм, ширина щели в покрытии составляла 4.0 мм. Отрезки волноводно-щелевой линии передачи разделялись отрезками регулярного волновода. Данная брэгговская структура исследовалась в диапазоне частот 8...12 ГГц.

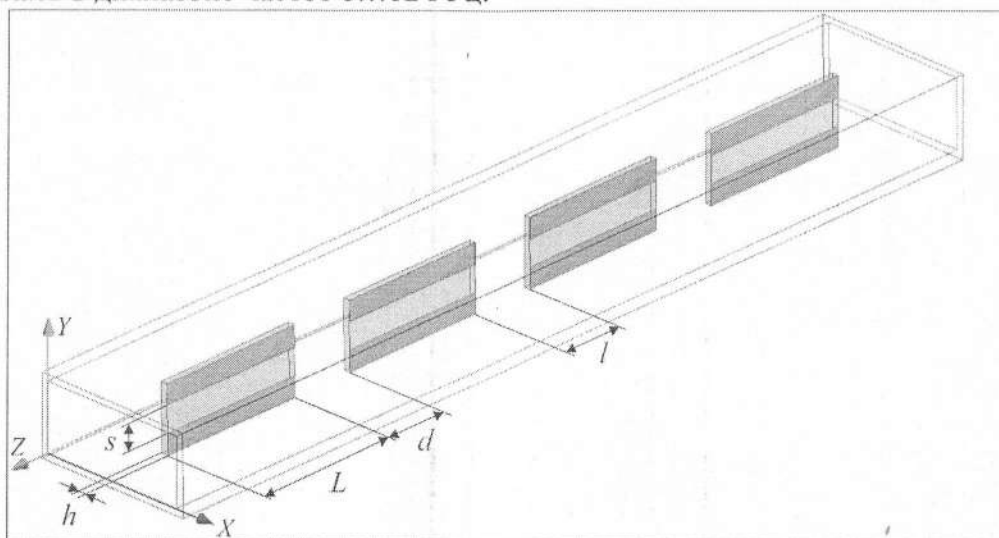


Рис. 1. Модель фотонного кристалла на основе волноводно-щелевых линий передачи. L – длина отрезка волноводно-щелевой линии передачи; d – длина регулярного отрезка волновода; h – толщина подложки щелевой линии, s – ширина щели, l – длина центрального регулярного отрезка волновода.

Известно, что в периодической структуре при определенных соотношениях между параметрами элементов, образующих эту структуру, возникают запрещенные и разрешенные зоны, при этом на частотах, соответствующих середине запрещенных зон ω_{bg} , выполняется условие Брэгга. Для структуры, составленной из периодически повторяющихся элементов двух типов, это условие может быть представлено в виде

$$\beta_1(\omega_{bg})d + \beta_2(\omega_{bg})L = n\pi \quad (1),$$

где $d + L$ – период структуры с фотонной запрещенной зоной, β_1 – фазовая составляющая постоянной распространения волны на отрезке регулярного волновода, являющаяся функцией ω_{bg} , β_2 – фазовая составляющая постоянной распространения волны на отрезке волноводно-щелевой линии передачи, определяемая геометрическими размерами щелевой линии передачи и её электрическими характеристиками, n – порядковый номер запрещенной зоны.

Изменение фазовых постоянных распространения как на отрезках волноводно-щелевой линии передачи, так и на отрезках регулярного волновода, как это следует из соотношения (1), должно приводить к сдвигу ω_{bg} . Изменение фазовой постоянной на отрезках волноводно-щелевой линии передачи может быть реализовано изменением толщины и величины диэлектрической проницаемости подложки и изменением ширины щели. Изменение фазовой постоянной на отрезках регулярного волновода может быть реализовано изменением диэлектрической проницаемости среды, заполняющей эти отрезки.

На рис. 2 и 3 представлены результаты расчета частотных зависимостей квадратов модулей коэффициента прохождения $|D|^2$ СВЧ-волны через брэгговскую структуру, состоящую из четырех отрезков волноводно-щелевой линии передачи, при различной толщине и диэлектрической проницаемости подложки щелевой линии, соответственно.

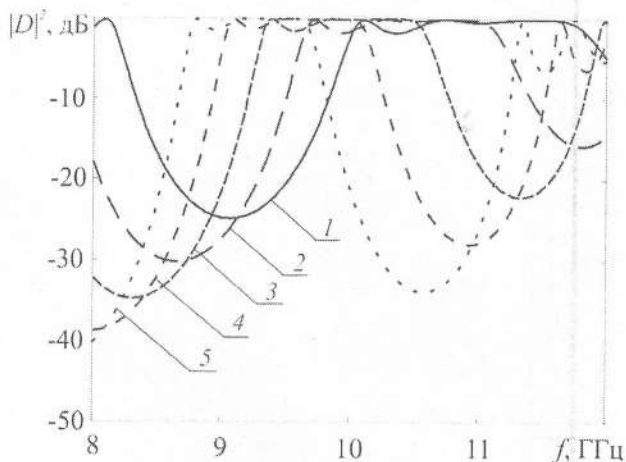


Рис. 2. Расчетные частотные зависимости коэффициента прохождения фотонного кристалла при различной толщине подложки h , мм: 1 – 0.2; 2 – 0.3; 3 – 0.4; 4 – 0.5; 5 – 0.6. $L = 23$ мм; $d = 10$ мм; $s = 4.0$ мм; $\varepsilon = 9.6$.

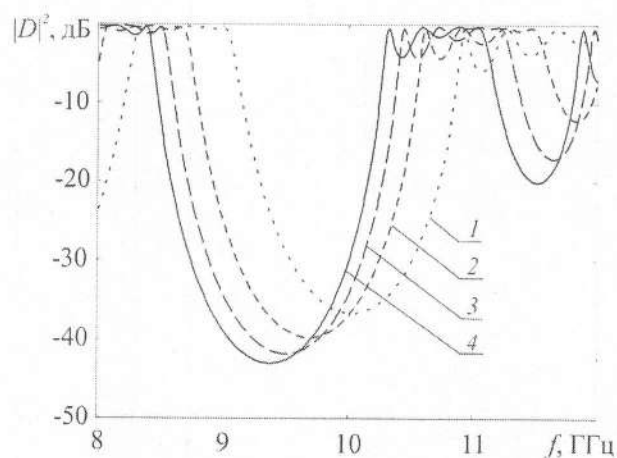


Рис. 3. Расчетные частотные зависимости коэффициента прохождения фотонного кристалла при различной диэлектрической проницаемости подложки ε : 1 – 8; 2 – 9; 3 – 9.6; 4 – 10. $L = 23$ мм; $d = 10$ мм; $s = 4.0$ мм; $h = 1.0$ мм.

Из представленных на рис. 2 и рис. 3 результатов следует, что увеличение толщины и диэлектрической проницаемости подложки в указанных пределах приводит к смещению амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) в область низких частот и увеличению глубины запрещенной зоны.

Такое поведение АЧХ связано с тем, что увеличение толщины и диэлектрической проницаемости подложки щелевой линии приводит к увеличению фазовой постоянной β_2 отрезка волноводно-щелевой линии передачи.

На рис. 4 и 5 представлены результаты расчета напряженности электрического поля электромагнитной волны внутри фотонного кристалла вдоль направления её распространения (вдоль оси Z см. рис. 1) и в поперечном направлении (вдоль оси X см. рис. 1) для различных толщин подложки на отрезке волноводно-щелевой линии передачи. Расчет вдоль оси Z проводился в плоскости, проходящей через середину широкой стенки волновода, а расчет вдоль оси X проводился в поперечном сечении волновода, проходящем через пучность стоячей волны на отрезке волноводно-щелевой линии передачи.

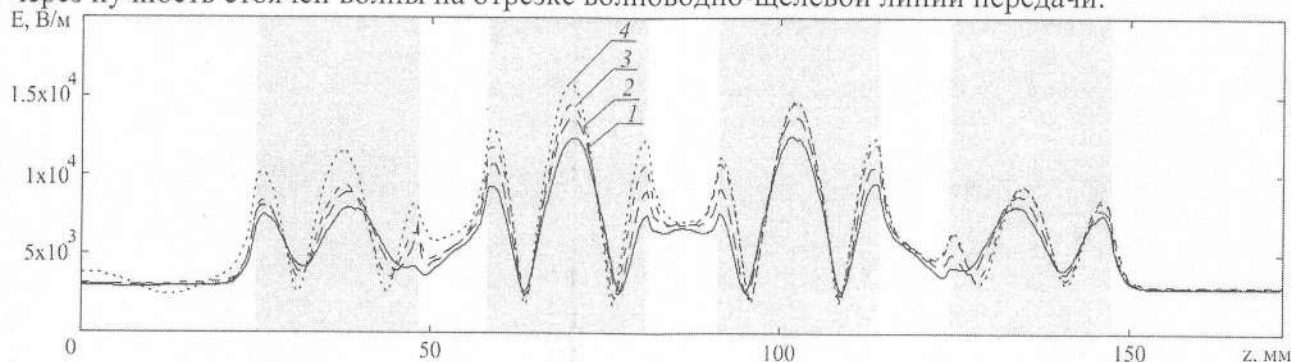


Рис. 4. Распределение напряженности электрического поля электромагнитной волны внутри фотонного кристалла вдоль направления её распространения. h , мм: 1 – 0.2; 2 – 0.3; 3 – 0.5; 4 – 0.6. $x = 11.5$ мм. $s = 4.0$ мм. Серые области занимают отрезки волноводно-щелевой линии передачи, светлые – регулярные отрезки волновода.

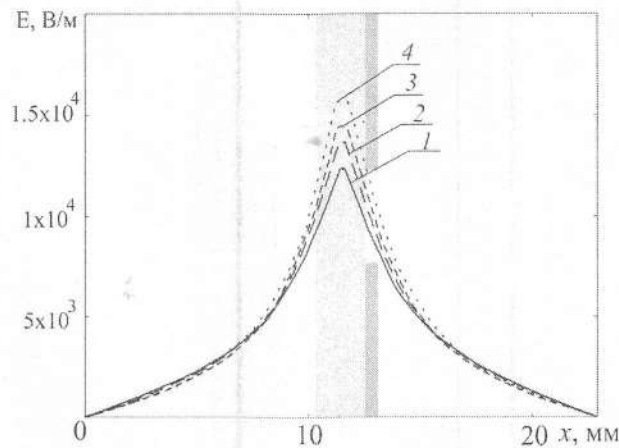


Рис. 5. Распределение напряженности электрического поля электромагнитной волны внутри фотонного кристалла в поперечной плоскости волновода. h , мм: 1 – 0.2; 2 – 0.3; 3 – 0.5; 4 – 0.6. $z = 68.5$ мм. $s = 4.0$ мм.

Анализ распределений напряженности электрического поля электромагнитной волны внутри фотонного кристалла вдоль направления её распространения и в поперечной плоскости волновода позволяет сделать вывод о том, что на частотах прозрачности фотонного кристалла внутри структуры фотонного кристалла реализуется режим стоячей волны с ярко выраженными узлами и пучностями. С увеличением толщины и диэлектрической проницаемости подложки волноводно-щелевой линии передачи напряженность электрического поля в пучностях увеличивается, а в узлах уменьшается. Следует отметить, что максимум напряженности электрического поля в плоскости поперечного сечения волновода располагается внутри в середине подложки, однако характер зависимости $E(x)$ существенно отличается от синусоидального, характерного для волны H_{10} .

Как было отмечено выше, изменение ширины щели также приводит к изменению фазовой постоянной β_2 отрезка волноводно-щелевой линии передачи, а именно: с уменьшением ширины щели увеличивается β_2 . Результаты расчета АЧХ исследуемой структуры, представленные на рис. 6, свидетельствуют о сдвиге АЧХ в область низких частот с уменьшением ширины щели.

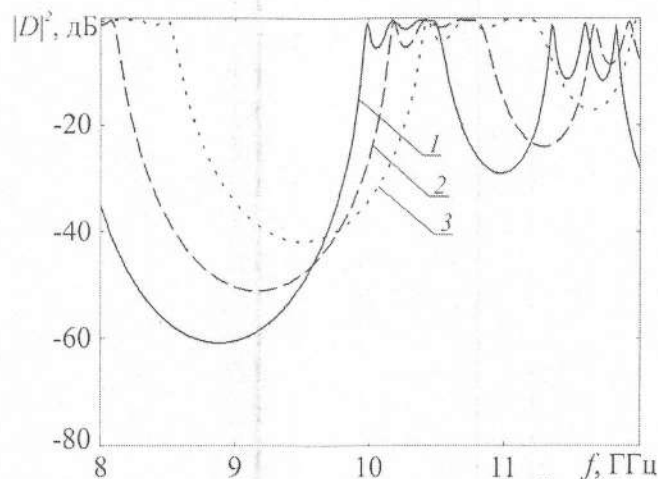


Рис. 6. Расчетные частотные зависимости коэффициента прохождения $|D|^2$ фотонного кристалла при различной ширине щели отрезков щелевой линии передачи s , мм: 1 – 2.0; 2 – 3.0; 3 – 4.0. $L = 23$ мм; $d = 10$ мм; $h = 1.0$ мм; $\varepsilon = 9.6$.

На рис. 7 представлены результаты расчета напряженности электрического поля электромагнитной волны внутри фотонного кристалла вдоль направления её распространения при различной ширине щели на отрезке волноводно-щелевой линии передачи.

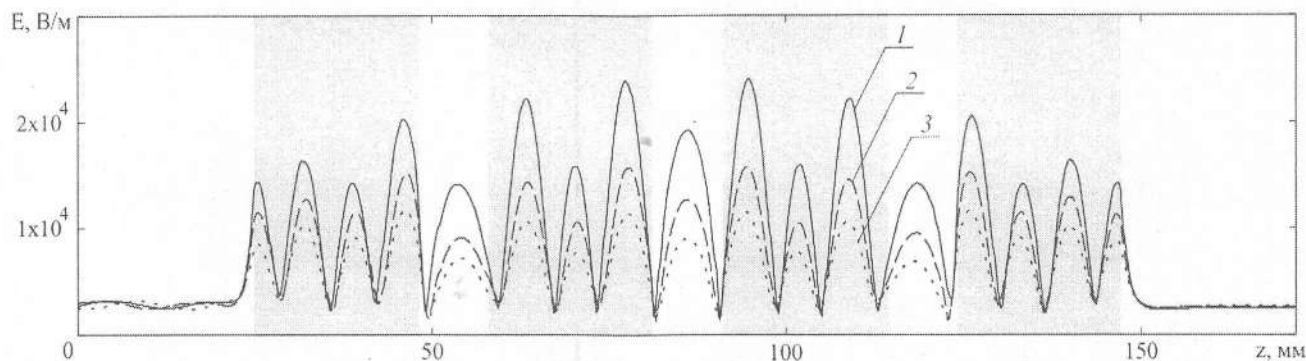


Рис. 7. Распределение напряженности электрического поля электромагнитной волны внутри фотонного кристалла вдоль направления её распространения. s , мм: 1 – 2.0; 2 – 3.0; 3 – 4.0. $x = 11.5$ мм. $h = 1.0$ мм. Серые области занимают отрезки волноводно-щелевой линии передачи, светлые – регулярные отрезки волновода.

Анализ представленных на рис. 7 зависимостей показывает, что на частотах прозрачности фотонного кристалла внутри структуры фотонного кристалла реализуется режим стоячей волны, при этом с уменьшением ширины щели на отрезке волноводно-щелевой линии передачи в два раза напряженность в пучностях увеличивается более чем в три раза. Дополнительные исследования показали, что увеличение длин регулярных отрезков волновода D приводит, как это и следует из соотношения (1), к смещению АЧХ структуры в область низких частот (см. рис. 8).

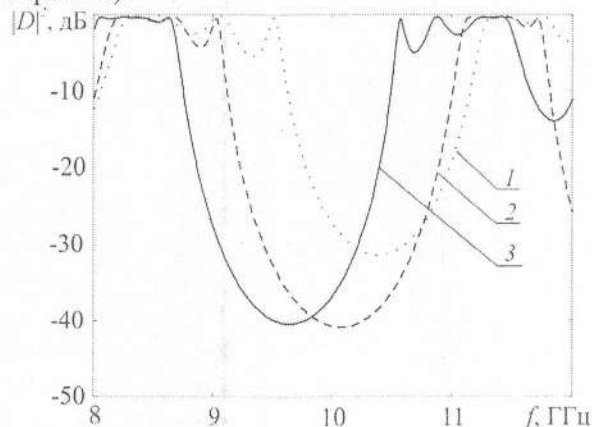


Рис. 8. Расчетные частотные зависимости коэффициента прохождения $|D|^2$ фотонного кристалла при различной длине регулярных отрезков волновода d , мм: 1 – 2; 2 – 5; 3 – 10. $L = 23$ мм; $s = 4.0$ мм; $h = 1.0$ мм; $\epsilon = 9.6$.

Результаты исследований влияния количества N периодически повторяющихся элементов в брэгговской структуре на основе чередующихся отрезков волноводно-щелевой линии передачи и отрезков регулярного волновода показали, что увеличение их числа приводит к росту глубины запрещенной зоны и увеличению количества резонансов M , формирующих разрешенную зону в соответствии с соотношением $M = N - 1$. При изменении количества отрезков волноводно-щелевой линии передачи в брэгговской структуре от 4 до 6 глубина запрещенной зоны увеличилась от –40 дБ до –65 дБ.

Известно, что в классических одномерных брэгговских структурах, состоящих из чередующихся слоев с различной величиной диэлектрической проницаемости, наличие дефекта в виде измененной толщины или диэлектрической проницаемости одного из слоёв, нарушающего периодичность, в фотонной запрещенной зоне может проявляться резонансная особенность, называемая примесной модой колебаний и обладающая высокой чувствительностью к параметрам дефекта.

С целью выяснения особенностей проявления примесной моды колебаний в предложенной брэгговской структуре проведены исследования АЧХ СВЧ фотонного кристалла с нарушением периодичности в виде изменения длины l центрального отрезка регулярного волновода.

На рис. 9 представлены результаты расчета частотных зависимостей коэффициента прохождения $|D|^2$ СВЧ-волны через брэгговскую структуру, состоящую из четырех отрезков волноводно-щелевой линии передачи длиной 23 мм (кривые 1-4), при различной длине

нарушения l и без нарушения. Длина нарушенного слоя l варьировалась в диапазоне от 14 мм до 20 мм.

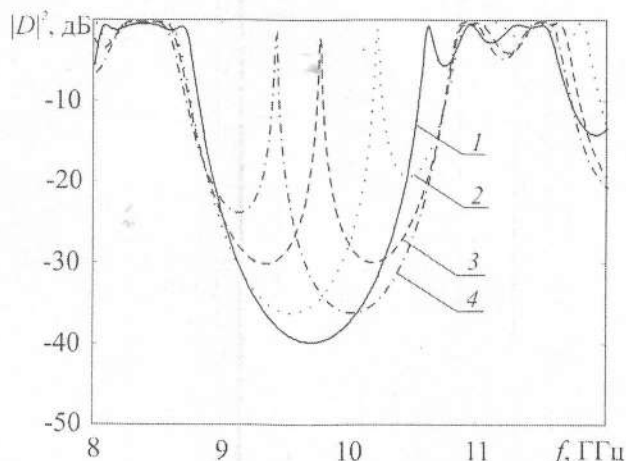


Рис. 9. Расчетные частотные зависимости коэффициента прохождения фотонного кристалла при различной длине нарушенного слоя l , мм: 2 – 14; 3 – 17; 4 – 20 и без нарушения – 1. $L = 23$ мм; $d = 10$ мм; $s = 4.0$ мм; $h = 1.0$ мм; $\varepsilon = 9.6$.

Из результатов, представленных на рис. 9, следует, что наличие нарушения периодичности в брэгговской структуре в виде измененной длины центрального отрезка регулярного волновода приводит к возникновению в запрещенной зоне примесной моды колебаний («окна прозрачности»), положение которой с увеличением длины нарушенного слоя l в диапазоне значений 14...20 мм смещается в низкочастотную область.

Высокочастотные характеристики исследуемого СВЧ-устройства на основе отрезков волноводно-щелевой линии передачи, исследовались с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA-L Network Analyzer N5230A.

Экспериментальные АЧХ исследуемой брэгговской структуры при различной длине регулярных отрезков волновода представлены на рис. 10 (кривые 1-3).

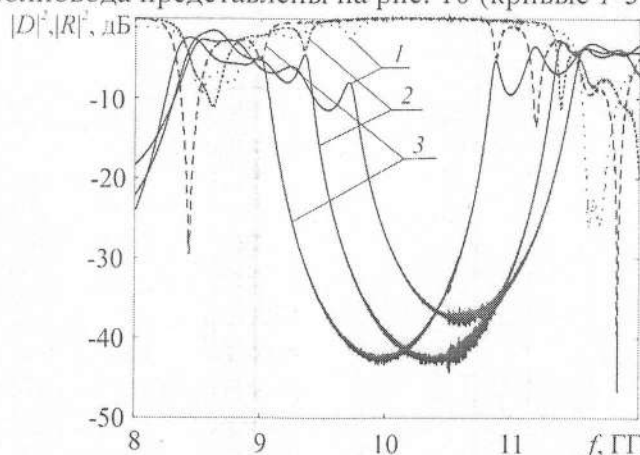


Рис. 10. Экспериментальные частотные зависимости коэффициентов отражения $|R|^2$ (штриховые, пунктирные и штрихпунктирные кривые) и прохождения $|D|^2$ (сплошные кривые) брэгговской структуры при различной длине регулярных отрезков волновода d , мм: 1 – 2; 2 – 5; 3 – 10. $L = 23$ мм; $s = 4.0$ мм; $h = 1.0$ мм; $\varepsilon = 9.6$.

Из результатов эксперимента, представленных на рис. 10, следует, что созданный фотонный кристалл на основе волноводно-щелевых линий передачи образует разрешенные и запрещенные зоны в диапазоне частот 8...12 ГГц. Сравнение результатов эксперимента, представленных на рис. 10, и результатов расчета, представленных на рис. 8, свидетельствует об их хорошем количественном соответствии.

Экспериментально исследованы АЧХ брэгговской структуры на основе отрезков волноводно-щелевой линии передачи с нарушением периодичности в виде измененной длины l центрального регулярного отрезка волновода. Как следует из эксперимента, создание нарушения в фотонном кристалле в виде центрального отрезка регулярного волновода увеличенной длины приводит к возникновению пика пропускания в запрещенной

зоне и увеличению её ширины (кривые 2 на рис. 11). На этом же рисунке приведены АЧХ брэгговской структуры без нарушения (кривые 1).

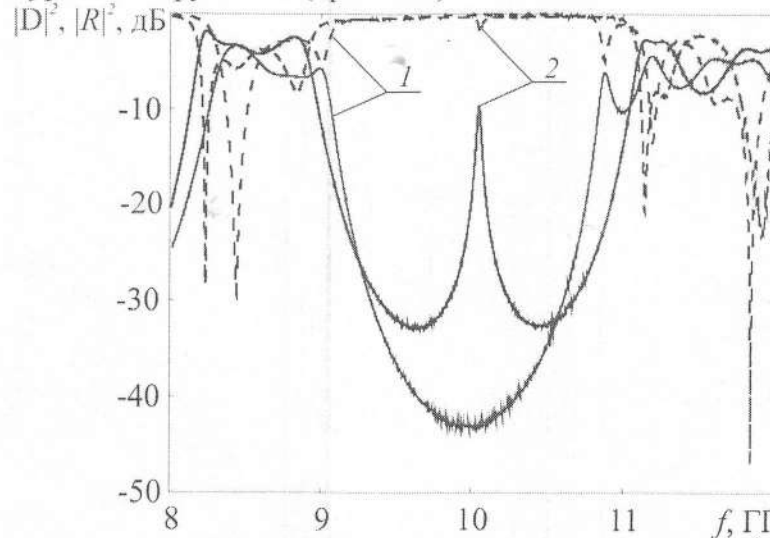


Рис. 11. Экспериментальные частотные зависимости коэффициентов отражения $|R|^2$ (штриховые кривые) и прохождения $|D|^2$ (сплошные кривые) брэгговской структуры при наличии нарушения в виде измененной длины центрального регулярного отрезка волновода $l = 17$ мм (2) и без нарушения (1). $L = 23$ мм; $d = 10$ мм; $s = 4.0$ мм; $h = 1.0$ мм; $\varepsilon = 9.6$.

Сравнение результатов эксперимента, представленных на рис. 11, и результатов расчета, представленных на рис. 9 (кривые 3), свидетельствует об их хорошем количественном соответствии.

В третьем разделе приведены результаты исследования брэгговских структур на основе отрезков волноводно-щелевой линии передачи с управляемыми элементами в виде $n-i-p-i-n$ -структур.

Проведен расчет эффективной удельной электропроводности $n-i-p-i-n$ -структуры при различных уровнях инжекции неравновесных носителей заряда, с целью использования её в качестве управляющего элемента волноводных структур, обладающих как запрещенной, так и разрешенной зоной пропускания. Рассмотрена возможность использования в данной системе полупроводниковых $n-i-p-i-n$ -диодных структур с целью создания электрически управляемых волноводных СВЧ-элементов, характеризующихся наличием запрещенных зон с резонансным пиком пропускания.

Для реализации возможности управления характеристиками СВЧ-излучения в рассматриваемых системах в качестве электрически управляемого элемента может быть использована $n-i-p-i-n$ -структура, которая размещалась в щели центрального отрезка волноводно-щелевой линии передачи.

С учетом зависимости удельной эффективной электропроводности $n-i-p-i-n$ -структуры σ от величины тока инжекции j были рассчитаны АЧХ $|S_{12}|^2$:

$$\sigma = q \left(\mu_n n_0 + \mu_p p_0 + \mu_p \frac{b+1}{l_i} \frac{jL^2}{2qD_p} \left[\frac{b+1}{b} - \frac{n_0 - p_0}{2} \times \frac{bp_{l_i} - p_0 + (b+1)N}{b(p_{l_i} + N)(p_0 + N)} \right] \right).$$

Здесь μ_n, μ_p, D_p, L — подвижность электронов и дырок, коэффициент диффузии и диффузионная длина дырок, l_i — длина i -области, $N = (bn_n + p_n)/(b+1)$, $b = \mu_n/\mu_p$.

На рисунке 12 представлена модель брэгговской СВЧ-структуры на основе волноводно-щелевых линий с $n-i-p-i-n$ -структурой в качестве управляющего элемента, расположенного в щели центрального отрезка волноводно-щелевой линии измененной длины, выступающем в качестве нарушения периодичности.

Структура состоит из 5 отрезков волноводно-щелевой линии передачи длиной 23 мм, шириной 10.16 мм и толщиной 1 мм разделенных отрезками регулярного волновода длиной 10 мм. Щелевая линия выполнена на поликоровой (Al_2O_3 , $\varepsilon = 9.6$) пластине на одну сторону

которой было нанесено алюминиевое покрытие толщиной 0.012 мм, а ширина щели в покрытии составляла 4.0 мм. Длина центрального отрезка волноводно-щелевой линии передачи составляла 15 мм. Размеры волновода 22,86 x 10,16 мм.

При расчете модельной диодной структуры полагалось, что полупроводниковая $n-i-p-i-n$ -структура имеет прямоугольную форму высотой c , равной 1 мм, длиной $b = 0.9$ мм и шириной $a = 1.3$ мм (см. вставку к рис. 12). Также создавались треугольные заходы в центральном отрезке волноводно-щелевой линии слева и справа от $n-i-p-i-n$ -структуры для согласования и уменьшения отражения волны.

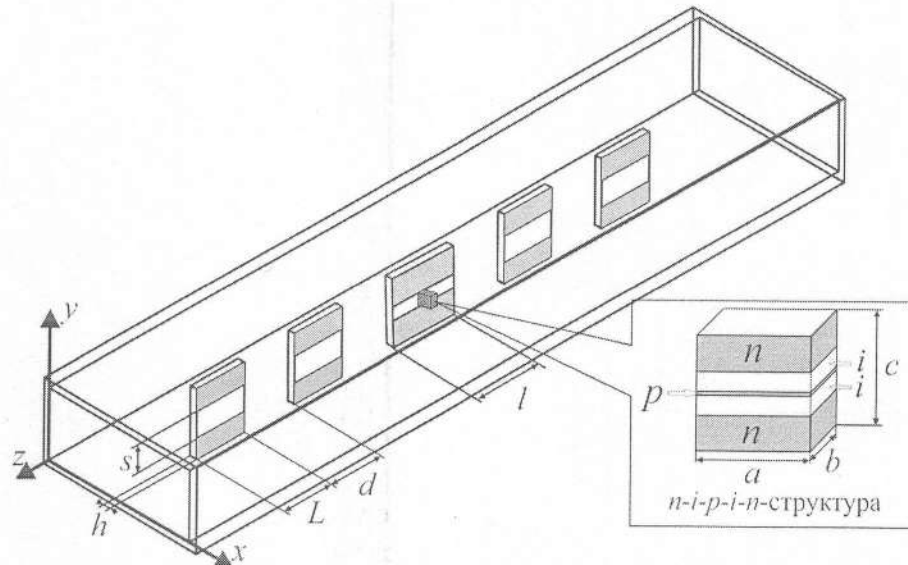


Рис. 12. Модель фотонного кристалла на основе волноводно-щелевых линий передачи полупроводниковой $n-i-p-i-n$ -структурой, расположенной в середине щели центрального отрезка волноводно-щелевой линии. L – длина отрезка волноводно-щелевой линии передачи; d – длина регулярного отрезка волновода; h – толщина подложки щелевой линии, s – ширина щели, l – длина центрального отрезка волноводно-щелевой линии, a – длина $n-i-p-i-n$ -структуры, b – ширина $n-i-p-i-n$ -структуры, c – высота $n-i-p-i-n$ -структуры.

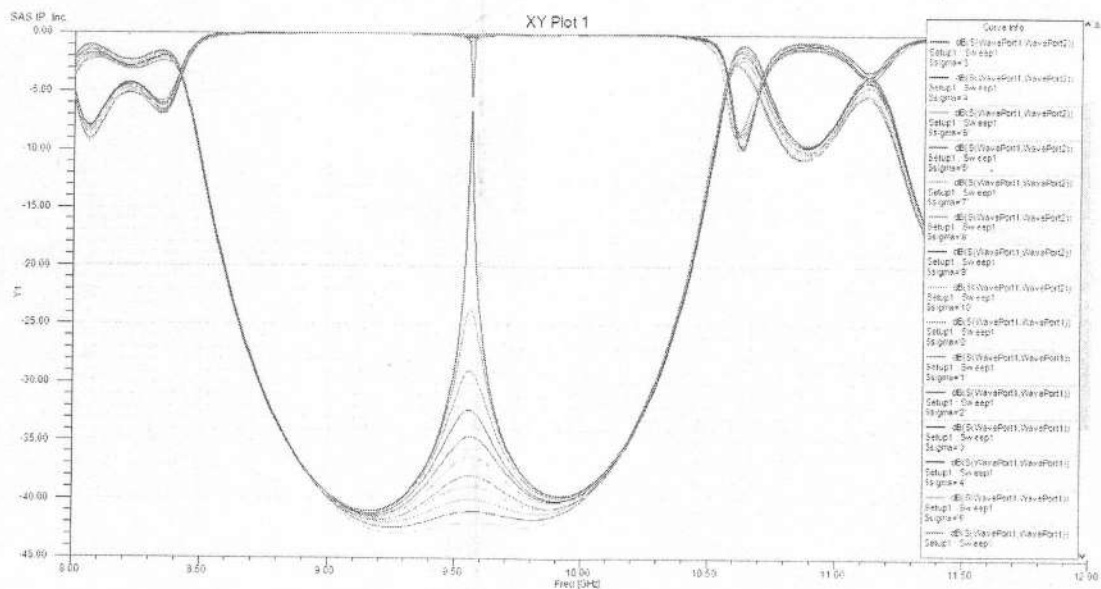


Рис. 13. Частотные зависимости коэффициента отражения и прохождения фотонного кристалла, состоящего из 5 отрезков волноводно-щелевой линии передачи при наличии нарушения в виде измененной длины центрального отрезка $l = 15$ мм, и полупроводниковой $n-i-p-i-n$ -структурой, расположенной в середине щели центрального отрезка волноводно-щелевой линии при различных значениях удельной электропроводности управляющего элемента $\sigma = 0..10$ См/м; $L = 23$ мм; $d = 10$ мм; $s = 4.0$ мм; $h = 1.0$ мм; $\epsilon = 9.6$.

Как следует из рисунка 13 изменение значения удельной электропроводности $n-i-p-i$ - n -структуры приводит к изменению коэффициента пропускания на частоте 9.55 ГГц, соответствующей «окну прозрачности», в диапазоне значений от -41 дБ до -6 дБ.

Таким образом, из полученных результатов следует, что расчётный динамический диапазон изменения коэффициента пропускания на частоте 9.55 ГГц составляет 35 дБ при прямых потерях 6 дБ.

В четвертом разделе приведены результаты исследования брэгговских гетероструктур на волноводно-щелевых линиях.

Представлена теоретическая модель, описывающая взаимодействие электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с брэгговскими гетероструктурами на волноводно-щелевых линиях, и позволяющая рассчитывать коэффициенты отражения и прохождения СВЧ-излучения.

Разработана модель такой структуры, на основе численного моделирования с использованием метода конечных элементов в САПР HFSS Ansoft и экспериментально проведено исследование СВЧ-характеристик созданной структуры.

Проведено численное моделирование и экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик коэффициентов отражения и прохождения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, взаимодействующего с такой брэгговской гетероструктурой и исследованы особенности возникновения таммовских состояний на границе двух брэгговских структур, выполненных в виде волноводно-щелевых линий передачи.

Проводя аналогию между фотонными и реальными кристаллами, соединение двух фотонных кристаллов, имеющих различные размеры элементарных ячеек, можно трактовать как фотонную брэгговскую гетероструктуру. При этом слой, соединяющий фотонные кристаллы, играет роль интерфейсного слоя.

В качестве периодически повторяющихся элементов СВЧ фотонного кристалла могут быть использованы отрезки различных типов линий передачи.

Общий вид исследуемой брэгговской СВЧ-структуры на основе волноводно-щелевых линий, составленной из двух подсистем, имеющих различные размеры элементарных ячеек, представлен на рис. 14. В центре поперечного сечения прямоугольного волновода H -диапазона (22.86 мм × 10.16 мм) в E -плоскости размещались две группы периодически расположенных отрезков щелевой линии передачи, образующих в совокупности брэгговскую гетероструктуру.

Щелевая линия первой подсистемы брэгговской гетероструктуры выполнена на поликоровой (Al_2O_3 , $\varepsilon = 9,6$) пластине длиной $L_1 = 15$ мм, шириной 10.16 мм и толщиной 1 мм. На одну сторону пластины было нанесено золотое покрытие толщиной 0.01 мм, ширина щели в покрытии составляла $s = 4.0$ мм. Отрезки первой подсистемы волноводно-щелевой линии передачи разделялись отрезками регулярного волновода длиной $d_1 = 10$ мм. Длина отрезков волноводно-щелевой линии второй подсистемы брэгговской гетероструктуры составляла $L_2 = 13$ мм, а длина отрезков регулярного волновода $d_2 = 15$ мм. Каждая из подсистем брэгговской гетероструктуры состояла из четырех отрезков щелевой линии.

Длины отрезков волноводно-щелевой линии передачи и регулярных отрезков волновода каждой из двух брэгговских структур были выбраны таким образом, чтобы частоты, соответствующие серединам запрещенных зон одной и другой брэгговских структур, максимально совпадали. При этом вследствие различной ширины запрещенных зон этих структур наблюдалось лишь их частичное перекрытие в частотной области.

Спектры пропускания для каждой из двух подсистем брэгговской гетероструктуры в отдельности представлены на рис. 15, а.

Были измерены и рассчитаны АЧХ фотонной брэгговской гетероструктуры, составленной из двух последовательно соединенных брэгговских структур, имеющих различные размеры элементарных ячеек.

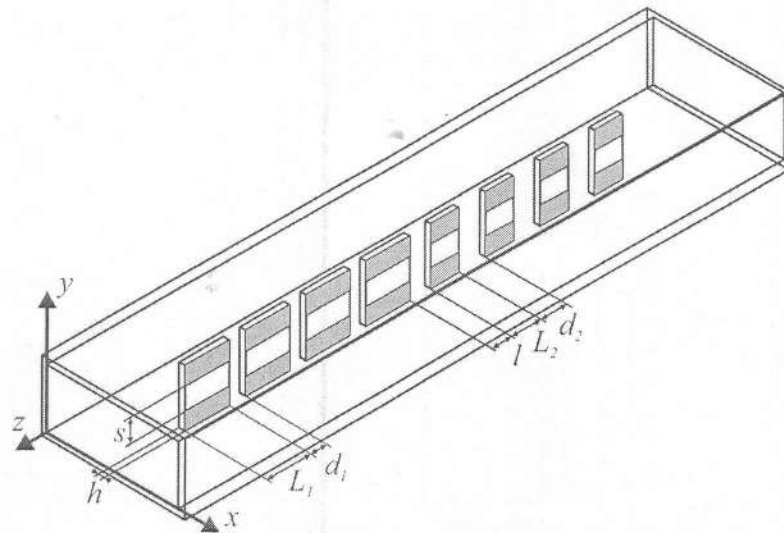


Рис.14. Модель гетероструктуры, состоящей из двух брэгговских структур на основе волноводно-щелевых линий передачи, имеющих различные размеры элементарных ячеек. $L_{1,2}$ – длины отрезков волноводно-щелевой линии передачи; $d_{1,2}$ – длины регулярных отрезков волновода; h – толщина подложки волноводно-щелевой линии, s – ширина щели, l – длина регулярного отрезка волновода (интерфейса). $L_1 = 13$ мм; $d_1 = 15$ мм; $L_2 = 15$ мм; $d_2 = 10$ мм; $s = 4.0$ мм; $h = 1.0$ мм; $\epsilon = 9.6$.

Как следует из результатов эксперимента и расчета, при длине l регулярного отрезка волновода, соединяющего две брэгговские структуры и играющего роль интерфейсного слоя, равной длине регулярных отрезков первой или второй брэгговской структуры, АЧХ фотонной брэгговской гетероструктуры характеризуется наличием запрещенной зоны с коэффициентом пропускания, достигающим -45 дБ (см. кривые 1 на рис. 15, б). При этом на АЧХ брэгговской гетероструктуры в запрещенной зоне не наблюдался пик коэффициента прохождения электромагнитной волны, связанный с прохождением электромагнитной волны через (интерфейс) таммовское состояние.

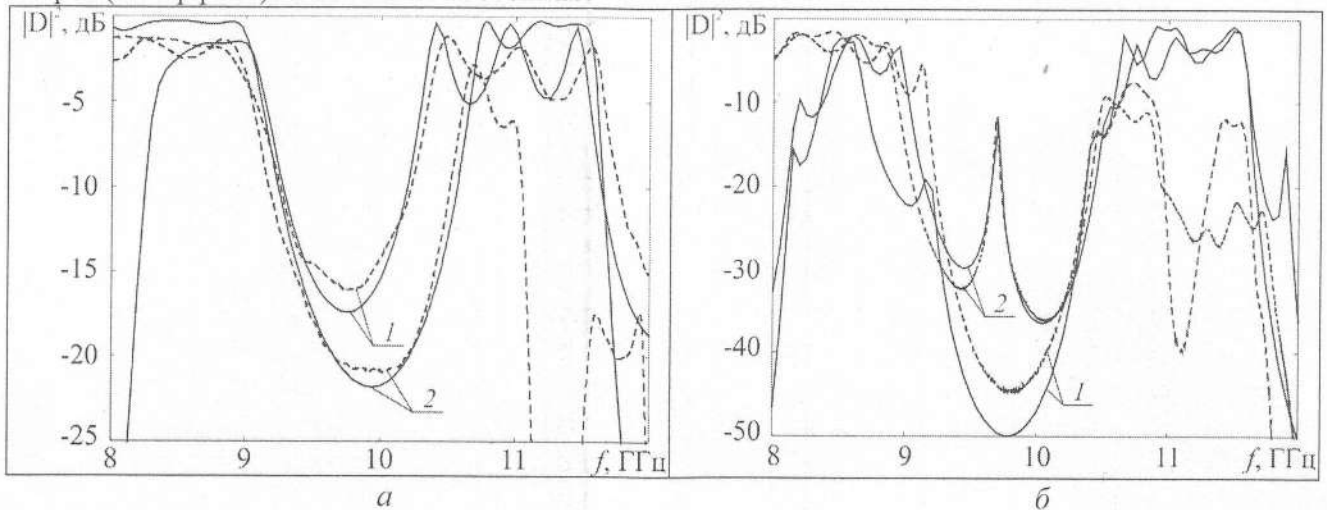


Рис. 15. Экспериментальные (штриховые кривые) и расчетные (сплошные кривые) частотные зависимости коэффициентов прохождения $|D|^2$: а — для двух отдельных подсистем с размерами элементов: кривая 1 – $L_1 = 13$ мм; $d_1 = 15$ мм; кривая 2 – $L_2 = 15$ мм; $d_2 = 10$ мм; $s = 4.0$ мм; $h = 1.0$ мм; $\epsilon = 9.6$; б — для брэгговской гетероструктуры, составленной из двух последовательно соединенных брэгговских структур, состоящих из 4 отрезков волноводно-щелевой линии передачи, при различной длине интерфейсного слоя l , мм: 1 – 1 мм, 2 – 10 мм.

При определенной длине l интерфейсного слоя в запрещенной зоне фотонной брэгговской гетероструктуры, состоящей из двух последовательно соединенных брэгговских структур, возникал пик прохождения электромагнитной волны. Так при длине l , равной 1 мм, пик прохождения возникал в середине запрещенной зоне (кривые 2 на рис. 15, б).

С целью выяснения особенностей локализации таммовских состояний на интерфейсной границе брэгговской гетероструктуры был выполнен расчет распределения напряженности электрического поля электромагнитной волны на частоте $f_{\text{Тамм}}$,

соответствующей пику коэффициента прохождения электромагнитной волны через (интерфейс) таммовское состояние (см. рис. 15, б).

Результаты расчета напряженности электрического поля электромагнитной волны демонстрируют чередование узлов и пучностей внутри брэгговской гетероструктуры вдоль направления ее распространения (см. рис. 16, а). При этом наблюдается локализованная на интерфейсной границе двух последовательно соединенных брэгговских структур пучность распределения электрического поля электромагнитной волны с максимальной напряженностью.

Анализ распределения поля в плоскостях поперечного сечения волновода, проходящих через пучности стоячей волны на отрезках волноводно-щелевой линии первой и второй последовательно соединенных брэгговских структур и через пучность на интерфейсной границе, свидетельствует о существенной локализации поля в середине широкой стенки волновода. При этом характер зависимости $E(x)$ существенно отличается от синусоидального, характерного для волны H_{10} (см. рис. 16, б).

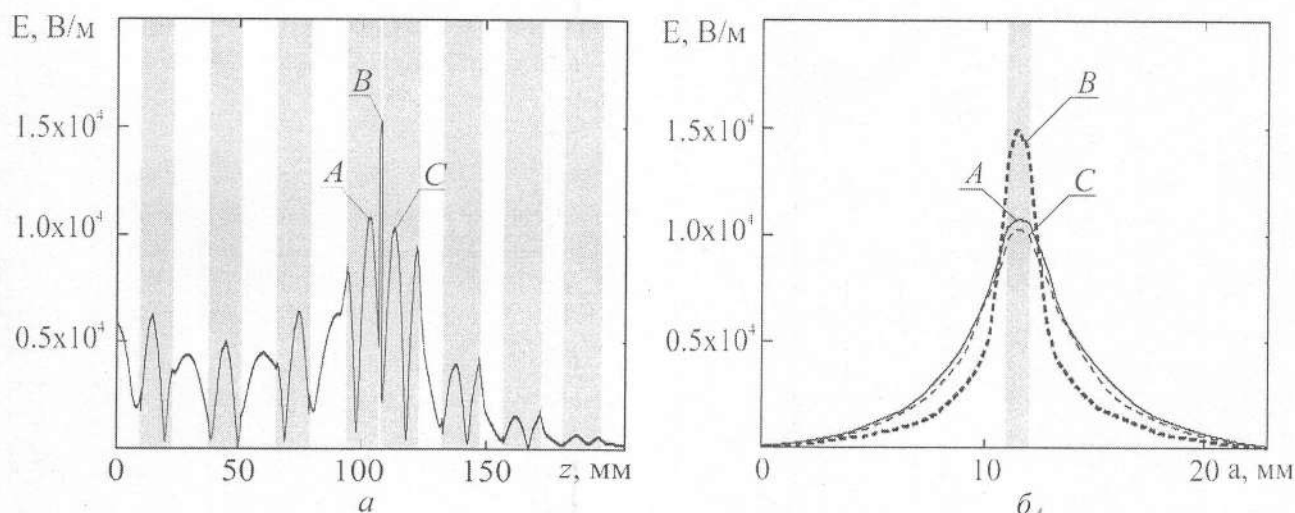


Рис. 16. Распределение напряженности электрического поля электромагнитной волны внутри брэгговской гетероструктуры на частоте, соответствующей пику коэффициента прохождения электромагнитной волны через (интерфейс) таммовское состояние: а — вдоль направления распространения электромагнитной волны; б — в плоскостях поперечного сечения волновода (А, В, С) на рис. 2, а. $f_{\text{Тамм}} = 9.686$ ГГц. Темным цветом на рис. 2, а отмечены области, которые заняты отрезками волноводно-щелевой линии передачи, светлым обозначены области, занятые регулярными отрезками волновода

Сравнение результатов эксперимента и расчетных данных свидетельствует об их хорошем количественном совпадении.

Экспериментальное исследование возникновения таммовских поверхностных состояний в фотонном кристалле, составленном из двух последовательно соединенных брэгговских структур, имеющих разные размеры элементарных ячеек и выполненных в виде волноводно-щелевых линий передачи показало, что таммовские поверхностные состояния на границе двух брэгговских структур возникают лишь при наличии на этой границе интерфейсного элемента с характеристиками, отличными от характеристик как одной, так и другой брэгговских структур.

В заключении приведены основные результаты и сформулированы выводы научной квалификационной работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Теоретически обоснована и экспериментально показана возможность создания нового типа брэгговской структуры в СВЧ-диапазоне на основе чередующихся отрезков волноводно-щелевой линии передачи и регулярных отрезков волновода.
2. Показано, что амплитудно-частотные характеристики брэгговской структуры в диапазоне частот 8...12 ГГц, характеризующиеся наличием разрешенных и запрещенных зон в

- указанном диапазоне частот, смещаются в область низких частот как с увеличением толщины и диэлектрической проницаемости подложки, так и ширины щели.
3. Установлен характер распределения напряженности электрического поля в стоячей волне, возникающей в брэгговской структуре, в качестве элементов которой используются отрезки волноводно-щелевой линии передачи.
 4. Описано теоретически и установлено экспериментально возникновение резонансной особенности – «окна прозрачности» в запрещенной зоне исследуемой брэгговской структуры при внесении нарушения в виде измененной длины центрального отрезка регулярного волновода, измененной длины центрального отрезка волноводно-щелевой линии передачи, а также измененной ширины щели центрального отрезка волноводно-щелевой линии передачи.
 5. Проведен расчет эффективной удельной электропроводности $n-i-p-i-n$ -структуры при различных уровнях инжекции неравновесных носителей заряда, с целью использования её в качестве управляющего элемента волноводных структур, обладающих как запрещенной, так и разрешённой зоной пропускания.
 6. Показана возможность эффективного управления характеристиками резонансной особенности, в запрещенной зоне исследуемой структуры с использованием $n-i-p-i-n$ -структуры. Величина динамического диапазона регулировки коэффициента пропускания в резонансной особенности, с помощью $n-i-p-i-n$ -структуры, помещённой в щель центрального отрезка волноводно-щелевой линии передачи достигает 35 дБ при уровне потерь пропускания от 6 дБ.
 7. Экспериментально исследовано возникновение таммовских поверхностных состояний в фотонном кристалле, составленном из двух последовательно соединенных брэгговских структур, имеющих разные размеры элементарных ячеек и выполненных в виде волноводно-щелевых линий передачи.
 8. Показано, что таммовские поверхностные состояния на границе двух брэгговских структур возникают лишь при наличии на этой границе интерфейсного элемента с характеристиками, отличными от характеристик как одной, так и другой брэгговских структур.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

1. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Мерданов М.К., Пономарев Д.В., Рязанов Д.С. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2015. Т. 18. №3, часть 2. С. 6–19.
2. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Рязанов Д.С. // Радиотехника и электроника. 2016. Том. 61. № 4. С. 321–326.

В других изданиях

3. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Рязанов Д.С. Таммовские состояния в брэгговских структурах на волноводно-щелевых линиях / Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: материалы Всерос. научной школы-семинара / под ред. проф. Д. А. Усанова. – Саратов: изд-во Саратовский источник, 2017. С. 90–93.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гуляев Ю.В., Лагарьков А.Н., Никитов С.А. Метаматериалы: фундаментальные исследования и перспективы применения// Вестник Российской Академии Наук. 2008. Т. 78, № 5. С. 438–457.
2. Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics// Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 58, no. 20, pp. 2059—2062.

3. Воронов М.М., Ивченко Е.Л., Кособукин В.А., Поддубный А.Н. Особенности спектров отражения и поглощения одномерных резонансных фотонных кристаллов// ФТТ. 2007. Т. 49, вып. 9. С. 1709–1718.
4. Голубев В.Г., Кособукин В.А., Курдюков Д.А., Медведев А.В., Певцов А.Б. Фотонные кристаллы с перестраиваемой запрещенной зоной на основе заполненных и инвертированных композитов опал—кремний// ФТП. 2001. Т. 35, вып. 6. С. 710–713.
5. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Куликов М.Ю. Фотонные структуры и их использование для измерения параметров материалов// Известия вузов. Электроника. 2008. № 5. С. 25—32.
6. 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.
7. Nagesh E.D.V., Subramanian V., Sivasubramanian V. & Murthy V.R.K.// Microwave Propagation in a Square Lattice Using Different Dielectric Materials for Device Applications// Ferroelectrics. 2005. Vol. 327, issue 1. pp. 11–17.