

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

Кафедра физики твёрдого тела

ТАММОВСКИЕ СОСТОЯНИЯ В БРЭГГОВСКИХ СТРУКТУРАХ
СВЧ-ДИАПАЗОНА НА ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВЫХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ

АВТОРЕФЕРАТ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ
МАГИСТРА

Студента 2 курса 201 группы
направления (специальности) 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»
код и наименование направления (специальности)
факультета нано- и биомедицинских технологий

Комарова Андрея Александровича

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

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

доцент, к.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

Д.В. Пономарев

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой
профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

Д.А. Усанов

инициалы, фамилия

Саратов 2018

ВВЕДЕНИЕ

На данный момент одной из наиболее активно развивающихся областей науки является направление по созданию и исследованию свойств метаматериалов, в свою очередь представляющих собой искусственно созданные гетерогенные среды, в которых геометрические размеры и электрофизические параметры специально подобранных составляющих элементов структуры периодически изменяются вдоль одного или нескольких пространственных направлений. К метаматериалам, как правило, относится целый класс фотонных кристаллов – искусственно созданных периодических структур с периодом, сравнимым с длиной волны распространяющегося в них электромагнитного излучения. По аналогии с реальными кристаллами, в данных фотонных кристаллах имеют место быть разрешенные и запрещенные для распространения электромагнитного излучения частотные области, по-другому называемые запрещенными зонами.

При рассмотрении одномерных искусственно созданных периодических структур, называемых одномерными фотонными кристаллами, на границе фотонного кристалла с большой вероятностью возможна локализация электрического поля при контакте фотонного кристалла с однородным слоем, которая характеризуется отрицательной диэлектрической проницаемостью или отрицательной магнитной проницаемостью. При этом на амплитудно-частотных характеристиках фотонного кристалла, контактирующего с однородным слоем, наблюдается в запрещенной зоне узкий пик коэффициента прохождения электромагнитной волны [1, 2]. Возникновение локализованных состояний на краях фотонного кристалла, который ограничен пленкой нанокompозита, в виде нанопористого серебра, описано авторами [3].

Локализованные состояния могут таким же образом встречаться на границе двух соединенных фотонных кристаллов, у которых с различные размеры элементарных ячеек при перекрытии запрещенных зон этих двух кристаллов [1, 4]. Существование локализованного состояния на границе между двумя фотонными кристаллами экспериментально наблюдалось и подтвердилось авторами [2, 5].

Уникальные свойства фотонных кристаллов, обусловленные резонансным взаимодействием электромагнитной волны с периодической структурой, позволяют создавать на их основе новые типы структур и устройств с управляемыми параметрами. Возможность управления и контролирования амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) СВЧ фотонных кристаллов открывает перспективу расширения их области применения. Такая возможность рассматривалась, в частности, в [6]. Авторы [6] взяли за основу конструкцию СВЧ фотонного кристалла, используемую в [7] в качестве фильтра. В качестве материала образующих фотонный кристалл слоев использовались пенопласт, поликор (Al_2O_3) (толщиной 1 мм) и поликристаллический железо-итриевый гранат (ЖИГ) (толщиной 1 мм). Управление АЧХ магнитным полем в рассматриваемых структурах происходит вследствие увеличения действительной части магнитной восприимчивости феррита с ростом магнитного поля. Это приводит к росту концентрации СВЧ поля в феррите и увеличению фазового сдвига волны при ее прохождении через ферритовую пластину и, как следствие, сдвигу амплитудно-частотных характеристик (АЧХ).

В [8] показана возможность создания волноводного фотонного кристалла с перестраиваемым частотным положением окна прозрачности, связанного с нарушением периодичности в фотонном кристалле, и управляемым с помощью *p-i-n*-диодов величиной затухания в этом окне. Был создан 11-слойный СВЧ фотонный кристалл, предназначенный для работы в 3-сантиметровом

диапазоне длин волн, представляющий собой 11 чередующихся слоев поликора толщиной 1 мм и пенопласта толщиной 12 мм. Нарушение периодичности обеспечивалось использованием в качестве шестого слоя пластины из пенопласта. Для реализации управления величиной пропускания в полосе прозрачности использовалась $p-i-n$ -диодная матрица, которая включалась в волноводный тракт совместно с фотонным кристаллом (Рис.1).

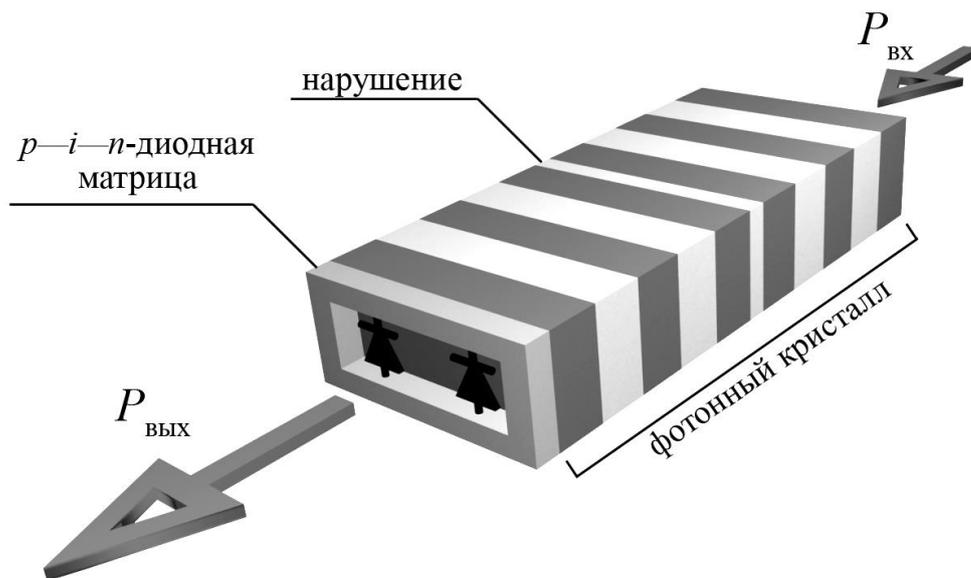


Рис. 1. Расположение фотонного кристалла и $p-i-n$ -диодной матрицы

К матрице $p-i-n$ -диодов прикладывалось управляющее напряжение, регулируемое в диапазоне 0–700 мВ. Матрица $p-i-n$ -диодов в отсутствие напряжения смещения вносит слабое возмущение в фотонный кристалл, и его характеристики остаются практически неизменными. С увеличением напряжения смещения это возмущение нарастает в связи с обогащением i -области носителями заряда, и характерное для фотонного кристалла резонансное пропускание уменьшается. Из приведенных результатов следует, что использование СВЧ фотонного кристалла позволяет создать СВЧ переключатель с электрически регулируемыми характеристиками от -

1.5 до –25 дБ при изменении напряжения смещения на *p-i-n*-диодах от 0 до 700 мВ.

Также возможно реализовать новые высокочувствительные методы измерения параметров материалов. В настоящее время разработано большое число методов для определения электрофизических параметров веществ в СВЧ-диапазоне. Особенную роль эти методы измерения, как правило, играют при исследовании материалов и структур, которые используются при создании приборов СВЧ электроники, так как информация, полученная с помощью низкочастотных методов, при переходе в СВЧ диапазон может оказаться недостаточной для успешного конструирования СВЧ устройства с первоначально заданными характеристиками.

С помощью СВЧ методов измерения с высокой точностью могут быть определены удельная проводимость, диэлектрическая проницаемость, а также магнитная проницаемость материала. Также время жизни, подвижность и эффективная масса носителей заряда. Скорость поверхностной рекомбинации, толщина слоев и другие параметры могут быть определены также с помощью данных СВЧ методов. При этом оказывается возможным проводить неразрушающее измерение нескольких параметров СВЧ структуры на одной установке с использованием одного образца.

Различные направления практического использования уникальных характеристик СВЧ-фотонных кристаллов рассматривались в [9]. Одно из распространенных названий СВЧ фотонных кристаллов – структуры с запрещенной зоной. В то же время известно, что, наряду с полосой запирания (аналогом запрещенной зоны в полупроводниках), у СВЧ фотонных кристаллов существует полоса частот, в которой волна распространяется, практически не затухая. Авторами [10] было предложено использовать это свойство для создания волноводных широкополосных

согласованных нагрузок. Проблема конструирования таких нагрузок остается одной из актуальных задач СВЧ-радиоэлектроники и в настоящее время. Согласованные СВЧ-нагрузки широко применяются как самостоятельно, так и в качестве элементов сложных функциональных устройств: направленных ответвителей, сумматоров, измерителей мощности, измерительных мостов, СВЧ-фильтров и т. д [11,12].

В работах [13, 14] приведены результаты исследований частотных зависимостей коэффициентов отражения электромагнитного излучения в одномерных фотонных кристаллах, которые содержат, наряду с периодически изменяющимся диэлектрическим заполнением, нанометровые металлические слои. Для изучения возможности использования одномерных фотонных кристаллов в качестве согласованных волноводных нагрузок было проведено компьютерное моделирование. При расчете коэффициентов отражения R и прохождения D электромагнитной волны использовалась матрица передачи волны между областями с разными значениями постоянной распространения электромагнитной волны, как это и было подробно описано и изучено в [14, 15, 16]. В результате компьютерного моделирования в работе [17] была показана возможность создания согласованных волноводных нагрузок в восьмимиллиметровом и трехсантиметровом диапазонах длин волн.

Целью данной магистерской работы является разработка брэгговской структуры, нахождение и исследование локализованных (таммовских) состояний и характеристик брэгговской сверхвысокочастотной структуры на волноводно-щелевых линиях передачи, а также управление характеристиками и исследование возможностей изменения параметров фотонных кристаллов на основе волноводно-щелевых линий передачи.

2 Теоретическое исследование СВЧ фотонных кристаллов на основе волноводно-щелевых линий передачи

Исследования были проведены при помощи системы электродинамического моделирования и проектирования HFSS.

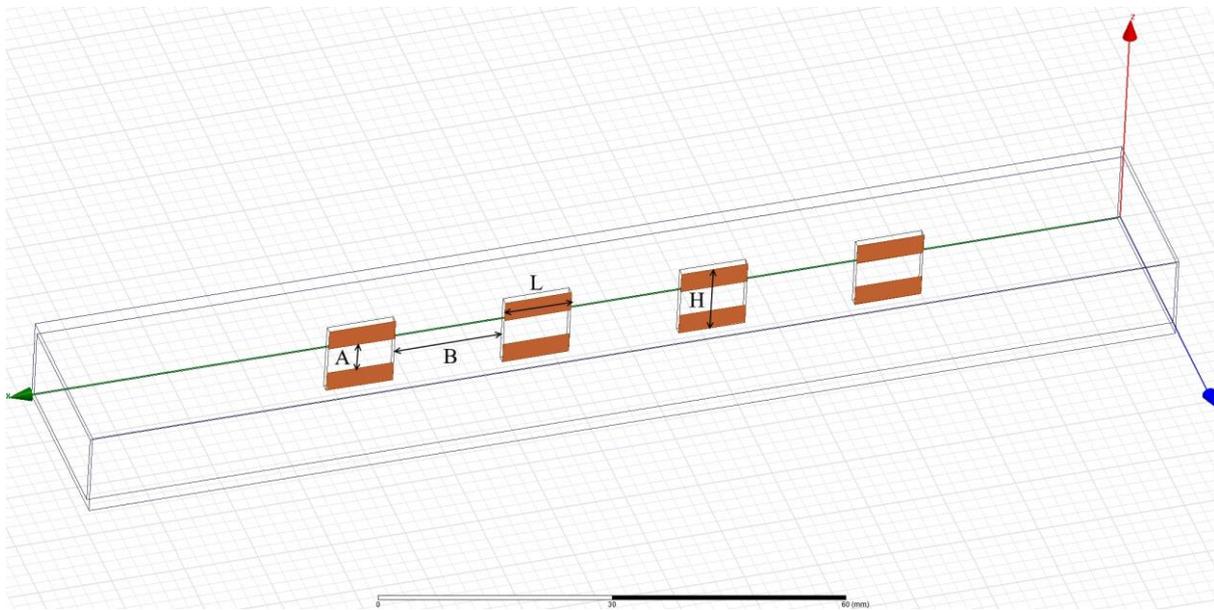


Рис. 2. Модель фотонного кристалла на основе волноводно-щелевой линии передачи, состоящая из 4 пластин. L - длина поликоровой подложки 9 мм; B - длина отрезков регулярного волновода 15 мм; H - ширина поликоровой подложки 10 мм; A - ширина щели 4 мм. Размеры волновода 23x10 мм.

В данном случае использовалась и исследовалась частотная зависимость коэффициентов отражения и прохождения, структуры состоящей из 4 пластин длиной 9 мм, с длиной отрезков регулярного волновода 15 мм, покрытием из алюминия, толщиной 0.012 мм, шириной щели 4 мм, без нарушения периодичности фотонного кристалла.

Из результатов, представленных на рисунках АЧХ, при использовании данной модели следует вывод: при увеличении расстояния между пластинами, не нарушая периодичности структуры, возникает смещение амплитудно-частотной характеристики в область низких частот и увеличение запрещенной

зоны в этой области. Данная картина подтверждает результаты, показанные ранее в работах на подобную тему.

Полученные результаты, представленные на рисунках АЧХ говорят о том, что при изменении длины поликоровой подложки (пластины) возникает похожая закономерность в смещении амплитудно-частотных характеристик в область низких частот и увеличении запрещенной зоны. Таким образом, наблюдающаяся закономерность смещения амплитудно-частотных характеристик аналогична закономерности представленной на рисунках.

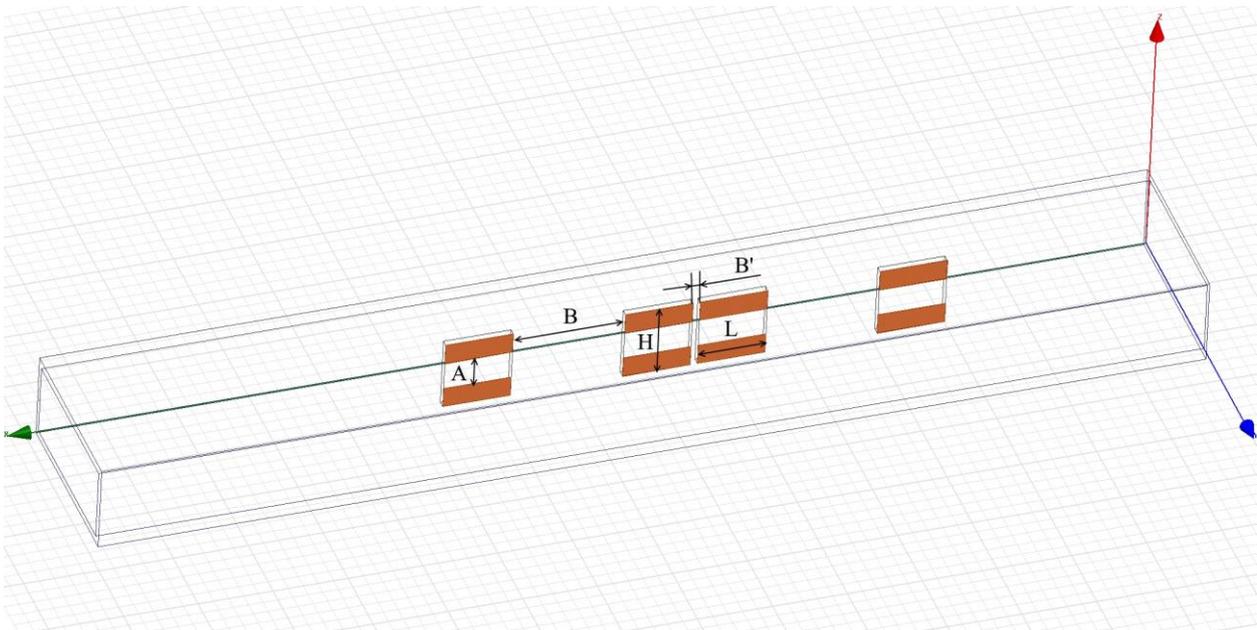


Рис. 3. Модель фотонного кристалла на основе волноводно-щелевой линии передачи. L - длина поликоровой подложки 9 мм; B - длина отрезков регулярного волновода 15 мм; H - Ширина поликоровой подложки 10 мм; A - ширина щели 4 мм, B' - длина центрального расстояния 1 мм.; Размеры волновода 23x10мм.

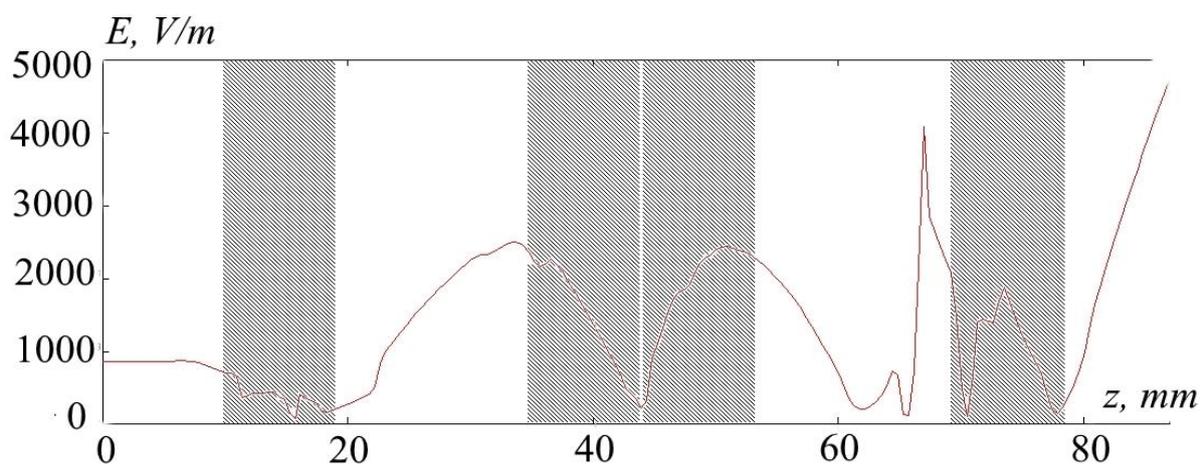


Рис. 4. Распределение напряженности электрического поля электромагнитной волны внутри фотонного кристалла вдоль направления ее распространения при длине центрального расстояния между пластинами $B' = 0.4$ мм на частоте 7.1 GHz. Серым цветом отмечены области, которые заняты отрезками волноводно-щелевой линии передачи, светлым обозначены области, занятые регулярными отрезками волновода

На рис. 4 представлены результаты расчета напряженности электрического поля электромагнитной волны внутри фотонного кристалла вдоль направления ее распространения (вдоль оси z) в плоскости, проходящей через середину широкой стенки волновода.

Анализ распределения напряженности электрического поля электромагнитной волны внутри СВЧ-фотонного кристалла вдоль направления ее распространения позволяет сделать вывод о том, что на частотах прозрачности фотонного кристалла внутри его структуры реализуется режим стоячей волны с ярко выраженными узлами и пучностями.

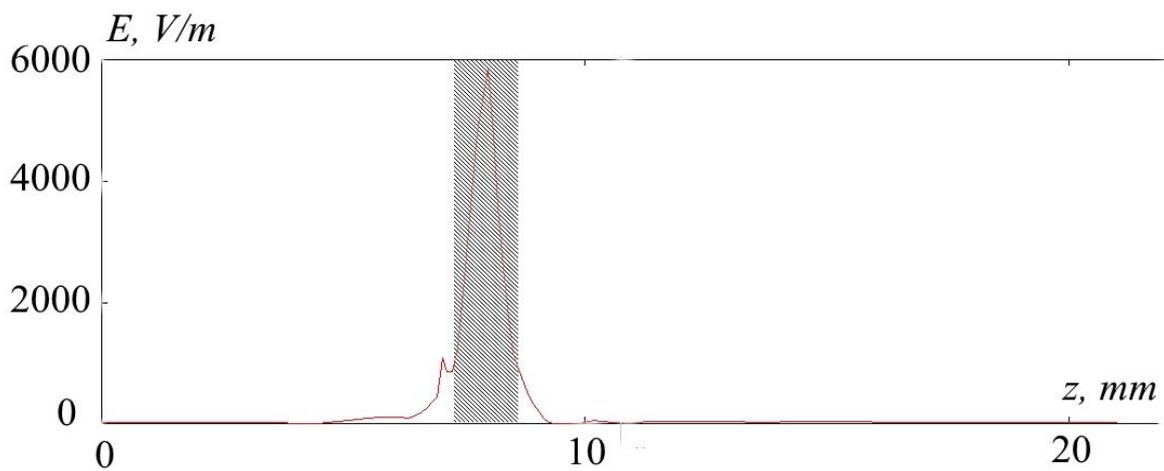


Рис. 5. Распределение напряженности электрического поля электромагнитной волны внутри фотонного кристалла в поперечной плоскости волновода при длине центрального расстояния между пластинами $B' = 0.4$ мм и частоте 7.1 GHz. Серым цветом отмечены области, которые заняты отрезками волноводно-щелевой линии передачи, светлым обозначены области, занятые регулярными отрезками волновода

Из результатов, показанных на рис. 5 можно отметить, что максимум напряженности электрического поля в плоскости поперечного сечения волновода располагается внутри подложки, при этом характер зависимости $E(x)$ существенно отличается от синусоидального, характерного для волны H_{10} .

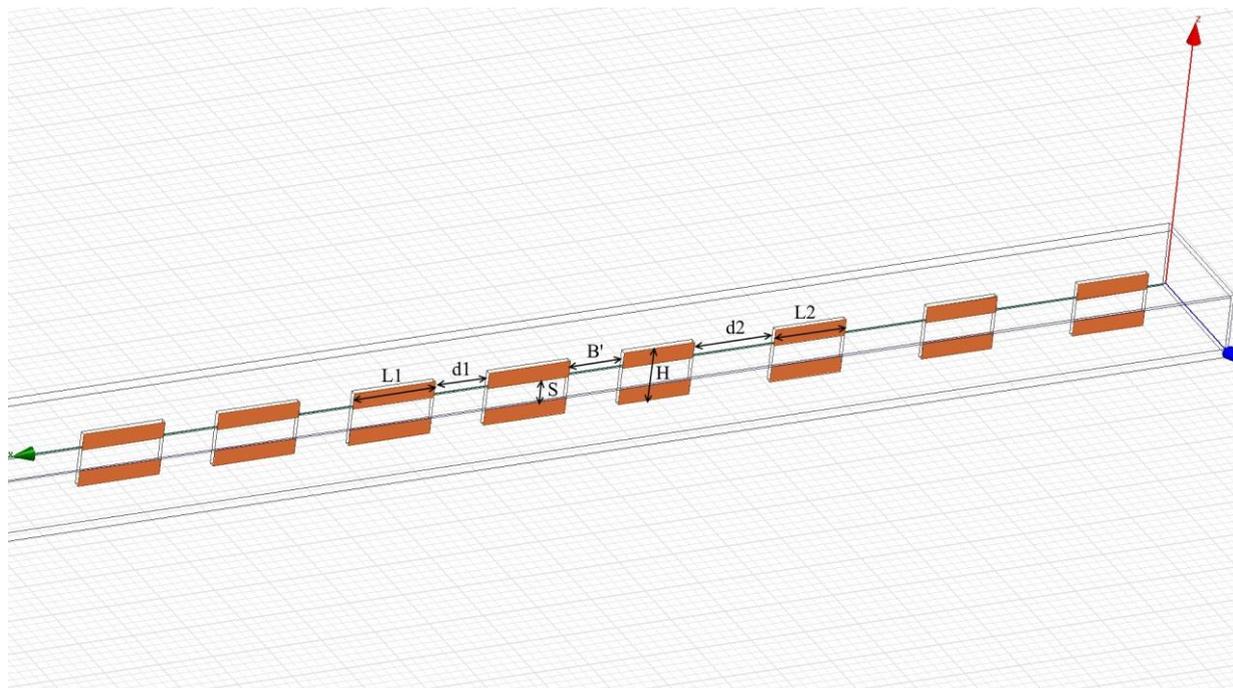


Рис. 6. Модель фотонного кристалла, состоящая из двух брэгговских структур на основе волноводно-щелевых линий передачи, имеющих различные размеры платин. $L_{1,2}$ – длины отрезков волноводно-щелевой линии передачи (13 мм, 15 мм); $d_{1,2}$ – длины регулярных отрезков волновода (10 мм, 15 мм); H – толщина подложки волноводно-щелевой линии (10 мм), S – ширина щели (4 мм), B' – длина нарушения регулярного отрезка волновода.; Размеры волновода 23x10 мм.

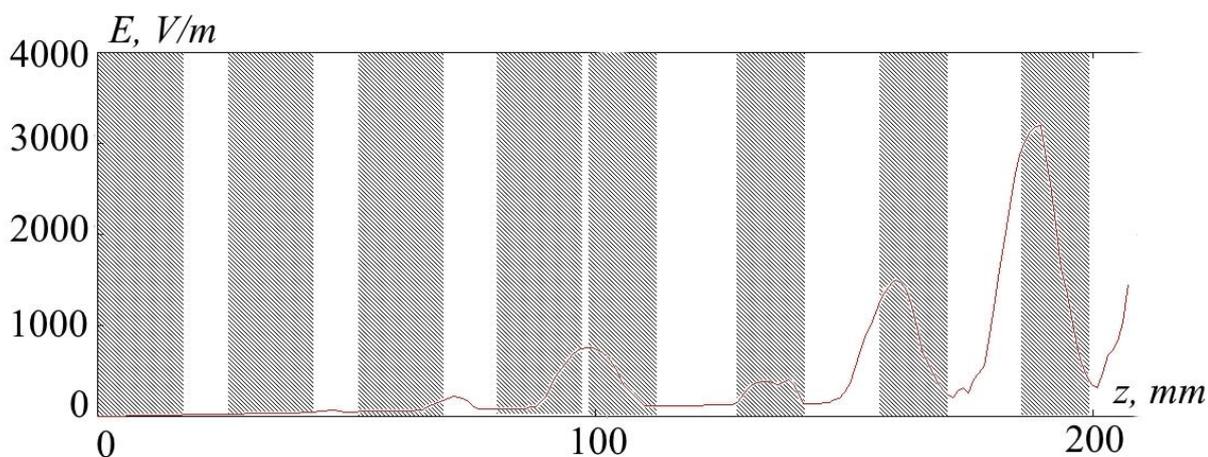


Рис. 7. Распределение напряженности электрического поля электромагнитной волны внутри фотонного кристалла в продольной плоскости волновода при длине центрального расстояния между пластинами $B' = 1$ мм на частоте $8,73\text{GHz}$. Серым цветом отмечены области, которые заняты отрезками волноводно-щелевой линии передачи, светлым обозначены области, занятые регулярными отрезками волновода

Распределение напряженности электрического поля, представленное на рис. 7, также говорит о возникновении внутри фотонного кристалла вдоль направления ее распространения и в поперечной плоскости волновода узлов и пучностей, а на частотах прозрачности фотонного кристалла внутри его структуры реализуется режим стоячей волны.

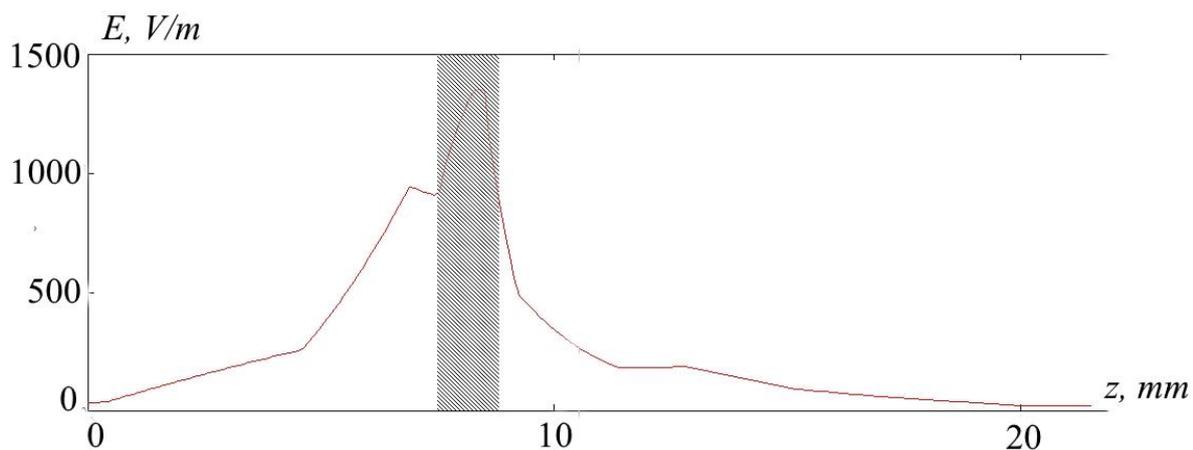


Рис. 8. Распределение напряженности электрического поля электромагнитной волны внутри фотонного кристалла в поперечной плоскости волновода(в пластине) при длине центрального расстояния между пластинами $B' = 1$ мм на частоте $8,73 GHz$. Серым цветом отмечены области, которые заняты отрезками волноводно-щелевой линии передачи, светлым обозначены области, занятые регулярными отрезками волновода

Распределение поля, представленное на рис. 8, аналогично картине поля представленной на рис. 5. Отсюда следует вывод, что фотонные таммовские состояния возникают в двойной брэгговской структуре, при наличии нарушения периодичности на частоте $8,73 GHz$.

3 Экспериментальное исследование СВЧ фотонных кристаллов на основе волноводно-щелевых линий передачи

В качестве экспериментальной модели был создан фотонный кристалл, состоящий из отрезков волноводно-щелевых линий передачи, имеющих следующие параметры: толщина поликоровой подложки 1 мм, диэлектрическая проницаемость поликора 9.6, длина пластин поликора 9 мм, толщина алюминиевого слоя 0.012 мм, ширина щели 4 мм.

Частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения получены при помощи векторного анализатора цепей *N5232A Agilent PNA-L Network Analyzer*.

Исследовалась зависимость амплитудно-частотных характеристик для СВЧ фотонного кристалла состоящего из 4 пластин, ширина щели в которой 4 мм., с изменяемой длиной отрезков регулярного волновода.

Результаты эксперимента были сопоставлены с результатами теоретического исследования.

Из результатов эксперимента, представленных на рисунках следует, что созданный фотонный кристалл на основе волноводно-щелевых линий передачи образует разрешенные и запрещенные зоны в диапазоне частот 7–13 GHz. Наблюдается качественное совпадение экспериментально полученных амплитудно-частотных характеристик фотонного кристалла с теоретическими зависимостями, приведенными на рис. 10, 11. Подтверждены выявленные в теоретическом исследовании закономерности изменения: АЧХ фотонного кристалла смещается в низкочастотную область, а также углубляется запрещенная зона.

Наблюдается качественное совпадение экспериментально полученных амплитудно-частотных характеристик фотонного кристалла с теоретическими зависимостями, приведенными на рис. 13, 16. Подтверждены выявленные в

теоретическом исследовании закономерности изменения АЧХ в зависимости от длины нарушенного слоя. Также анализ экспериментального распределения напряженности электрического поля электромагнитной волны внутри СВЧ-фотонного кристалла вдоль направления ее распространения позволяет сделать вывод о том, что на частотах прозрачности фотонного кристалла внутри его структуры реализуется режим стоячей волны с ярко выраженными узлами и пучностями. В СВЧ-фотонном кристалле замечены фотонные таммовские локализованные состояния.

Отличие количественных значений полученных АЧХ и распределения напряжённости электрического поля обусловлено неидеальностью созданной структуры, выражающейся в отличии параметров экспериментальной структуры от принятых в теоретической модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведения выпускной квалификационной работы были получены следующие результаты:

Проведен анализ электродинамических характеристик типичных волноводно-щелевых линий передачи, применяемых в СВЧ-диапазоне.

В среде HFSS построена модель фотонного кристалла в виде волноводно-щелевой линии передачи.

Проведено компьютерное моделирование характеристик фотонного кристалла в виде волноводно-щелевой линии передачи

Проведен анализ амплитудно-частотных характеристик фотонного кристалла в виде волноводно-щелевой линии передачи при различных длинах пластин, при различной длине расстояния между пластинами, с различными размерами нарушения периодичности СВЧ-фотонного кристалла, различными размерами нарушения в двойной брэгговской структуре, представляющую собой две периодические структуры.

Создан макет фотонного кристалла на основе волноводно-щелевой линии передачи.

Проведено экспериментальное исследование созданного фотонного кристалла в виде волноводно-щелевой линии передачи.

Исследованы амплитудно-частотные характеристики структуры при различной длине поликорковых пластин, расстояния между ними и нарушения волноводно-щелевых линий передачи.

В результате исследования установлено, что созданный фотонный кристалл на основе волноводно-щелевых линий передачи образует разрешенные и запрещенные зоны в диапазоне частот 7-13 GHz. При создании нарушения в виде изменённого расстояния между центральными отрезками щелевых линий, образующих фотонный кристалл, в запрещенной зоне образуется пик пропускания – «окно прозрачности». Подтверждены

выявленные в теоретическом исследовании закономерности изменения АЧХ в зависимости от длины нарушенного слоя.

Впервые было рассчитано распределение электрического поля в СВЧ-фотонном кристалле представленной модели структуры. Экспериментально показано наличие фотонных таммовских локализованных состояний в продольной плоскости волновода в диапазоне частот 7-13 *GHz*. В ходе работы были обнаружены максимумы и минимумы напряженности электрического поля в пределах СВЧ-фотонного кристалла.

Показана возможность управления амплитудно-частотными характеристиками с помощью изменения величины нарушения и исследованы закономерности в процессе изменения различных параметров структуры.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Виноградов А.П., Дорофеев А.В., Мерзликин А.М., Лисянский А.А. Поверхностные состояния в фотонных кристаллах// Успехи физических наук. 2010. Том 180. № 3. С. 249–263.
2. Goto T., Dorofeenko A.V., Merzlikin A. M., Baryshev A.V., Vinogradov A. P., Inoue M., Lisyansky A. A., Granovsky A. B. Optical Tamm States in One-Dimensional Magneto-photonic Structures// Physical Review Letters. 2008. 101 113902 (1)–113902 (3).
3. Bikbaev R.G., Vetrov S.Ya. and Timofeev I.V. The optical Tamm states at the interface between a photonic crystal and nanoporous silver// Journal of Optics. 19 (2017) 015104 (6pp)
4. Kavokin, A. V., Shelykh I. A., and Malpuech G. Lossless interface modes at the boundary between two periodic dielectric structures// Phys. Rev. B. 2005. Vol. 72, p. 233102(1)–233102(4).
5. Belozorov D. P., Girich A., Nedukh S. V., Moskaltsova A. N., Tarapov S. I. Microwave Analogue of Tamm States in Periodic Chain-Like Structures// Progress in Electromagnetics Research Letters. 2014. Vol. 46. P. 7–12.
6. Бритун Н.В., Данилов В.В. Электронное управление параметрами структур с фотонной запрещенной зоной// ПЖТФ. 2003. Т. 29, вып. 7. С. 27–32.
7. Kuriazidou C.A., Contopanagos H.F., Alexopoulos N.G. Monolithic waveguide filters using printed photonic-bandgap materials // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. 2001. V. 49. N. 2. P. 297—306.
8. Волноводные фотонные кристаллы с характеристиками, управляемыми p-i-n-диодами/ Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.В. Абрамов, А.С. Боголюбов, В.С. Скворцов, М.К. Мерданов// Изв.вузов Электроника. 2010. № 1. С. 24—29.
9. Ozbay E., Temelkuran B., and Bayindir M. Microwave applications of photonic crystals// Progress In Electromagnetics Research, 2003. Vol. 41, pp. 185–209.

10. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Абрамов А. В., Боголюбов А. С., Скворцов В. С., Мерданов М. К. Широкополосные волноводные согласованные нагрузки на основе фотонных кристаллов с нанометровыми металлическими слоями // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2009. Т. 52,
11. J. Xelszajn, "Passive and Active Microwave Circuits," John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, 1978.
12. K. A. Lee, Y. Guo, Ph. A. Stimson, K.A. Potter, Jung-Chih Chiao, D.B. Rutledge, "Thin-Film Power-Density Meter for Millimeter Wavelengths," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 39, № 3, pp. 425-428, 1991.
13. Dmitry Usanov, Alexander Skripal, Anton Abramov, Anton Bogolubov, Vladimir Skvortsov, Merdan Merdanov. Measurement of the Metal Nanometer Layer Parameters on Dielectric Substrates using Photonic Crystals based on the Waveguide Structures with Controlled Irregularity in the Microwave Band // Proc. of 37th European Microwave Conference. Munich, Germany. 8–12th October 2007. P. 198–201.
14. Гуляев Ю.В., Никитов С.А. Фотонные и магнитофотонные кристаллы – новая среда для передачи информации // Радиотехника. 2003. №8. С. 26–30.
15. Чаплыгин Ю.А., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С. Методика измерения электропроводности нанометровых металлических пленок в слоистых структурах по спектрам отражения электромагнитного излучения // Известия вузов. Электроника. 2006, № 6, с. 27-35.
16. D.A. Usanov, A.V. Skripal, A.V. Abramov, A.S. Bogolyubov, N.V. Kalinina. Measurements of thickness of metal films in sandwich structures by the microwave reflection spectrum // Proc. of 36rd European Microwave Conference. Manchester, UK. 10–15th September 2006. 509–512.
17. Esaki. L.; Tsu. R. Superlattice and Negative Differential Conductivity in Semiconductors // IBM Journal of Research and Development. 1970. Vol.14, Issue 1. P.61–65.