

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

Кафедра физики твердого тела

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЧ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ  
КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛЛОВ В ВИДЕ СЛОИСТЫХ СТРУКТУР

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса

по направлению 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»  
факультета нано- и биомедицинских технологий

Селивановой Ольги Александровны

Научные руководители

профессор, д.ф.-.м.н.

А.В. Скрипаль

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

доцент, к.ф.-.м.н.

Д.В. Пономарев

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-.м.н.

Д.А. Усанов

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

Саратов 2018

**Введение.** В настоящее время одной из наиболее интенсивно развивающихся областей науки и техники является разработка, создание и исследование метаматериалов. Метаматериалы - это искусственно созданные гетерогенные среды, в которых геометрические размеры, а также электрофизические параметры составляющих элементов периодически изменяются вдоль одного или нескольких пространственных направлений. Интенсивно создаются новые типы структур и устройств с управляемыми параметрами на основе метаматериалов с уникальными свойствами, которые обусловлены резонансным взаимодействием электромагнитной волны с периодической структурой. Одним из типов метаматериалов являются фотонные кристаллы. К ним проявляется огромный интерес, в связи с тем, что при их создании можно добиться уникальных свойств, используя в качестве одного или нескольких слоёв композитные материалы.

Фотонные кристаллы могут применяться в качестве структурных и управляющих элементов различного рода фильтров, усилителей, антенн и резонаторов. Изменяя параметры периодичности и создаваемых нарушений фотонных кристаллов, можно управлять шириной и глубиной фотонной запрещенной зоны, частотным положением ее границ, появлением, а также частотными положениями «окон прозрачности» – частотной области с минимальным значением коэффициента отражения электромагнитной волны. В качестве одного или нескольких слоёв фотонного кристалла можно использовать композитные материалы. Характеристики композитов могут существенно влиять на параметры нарушений, например, увеличивая объемную долю включений, можно управлять положением «окна прозрачности»

Учитывая вышесказанное исследование особенностей взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ диапазона с одномерными волноводными фотонными кристаллами, содержащими композитные слои является актуальным.

*Целью бакалаврской работы являлось* выявление особенностей взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ диапазона с одномерными волноводными фотонными кристаллами, содержащими в качестве нарушения периодичности композитные слои.

Бакалаврская работа содержит 4 главы:

## **1.Критический анализ современного состояния исследований фотонных кристаллов**

1.1 Композитные материалы

1.2 Классификация композитных материалов

1.3 Преимущества и свойства композитных материалов

1.4 Анализ исследований фотонных кристаллов

## **2 Математическая модель взаимодействия электромагнитного излучения свч-диапазона с одномерными волноводными фотонными кристаллами**

2.1 Математическая модель взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с одномерными волноводными фотонными кристаллами на основе матрицы передачи

2.2 Электродинамическая модель взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с одномерными волноводными фотонными кристаллами на основе метода конечных элементов

## **3. Результаты компьютерного моделирования взаимодействия электромагнитного излучения свч-диапазона с одномерными волноводными фотонными кристаллами**

3.1 Результаты компьютерного моделирования спектров отражения и прохождения одномерных волноводных фотонных кристаллов без нарушения периодичности

3.2 Результаты компьютерного моделирования спектров отражения и прохождения одномерных волноводных фотонных кристаллов с нарушением периодичности толщиной 23мм

3.3 Результаты компьютерного моделирования спектров отражения и прохождения одномерных волноводных фотонных кристаллов с нарушением периодичности толщиной 2мм

3.4 Результаты компьютерного моделирования спектров отражения и прохождения одномерных волноводных фотонных кристаллов с нарушением периодичности толщиной 4мм

#### **4. Результаты экспериментального исследования взаимодействия свч-излучения с одномерными фотонными кристаллами на основе композиционных материалов в виде слоистых структур**

4.1 Экспериментальное исследование взаимодействия СВЧ- излучения с одномерным фотонным кристаллом без нарушения периодичности

**1. Критический анализ современного состояния исследований фотонных кристаллов.** Фотонные кристаллы являются разновидностью метаматериаллов, они представляют собой полученные искусственным путем периодические структуры с периодом, сравнимым с длиной распространяющегося в них электромагнитного излучения. В данных структурах создается периодичное изменение электрофизических параметров слоев и их геометрических размеров. В фотонных кристаллах наблюдается чередование запрещенных и разрешенных для распространения электромагнитного излучения частотных диапазонов, в спектрах отражения и пропускания электромагнитного излучения, взаимодействующего с подобными структурами. Как и в реальных кристаллах, частотная область, где запрещено распространение электромагнитной волны, называется фотонной запрещенной зоной.

Когда появляется нарушение периодичности в структуре ФК, которое создается путем изменения геометрических размеров и/или электрофизических параметров слоев, в запрещенной зоне фотонного кристалла появляется узкое «окно прозрачности» – частотная область с минимальным значением коэффициента отражения электромагнитной волны. Форма, а также положение «окна прозрачности» определяется размерами и электрофизическими параметрами создаваемого нарушения периодичности.

Важное свойство фотонных кристаллов – высокая чувствительность частотного положения «окна прозрачности» к изменению параметров нарушения периодичности фотонных кристаллов. При изменении геометрических размеров и/или электрофизических параметров нарушения периодичности происходит частотный сдвиг и изменение формы «окна прозрачности» в фотонной запрещенной зоне периодической структуры. Эта особенность чрезвычайно перспективная при создании методов по определению параметров материалов и веществ, играющих роль нарушения периодичности структуры фотонного кристалла

**1.1 Композитные материалы.** Композитный материал (КМ) – это искусственно созданный неоднородный материал, состоящий из двух или более компонентов с чёткой границей раздела между ними. В большинстве композитных материалов, их компоненты можно разделить на матрицу и включённые в неё наполнители.

**1.2 Классификация композитных материалов.** Всё многообразие композиционных материалов подразделяется по следующим критериям:

- материалу матрицы и наполнителя,
- геометрическим параметрам компонентов,
- структуре и расположению компонентов,
- способу получения.

**1.3 Преимущества и свойства композитных материалов.** Получая новый композитный материал, существует возможность задать ему такие характеристики, которые будут значительно отличаться от первоначальных характеристик традиционного материала это и является главным преимуществом композитного материала. Диэлектрические свойства композитных материалов могут быть описаны величиной эффективной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{\text{eff}}$ .

**1.4 Анализ исследований фотонных кристаллов.** Анализ работ, в которых идут интенсивные исследования фотонных кристаллов СВЧ-диапазона, а также их электродинамических свойств, показывает активный процесс исследований в данной области, который направлен на разработку новых устройств с управляемыми параметрами и улучшение характеристик уже существующих устройств. Наибольший практический интерес для создания фильтров представляют волноводные фотонные кристаллы.

**2. Математическая модель взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с одномерными волноводными фотонными кристаллами.** Для теоретического исследования взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с одномерными волноводными фотонными кристаллами могут применяться матричные методы.

**2.1 Математическая модель взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с одномерными волноводными фотонными кристаллами на основе матрицы передачи.** Коэффициенты отражения  $R$  и пропускания  $D$  электромагнитной волны, взаимодействующей с фотонной структурой, определяются через элементы матрицы передачи  $\mathbf{T}_N$  с помощью формул

$$R = -\frac{\mathbf{T}_N [2,1]}{\mathbf{T}_N [2,2]},$$

$$D = \frac{\mathbf{T}_N [1,1] \cdot \mathbf{T}_N [2,2] - \mathbf{T}_N [1,2] \cdot \mathbf{T}_N [2,1]}{\mathbf{T}_N [2,2]}$$

где

$$\mathbf{T}_N = \begin{pmatrix} \mathbf{T}_N [1,1] & \mathbf{T}_N [1,2] \\ \mathbf{T}_N [2,1] & \mathbf{T}_N [2,2] \end{pmatrix} = \prod_{j=N}^0 \mathbf{T}_{j,(j+1)} = \mathbf{T}(z_{N,N+1}) \cdot \mathbf{T}(z_{N-1,N}) \dots \mathbf{T}(z_{1,2}) \cdot \mathbf{T}(z_{0,1}) \quad (2.3)$$

матрица передачи слоистой структуры, состоящей из  $N$  слоев

**2.2 Электродинамическая модель взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с одномерными волноводными фотонными кристаллами на основе метода конечных элементов.** Для математического моделирования спектров отражения и прохождения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, которое взаимодействовало с одномерным волноводным фотонным кристаллом, и оптимизации геометрических и электрофизических параметров его слоев использовалось программное обеспечение ANSYS HFSS. Основу решения различных задач электродинамики в HFSS представляет метод конечных элементов.

### **3. Результаты компьютерного моделирования взаимодействия электромагнитного излучения свч-диапазона с одномерными волноводными фотонными кристаллами.**

**3.1 Результаты компьютерного моделирования спектров отражения и прохождения одномерных волноводных фотонных кристаллов без нарушения периодичности.** В данном разделе исследовалась 11-слойная структура, представляющая собой чередующиеся нечетные слои поликора ( $Al_2O_3$ ) толщиной 0,45 мм с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 9,6$  и четные слои пенопласта толщиной 15 мм с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 1,04$  в диапазоне 7-13 ГГц

**3.2 Результаты компьютерного моделирования спектров отражения и прохождения одномерных волноводных фотонных кристаллов с нарушением периодичности толщиной 23мм.** Исследована структура, описанная в пункте 3.1, отличающаяся тем, что центральный нарушенный слой имел толщину 23мм. Получены АЧХ коэффициентов отражения и прохождения. Исследовано поведение «окна прозрачности» при изменении толщины нарушенного слоя, поведение ширины запрещенной зоны

**3.3 Результаты компьютерного моделирования спектров отражения и прохождения одномерных волноводных фотонных кристаллов с нарушением периодичности толщиной 2 мм.** Исследован фотонный кристалл с нарушенным слоем, толщиной 2 мм. Показано отсутствие

чувствительности сдвига «окна прозрачности» к изменению эффективной диэлектрической проницаемости, т.к. при такой конфигурации наблюдался минимум поля вдоль нарушенного слоя.

**3.4 Результаты компьютерного моделирования спектров отражения и прохождения одномерных волноводных фотонных кристаллов с нарушением периодичности толщиной 4мм.** Исследован фотонный кристалл с нарушенным слоем, толщиной 4 мм. Такая конфигурация фотонного кристалла позволила с меньшей погрешностью использовать модель «эффективной среды», а именно формулу Бруггемана для определения эффективной диэлектрической проницаемости, а также имела достаточно высокую чувствительность  $\epsilon_{eff}$  к изменению объёмной доли поликора, т.к. при такой конфигурации фотонного кристалла вдоль нарушенного слоя наблюдался максимум поля. Получены АЧХ коэффициентов отражения и прохождения.

**4. Результаты экспериментального исследования взаимодействия СВЧ-излучения с одномерными фотонными кристаллами на основе композиционных материалов в виде слоистых структур**

**4.1 Экспериментальное исследование взаимодействия СВЧ-излучения с одномерным фотонным кристаллом без нарушения периодичности.**

Экспериментально исследовался одномерный волноводный фотонный кристалл, созданный в соответствии с описанной моделью в пункте 3.1 и представляющий собой чередующиеся слои поликора и пенопласта. (Рис. 4.1) Измерение амплитудно-частотных характеристик коэффициентов отражения и пропускания исследуемого фотонного кристалла в трехсантиметровом диапазоне длин волн проводилось с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA-L Network Analyzer N5242A. Получены АЧХ коэффициентов отражения и прохождения для данной структуры. Произведено сравнение полученных экспериментальных данных с результатами компьютерного моделирования. Показана возможность описания слоистых композитных структур моделью «эффективной среды». Подчеркнуто, что данная модель нуждается в корректировке.

## Список использованной литературы

- 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 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.
- 3 Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics// Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 58, no. 20. pp. 2059—2062.
- 4 Yablonovitch E. Photonic Crystals: Semiconductors of Light// Scientific American. 2001. Vol. 285, no. 6. pp. 47–55.
- 5 Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, М.К. Мерданов, В.О. Горлицкий Волноводный фотонный кристалл, выполненный в виде диэлектрических матриц с воздушными включениями Журнал технической физики, 2016, том 86, вып. 2. с. 65-70.
- 6 Мэтьюз Ф. Ролингс Р. Композитные материалы. Механика и технология. Москва: Техносфера, 2004. – С. 16-21.
- 7 Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Горлицкий В.О. Волноводный фотонный кристалл, выполненный в виде диэлектрических матриц с воздушными включениями/ Журнал технической физики, 2016, том 86, вып. 2
- 8 Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.А. Романов Характеристики дефектной моды одномерного СВЧ волноводного фотонного кристалла с металлическим включением в элементе, нарушающем его периодичность/ Журнал технической физики, 2017, том 87, вып. 6

9 Никитов С.А., Гуляев Ю.В., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В.  
// ДАН. 2013. Т. 448. № 1. С. 35–37.

10 Банков С.Е., Курушин А.А., Разевиг В.Д. Анализ и оптимизация СВЧ структур с помощью HFSS. М. (2004). С. 14.