

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твердого тела

**Интерфейсные состояния на границе фотонного
кристалла при его контакте с ограниченной
нанометровой металлической пленкой**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 2 курса 201 группы
направления 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»
факультета нано- и биомедицинских технологий

Приемышевой Ольги Александровны

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

А.В. Скрипаль

доцент, к.ф.-м.н.

Д.В. Пономарев

Зав. кафедрой
профессор, д.ф.-м.н.

А.В. Скрипаль

Саратов 2020

Введение. На сегодняшний день довольно интенсивно развивающейся областью науки является разработка, создание и исследование метаматериалов. Метаматериалы - это искусственно созданные гетерогенные среды, в которых геометрические размеры, а также электрофизические параметры составляющих элементов изменяются периодически вдоль одного или нескольких пространственных направлений. Также активно создаются новые типы структур и устройств на их основе с управляемыми параметрами и с уникальными свойствами, которые обусловлены резонансным взаимодействием электромагнитной волны с периодической структурой. Одним из типов метаматериалов являются фотонные кристаллы. К ним проявляется огромный интерес, потому что при их создании можно добиться уникальных свойств, используя в качестве одного или нескольких слоёв композитные материалы. Также если за ФК разместить металлическую нанометровую пластину можно добиться появления интерфейсных состояний на поверхности фотонного кристалла.. Они еще называются фотонные таммовские состояния.

Фотонные кристаллы могут применяться в качестве структурных и управляющих элементов различного рода фильтров, усилителей, антенн и резонаторов. Изменяя параметры 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.

Учитывая вышесказанное, исследование особенностей положения поверхностных интерфейсных состояний в зависимости от изменения параметров фотонного кристалла при взаимодействии с ним электромагнитного излучения СВЧ диапазона на данный момент является довольно актуальным.

Целью магистерской работы являлось выявление особенностей поведения поверхностных состояний в фотонном кристалле при контакте с нанометровой металлической пленкой при изменении параметров слоев фотонного кристалла, а также самой металлической пленки.

Магистерская 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 Таммовские фотонные состояния

1.5 Анализ исследований фотонных кристаллов

1.6 Анализ исследования таммовских состояний

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 металлической пленки

3.2 Результаты компьютерного моделирования спектров отражения и прохождения одномерного волноводных фотонного кристалла с металлической пленкой и разными диэлектрическими проницаемостями слоев фторопласта

3.3 Результаты компьютерного моделирования спектров отражения и прохождения одномерного волноводного фотонного кристалла с нанометровой металлической пленкой разной толщины

4. Экспериментальное исследование взаимодействия свч-излучения с одномерными фотонными кристаллами

4.1 Экспериментальное исследование взаимодействия СВЧ- излучения с одномерным фотонным кристаллом с нанометровой металлической пленкой

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.

Аналогично тому, как с созданием нарушения кристаллической структуры в реальных кристаллах путем введения примесных атомов возникают донорные или акцепторные уровни в запрещенной зоне, создание нарушения периодичности фотонного кристалла приводит к возникновению в фотонной запрещенной зоне «донорных» и «акцепторных» окон прозрачности, находящихся около верхней и нижней частотных границ фотонной запрещенной зоны соответственно.

При размещении за фотонным кристаллом нанометровой металлической пленки, на границе фотонной запрещенной зоны появляются «окна прозрачности», так называемые интерфейсные состояния, положением которых можно управлять, изменяя параметры фотонного кристалла и самой металлической пленки.

Важное свойство фотонных кристаллов – высокая чувствительность частотного положения «окна прозрачности» к изменению параметров фотонных кристаллов. При изменении геометрических размеров и/или электрофизических параметров 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 четкой 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.

***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 ϵ_{eff} .*

1.3 Таммовские фотонные состояния

Еще в 1932 г. И.Е.Тамм на основе квантовой механики впервые показал, что наряду с известными зонными состояниями электронов в кристалле, у поверхности кристалла могут существовать также состояния электронов совершенно другого типа. Такие состояния электронов обладают дискретным энергетическим спектром и волновыми функциями, экспоненциально затухающими по мере удаления от поверхности в глубину и в сторону внешней среды (вакуума) [17-19]. За прошедшие с тех пор более 90 лет эта теория была сильно развита в отношении методики расчета и анализа проявления поверхностных состояний в различных кристаллах.

***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.

1.4 Анализ исследований таммовских состояний

При рассмотрении одномерных волноводных фотонных кристаллов, на их границе возможна локализация электрического поля при контакте одномерного волноводного фотонного кристалла с однородным слоем, характеризующимся отрицательной диэлектрической проницаемостью или отрицательной магнитной проницаемостью. Такая локализация электрического поля трактуется как поверхностное таммовское состояние в фотонном кристалле. При этом на амплитудно-частотной характеристике одномерного фотонного кристалла, контактирующего с однородным слоем, наблюдается узкий пик коэффициента прохождения электромагнитной волны, так называемое «окно прозрачности», который связан с её прохождением через таммовское состояние.

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 T_N с помощью формул

$$R = -\frac{T_N [2,1]}{T_N [2,2]},$$

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

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 металлической пленки. В данном разделе исследовалась 11-слойная структура, представляющая собой чередующиеся нечетные слои поликора (Al_2O_3) толщиной 0,5 мм с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 9,6$ и четные слои фторопласта толщиной 18 мм с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2$ в диапазоне 7-13 ГГц

3.2 Результаты компьютерного моделирования спектров отражения и прохождения одномерного волноводного фотонного кристалла с нанометровой металлической пленкой и разными диэлектрическими проницаемостями слоев фторопласта. Исследована структура, описанная в пункте 3.1, отличающаяся тем, что за фотонным кристаллом располагалась металлическая пленка. А диэлектрическая проницаемость слоев фторопласта варьировалась от 1,6 до 2 мм. Получены АЧХ коэффициентов отражения и прохождения. Исследовано поведение «окна прозрачности» при изменении толщины слоев фторопласта.

3.3 Результаты компьютерного моделирования спектров отражения и прохождения одномерного волноводного фотонного кристалла с нанометровой металлической пленкой разной толщины. Исследован фотонный кристалл с нанометровой металлической пленкой. Получены АЧХ коэффициентов отражения и прохождения. Исследовано поведение «окна прозрачности» при изменении толщины нанометрового слоя. Показано, что увеличение толщины ведет к сдвигу кривых в сторону низких частот.

4. 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. В случае экспериментального исследования одномерных волноводных фотонных кристаллов измерения амплитудно-частотных характеристик коэффициентов отражения и пропускания в трехсантиметровом диапазоне длин волн проводятся с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA-L Network Analyzer N5242A.

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 Tamm I.E. On the possible bound states of electrons on a crystal surface// Phys. Z. Sowiet Union. 1932. Vol. 1. P. 733.
- 10 Тамм И.Е. О возможности связанных состояний электронов на поверхности кристалла // Журнал экспериментально и теоретической физики. 1933. Т.3. С.34–43.
- 11 Tamm I.E. Über eine mögliche Art der Elektronenbindung an Kristalloberflächen// Zh. Eksp.Teor. Fiz. 1932. Vol. 76. No. 11–12. P. 849–850.
- 12 Никитов С.А., Гуляев Ю.В., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В. // ДАН. 2013. Т. 448. № 1. С. 35–37.
- 13 Банков С.Е., Курушин А.А., Разевиг В.Д. Анализ и оптимизация СВЧ структур с помощью HFSS. М. (2004). С. 14.