МИНОБРНАУКИ РОССИИ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждениевысшего образования «САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твердого тела

СВЧ фотонные кристаллы миллиметрового диапазона и их использование для измерения параметров материалов

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студентки

_курса

<u>4051</u>группы

направления

<u>11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»</u> код и наименование направления

институт физики

наименование факультета, института, колледжа

Рыбкина Наталья Павловна

фамилия, имя, отчество (именительный падеж)

Научные руководители: д.ф.-м.н., профессор должность, уч. степень, уч. звание 15.06, 2022 подпись, дата

А.В. Скрипаль

А.П. Фролов

инициалы, фамилия

к.ф.-м.н. доцент должность, уч. степень, уч. звание

Зав. кафедрой: д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

Th

подпись, дата 15-06, 2027

.06. 21 подпись, дата

А.В. Скрипаль

Саратов, 2022

Введение

На сегодняшний день одной из наиболее интенсивно развивающихся областей науки является направление по созданию и изучению свойств фотонных кристаллов. Сходство реальных кристаллов с фотонными разрешенных заключается В наличии И запрещенных зон ДЛЯ распространения электромагнитного излучения [1]. Заинтересованность в этих структурах заключается в возможности создания уникальных свойств, добавляя нарушения периодичности слои В качестве композитных материалов.

Будущее новейшей электроники напрямую связано с дальнейшим изучением и развитием фотонных кристаллов. В настоящий момент идет интенсивное изучение их свойств, а так же разработка различных устройств на основе фотонных кристаллов, практическая реализация теоретически предсказанных эффектов. Предполагается, что фотонные кристаллы найдут свое применение в таких областях, как лазеры (позволят получить малосигнальную лазерную генерацию), волноводы (очень компактны и обладают малыми оптическими потерями), а также создание сред с отрицательными показателями преломления, что даст возможность фокусировать свет в точку размерами меньше длины волн. 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, управлять положением «окна прозрачности» можно диапазон длин волн оптического излучения, в котором имеет место меньшее, по сравнению с другими диапазонами, затухание излучения в среде.

Реакция сред на воздействие электромагнитного излучения в зависимости от состава и внешних факторов проявляется в его отражении, пропускании или поглощении, которые, как правило, носят комплексный характер, с доминирующей ролью одного из них

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, а также реализовать новые высокочувствительные методы измерения параметров материалов.

При помощи СВЧ - методов измерения могут быть определены многие параметры, такие как удельная проводимость, диэлектрическая и магнитная проницаемость материала, время жизни, подвижность, эффективная масса носителей заряда, скорость поверхностной рекомбинации, толщина слоев и другие параметры. При этом появляется возможность проводить неразрушающее измерение нескольких параметров на одной установке с задействованием одного образца.

Для одновременного определения электропроводности, а

также толщины полупроводниковых слоев из решения обратной задачи, что усложняется присутствием различных сочетаний значений указанных параметров, при которых наблюдается одинаковые АЧХ коэффициентов прохождения и отражения СВЧ – излучения, используют результаты измерений спектров отражения и прохождения СВЧ – излучения, который взаимодействует со структурами, их частотные характеристики обладают высокой чувствительностью к изменению данных параметров.

Интерес к исследованию электрофизических свойств композиционных материалов в СВЧ - диапазоне связан с потребностью создания новых материалов с уникальными свойствами, которые не достижимы для традиционных однородных материалов и необходимостью решения насущных вопросов радиофизики, твердотельной, микро - и наноэлектроники [2].

Целью бакалаврской работы являлось исследование СВЧ фотонных кристаллов миллиметрового диапазона в волноводном исполнении и их использование для измерения параметров материалов.

Основное содержание работы

Первая глава посвящена описанию композитных материалов. Композиты - многокомпонентные материалы, которые состоят из основы (матрицы) армированной наполнителями из волокон, нитевидных кристаллов и др. В качестве основы чаще всего выступают: полимеры, металлы, керамика также используют и другие материалы. На рисунке 1 приведен пример структуры композита.



Рисунок 1 – Структура композита

Путем подбора состава и свойств матрицы и наполнителя, а также их соотношения, ориентации наполнителя можно получить уникальные материалы с требуемыми сочетаниями технологических и эксплуатационных свойств.

Вторая глава связана с фотонными кристаллами, а также их применением и использованием для измерения параметров материалов. собой Фотонные кристаллы представляют искусственно созданные гетерогенные среды, в которых происходит изменение геометрических электрофизических параметров размеров И специально подобранных составляющих элементов вдоль одного или нескольких направлений.

При появлении нарушения периодичности в структуре фотонного кристалла, которое создается путем изменения геометрических размеров или электрофизических параметров слоев, в запрещенной зоне появляется примесная мода колебаний – появление резонансной особенности с

коэффициентом пропускания, близким к единице в запрещенной зоне.

СВЧ фотонные кристаллы обладают рядом преимуществ в сравнении с фотонными кристаллами других диапазонов. К преимуществам относят технологичность изготовления периодических структур; хорошее совпадение численного расчета с экспериментом; возможность модификации структуры фотонного кристалла в силу того, что его составные части имеют макроскопические размеры; конструктивно фотонный кристалл может быть создан на основе стандартных элементов СВЧ-схем [5].

В третьей главе приведены основные формулы для расчета основных параметров. Диэлектрические свойства композитных материалов могут быть охарактеризованы величиной эффективной диэлектрической проницаемости \mathcal{E}_{ef} , определяемой величинами диэлектрических проницаемостей матрицы из поликора \mathcal{E}_1 и наполнителей из фторопласта \mathcal{E}_2 , и их объемными долями, описываемые соотношением Максвелла –Гарнетта:

$$\frac{\varepsilon_{ef} - \varepsilon_2}{\varepsilon_{ef} + 2\varepsilon_2} = x_1 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}$$

Зависимость диэлектрической проницаемости наполнителя из фторопласта от объемной доли:

$$\mathcal{E}_{ef}(x_1) = \frac{2 * x_1 * \mathcal{E}_1 * \mathcal{E}_2 - 2 * x_1 * \mathcal{E}_2^2 + \mathcal{E}_1 * \mathcal{E}_2 + 2 * \mathcal{E}_2^2}{\mathcal{E}_1 + 2 * \mathcal{E}_2 - x_1 * \mathcal{E}_1 + x_1 * \mathcal{E}_2}$$

Прежде, чем построить зависимость, необходимо найти величины постоянных распространения волны в пустом волноводе - γ_0 и в заполненном $-\gamma$.

Четвертая глава посвящена результатам моделирования амлитудночастотных характеристик СВЧ фотонных кристаллов. При моделировании рассматривали 15-слойную структуру, нечетные слои которой были выполнены из поликора толщиной 0.95 мм с диэлектрической проницаемостью ε = 9.6, а четные из фторопласта с толщиной 13 мм с диэлектрической проницаемостью ε = 2 в диапазоне частот 8-24 ГГц.

Диапазон частот выбирался таким образом, чтобы наблюдались две разрешенных и одна запрещенная зоны.

При компьютерном моделировании 15-слойной структуры с нарушением в виде центрального слоя с композитом с величиной диэлектрической проницаемости, рассчитанной с использованием выражения Максвелла – Гарнетта. Можно заметить, что происходит смещение разрешенных и запрещенных зон вправо.

При равномерном уменьшением объемной доли наполнителя от 1 до 0.4. Резонансы, образующие разрешенную зону, имеют разные амплитуды в отличие от предыдущего случая. Разрешенные и запрещенные зоны сдвинулись в высокочастотную область. Увеличился период повторения запрещенных и разрешенных зон.

При моделировании структуры с максимальным значением объемной доли наполнителя в центральном слое. Разрешенные и запрещенные зоны сдвинулись в высокочастотную область по сравнению с однородными слоями (см.рис.2).



Рисунок 2 – Результаты расчета коэффициентов отражения и прохождения электромагнитной волны через 15-слойную структуру без нарушения и с равномерным увеличением объемной доли наполнителя от 0.4 до 1(кривые 1,2 – ФК без нарушений, кривые 3,4 – ФК на основе композита)

Далее в моделировании исследовалась 7-слойная структура, представляющая собой чередующиеся нечетные слои ФЛАНа и четные слои фторопласта в диапазоне частот 7-14 ГГц. При выбранных геометрических длинах отрезков из ФЛАНа и фторопласта набеги фазы оказываются равными друг другу в данном диапазоне. Геометрические размеры и величины диэлектрической проницаемости представлены на слайде.

АЧХ такой структуры характеризуются наличием периодически чередующихся разрешенных и запрещенных зон в общем случае разной ширины. В волноводе все запрещенные и разрешенные зоны не одинаковы по размерам и форме между собой, по сравнению с коаксиальной брэгговской структурой. Такое отличие в двух структурах можно объяснить тем, что постоянная распространения волны (γ), которая задействована в определение набега фаз в волноводе, является величиной частотнозависимой.

При кратности электрических длин четных и нечетных слоев в спектре прохождения возникают дополнительные наборы разрешенных и запрещенных зон.

Если электрическая длина нечетных отрезков кратна длине четных в ФК, то возникают дополнительные разрешенные зоны с числом резонансов *N*_{res}, образующих эти зоны, равным 4.

Если же электрическая длина четных отрезков ФК кратна длине нечетных, то число резонансов N_{res}, образующих дополнительные разрешенные зоны, равно 3.

При отношении электрических длин равным 1.5, возникают два типа дополнительных разрешенных зон с числом резонансов N_{res} , образующих эти зоны, равным 3 и 4. В этом случае ФК можно рассматривать как три вложенные друг в друга брэгговские решетки с числом элементарных ячеек 7, 4 и 3 (см.рис.3).



Рисунок 3– АЧХ 7-слойного фотонного кристалла при кратности длины отрезков с заполнением из фторопласта длине отрезков с заполнением из

ФЛАНа, равной 1.5. $l_1 = 11.0$ мм, $l_2 = 32.55$ мм, $\epsilon_1 = 8.8$, $\epsilon_2 = 2.0$.

В пятой главе рассмотрено описание математической модели для решения прямой и обратной задачи, а также проведен анализ полученных данных. Для проведения экспериментальных исследований была создана измерительная секция в виде фотонного кристалла, помещенного в волновод. Геометрические параметры волновода представлены слайде. на Измерительную секцию, содержащую исследуемый фотонный кристалл, анализатору цепей. В ходе подключали к эксперимента измеряли амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) коэффициентов отражения и прохождения СВЧ-излучения, взаимодействующего с 11-слойным ФК в диапазоне частот 22-40 ГГц.

Нечетные слои ФК представляли собой отрезки с диэлектрическим заполнением из поликора, четные – с диэлектрическим заполнением из фторопласта.

Представлено компьютерное моделирование АЧХ 11-слойного фотонного кристалла с заполнением из поликора и фторопласта без нарушения периодичности (1) и с нарушением периодичности в виде центрального (6-го слоя) с различными значениями комплексной диэлектрической проницаемости: 2– фторопласт с измененной толщиной; 3–

нитрид бора; 4 - фторопласт с 3 воздушными включениями в виде круглых сквозных отверстий (см.рис.4).



Рисунок 4 – Компьютерное моделирование АЧХ 11-слойного фотонного кристалла с заполнением из поликора и фторопласта без нарушения периодичности (1) и с нарушением периодичности в виде центрального (6-го слоя) с различными значениями комплексной диэлектрической проницаемости: 2– фторопласт толщиной d=2.25мм; 3 – нитрид бора; 4 - фторопласт толщиной d=2.15мм с 3 воздушными включениями в виде

круглых сквозных отверстий

Сравнение результатов расчёта и эксперимента свидетельствует об их хорошем количественном совпадении. Для реализации метода измерения диэлектрической проницаемости исследуемых в эксперименте материалов была выбрана дефектная мода.

Исследуемые образцы помещали в фотонный кристалл в качестве центрального (шестого) слоя, в случае измерения параметра диэлектрической проницаемости у нитрида бора использовалась 13-слойная структура, следовательно, образец помещали в 7 слое.

С использованием методики измерений на основе решения обратной задачи были определены значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь экспериментальных образцов.

На рисунке 5 представлена функция невязок и ее контурная карта для случая измерения образца, выполненного из нитрида бора. Функция невязок

обладает ярко выраженным глобальным минимумом, что подтверждает возможность однозначно определять параметры исследуемого образца из решения системы уравнений.



Рисунок 5 – Вид функции невязок *S*(ε, tg h) в пространстве (ε, tg h,*S*(ε, tg h)) (a) и контурные карты в плоскости искомых параметров (ε, tg h) (б) для образца из нитрида бора на резонансной частоте *f* = 29.436 ГГц, соответствующей дефектной моде.

Заключение

В ходе выполнения бакалаврской работы были получены следующие результаты:

Были выявлены особенности взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ диапазона с одномерными волноводными фотонными кристаллами, содержащими в качестве нарушения периодичности композитные слои, а также рассмотрено измерение параметров некоторых материалов. Был проведен анализ и компьютерное моделирование частотной зависимости коэффициентов отражения и прохождения СВЧ – излучения.

У фотонного коаксиального кристалла, характеризующегося количеством пиков в разрешенной зоне, равным числу элементов фотонного кристалла, электрические длины этих элементов должны быть равны друг другу. При этом изменение длины элементов первого типа должно сопровождаться изменением электрической длины второго типа с коэффициентом пропорциональности, зависящем OT соотношения диэлектрических проницаемостей.

В случае же фотонного кристалла, помещенного в волновод необходимо равенство набегов фаз электромагнитной волны на длине элемента фотонного кристалла, как первого, так и второго типа. Для достижения такой ситуации увеличение длины отрезков одного типа должно приводить к увеличению длины отрезков второго типа ФК с коэффициентом пропорциональности, зависящим от диэлектрической проницаемости и частоты электромагнитного излучения.

Также была предложена И реализована методика измерения диэлектрической проницаемости материалов, a также тангенса угла диэлектрических потерь в миллиметровом диапазоне с использованием фотонных кристаллов, основанная на решении обратной задачи при зависимостей коэффициента использовании измеренных частотных прохождения и отражения на частоте дефектной моды в запрещенной зоне.

Закономерности, расписанные и описанные в рамках выполнения выпускной квалификационной работы, могут быть интересны при разработке, основанных на фотонных кристаллах, элементов СВЧ-схем и высокочувствительных методов измерений электрофизических параметров нанометровых металлических, полупроводниковых и диэлектрических материалов, а также структур, используемых в микро-, нано- и СВЧэлектронике [21].

Список использованных источников

- 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. С.65-70
- Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В.//Лабораторные работы «Фотонные кристаллы СВЧ-диапазона и их использование для измерения параметров материалов» (учебное пособие)– Саратов: Электронное издание Сарат. ун-та, 2014. – 32 с.
- Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Феклистов В.Б., Вениг С.Б.// Измерение параметров полупроводников, микро- и наноструктур на СВЧ (учебное пособие)– Саратов: Электронное издание Сарат. ун-та, 2012. – 55 с.
- Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Пономарев Д. В.// СВЧ фотонные кристаллы–новая разновидность периодических структур в радиоэлектронике (учебное пособие) - Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2016. — 84 с.
- Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Пономарев Д. В. Одномерные СВЧ фотонные кристаллы. Новые области применения. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2018. 184 с.
- Беляев Б. А., Ходенков С. А., Шабанов В. Ф. Исследо-вание частотноселективных устройств, построенных на основе микрополоскового двумерного фотонного кристалла // Докл. АН. 2016. Т. 467, № 4. С. 400–404.
- 7. А. В. Скрипаль, Д. В. Пономарев, О. М. Рузанов, И. О. Тимофеев// Резонансные особенности в разрешенныхи запрещенных зонах сверхвысокочастотных коаксиальных брэгтовских структур с периодически чередующимся диэлектрическим заполнением - Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2020. Т. 20, вып. 1, стр. 29-41.
- Белотелов В.И., Звездин А.К.// Фотонные кристаллы и другие метаматериалы, 2006.

- Шабанов В.Ф., Зырянов В.Я. (ред.)//Фотонные кристаллы и нанокомпозиты: структурообразование, оптические и диэлектрические свойства - Монография, Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2009г., 257 с.
- 10. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Романов А. В. Комплекс- ная диэлектрическая проницаемость композитов на основе диэлектрических матриц и входящих в их состав углеродных нанотрубок // ЖТФ. 2011. Т. 81, вып. 1. С. 106–110.
- В.Н., Нефедов И.С., Морозов Ю.А. 11. Гусятников Оптическая фотонной запрещенной перестройка зоны В классической полупроводниковой сверхрешетке при импульсном световом воздействии// Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2001. T. 65. № 2. C. 302-304.
- 12. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Абрамов А. В., Боголюбов А. С. Измерения толщины нанометровых слоев металла И электропроводности полупроводника структурах В металлполупроводник ПО спектрам отражения И прохождения электромагнитного излучения // ЖТФ. 2006. Т. 76, вып. 5. С. 112–117.
- 13. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Абрамов А. В., Боголюбов А. С., Скворцов В. С., Мерданов М. К. Использова- ние волноводных фотонных структур для измерения параметров нанометровых металлических слоев на изолирующих подложках // Известия вузов. Электро-ника. 2007. № 6. С. 25–32.
- 14.Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Пономарев Д. В., Латышева Е. В. Многопараметровые измерения эпитаксиальных полупроводниковых структур с использованием одномерных сверхвысокочастотных фотонных кристаллов // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61, № 1. С. 45–53.
- 15. Никитин Ал. А., Никитин Ан. А., Устинов А. Б., Lähderanta Е., Калиникос Б. А. Сверхвысокочастотный фотонный кристалл на

щелевой линии передачи с сегнетоэлектрической пленкой // ЖТФ. 2016. Т. 86, вып. 6. С. 115–120.

- 16. Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Рязанов Д. С. Брэгговские сверхвысокочастотные структуры на волноводнощелевых линиях // Радио- техника и электроника. 2016. Т. 61, № 4. С. 321–326.
- 17. Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Мер- данов М. К., Евтеев С. Г. Волноводные фотонные кристаллы на резонансных диафрагмах с управляе- мыми n-i-p-i-n-диодами характеристиками // Радио- техника и электроника. 2018. № 1. С. 65–71.
- 18. Насыбуллин А. Р., Морозов О. Г., Севастьянов А. А. Брэгговские сенсорные СВЧ-структуры на коаксиальном кабеле // Журн. радиоэлектроники. 2014. № 3.С. 1–17.
- 19. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ : учебник для радиотехн. спец. вузов. М. : Высш. шк., 1988. 432 с
- 20. Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р., Смирнов В. П. Спра- вочник по элементам волноводной техники. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Сов. радио, 1967. 651 с.
- 21.Усанов Д.А., Скрипаль А.В // Измерение электропроводности нанометровых металлических пленок в слоистых структурах по спектрам отражения электромагнитного излучения- Учебное пособие для студ. фак. Нано- и биомедицинских технологий. – Саратов, СГУ, 2007. - 84 с.

Huel