

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра физики твердого тела

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

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 411 группы

направления 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

факультета нано- и биомедицинских технологий

Лада Никиты Олеговича

Научный руководитель

профессор, д.ф.-м.н

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

Д.В. Пономарёв

инициалы, фамилия

ИО зав. кафедрой

профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2019 г.

Введение

Современная наука на этапе научно-технического развития прогрессивно совершенствует направление по созданию и исследованию свойств метаматериалов, представляющих собой искусственно созданные гетерогенные структуры, с периодически распределенными неоднородностями, в которых геометрические размеры и электрофизические свойства периодически изменяются. Это обусловлено тем, что распространение волн в таких структурах связано с наличием разрешенных и запрещенных частотных зон, в пределах которых волны могут распространяться полностью или частично, и не распространяться вообще, испытывая при этом полное отражение на границе периодической структуры.

К метаматериалам относится класс фотонных кристаллов – искусственных периодических структур с периодом, сравнимым с длиной волны распространяющегося в них электромагнитного излучения.

Отличительной особенностью фотонных кристаллов СВЧ диапазона является высокая технологичность их производства, макроскопичность составляющих их конструкцию элементов и возможность реализации фотонных кристаллов на основе упорядоченных массивов элементов различной формы и конфигурации. Все это позволяет реализовать функции стандартных элементов СВЧ схем, таких как полосовые фильтры, направленные ответвители, согласованные нагрузки, перестраиваемые резонаторы, миниатюрные антенны.

Цель бакалаврской работы

Целью данной бакалаврской работы является исследование явления внутреннего отражения СВЧ–электромагнитной волны в фотонном кристалле со структурой поликор–фторопласт и поликор–воздух без нарушения и с нарушением периодичности, с различным количеством слоев, наблюдение за амплитудно–частотной характеристикой при внедрении в

структуру металлических пленок различных толщин и доказательство существования таммовских состояний на границе фотонного кристалла при его контакте с ограниченной нанометровой металлической пленкой.

Бакалаврская работа содержит 4 главы:

1. Основные характеристики фотонных кристаллов.
2. Поверхностные состояния в фотонных кристаллах.
3. Результаты компьютерного моделирования амплитудно-частотных характеристик СВЧ фотонного кристалла.
4. Результаты экспериментального исследования амплитудно-частотных характеристик СВЧ фотонного кристалла.

1. Основные характеристики фотонных кристаллов.

Фотонные кристаллы, из-за периодического изменения коэффициентов отражения и прохождения электромагнитной волны, позволяют получить разрешенные и запрещенные диапазоны для энергии самой волны. В спектрах отражения и прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с такими структурами, наблюдается ярко выраженное чередование разрешенных и запрещенных для распространения электромагнитной волны частотных диапазонов. Практически, это означает, что если на фотонный кристалл падает электромагнитная волна, обладающая энергией (длиной волны, частотой), которая соответствует запрещенной зоне данного фотонного кристалла, то она не может распространяться в фотонном кристалле и отражается. И наоборот, это означает, что если на фотонный кристалл падает волна, обладающая энергией (длиной волны, частотой), которая соответствует разрешенной зоне данного фотонного кристалла, то она может распространяться в фотонном кристалле. По аналогии с реальными кристаллами, частотная область, в которой запрещено распространение электромагнитной волны, получила название фотонной запрещенной зоны. Другими словами, фотонный кристалл выступает в качестве фильтра [6].

Если излучение с частотой запрещённой зоны было сгенерировано внутри фотонного кристалла, то оно не может распространяться в нём, если же такое

излучение падает на фотонный кристалл извне, то оно просто отражается от кристалла. [2].

2. Поверхностные состояния в фотонных кристаллах.

Реальная поверхность кристалла, с которой приходится работать, отличается от идеальной, так как на ней в большинстве случаев всегда имеют место быть различного рода макроскопические и микроскопические структурные дефекты, связанные с условиями обработки (резка, полировка, шлифовка) и роста кристалла (огранка кристалла и другого рода особенности рельефа поверхности макроскопических и микроскопических размеров). Вдобавок, реальная поверхность кристалла находится в постоянном контакте с окружающей средой, различного типа химическими соединениями, применяемыми в качестве травителей, после чего на поверхности возможна адсорбция посторонних атомов и молекул их этих источников, возникновение окисных пленок как результат окислительно-растворительных реакций при травлении. Все это приводит к появлению локализованных на поверхности кристалла состояний, которые зависят от степени сродства к электрону и дырке, положения уровня Ферми и на поверхности могут проявлять себя как донорные или акцепторные центры захвата или рекомбинационные ловушки электронно – дырочных пар. Если на поверхности находятся донорные состояния, которые, как известно, могут быть нейтральными, либо заряженными положительно при отдаче электрона в зону проводимости, поверхность полупроводника будет заряжена положительно. А при наличии акцепторных состояний поверхность кристалла будет заряжена отрицательно, так как акцепторные состояния могут быть либо нейтральны (когда пусты), либо отрицательно заряжены (когда заполнены электронами). Величина заряда Q_{ss} на поверхности зависит от концентрации поверхностных состояний N_s и функций распределения для ловушек захвата, которые определяются значением электрохимического

потенциала на поверхности полупроводника относительно к энергетическому положению уровня ловушки захвата [9].

3. Результаты компьютерного моделирования амплитудно-частотных характеристик СВЧ фотонного кристалла.

Численные расчеты производились в математическом пакете Mathcad.

С помощью компьютерного моделирования производились вычисления коэффициентов прохождения R и T отражения СВЧ – электромагнитной волны, основанные на использовании в качестве преобразовательного элемента фотонного кристалла (ФК) со структурами поликор–фторопласт и поликор–воздух с использованием ограниченной нанометровой металлической пленки, обладающей большой электропроводностью, для доказательства наличия таммовских поверхностных состояний в фотонном кристалле. В процессе исследования использовалась 13-, 11- и 9-слойная периодическая структура, помещенная в волновод, структура которой состоит из чередующихся слоев поликор–фторопласт и поликор–воздух, через которую пропусклась СВЧ – электромагнитная волна частотой от 8 до 14 ГГц. Для первой исследуемой структуры толщина поликорового слоя составляла $d_{\Pi} = 0.5$ мм и диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{\Pi} = 9.6$, фторопластового слоя составляла $d_{\Phi} = 14$ мм и $\varepsilon_{\Phi} = 2$. Для второй исследуемой структуры $d_{\Pi} = 0.5$ мм и $\varepsilon_{\Pi} = 9.6$, воздушного слоя $d_{B} = 19$ мм и $\varepsilon_{\Phi} = 1$. Для теоретического доказательства таммовских состояний использовались металлические пленки с электропроводностью $\sigma = 5 \cdot 10^4 \text{ Ом}^{-1}$ толщиной $d_{M1} = 760$ нм и $d_{M2} = 1000$ нм.

4. Результаты экспериментального исследования амплитудно-частотных характеристик СВЧ фотонного кристалла.

При проведении эксперимента исследовался СВЧ фотонный кристалл с 12- и 10-слойной периодической структурой, помещенной в волновод,

структура которой состоит из чередующихся слоев поликор–фторопласт и поликор–воздух с толщинами соответственно $d_{II} = 0.5$ мм и диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_{II} = 9.6$, $d_{\Phi} = 14$ мм и $\varepsilon_{\Phi} = 2$, $d_B = 19$ мм и $\varepsilon_B = 1$, через которую пропусклась СВЧ – электромагнитная волна частотой от 8 до 14 ГГц.

Исследования проводились с использованием анализатора цепей Agilent Technologies PNA-X.

Экспериментально удалось показать существование разрешенных и запрещенных зон в фотонном кристалле с периодической структурой поликор–фторопласт и поликор–воздух.

Для экспериментального доказательства таммовских состояний в фотонном кристалле использовались металлические пленки различных толщин, которые служили средой для полного отражения СВЧ-электромагнитной волны. При исследовании амплитудно–частотной характеристики коэффициентов прохождения R и отражения T удалось получить разрешенное состояние в запрещенной зоне фотонного кристалла, которое характеризовалось резонансным минимумом коэффициента отражения, после которого наблюдалось затухание СВЧ-электромагнитной волны.

Заключение

В ходе выполнения бакалаврской работы получены следующие результаты.

Теоретически были рассмотрены фотонные кристаллы в СВЧ-диапазоне. С помощью компьютерного моделирования и эксперимента была исследована амплитудно-частотная характеристика и резонансные особенности разрешенных и запрещенных зон СВЧ-фотонного кристалла со структурой поликор–фторопласт в волноводе без нарушения и с нарушением периодичности, а также СВЧ-фотонного кристалла со структурой поликор–воздух в волноводе. В том числе, было доказано с помощью компьютерного моделирования и последующим экспериментом существование таммовских («поверхностных») состояний на периодической структуре поликор – фторопласт и структуре поликор – воздух с внесением металлических пленок различной толщины.

Сравнение результатов эксперимента с результатами компьютерного показывает их хорошее качественное и количественное совпадение.

Установлено, что при внесении нарушений в СВЧ фотонном кристалле наблюдается увеличение размеров запрещенных и уменьшение размеров разрешенных зон при возникновении в запрещенной зоне примесной моды колебаний. Такое поведение характеристик объяснено уменьшением числа идентичных элементов, периодическую последовательность которых определяет фотонный кристалл, при введении в него нарушений, например, в виде центрального слоя большей толщины, что приводит к уменьшению числа резонансов, составляющих разрешенную зону, и, таким образом, к увеличению ширины запрещенной зоны фотонного кристалла.

В математическом пакете Mathcad была рассчитана частотная зависимость коэффициентов прохождения и отражения.

Список использованных источников

1. Д. А. Усанов, М. К. Мерданов, А. В. Скрипаль, Д. В. Пономарев, Е.В. Латышева. Использование СВЧ фотонных кристаллов для измерения параметров материалов // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами / Под ред. Д.А. Усанова. – М.: «Всероссийская научная школа-семинара», 2015. – 50 с.
2. Резонансные особенности в разрешенных и запрещенных зонах сверхвысокочастотного фотонного кристалла с нарушением периодичности / Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В. // Радиотехника и электроника. – 2013. – Т. 58, № 11. – С. 1071-1076.
3. СВЧ-фотонные структуры и их использование для измерения параметров материалов и создания функциональных устройств СВЧ-электроники / Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Куликов М.Ю., Скворцов В.С., Мерданов М.К.// Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2008. – Т. 11, № 3. – 51 с.
4. Фролов А.П. Структуры с фотонной запрещенной зоной и их использование в ближнеполевой СВЧ-микроскопии: Дис. на соиск. учен. степ. канд. ф.-м. наук. – Саратов, 2014, – Л. 14-17.
5. СВЧ фотонные кристаллы. Новые сферы применения / Усанов Д.А., Мерданов М.К., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В. // Известия саратовского университета. Новая серия. Серия: физика, – 2015, – Т. 15, № 1. – С. 57-58.
6. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В. // Фотонные кристаллы СВЧ-диапазона и их использование для измерения параметров материалов (учебное пособие) – Саратов: Электронное издание Сарат. Ун-та, 2015. – С. 6-8.

7. К.В. Шалимова. Физика полупроводников (учебник) - М.: Энергоатомиздат, 1985. — 392 с., ил.
8. А. П. Виноградов, А. В. Дорофеев, А. М. Мерзликин, А. А. Лисянский. Поверхностные состояния в фотонных кристаллах, УФН, 2010, том 180, номер 3, 249–261.
9. И. М. Лифшиц, С. И. Пекар. Таммовские связанные состояния электронов на поверхности кристалла и поверхностные колебания атомов решетки, УФН, 1955, том 56, вып. 4, 531 – 568.
10. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Латышева Е.В., Феклистов В.Б. Волноводно-диэлектрический резонанс в системе с нанометровым металлическим слоем на диэлектрической подложке // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. 2016. Т. 16. Вып. 2, I ISSN 1814-733X, ISSN 1817-3020.
11. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Латышева Е.В. Использование волноводно-диэлектрического резонанса для измерения параметров структуры «нанометровая металлическая пленка – диэлектрик» // Радиотехника. 2016. №7 С. 10–16.
12. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Латышева Е.В. Контроль параметров структуры нанометровая металлическая пленка-диэлектрик методом волноводно-диэлектрического резонанса // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Всерос. научной школы-семинара / под ред. проф. Д.А. Усанова. – Саратов: изд-во Саратовский источник, 2016.