

Одним из основоположников идеи создания фотонных кристаллов является Эли Яблонович, который в своей работе, посвященной замедленному спонтанному излучению в физике твердого тела и электронике, [1] впервые описал периодическую трехмерную диэлектрическую структуру, имеющую запрещенные зоны и предположил, что такая структура может найти широкое применение в разработке полупроводниковых лазеров.

Следующей работой, описывающей подобную структуру, явилась статья Саджива Джона о сильной локализации фотонов в некоторых неупорядоченных диэлектрических сверхрешетках [2], в которой автор выдвинул теорию о том, что эффект, описанный в работе Э. Яблоновича, может наблюдаться в хорошо подготовленных сверхрешетках. Причем изменение степени разупорядоченности может привести к предсказуемым и систематически наблюдаемым состояниям сильно локализованных фотонов в недиссипативных материалах с положительной диэлектрической проницаемостью во всем объеме.

В настоящее время во многих исследованиях в области электроники и прилежащих технологий особое место уделяется фотонным кристаллам и их свойствам, что связано с перспективой их применения в квантовой оптике и оптоэлектронике. [3].

Также является интересным использование фотонных кристаллов в нанофотонике и оптоэлектронике в качестве элементов эффективного управления световыми потоками [4, 5], а кроме того появляется возможность изучения новых оптических явлений, имеющих фундаментальное научное значение.

Широкое применение нашли СВЧ фотонные кристаллы, например, в высоконаправленных резонансных антеннах, резонансных полостях для

размещения полупроводниковых детекторов, различных типов СВЧ-фильтров, в том числе с управляемыми характеристиками. [6]

Другой областью применения СВЧ фотонных кристаллов являются СВЧ-устройства, называемые СВЧ-нагрузками, применяемые как самостоятельно, так и в составе сложных функциональных устройств направленных ответвителей, сумматоров, измерителей мощности, измерительных мостов, фильтров и т. д.[7] Одной из основных задач, которую необходимо решить при создании согласованных нагрузок, предназначенных для работы на малых и средних уровнях мощности СВЧ-излучения, является обеспечение согласования в максимально широком диапазоне частот при минимальных габаритах конструкции. [8]

Кроме того, с помощью СВЧ фотонных кристаллов возможно измерение параметров различных материалов, например, металлических нанослоев. [9]

Уже известно о существовании таммовских состояний в углеродных и гетероатомных нанотрубках [10], в углеродных нанотрубках типа зигзаг[11], в брэгговских гетероструктурах на волноводно-щелевых линиях [12]

Фотонное таммовское состояние характеризуется локализацией электрического поля электромагнитной волны на внутренней или внешней границах фотонного кристалла, при этом амплитуда электрического поля на частоте резонанса Тамма уменьшается как по мере удаления от границы фотонного кристалла с проводящим нанослоем внутри фотонного кристалла, так и с внешней стороны проводящего слоя.

При этом резкое убывание напряженности электрического поля обеспечивается как вследствие отрицательной величины действительной части комплексной диэлектрической проницаемости контактного слоя, так и значительной величины мнимой её части.

В связи с этим представляет интерес исследование возможности возникновения аналогов фотонных таммовских состояний при контакте фотонного кристалла со средой, характеризующейся положительной величиной действительной части комплексной диэлектрической проницаемости и значительной величиной мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости.

В связи с этим целью магистерской работы является исследование возможности и особенностей возникновения фотонных таммовских резонансов в структуре одномерный СВЧ фотонный кристалл/ слой полярной жидкости.

Магистерская работа состоит из трех глав:

1. Критический анализ современного состояния исследований фотонных Таммовских состояний
2. Теоретический расчет частотных зависимостей диэлектрической проницаемости и коэффициентов отражения, прохождения
3. Экспериментальное исследование структуры фотонный кристалл/слой полярной жидкости

Критический анализ современного состояния исследований фотонных Таммовских состояний. Существует несколько подходов к определению понятия фотонного кристалла.

Согласно первому, это материал, структура которого характеризуется периодическим изменением показателя преломления в пространственных направлениях [13]. Подобно тому, как периодический кристаллический потенциал в твердотельных кристаллах определяет их свойства для проведения электронов, периодическое структурирование фотонных кристаллов приводит к предвидению возможности достижения контроля потока фотонов в диэлектрике и металлических материалы.

Второй подход заключается в определении фотонного кристалла, как среды, у которых диэлектрическая проницаемость периодически изменяется в пространстве с периодом, допускающим брэгговскую дифракцию света [14]. В рамках данного подхода в качестве простейшей реализации фотонного кристалла предлагается структура, состоящая из двух материалов А и В с разными диэлектрическими постоянными ϵ_A и ϵ_B . Т.е. периодическая слоистая среда ...А/В/А/В... в случае одномерных фотонных кристаллов и периодические массивы цилиндров или шариков из материала А, помещенные в диэлектрическую матрицу В, в двумерных и трехмерных фотонных кристаллах соответственно.

Согласно еще одному подходу, фотонные кристаллы – пространственно-периодические твердотельные структуры, диэлектрическая проницаемость которых промодулирована с периодом, сравнимым с длиной волны света [15], что делает возможным наблюдение таких оптических эффектов, как многоволновая брэгговская дифракция, которая проявляется в виде специфической дублетной структуры полосы брэгговского отражения.

Другой вариант определения фотонных кристаллов был предложен в работе [16] и представляет фотонный кристалл, как класс оптических материалов, для которых характерно наличие двух свойств. Первое – это периодическая модуляция (трансляционная симметрия) диэлектрической проницаемости с периодом, сравнимым с длиной волны света. Второе – наличие связанной с периодичностью кристалла *полной* запрещенной зоны в спектре собственных электромагнитных состояний кристалла. Последнее свойство отличает фотонный кристалл от обычной дифракционной решетки. Оно означает, что в данном спектральном диапазоне свет любой поляризации не может войти в образец или выйти из него ни в каком направлении.

Связывание электрона в определенном месте в пространстве обычно объясняется наличием потенциальной ямы в этом месте (так называемые «зонные» состояния электронов в кристалле), при этом потенциальные

пороги по обе стороны от места связывания должны превышать полную энергию связываемого электрона. Однако, Тамм показал, что связывание электрона может происходить и по-другому. Вместо того, чтобы иметь потенциальные стенки по обе стороны от места связывания, одну из них можно заменить периодическим потенциальным полем. Если максимальная величина этого поля $U(x)$ меньше, чем полная энергия W связанного электрона, то при определенных значениях W соответствующая электронная волна все равно будет полностью отражаться на потенциальной сетке.

По аналогии с поверхностными таммовскими состояниями в твердом теле, в фотонных кристаллах, состоящих из периодически чередующихся макроскопических элементов, возможно наблюдение, так называемых, фотонных таммовских состояний.

На границе фотонного кристалла возможна локализация электрического поля при контакте фотонного кристалла с однородным слоем, характеризующимся отрицательной диэлектрической проницаемостью (проводящая среда на частотах ниже плазменной) или отрицательной магнитной проницаемостью (магнитная среда на частоте в окрестности ферромагнитного резонанса). Такая локализация электрического поля трактуется как поверхностное таммовское состояние в фотонном кристалле. При этом на амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) фотонного кристалла, контактирующего с однородным слоем, наблюдается узкий пик коэффициента прохождения электромагнитной волны, связанный с её прохождением через таммовское состояние.

Состояния Тамма могут также встречаться на границе двух соединенных фотонных кристаллов с различными размерами элементарных ячеек при перекрытии запрещенных зон этих двух кристаллов.

Таммовские состояния возникают, когда нарушение периодичности является либо следствием полного отсутствия одной составляющей в элементе периодической структуры в месте стыка двух фотонных

кристаллов, либо при наличии двух образующих элемент периодической структуры составляющих, следствием изменения в месте стыка параметров (например, его электрической длины) стыкуемой составляющей одного из кристаллов.

Теоретический расчет частотных зависимостей диэлектрической проницаемости и коэффициентов отражения, прохождения. Выполнено компьютерное моделирование частотных зависимостей коэффициентов отражения и прохождения для 11-слойного фотонного кристалла и 11-слойного фотонного кристалла со слоем полярной жидкости (дистиллированной воды), которое подтвердило наличие минимума коэффициента отражения в первой запрещенной зоне фотонного кристалла, что соответствует фотонным Таммовским состояниям. Установлено, что увеличение толщины слоя полярной жидкости приводит к смещению частоты возникновения минимума коэффициента отражения в первой запрещенной зоне в область низких частот.

Экспериментальное исследование структуры фотонный кристалл/слой полярной жидкости. Для проведения исследования был собран 11-слойный фотонный кристалл со следующими параметрами: нечетные слои были выполнены из поликора ($\epsilon = 9,6$), четные выполнены из фторопласта ($\epsilon = 2,5$). Длины нечетных и четных отрезков составляли 0.5 и 18 мм соответственно. Фотонный кристалл исследовался с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA-X Network Analyzer N5242A в диапазоне частот 7 – 13 ГГц.

На графиках видно, что частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения, полученные экспериментально, аналогичные тем, которые были получены в результате моделирования.

Для проведения экспериментальных исследований была изготовлена кювета (рис. 29) из полимерного диэлектрика с относительной

диэлектрической проницаемостью равной 2.45 единиц, которая примыкала к последнему слою фотонного кристалла. Кювета полностью заполняла поперечное сечение волновода ($23 \times 10 \text{ мм}^2$) (рис. 30). Кювета полностью заполнялась исследуемой жидкостью (дистиллированная вода). Толщина слоя воды составляла 0.8 мм.

Установлено, что наличие кюветы приводит к небольшому смещению кривых в область низких частот.

Заполнение 13-го слоя структуры водой приводит к появлению резонансных частот пропускания в 1-ой и 2-ой запрещенных зонах.

Далее был проведен эксперимент по измерению коэффициентов отражения и прохождения для структуры фотонный кристалл-слой жидкости (без использования кюветы).

В качестве слоя, разделяющего фотонный кристалл и воду, использовалась пищевая пленка, которая, как показали измерения, не влияет на спектры коэффициентов отражения и прохождения.

Был измерен коэффициент отражения для различных толщин слоя жидкости: от 2 мм до 30 мм.

Выявлено, что увеличение толщины слоя дистиллированной воды приводит к смещению минимума коэффициента отражения, возникающего в первой запрещенной зоне в сторону меньших частот. При толщине слоя воды больше 2 мм с ростом толщины слоя воды частотное положение минимума остается практически неизменным, но коэффициент отражения в минимуме увеличивается.

Аналогичные измерения были проведены для раствора соли NaCl двух концентраций: 35 г/100 мл и 17,5 г/100 мл. Установлено, что увеличение толщины слоя раствора NaCl приводит к увеличению коэффициента отражения электромагнитной волны на частоте таммовского резонанса без изменения частоты резонанса.

Далее была решена обратная задача по определению диэлектрической проницаемости растворов при различных толщинах слоя дистиллированной воды. Решение обратной задачи согласуется с экспериментально измеренными данными.

Проверка результатов решения обратной задачи путем построения коэффициента отражения по рассчитанной диэлектрической проницаемости и исходной кривой показала полное совпадение результатов.

Заключение. В ходе выполнения магистерской работы получены следующие результаты:

Описана методика проведения измерения комплексной диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков в виде растворов полярных жидкостей при изменении температуры для различных концентраций этанола в растворе в СВЧ-диапазоне с использованием зонда, представляющего собой отрезок разомкнутой коаксиальной линии передачи.

Проведено измерение комплексной диэлектрической проницаемости раствора вода -этанол при изменении концентраций спирта от 0% до 95% в диапазоне частот 0,1 ГГц–26 ГГц. По полученным данным была выявлена возможность описания данного раствора с помощью модели композита вода-этанол, в котором объемное содержание спирта меняется от 0 до 1 при малых содержаниях спирта (до 15%) или малых содержаниях воды (более 80% спирта) и решена задача для экспериментальных кривых по определению объемного содержания спирта для данных концентраций. Также установлено, что диэлектрическая проницаемость раствора сразу после его смешивания имеет большее значение, чем через промежуток времени, что может быть объяснено наличием некоторого конечного времени, требующегося для образования химических связей между молекулами воды и этанола. Однако, данный эффект имеет большее влияние для отдельных концентраций этанола: 20%, 50%, 55%, 75%, 80%.

Выполнено компьютерное моделирование частотных зависимостей коэффициентов отражения и прохождения для 11-слояного фотонного кристалла и 11-слояного фотонного кристалла со слоем полярной жидкости (дистиллированной воды), которое подтвердило наличие минимума коэффициента отражения в первой запрещенной зоне фотонного кристалла, что соответствует фотонным Таммовским состояниям. Установлено, что увеличение толщины слоя полярной жидкости приводит к смещению частоты возникновения минимума коэффициента отражения в первой запрещенной зоне в область низких частот.

Выполнено экспериментальное исследование структуры 11-слояный фотонный кристалл-кювета с полярной жидкостью, в которой также возможно наблюдение фотонного Таммовского состояния.

Экспериментально исследовано изменение спектра коэффициента отражения для структуры фотонный кристалл/слой полярной жидкости (дистиллированная вода) при различной толщине последнего слоя. Результат соответствует полученному путем моделирования: при увеличении толщины слоя наблюдается смещение пика в низкочастотную область. Также исследованы аналогичные структуры с включениями в виде водных растворов NaCl концентрацией 17,5 мг/100 мл и 35 мг/ 100 мл для которых увеличение толщины слоя жидкости приводит к увеличению коэффициента отражения электромагнитной волны на частоте таммовского резонанса без изменения частоты резонанса.

Решена обратная задача по определению частотно зависимой диэлектрической проницаемости слоя полярной жидкости при различных значениях толщины слоя жидкости. Полученное решение согласуется с экспериментальными данными.

Список использованных источников

- 1 Eli Yablonovitch: *Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics*. In: *Physical Review Letters*. Band 58, 1987, S. 2059
- 2 Sajeev John: *Strong Localisation of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices*. in: *Physical Review Letters*, Band 58, 1987, 2486-2489
- 3 Успехи физических наук. Том 180, №3, Март 2010г. Поверхностные состояния в фотонных кристаллах. А.П. Виноградов, А.В.Дорофенко, А.М. Мерзликин, А.А. Лисянский. Стр. 249 – 263 = Виноградов А.П., Дорофеев А.В., Мерзликин А.М., Лисянский А.А. // УФН. 2010. Т. 180. № 3. С. 249–263
- 4 Galisteo-López J.F., Ibasate M., Sapienza R., Froufe-Pérez L.S., Blanco A., López C. Self-Assembled Photonic Structures // *Adv. Mater.*, 2011, 23(1), 30-69.1 – 3
- 5 Mizeikis V., Juodkazis S., Marcinkevicius A., Matsuo S., Misawa H. Tailoring and Characterization of Photonic Crystals // *J. Photochem. Photobiol. C*, 2001, 2, 35-69.
- 6 Progress In Electromagnetics Research, PIER 41, 185–209, 2003 MICROWAVE APPLICATIONS OF PHOTONIC CRYSTALS E. Ozbay, B. Temelkuran, and M. Bayindir
- 7 СВЧ ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ. НОВЫЕ СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ. Д. А. Усанов и др. СВЧ фотонные кристаллы. Новые сферы применения. Усанов Д. А., Мерданов М. К., Скрипаль А. В., Пономарев Д. В., 2015 Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2015. Т. 15, вып. 1 стр 57 – 73
- 8 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 // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2009. № 1. С. 73–80.

9 Usanov D., Skripal A., Abramov A., Bogolubov A., Skvortsov V., Merdanov M. 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 37rd European Microwave Conf. Munich, Germany, 2007. P. 198–201.

10 Таммовские состояния и квантовые точки в углеродных и гетероатомных нанотрубках. И.В. Станкевич, Л.А. Чернозатонский. Физика твердого тела, том 41, вып. 8. 1515-1519

11 Таммовские состояния в углеродных нанотрубках типа зигзаг. Аналитические оценки в приближении Хюккеля. Павлов М.В., Балашов А.М., Ермиов А.Ю. Журнал физической химии, т. 84, № 10, 2010, стр 1928-1936

12 Таммовские состояния в брэгговских гетероструктурах на волноводно-щелевых линиях. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Рязанов Д.С. Журнал технической физики том 88, номер 7, 2018 стр 1046-1049

13 Photonic Crystals, H. Benisty, V. Berger, J.-M. Gerard, D. Maestre, A. Tchelnokov, Springer 2005.

14 Е.Л. Ивченко, А.Н. Поддубный, "Резонансные трёхмерные фотонные кристаллы, "Физика твёрдого тела, 2006, том 48, вып. 3, стр. 540—547.

15 В.Г. Федотов, А.В. Селькин / МНОГОВОЛНОВАЯ БРЭГГОВСКАЯ ДИФРАКЦИЯ И ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В 3D ФОТОННОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЁНКАХ.— Журнал НИУ ИТМО.— Наносистемы: физика, химия, математика.— 2(11). -УДК 538.958

16 В. А. Кособукин, "Фотонные кристаллы, «Окно в Микромир», No. 4, 2002.