

Научная статья
УДК 535.3
ББК 22.343
ГРНТИ 29.31.21
ВАК 1.3.6.
PACS 42.25.Bs
OCIS 310.6628
MSC 00A79

Исследование оптических свойств наноструктур с одномерными фотонными кристаллами типа АВС

К. К. Алтунин , Р. Р. Алиева  ¹

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», 432071, Ульяновск, Россия

Поступила в редакцию 11 апреля 2024 года

После переработки 12 апреля 2024 года

Опубликована 12 июня 2024 года

Аннотация. Рассмотрены оптические свойства наноструктур с одномерными фотонными кристаллами типа АВС. Предложена теоретическая модель оптических процессов в наноструктурах с одномерными фотонными кристаллами типа АВС. Получено численное решение дисперсионного уравнения для электромагнитных волн в наноструктурах с одномерными фотонными кристаллами типа АВС. Проведённые компьютерные расчёты для наноразмерных структур с одномерными фотонными кристаллами типа АВС позволили построить графики дисперсионных зависимостей света в наноструктурах с одномерными фотонными кристаллами типа АВС, в которых наблюдалось появление фотонных запрещённых зон, свидетельствующих о специфических оптических свойствах наноструктур с фотонными кристаллами типа АВС.

Ключевые слова: оптическое излучение, показатель преломления, фотонный кристалл, наноструктура, электромагнитная волна, дисперсионное уравнение, фотонная запрещённая зона, оптические свойства наноструктур

Введение

Цель исследования состоит в том, чтобы изучить и проанализировать оптические свойства наноструктурных материалов с фотонными кристаллами типа АВС.

Задачи исследования:

1. написать обзор литературы по физическим свойствам и принципам функционирования наноструктур с фотонными кристаллами,
2. разработать модель, учитывающую влияние различных факторов (например, размера и формы наноструктур, материала, из которого они изготовлены) на оптические свойства наноструктур с фотонными кристаллами типа АВС.

¹E-mail: alieva02regina@mail.ru

Объектом исследования является группа наноструктур с одномерными фотонными кристаллами типа ABC. Предметом исследования является совокупность оптических свойств наноструктур с одномерными фотонными кристаллами типа ABC.

Гипотеза исследования заключается в том, что если выявить особенности оптических свойств фотонных кристаллов типа ABC, то курс квантовой оптики наноструктур можно наполнить теоретическими сведениями по фотонным кристаллам типа ABC.

Обзор научных работ по хиральным фотонным структурам

Хиральные наноразмерные структуры и фотонные структуры обладают уникальными оптическими свойствами, такими как двухполосный круговой дихроизм, при котором определённые состояния круговой поляризации испытывают значительное ослабление, в то время как другие проходят практически без изменений. Эти структуры, включая прямые и обратные хиральные кристаллы поленниц и хиральные брэгговские стопки, демонстрируют настраиваемый круговой дихроизм, основанный на поперечных периодах, перпендикулярных киральной оси. Кроме того, киральные интерфейсы в фотонно-кристаллических волноводах обеспечивают эффективную спин-фотонную связь и невзаимную фотонику, при этом топологические волноводы предлагают более высокие коэффициенты усиления Парселла, несмотря на некоторые потери на обратное рассеяние. Хиральные двухъядерные фотонно-кристаллические волокна были исследованы в качестве эффективных светоделителей с круговой поляризацией, демонстрирующих превосходные характеристики в управлении поляризацией и разделении длин волн для таких приложений, как мультиплексирование с круговой поляризацией в волоконной лазерной связи [1–3].

В статье [1] проведено теоретическое и численное исследование оптических свойств как прямых, так и обратных трёхмерных хиральных структур поленниц и соответствующей киральной стопки Брэгга, также известной как стопка Ройша. В статье [1] рассчитываются спектры пропускания в спиральном направлении для конечных кристаллов и фотонных зонных структур, где обеспечивается одинаковый эффективный индекс всех структур. В статье [1] обнаружено, что обе трёхмерные структуры демонстрируют двухдиапазонный круговой дихроизм, где свет с определённым состоянием круговой поляризации — либо левосторонний — обнаруживает, либо правосторонний — демонстрирует широкую стоп-зону с большим ослаблением. тогда как другое состояние поляризации передается почти беспрепятственно. Такие разрывы наблюдаются в разных частотных диапазонах с разной направленностью. Появление щелей с круговой поляризацией успешно интерпретируется с помощью физической модели, в которой круговая поляризация либо сотрудничает, либо противодействует вращению киральной структуры, тем самым эффективно приводя к пространственно-зависимому или постоянному показателю преломления и, таким образом, к наличию или отсутствию зазор. В статье [1] обнаружено, что наличие или отсутствие циркулярно поляризованных щелей регулируется поперечными периодами, перпендикулярными киральной оси, как в трёхмерных прямых, так и в обратных хиральных кристаллических структурах из поленниц. Возможность настройки кругового дихроизма может найти применение в качестве встроенных датчиков света с круговой поляризацией и внутрикристалльного обнаружения хиральных молекул.

В статье [2] количественно оценены физические характеристики обычных и топологических фотонно-кристаллических волноводов в качестве киральных интерфейсов эмиттер-фотон, а также показана способность этих структур поддерживать и усиливать направленные взаимодействия, одновременно подавляя последующие потери на обратное рассеяние. Хиральные фотонные структуры, такие как нарушенная симметрия и топологические фотонно-кристаллические волноводы в статье, поддерживают направ-

ленные взаимодействия для эффективного взаимодействия спин-фотонов и квантовых логических архитектур на кристалле. Встроенные в кристалл киральные квантовые интерфейсы света и материи, которые поддерживают направленные взаимодействия, обеспечивают многообещающую платформу для эффективного взаимодействия спин-фотон, невзаимных фотонных элементов и архитектур квантовой логики. В статье [2] представлены полноволновые трёхмерные расчёты для количественной оценки характеристик обычных и топологических фотонно-кристаллических волноводов в качестве киральных интерфейсов эмиттер-фотон. В частности, количественно оценена способность этих структур поддерживать и усиливать направленные взаимодействия, одновременно подавляя последующие потери на обратное рассеяние. Обнаружено, что волноводы с нарушенной симметрией, такие как нетопологический волновод с плоскостью скольжения и волновод с топологическим бородатым интерфейсом, действуют как эффективные киральные интерфейсы, при этом топологические режимы волновода позволяют работать при значительно более высоких коэффициентах усиления Перселла. Наконец, хотя все структуры страдают от потерь обратного рассеяния из-за несовершенства изготовления, они оказываются меньшими при высоких коэффициентах усиления топологического волновода. Эти уменьшенные потери происходят потому, что оптическая мода отталкивается от границ раздела воздух-диэлектрик, где происходит рассеяние, а не из-за какой-либо топологической защиты. Эти результаты важны для понимания взаимодействий света и материи в топологических фотонных кристаллах и разработки эффективных встроенных в кристалл киральных квантовых устройств.

В статье [3] киральное двухсердцевинное фотонно-кристаллическое волокно было исследовано как своего рода эффективный светоделитель с круговой поляризацией с использованием метода расширения киральных плоских волн. Хиральные фотонные структуры, такие как хиральное двухъядерное волокно из фотонных кристаллов, исследуются на предмет эффективных светоделителей с круговой поляризацией, демонстрируя многообещающие применения в волоконных лазерных системах связи. В зависимости от светоделителя с круговой поляризацией сочетание светоделителя с линейной поляризацией и четвертьволновой пластиной приводит к ошибке поляризации в оптоволоконной цепи с круговой поляризацией. Чтобы уменьшить эту ошибку, хиральное двухъядерное волокно из фотонных кристаллов исследуется как своего рода эффективный светоделитель с круговой поляризацией с использованием метода расширения киральных плоских волн. В статье [3] разрабатывается своего рода светоделитель с круговой поляризацией на основе хирального двухсердцевинного волокна из фотонных кристаллов с более слабой киральностью, с центральной длиной волны 1.55 мкм. Моделирование показывает превосходные характеристики за счёт более короткой длины связи и более высокого коэффициента затухания. Кроме того, двойная длина волны 1.55 мкм и 1.30 мкм с левой круговой поляризацией может быть дополнительно разделена с помощью соответствующего кирального двухсердцевинного волокна из фотонных кристаллов. Результаты показывают многообещающие применения мультиплексора и демультиплексора с круговой поляризацией в волоконных системах связи.

В статье [4] исследованы особенности распространения света в одноосных киральных жидких кристаллах с большим шагом спирали, в которых для необыкновенного луча при достаточно больших углах падения существуют запрещённые зоны.

В работе [5] описан лазер на основе полупроводникового микрорезонатора с киральным фотонным кристаллом.

В статье [6] проведены оптические исследования холестерического фотонного кристалла: измерены спектры пропускания, вращения плоскости поляризации света, поляризационные характеристики прошедшего через фотонный кристалл света. В спектрах вращения плоскости поляризации наблюдаются особенности, связанные с нали-

чем квазизапрещённой фотонной зоны. В статье [6] определена плотность фотонных состояний, её трансформация при изменении температуры и толщины фотонного кристалла.

В статье [7] исследовано распространение света в одноосных киральных жидких кристаллах с большим шагом спирали. В статье [7] проанализированы окрестности точек поворота и рассмотрен эффект прохождения необыкновенных волн через запрещённую зону.

В статье [8] предложена теоретическая модель, основанная на классическом электромагнетизме, для описания оптических свойств полостей Фабри-Перо, заполненных многослойными и линейными киральными материалами. Мы находим формальную связь между подходами на основе матрицы переноса, матрицы рассеяния и функции Грина для расчета поляризационно-зависимого оптического пропускания и сигналов кругового дихроизма, модифицированных резонатором. В статье [8] показано, как общие симметрии, такие как взаимность Лоренца и симметрия обращения времени, ограничивают моделирование таких полостей. В статье [8] применяется подход для численного и аналитического исследования свойств различных резонаторов Фабри-Перо, изготовленных из металлических или сохраняющих спиральность диэлектрических фотоннокристаллических зеркал. В последнем случае анализируется возникновение поляритонов киральной полости с точки зрения сохранения частичной спиральности электромагнитных волн, отраженных от границ зеркала. Подход, использованный в статье [8], актуален для разработки инновационных полостей Фабри-Перо для кирального зондирования и для исследования стереохимии, модифицированной полостью.

Кинковые состояния долины и киральные краевые состояния с долинной поляризацией, чьи топологически защищенные свойства имеют большой потенциал применения в высокоскоростной обработке и передаче информации, в последнее время стали важными рубежами топологической фотоники. Однако долинные фотонные топологические изоляторы в основном поддерживают топологические состояния одного типа за счёт нарушения пространственной симметрии решетки. Сосуществование различных типов топологических состояний в конкретной фотонной системе остается затруднительным. В статье [9] предложено разумно спроектированные топологические фотонные кристаллы, интегрированные в подложку (но без металлических переходных отверстий) с симметрией C_3 , которые могут поддерживать состояния долинного излома и долинно-поляризованные киральные краевые состояния в различных волноводных каналах. В статье [9] посредством численного моделирования и измерений демонстрируется устойчивая передача как состояний кинков долины, так и киральных краевых состояний с долинной поляризацией через острые углы, а также показываем высокоэффективную связь между классическими направленными волнами и топологическими волнами. Что ещё более важно, в статье [9] достигаются плавные переходы между киральными и тривиальными краевыми состояниями, тривиальными краевыми состояниями и состояниями излома долины, а также состояниями излома долины и киральными краевыми состояниями с долинной поляризацией путём соединения различных волноводных каналов. Предлагаемая в статье [9] конструкция полезна для взаимодействия с существующими функциональными фотонными волноводами или устройствами и открывает альтернативный путь для усовершенствованных планарных интегрированных топологических фотонных систем с субволновой толщиной.

Для изучения топологических фаз в фотонике, в то время как киральные краевые состояния первого порядка квантово-холловского типа обычно реализуются в магнитооптических фотонных кристаллах, топологические состояния более высокого порядка в основном исследуются в полностью диэлектрических фотонных кристаллах. В статье [10] изучаются топологические фотонные состояния первого и второго порядка в

магнитооптических фотонных кристаллах. В частности, в статье [10] вновь рассматривается простой магнитооптический фотонный кристалл с квадратной решёткой и одним гирромагнитным цилиндром в каждой элементарной ячейке. Однако вместо того, чтобы исследовать традиционную элементарную ячейку, где цилиндр находится в центре квадратной элементарной ячейки, и показано, что эта конфигурация содержит богатые топологические фазы, такие как двухзонные топологические фазы Черна, дипольные и квадрупольные топологические фазы. Подробные характеристики этих топологических состояний основаны на полосах Ванье и их поляризации с помощью методов петли Вильсона и вложенных петель Вильсона. В статье [10] подробно изучается как краевые, так и угловые состояния различных топологических фаз и показано, что они обладают особой особенностью устойчивости спектра. Например, хотя краевые и угловые состояния дипольных фаз, находящихся в запрещенной зоне, могут быть перенесены в объёмные зоны путём настройки граничных условий, они могут проходить через объёмные зоны и вновь появляться в другой запрещённой зоне. Для двухзонных квадрупольных фаз можно найти режим, в котором обе запрещённые зоны одновременно содержат набор угловых состояний, и, что интересно, аномалия заполнения одного набора угловых состояний может оставить свои следы в аномалии заполнения другого набора угловых состояний ячеек, хотя они разделены большим количеством крупных ячеек. Богатая топологическая физика, обнаруженная в простом магнитооптическом фотонном кристалле, не только даёт новое понимание топологических фаз более высокого порядка в фотонных системах с нарушенной симметрией, но и может найти многообещающие применения за счёт использования потенциалов как краёв, так и углов ячеек фотонных систем.

В статье [11] представлены результаты исследования гексагональной полости, поддерживающей киральные топологические моды шепчущей галереи, образованные гирромагнитным фотонным кристаллом. Этот режим представляет собой уникальный тип топологически защищённого состояния, демонстрирующий хиральность при распространении внутри фотонных кристаллов. Моделирование методом конечных элементов демонстрирует наличие дискретных краевых состояний внутри топологической запрещенной зоны, возникающих в результате взаимодействия киральных краевых состояний и мод шепчущей галереи. Поскольку резонатор поддерживает исключительно режимы краевого состояния с групповой скоростью в одном направлении, он может генерировать чисто бегущие режимы и остаётся невосприимчивым к интерференционным режимам. Кроме того, в статье [11] ввели дефекты и беспорядок для оценки устойчивости резонатора, продемонстрировав эффективное поддержание киральных топологических мод шепчущей галереи при различных возмущениях. В статье [11] платформа с топологическими резонаторами предлагает полезный прототип надёжных топологических фотонных устройств. В статье [11] отмечено, что существование этой моды может иметь важные последствия для таких приложений, как топологические устройства на бегущей волне и эффективные оптические соединители.

Локализация света, полезная для улучшения взаимодействия света и материи, лежит в основе исследований фотоники. Для локализации света предложены различные подходы, в том числе основанные на динамической локализации, топологических тривиальных или нетривиальных дефектах запрещённой зоны фотонных кристаллов и связанных состояниях в континууме. В статье [12] предложен инновационный метод локализации света в непрерывных системах с помощью фотонных угловых скин-мод, которые представляют собой гибридные скин-топологические моды как особый вид неэрмитова скин-эффекта второго порядка с симметрично распределёнными усилением и потерями. В частности, в статье [12] предлагается использовать слабый псевдоинверсионный симметричный коэффициент усиления и потерь, который не закрывает

запрещённую зону системы, для реализации неэрмитова фотонного изолятора Черна с киральными краевыми состояниями. Затем киральные краевые состояния накапливаются в определённых углах системы. В непрерывных системах прогнозируются такие интригующие явления, как угловые скин-моды, возникающие в результате лежащего в их основе биполярного неэрмитова скин-эффекта второго порядка, а также многоугольные скин-моды [12].

В периодических системах зонные вырождения обычно защищаются и классифицируются с помощью пространственной симметрии. Однако в фотонных системах точка Γ на нулевой частоте является внутренним вырождением из-за степени свободы поляризации электромагнитных волн. Для киральных фотонных кристаллов такое внутреннее вырождение несёт киральный топологический заряд ± 2 , имея при этом линейную зонную дисперсию, что отличается от общего представления о том, что узлы заряда 2 связаны с квадратичными дисперсиями. В статье [13] показано, что эти топологические признаки возникают из точки Вейля со спином 1 в узле тройного вырождения с нулевой частотой из-за существования электростатической плоской зоны. Такой топологический заряд на нулевой частоте обычно скрыт в выступах объёмных зон и никогда экспериментально не наблюдался. Чтобы решить эту проблему, в статье [13] вводится винтовая симметрия пространственной группы в конструкцию кирального фотонного кристалла, которая делает границу зоны Бриллюэна противоположно заряженной узловоей поверхностью, охватывающей точку Γ . В результате возникающие дуги Ферми вынуждены соединять проекции этих топологических особенностей, что позволяет их экспериментальное наблюдение. Тогда количество дуг Ферми напрямую показывает внедрённый топологический заряд на нулевой частоте [13].

Недавно обнаруженные состояния более высокого порядка значительно обогащают изучение топологических фаз, позволяя манипулировать волнами, распространяющимися или локализующимися более чем на одно измерение ниже, чем объём. На сегодняшний день обширные топологические фазы высшего порядка были продемонстрированы в фотонике, акустике, механике и электронике; однако обычно это происходит в сценариях, свободных от магнитных полей. В статье [14] сообщается о реализации магнитных угловых состояний в двумерном гиромангнитном фотонном кристалле с сотовой решёткой. Одновременно нарушая как симметрию обращения времени, так и симметрию четности с помощью одноподрешёточного магнитного смещения, в статье [14] тщательно создаётся разрыв в собственных бесцелевых киральных краевых состояниях фазы квантового Холла. В статье [14] в полных запрещённых зонах экспериментально наблюдается пара нетрадиционных угловых состояний, возникающих в результате гибридизации двух центров Ванье с образованием симметричных и антисимметричных мод. Более того, в статье [14] показано, что можно включать (выключать) локализацию угловых полей исключительно путем добавления (удаления) магнитных полей угловых узлов, не меняя при этом других конфигураций.

В статье [15] представлен подход обратного проектирования, позволяющий значительно улучшить показатели качества киральной фотоники с квантовыми эмиттерами в топологических фотонно-кристаллических пластинчатых волноводах. Начиная с топологической моды волновода с групповым индексом примерно 10 и максимальным прямым или обратным фактором Парселла в киральной точке менее 0.5, в статье [15] выполнена оптимизация направленного фактора Парселла. В статье [15] используется полностью трёхмерный метод расширения управляемых мод для эффективного расчёта свойств и мод дисперсии полос волновода, а автоматическое дифференцирование используется для расчёта градиента целевых функций. В статье [15] представлены два примера улучшенных схем: топологический режим с индексом доступной группы примерно 30 и максимальным однонаправленным фактором Перселла в киральной точке

более 4.5, что представляет собой почти 10-кратное улучшение фактора Перселла, и режим медленного света, расположенный далеко от края зоны Бриллюэна, с групповым индексом более 350 и максимальным однонаправленным фактором Парселла в киральной точке более 45.

В статье [16] показываем, что адиабатические циклы в двумерных кристаллах с исчезающими дипольными моментами (и, следовательно, с нулевым общим переносом частиц) тем не менее могут быть топологически нетривиальными. Эти циклы связаны с топологией более высокого порядка и могут быть диагностированы по их способности обеспечивать транспортировку из угла в угол на определенных платформах метаматериалов. В статье [16] экспериментально проверен перенос из угла в угол, связанный с этим топологическим насосом, используя массив фотонных волноводов, адиабатически модулированных по их расстояниям и показателям преломления. Сопоставляя продемонстрированное в статье [16] динамическое явление из двух пространственных и одного временного измерений в три пространственных измерения, наблюдения эквивалентны наблюдению киральных шарнирных состояний в трёхмерном топологическом изоляторе второго порядка.

В статье [17] на примере холестерического жидкого кристалла и рассмотрения его как многослойной стопки двулучепреломляющих пластин используется метод матрицы переноса для анализа распространения света в общей киральной среде с учетом межслоевого отражения и пропускания. В статье [17] на основе матрицы переноса распределение электрического поля может быть выражено в виде как линейно, так и циркулярно поляризованных компонентов, чтобы можно было обсудить изменение состояния поляризации света в процессе передачи. В статье [17] показано, что матрицу переноса одной и той же среды с разной киральностью можно преобразовать, лишь меняя матрицу вращения в процессе расчёта. В статье [17] рассчитаны распределения электрического поля, зонная структура, спектры пропускания и отражения при нормальном падении циркулярно-поляризованного света на холестерические жидкие кристаллы или на составные периодические структуры левосторонних и правосторонних холестерических жидких кристаллов. В статье [17] результаты, полученные с помощью этого метода матрицы переноса, хорошо согласуются с результатами, полученными методом, основанным на решении собственных значений уравнений Максвелла. Наконец, метод матрицы переноса используется для расчёта динамических пропускающих свойств холестерических жидких кристаллов под действием внешнего магнитного поля, что имеет большое значение для исследования оптических устройств бесконтактного управления. В статье [17] представленный вычислительный метод экономит вычислительное время и может быть использован для создания новых фотонных микроструктур с различными киральными средами.

Фотонно-кристаллический резонатор H1 поддерживает две вырожденные дипольные моды с ортогональной линейной поляризацией, которые могут вызывать поля с круговой поляризацией при возбуждении с разностью фаз $\pi/2$. Однако ошибки изготовления имеют тенденцию нарушать симметрию резонатора, что снимает вырождение мод, делая резонатор непригодным для поддержания круговой поляризации. В статье [18] численно продемонстрирована схема, которая вызывает киральность в модах резонатора, тем самым достигая резонатора, который поддерживает внутреннюю круговую поляризацию. Выборочно модифицируя два воздушных отверстия вокруг полости, дипольные моды могут взаимодействовать посредством асимметричного когерентного обратного рассеяния, что является неэрмитовым процессом. При подходящих параметрах воздушного отверстия моды резонатора приближаются к исключительной точке, объединяясь по частотам и ширине линий, а также вызывая значительную круговую поляризацию, близкую к единице. Направленность киральности может быть выбрана в зави-

симости от выбора модифицированных воздушных отверстий. Результаты, полученные в статье [18], подчеркивают перспективу использования фотонно-кристаллической полости H1 для кирального взаимодействия света и материи в таких приложениях, как долинатроника, спин-фотонные интерфейсы и генерация одиночных фотонов с чётко определёнными спинами.

Хиральные, топологически защищённые фотонные поверхностные квантовые состояния можно обнаружить на границе между гиротропными фотонными кристаллами, где изменяющееся магнитное поле индуцирует различную топологию на границе раздела. Обычно требуются фотонные кристаллы либо с подходящей зонной структурой по обе стороны границы раздела, обеспечивающей запрещённую зону и кратковременный распад поверхностных состояний вдали от границы раздела, либо с внешним слоем с специально разработанными свойствами материала. В статье [19] показывается возникновение топологических однонаправленных поверхностных состояний на границе конечных гиротропных фотонных кристаллов с простой квадратной решеткой и вращательной симметрией C_4 , ограниченных вакуумом, что устраняет необходимость во внешнем слое для обеспечения киральных поверхностных мод. В статье [19] рассмотрение начинается с бесконечного фотонного кристалла, нарушающего временную симметрию, с запрещённой зоной, связанной с полосами с ненулевыми числами Черна, отличными от полностью нулевых чисел Черна в воздухе. Затем мы модифицируем фотонный кристалл, чтобы переместить эту запрещённую зону ниже световой линии, сохраняя при этом разрывы числа Черна. В статье [19] расчёты зонной структуры суперячейки, аппроксимирующей фотонный кристалл, конечный в нормальном к поверхности направлении, демонстрируют существование, дисперсию и киральность поверхностной моды. Обширные расчёты прямого рассеяния для точечного источника и пространственный анализ Фурье дополнительно выявили однонаправленное топологическое состояние поверхности в свободном пространстве, которое распространяется против часовой стрелки вокруг поверхности конечного фотонного кристалла, обеспечивая почти надёжный способ перекрестной проверки зонной структуры поверхностных мод не подвержено влиянию обратного рассеяния от локальных дефектов. Кроме того, в статье [19] моделирование рассеяния позволяет независимо охарактеризовать дисперсию состояний и выявить устойчивость распространения топологических плазмонных мод вокруг 90° изгибов структуры, обусловленного только утечкой излучения. В статье [19] в отличие от скрытых топологических поверхностных состояний, наблюдаемые поверхностные моды на границе раздела фотонный кристалл-воздух имеют то преимущество, что они доступны внешнему миру, что позволяет использовать преимущества толерантных к дефектам поверхностных мод без обратного рассеяния для создания эмиссии из фотонных состояний. поверхности кристаллов в произвольные формы и направления лучей в свободном пространстве.

В статье [20] выясняется, что топологические моды кольцевого резонатора, распространяющиеся вдоль границы раздела двух различных по топологии фотонных кристаллов сотового типа, могут быть использованы для достижения стабильной одномодовой генерации с максимальной интенсивностью, большей, чем у аналога моды шепчущей галереи на порядок величины.

Анализ научной литературы по фотонным кристаллам показывает актуальность темы исследования.

Теоретическая модель оптических процессов в наноструктурах с одномерными фотонными кристаллами типа ABC

Рассмотрим оптические процессы в фотонных кристаллах из периодически повторяющихся слоёв А и В, разделённых слоем С. Матрицей слоя С является SiO_2 .

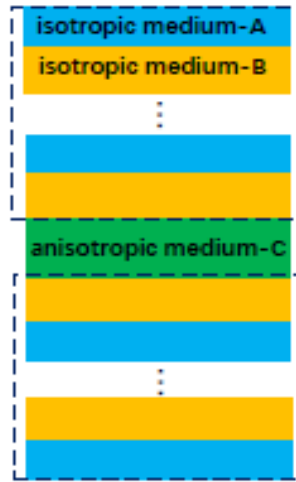


Рис. 1. Структура фотонного кристалла типа ABC

На рис. 1 приведено изображение структуры фотонного кристалла типа ABC.

Слой А имеет толщину d_A и показатель преломления n_A . Слой В имеет толщину d_B и показатель преломления n_B . Слой С имеет толщину d_C и показатель преломления n_C . Эффективная диэлектрическая проницаемость системы из трёх слоёв А, В и С описывается тензором:

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_t & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_t & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_n \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где

$$\varepsilon_t = \frac{\varepsilon_{At}d_A N + \varepsilon_{Bt}d_B N + \varepsilon_{Ct}d_C}{d}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_n = \frac{d}{d_A N / \varepsilon_{At} + d_B N / \varepsilon_{Bt} + d_C / \varepsilon_{Ct}}, \quad (3)$$

где N – число повторяющихся слоёв в структуре фотонного кристалла.

Для определения продольных компонент тензора диэлектрической проницаемости ячейки фотонного кристалла применим следующие формулы смешения:

$$\varepsilon_{At} = f_A \varepsilon_{Ai} + (1 - f_A) \varepsilon_{Am}, \quad (4)$$

$$\varepsilon_{Bt} = f_B \varepsilon_{Bi} + (1 - f_B) \varepsilon_{Bm}, \quad (5)$$

$$\varepsilon_{Ct} = f_C \varepsilon_{Ci} + (1 - f_C) \varepsilon_{Cm}. \quad (6)$$

Для определения поперечных компонент тензора диэлектрической проницаемости ячейки фотонного кристалла применим следующие формулы смешения:

$$\varepsilon_{An} = \frac{1}{\frac{f_A}{\varepsilon_{Ai}} + \frac{(1-f_A)}{\varepsilon_{Am}}}, \quad (7)$$

$$\varepsilon_{Bn} = \frac{1}{\frac{f_B}{\varepsilon_{Bi}} + \frac{(1-f_B)}{\varepsilon_{Bm}}}, \quad (8)$$

$$\varepsilon_{Cn} = \frac{1}{\frac{f_C}{\varepsilon_{Ci}} + \frac{(1-f_C)}{\varepsilon_{Cm}}}. \quad (9)$$

Для системы включений воспользуемся формулой

$$\varepsilon_i = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}, \quad (10)$$

в которой $\varepsilon_\infty = 5$, $\omega_p = 2\pi \cdot 2175$ ТГц, $\gamma = 2\pi \cdot 4.35$ ТГц.

Волновое число электромагнитной волны в слое А найдём по формуле:

$$k_A = n_A k_0 = n_A \frac{\omega}{c} = \sqrt{\varepsilon_A} \frac{\omega}{c} = n_A \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (11)$$

Волновое число электромагнитной волны в слое В найдём по формуле:

$$k_B = n_B k_0 = n_B \frac{\omega}{c} = \sqrt{\varepsilon_B} \frac{\omega}{c} = n_B \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (12)$$

Волновое число электромагнитной волны в слое С найдём по формуле:

$$k_C = n_C k_0 = n_C \frac{\omega}{c} = \sqrt{\varepsilon_C} \frac{\omega}{c} = n_C \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (13)$$

Дисперсионное соотношение электромагнитных волн в одномерном фотонном кристалле с бесконечным числом слоёв имеет вид:

$$\begin{aligned} \cos Kd = & \cos k_A d_A \cos k_B d_B \cos k_C d_C - \\ & - \frac{1}{2} \left(\frac{k_B}{k_A} + \frac{k_A}{k_B} \right) \left(\frac{k_C}{k_B} + \frac{k_B}{k_C} \right) \sin k_A d_A \sin k_B d_B \sin k_C d_C. \end{aligned} \quad (14)$$

Учитывая соотношения (11), (12) и (13), получаем

$$\begin{aligned} \cos Kd = & \cos k_A d_A \cos k_B d_B \cos k_C d_C - \\ & - \frac{1}{2} \left(\frac{n_B}{n_A} + \frac{n_A}{n_B} \right) \left(\frac{n_C}{n_B} + \frac{n_B}{n_C} \right) \sin k_A d_A \sin k_B d_B \sin k_C d_C. \end{aligned} \quad (15)$$

Выражаем

$$\begin{aligned} K = \frac{1}{d} \arccos \left(\cos k_A d_A \cos k_B d_B \cos k_C d_C - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \left(\frac{n_B}{n_A} + \frac{n_A}{n_B} \right) \left(\frac{n_C}{n_B} + \frac{n_B}{n_C} \right) \sin k_A d_A \sin k_B d_B \sin k_C d_C \right). \end{aligned} \quad (16)$$

Дополнительные ветви дисперсионной кривой находятся из соотношений:

$$K_A = \frac{G_A}{2} \frac{k_A \Lambda}{\sqrt{\varepsilon_A + \frac{\Delta\varepsilon_A}{2}}}, \quad (17)$$

$$K_B = \frac{G_B}{2} \frac{k_B \Lambda}{\sqrt{\varepsilon_B - \frac{\Delta\varepsilon_B}{2}}}, \quad (18)$$

$$K_C = \frac{G_C}{2} \frac{k_C \Lambda}{\sqrt{\varepsilon_C - \frac{\Delta\varepsilon_C}{2}}}, \quad (19)$$

где

$$G_A = \frac{2\pi}{d_A}, \quad (20)$$

$$G_B = \frac{2\pi}{d_B}, \quad (21)$$

$$G_C = \frac{2\pi}{d_C}. \quad (22)$$

Результаты численного решения дисперсионного уравнения в наноструктурах с одномерными фотонными кристаллами типа ABC

Приведём результаты численных расчётов дисперсионной зависимости электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC.

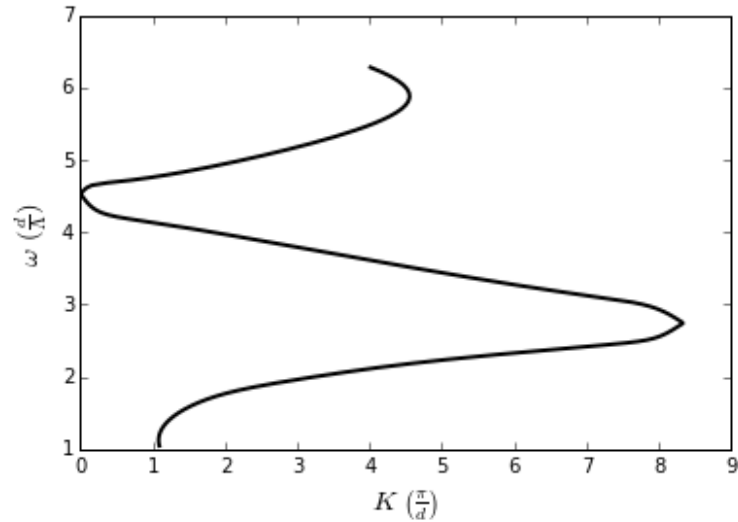


Рис. 2. Дисперсионная зависимость $\omega(K)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.05$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$

На рис. 2 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.05$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$.

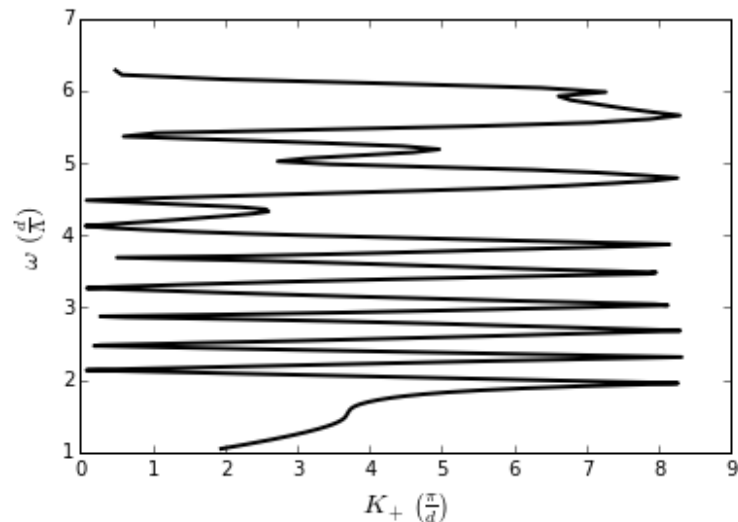


Рис. 3. Дисперсионная зависимость $\omega(K_+)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.05$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$

На рис. 3 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K_+)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм,

$d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.05$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$.

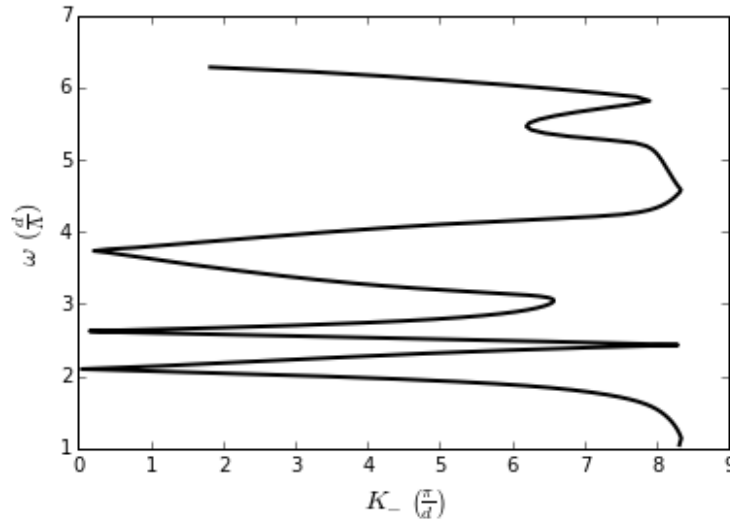


Рис. 4. Дисперсионная зависимость $\omega(K_-)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.05$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$

На рис. 4 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K_-)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.05$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$.

Изменим фактор заполнения среды А.

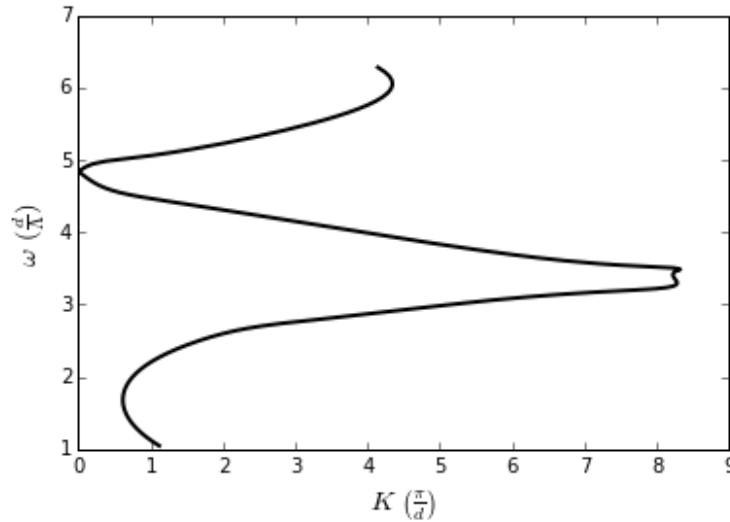


Рис. 5. Дисперсионная зависимость $\omega(K)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.2$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$

На рис. 5 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.2$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$.

На рис. 6 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K_+)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.2$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$.

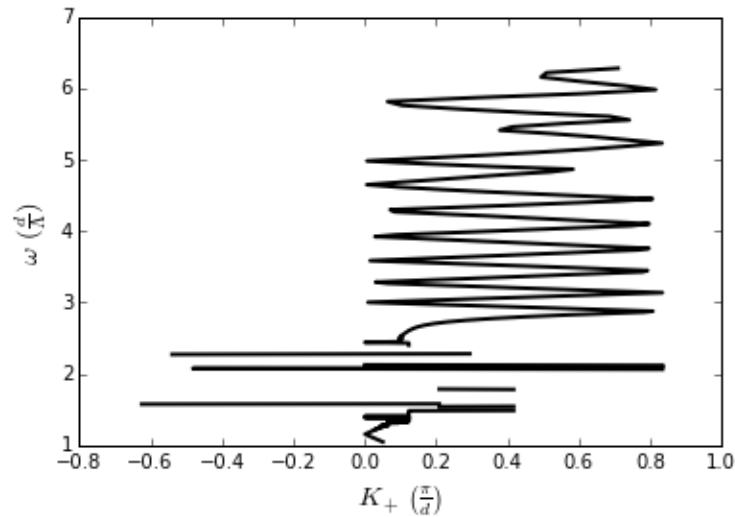


Рис. 6. Дисперсионная зависимость $\omega(K_+)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.2$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$

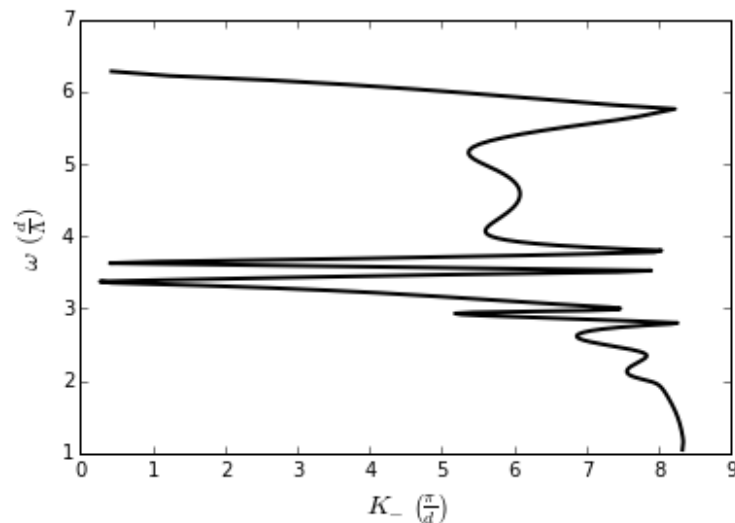


Рис. 7. Дисперсионная зависимость $\omega(K_-)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.2$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$

На рис. 7 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K_-)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.2$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$.

Изменим число слоёв. Возьмём число слоёв, равным $N = 100$, для фотонного кристалла типа ABC.

На рис. 8 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 100$, $f_A = 0.3$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$.

На рис. 9 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K_+)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 100$, $f_A = 0.3$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$.

На рис. 10 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K_-)$ элек-

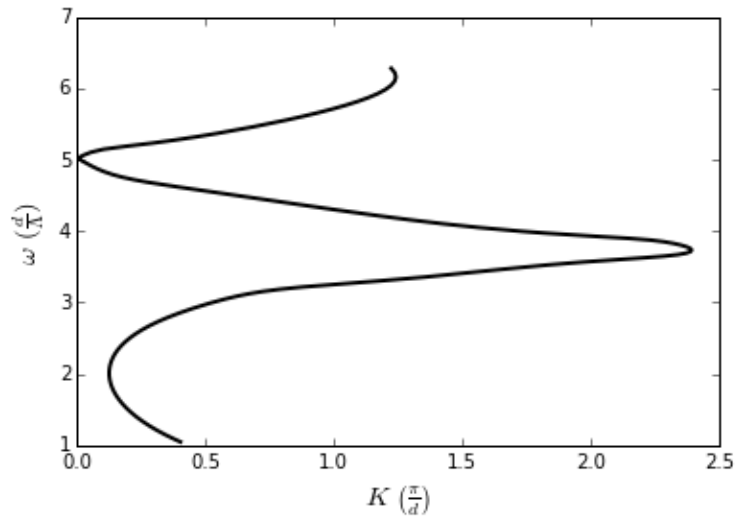


Рис. 8. Дисперсионная зависимость $\omega(K)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 100$, $f_A = 0.3$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$

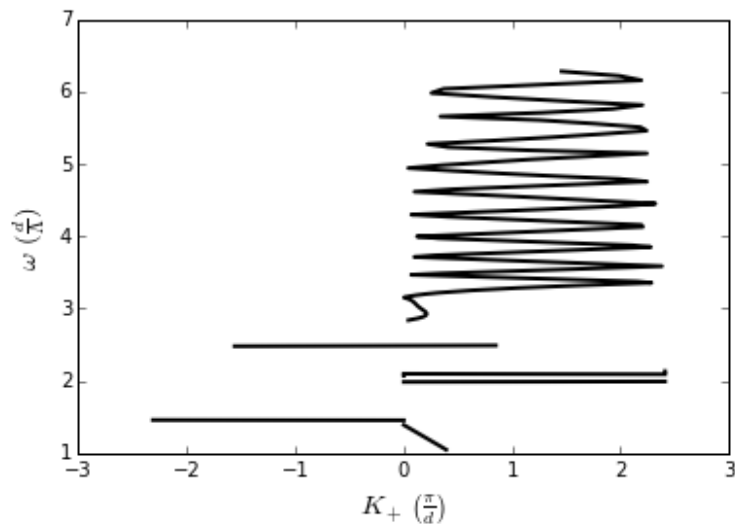


Рис. 9. Дисперсионная зависимость $\omega(K_+)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 100$, $f_A = 0.3$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$

электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 100$, $f_A = 0.3$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$.

Проведённые компьютерные вычисления для наноструктур с фотонными кристаллами позволили получить дисперсионные зависимости света в наноструктурах с фотонными кристаллами, в которых наблюдалось появление фотонных запрещённых зон, свидетельствующих о специфических оптических свойствах наноструктур с фотонными кристаллами.

Заключение

По результатам исследования можно сделать следующие выводы: обзор научной литературы по физическим свойствам фотонных кристаллов показал актуальность исследования оптических процессов в наноструктурах с фотонными кристаллами, проведён-

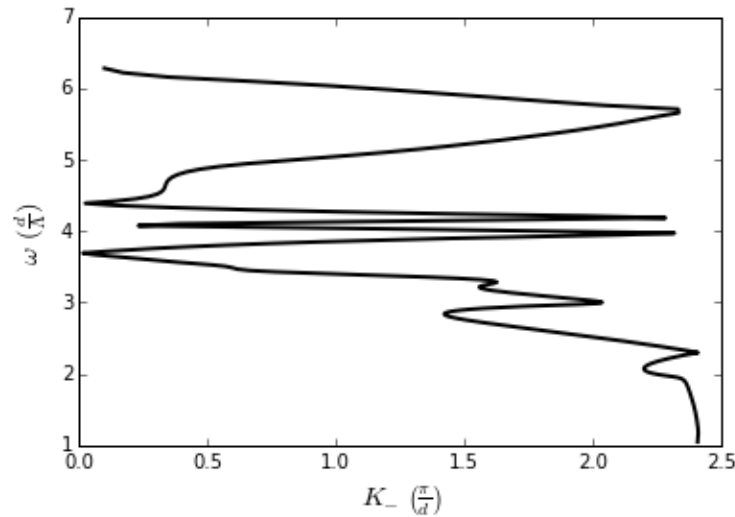


Рис. 10. Дисперсионная зависимость $\omega(K_-)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 100$, $f_A = 0.3$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$

ные компьютерные расчёты для наноразмерных структур с одномерными фотонными кристаллами типа ABC позволили построить графики дисперсионных зависимостей света в наноструктурах с одномерными фотонными кристаллами типа ABC, в которых наблюдалось появление фотонных запрещённых зон, свидетельствующих о специфических оптических свойствах наноструктур с фотонными кристаллами типа ABC.

Гипотеза исследования, заключающаяся в том, что если выявить особенности оптических свойств фотонных кристаллов типа ABC, то курс квантовой оптики наноструктур можно наполнить теоретическими сведениями по фотонным кристаллам типа ABC, подтверждена полностью.

Исследование оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами типа АВ в контексте квантовой оптики наноструктур имеет важное теоретическое значение для расширения понимания оптических явлений и физических процессов в фотонных кристаллах типа АВ, поскольку оно помогает лучше понимать основные физические принципы функционирования наноструктур на основе фотонных кристаллов типа АВ и взаимодействие наноструктур на основе фотонных кристаллов типа АВ с оптическим излучением. Исследование оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами имеет важное практическое значение, поскольку оно может помочь в разработке новых методов и технологий, основанных на оптических свойствах наноструктур с фотонными кристаллами типа АВ, а также в создании новых оптоэлектронных приборов и устройств с улучшенными физическими характеристиками. Исследование оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами типа АВ может быть использовано в различных областях физики и техники, включая нанооптику, нанофотонику, квантовую электронику.

Список использованных источников

1. Optical properties of chiral three-dimensional photonic crystals / Shun Takahashi [et al.] // Physical Review B. — 2023. — apr. — Vol. 107, no. 16. — P. 165307. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/physrevb.107.165307>.
2. Chiral quantum optics in broken-symmetry and topological photonic crystal waveguides / Nils Valentin Hauff [et al.] // Physical Review Research. — 2022. — apr. —

- Vol. 4, no. 2. — P. 023082. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/physrevresearch.4.023082>.
3. Chiral dual-core photonic crystal fiber for an efficient circular polarization beam splitter / She Li [et al.] // *Photonics*. — 2023. — jan. — Vol. 10, no. 1. — P. 45. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/photonics10010045>.
 4. Прохождение света через запрещённую зону в киральных средах / Е. В. Аксенова [и др.] // *Оптика и спектроскопия*. — 2008. — Т. 104, № 6. — С. 1001–1012. — URL: <https://www.elibrary.ru/imqodl>.
 5. Лазер циркулярно-поляризованного излучения на основе полупроводникового микрорезонатора с киральным фотонным кристаллом / А. А. Деменев [и др.] // XIII Российская конференция по физике полупроводников. Екатеринбург, 02-06 октября 2017 года. Тезисы докладов. — Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН, 2017. — С. 376–376. — URL: <https://www.elibrary.ru/xwjzwh>.
 6. Долганов П. В., Бакланова К. Д., Долганов В. К. Спектральные и поляризационные характеристики света, прошедшего через холестерический фотонный кристалл // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2020. — Т. 157, № 5. — С. 936–943. — URL: <https://www.elibrary.ru/zhvncp>.
 7. Аксенова Е. В., Крюков Е. В., Романов В. П. Особенности распространения света в киральных средах // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2007. — Т. 132, № 6. — С. 1435–1453. — URL: <https://www.elibrary.ru/iirvqj>.
 8. Classical approaches to chiral polaritonics / L. Mauro [et al.] // *Physical Review A*. — 2024. — feb. — Vol. 109, no. 2. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.109.023528>.
 9. Valley kink states and valley-polarized chiral edge states in substrate-integrated topological photonic crystals / Jianfei Han [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2024. — jan. — Vol. 21, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.21.014046>.
 10. Chern, dipole, and quadrupole topological phases of a simple magneto-optical photonic crystal with a square lattice and an unconventional unit cell / Zhihao Lan [et al.] // *Physical Review B*. — 2024. — jan. — Vol. 109, no. 4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.109.045402>.
 11. Chiral topological whispering gallery modes formed by gyromagnetic photonic crystals / Yongqi Chen [et al.] // *Physical Review B*. — 2023. — nov. — Vol. 108, no. 19. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.108.195423>.
 12. Zhu Weiwei, Gong Jiangbin. Photonic corner skin modes in non-Hermitian photonic crystals // *Physical Review B*. — 2023. — jul. — Vol. 108, no. 3. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.108.035406>.
 13. Intrinsic triple degeneracy point bounded by nodal surfaces in chiral photonic crystal / Dongyang Wang [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2023. — may. — Vol. 130, no. 20. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.203802>.
 14. Magnetic corner states in a two-dimensional gyromagnetic photonic crystal / Yan-Chen Zhou [et al.] // *Physical Review B*. — 2023. — jan. — Vol. 107, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.107.014105>.

15. Nussbaum Eric, Rotenberg Nir, Hughes Stephen. Optimizing the chiral Purcell factor for unidirectional single-photon emitters in topological photonic crystal waveguides using inverse design // *Physical Review A*. — 2022. — sep. — Vol. 106, no. 3. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.106.033514>.
16. Higher-order topological pumping and its observation in photonic lattices / Wladimir A. Benalcazar [et al.] // *Physical Review B*. — 2022. — may. — Vol. 105, no. 19. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.105.195129>.
17. Transfer matrix method for light propagation in variable complex chiral media / Yu Wang [et al.] // *Physical Review E*. — 2021. — dec. — Vol. 104, no. 6. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.104.064702>.
18. Chiral modes near exceptional points in symmetry broken H1 photonic crystal cavities / C. F. Fong [et al.] // *Physical Review Research*. — 2021. — nov. — Vol. 3, no. 4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevResearch.3.043096>.
19. Chiral topological surface states on a finite square photonic crystal bounded by air / Anna C. Tasolamprou [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2021. — oct. — Vol. 16, no. 4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.16.044011>.
20. Sun Xiao-Chen, Hu Xiao. Topological ring-cavity laser formed by honeycomb photonic crystals // *Physical Review B*. — 2021. — jun. — Vol. 103, no. 24. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.103.245305>.

Сведения об авторах:

Константин Константинович Алтуни — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики и технических дисциплин ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: kostya_altunin@mail.ru

ORCID iD  0000-0002-0725-9416

Web of Science ResearcherID  I-5739-2014

SCOPUS ID  57201126207

IstinaResearcherID  66185348

Регина Рамилевна Алиева — студент факультета физико-математического и технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: alieva02regina@mail.ru

ORCID iD  0000-0003-2871-3486

Web of Science ResearcherID  AAX-8215-2021

Original article
PACS 42.25.Bs
OCIS 310.6628
MSC 00A79

Investigation of the optical properties of nanostructures with one-dimensional photonic crystals of the ABC type

K. K. Altunin , R. R. Alieva 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted April 11, 2024
Resubmitted April 12, 2024
Published June 12, 2024

Abstract. The optical properties of nanostructures with one-dimensional ABC type photonic crystals are considered. A theoretical model of optical processes in nanostructures with one-dimensional photonic crystals of the ABC type is proposed. A numerical solution to the dispersion equation for electromagnetic waves in nanostructures with one-dimensional photonic crystals of the ABC type is obtained. Computer calculations carried out for nanoscale structures with one-dimensional photonic crystals of the ABC type made it possible to construct graphs of the dispersion dependences of light in nanostructures with one-dimensional photonic crystals of the ABC type, in which the appearance of photonic band gaps was observed, indicating the specific optical properties of nanostructures with photonic crystals of the ABC type.

Keywords: optical radiation, refractive index, photonic crystal, nanostructure, electromagnetic wave, dispersion equation, photonic band gap, optical properties of nanostructures

References

1. Optical properties of chiral three-dimensional photonic crystals / Shun Takahashi [et al.] // *Physical Review B*. — 2023. — apr. — Vol. 107, no. 16. — P. 165307. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/physrevb.107.165307>.
2. Chiral quantum optics in broken-symmetry and topological photonic crystal waveguides / Nils Valentin Hauff [et al.] // *Physical Review Research*. — 2022. — apr. — Vol. 4, no. 2. — P. 023082. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/physrevresearch.4.023082>.
3. Chiral dual-core photonic crystal fiber for an efficient circular polarization beam splitter / She Li [et al.] // *Photonics*. — 2023. — jan. — Vol. 10, no. 1. — P. 45. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/photonics10010045>.
4. Transmission of light through the band gap in chiral media / E. V. Aksenova [et al.] // *Optics and spectroscopy*. — 2008. — Vol. 104, no. 6. — P. 1001–1012. — URL: <https://www.elibrary.ru/imqodl>.

5. Laser of circularly polarized radiation based on a semiconductor microcavity with a chiral photonic crystal / A. A. Demenev [et al.] // XIII Russian conference on semiconductor physics. Ekaterinburg, October 02-06, 2017. Abstracts of reports. — Institute of Metal Physics named after M. N. Mikheev Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2017. — P. 376–376. — URL: <https://www.elibrary.ru/xwjzwh>.
6. Dolganov P.V., Baklanova K.D., Dolganov V.K. Spectral and polarization characteristics of light passed through a cholesteric photonic crystal // Journal of experimental and theoretical physics. — 2020. — Vol. 157, no. 5. — P. 936–943. — URL: <https://www.elibrary.ru/zhvncp>.
7. Aksenova E. V., Kryukov E. V., Romanov V. P. Features of light propagation in chiral media // Journal of experimental and theoretical physics. — 2007. — Vol. 132, no. 6. — P. 1435–1453. — URL: <https://www.elibrary.ru/iirvqj>.
8. Classical approaches to chiral polaritonics / L. Mauro [et al.] // Physical Review A. — 2024. — feb. — Vol. 109, no. 2. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.109.023528>.
9. Valley kink states and valley-polarized chiral edge states in substrate-integrated topological photonic crystals / Jianfei Han [et al.] // Physical Review Applied. — 2024. — jan. — Vol. 21, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.21.014046>.
10. Chern, dipole, and quadrupole topological phases of a simple magneto-optical photonic crystal with a square lattice and an unconventional unit cell / Zhihao Lan [et al.] // Physical Review B. — 2024. — jan. — Vol. 109, no. 4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.109.045402>.
11. Chiral topological whispering gallery modes formed by gyromagnetic photonic crystals / Yongqi Chen [et al.] // Physical Review B. — 2023. — nov. — Vol. 108, no. 19. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.108.195423>.
12. Zhu Weiwei, Gong Jiangbin. Photonic corner skin modes in non-Hermitian photonic crystals // Physical Review B. — 2023. — jul. — Vol. 108, no. 3. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.108.035406>.
13. Intrinsic triple degeneracy point bounded by nodal surfaces in chiral photonic crystal / Dongyang Wang [et al.] // Physical Review Letters. — 2023. — may. — Vol. 130, no. 20. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.203802>.
14. Magnetic corner states in a two-dimensional gyromagnetic photonic crystal / Yan-Chen Zhou [et al.] // Physical Review B. — 2023. — jan. — Vol. 107, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.107.014105>.
15. Nussbaum Eric, Rotenberg Nir, Hughes Stephen. Optimizing the chiral Purcell factor for unidirectional single-photon emitters in topological photonic crystal waveguides using inverse design // Physical Review A. — 2022. — sep. — Vol. 106, no. 3. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.106.033514>.
16. Higher-order topological pumping and its observation in photonic lattices / Wladimir A. Benalcazar [et al.] // Physical Review B. — 2022. — may. — Vol. 105, no. 19. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.105.195129>.

17. Transfer matrix method for light propagation in variable complex chiral media / Yu Wang [et al.] // *Physical Review E*. — 2021. — dec. — Vol. 104, no. 6. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.104.064702>.
18. Chiral modes near exceptional points in symmetry broken H1 photonic crystal cavities / C. F. Fong [et al.] // *Physical Review Research*. — 2021. — nov. — Vol. 3, no. 4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevResearch.3.043096>.
19. Chiral topological surface states on a finite square photonic crystal bounded by air / Anna C. Tasolamprou [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2021. — oct. — Vol. 16, no. 4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.16.044011>.
20. Sun Xiao-Chen, Hu Xiao. Topological ring-cavity laser formed by honeycomb photonic crystals // *Physical Review B*. — 2021. — jun. — Vol. 103, no. 24. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.103.245305>.

Information about authors:

Konstantin Konstantinovich Altunin — PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics and Technical Disciplines of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: kostya.altunin@mail.ru

ORCID iD  0000-0002-0725-9416


Web of Science ResearcherID  I-5739-2014

SCOPUS ID  57201126207

IstinaResearcherID  66185348

Regina Ramilevna Alieva — student of the Faculty of Physics, Mathematics and Technological Education of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: alieva02regina@mail.ru

ORCID iD  0000-0003-2871-3486

Web of Science ResearcherID  AAX-8215-2021