

Секция 1

Физические науки

1.1 Оптика

Научная статья

УДК 535.3

ББК 22.343

ГРНТИ 29.31.21

ВАК 1.3.6.

RACS 42.25.Bs

OCIS 310.6628

MSC 00A79

Исследование оптических свойств наноструктур с одномерными фотонными кристаллами типа АВ

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

Ключевые слова: оптическое излучение, фотонный кристалл, наноструктура, электромагнитная волна, дисперсионное уравнение, фотонная запрещённая зона

¹E-mail: alieva02regina@mail.ru

Введение

С развитием нанотехнологий и квантовой оптики наноструктур возникает всё больший интерес к исследованию оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами. Исследование оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами является актуальным направлением в области квантовой оптики и нанотехнологий. Исследование оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами позволяет улучшить физические характеристики существующих оптоэлектронных устройств и приборов.

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

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 АВ.

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

Научная новизна исследования заключается в выявлении особенностей оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами, что может послужить основой для разработки новых технологий в области нанооптики и наноэлектроники. Исследование оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами в контексте квантовой оптики наноструктур является новым и перспективным направлением исследований, которое позволяет получить новые знания о функционировании наноструктур с фотонными кристаллами. Разработка новых методов и технологий, основанных на оптических свойствах наноструктур с фотонными кристаллами, может привести к созданию новых материалов и устройств с улучшенными физическими характеристиками. Исследование оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами в контексте квантовой оптики наноструктур может помочь в решении актуальных проблем в области оптики, фотоники и квантовой электроники.

Исследование проводилось с использованием следующих методов исследования:

1. использование математических моделей и теоретических подходов для анализа оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами,
2. использование компьютерных программ, программных комплексов и алгоритмов для численного моделирования оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами,
3. для анализа оптических свойств наноструктур применялись теоретические методы, позволяющие описывать взаимодействие света с наноструктурами на различных длинах волн излучения.

В качестве материалов исследования использовались материалы наноразмерных структур с фотонными кристаллами различных геометрических размеров и форм, наноматериалы, изготовленные на основе фотонных кристаллов.

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

Теоретическая значимость исследования состоит в том, что исследование оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами в контексте курса квантовой

оптики наноструктур имеет важное теоретическое значение и расширяет понимание оптических явлений в фотонных кристаллах, поскольку оно помогает лучше понимать основные физические принципы функционирования наноструктур на основе фотонных кристаллов и взаимодействие с оптическим излучением.

Практическая значимость исследования состоит в том, что исследование оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами в контексте квантовой оптики наноструктур имеет важное практическое значение, поскольку оно может помочь в разработке новых методов и технологий, основанных на оптических свойствах наноструктур с фотонными кристаллами, а также в создании новых оптоэлектронных приборов и устройств с улучшенными физическими характеристиками. Исследование оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами может быть использовано в различных областях физики и техники, включая нанооптику, нанофотонику, квантовую электронику.

Обзор научных работ по оптическим свойствам наноструктур с фотонными кристаллами

Электродинамические процессы в различных фотонных кристаллах включают изучение уникальных физических характеристик металлофотонных и магнитофотонных структур, изучение плазмонных резонансов, прохождения оптического излучения, взаимодействия с электронными потоками и волновых процессов в различных материалах [1]. Кроме того, исследуются электродинамические свойства фотонно-кристаллических схем, легированных активными узлами решётки, с упором на механизмы распространения световых волн в плоскости с использованием строгих полуаналитических методов [2]. Изучена нелинейная динамика, индуцированная в подвешенных наномембранах фотонным кристаллом, действующим как деформируемое зеркало, наблюдая бистабильность и субгармонические резонансы высокого порядка за счёт электростатических сил, прикладываемых интегрированными электродами [3]. Эти исследования способствуют пониманию поведения света в фотонных структурах и их потенциального применения в субтерагерцовой и терагерцовой электронике [4].

В статье [2] исследован механизм распространения световых волн в плоскости в фотонно-кристаллических схемах, легированных активными узлами решётки, с использованием строгого полуаналитического метода. В статье [2] исследуются электродинамические свойства и особенно механизм распространения световых волн в плоскости в фотонно-кристаллических схемах, легированных активными узлами решётки, с упором на механизмы распространения световых волн в плоскости с использованием полуаналитического метода.

В работе [3] изучается нелинейная динамика, возникающая в подвешенных наномембранах, пронизанных фотонным кристаллом, действующим как деформируемое зеркало, работающее при нормальном падении оптического излучения. На мембрану воздействуют путём приложения электростатической силы, создаваемой встречно-штыревыми электродами, встроенными под мембрану. В работе [3] наблюдаются бистабильность и субгармонические резонансы высоких порядков.

В статье [4] исследовано влияние электрического поля на показатель преломления материалов в твёрдом состоянии, а результаты использованы при изготовлении большого количества оптических устройств, таких как перестраиваемые узкополосные интерференционные поляризационные монохроматоры, модуляторы света, deflectоры луча, преобразователи частоты и генераторы второй гармоники.

В статье [5] обсуждаются основные концепции и принципы фотонных кристаллов, а также их способности управлять светом и обеспечивать необычные оптические явления, такие как отрицательное преломление света, эффект суперпризмы и возможность

субволновой фокусировки. Фотонные кристаллы демонстрируют электродинамические процессы, такие как отрицательное преломление, эффект суперпризмы и суперлинзирование, благодаря своей периодической структуре, управляя светом уникальными способами на основе уравнений Максвелла. В статье [5] обсуждаются конкретные примеры, включая отрицательное преломление света, эффект суперпризмы (аномальная электромагнитная дисперсия) и возможность субволновой фокусировки. Это очень общие результаты, основанные на прямых решениях уравнений Максвелла.

В статье [6] исследуется фазовая и амплитудная динамика электромагнитного поля в двумерном фотонном кристалле при инъекции фемтосекундных импульсов, показывая, что обычное адиабатическое приближение, лежащее в основе динамики поля и носителей в полупроводниковом резонаторе, больше не справедливо. поскольку, вообще говоря, временем жизни фотона нельзя пренебрегать по отношению к времени жизни рекомбинации носителей. В статье [6] изучена неадиабатическая динамика электромагнитного поля и носителей заряда в фотонно-кристаллических резонаторах, обнаружена нарушение адиабатического приближения из-за взаимодействия времен жизни фотонов и носителей заряда. В статье [6] рассматривается как экспериментально, так и теоретически динамика фазы и амплитуды электромагнитного поля в двумерном фотонном кристалле при инъекции фемтосекундных импульсов. В статье [6] показано, что обычное адиабатическое приближение, лежащее в основе динамики поля и носителей в полупроводниковом резонаторе, больше не применимо, поскольку, вообще говоря, нельзя пренебрегать временем жизни фотона по отношению к времени жизни рекомбинации носителей. В статье [6] показаны области параметров, в которых адиабатичность нарушается, и предсказано повсеместное распространение наблюдаемого динамического сценария в новом поколении активных фотонных микрорезонаторов.

В статье [7] рассмотрено возбуждение диполем металлических фотонных кристаллов и получены аналитические выражения, позволяющие дать простую оценку частот, определяющих края запрещённой зоны в спектре собственных состояний такого кристалла, а также, для описания амплитудных характеристик излучения в низкочастотном диапазоне. В статье [7] анализируются электродинамические свойства металлических фотонных кристаллов, выводятся аналитические выражения для краёв запрещённой зоны и характеристик излучения, сравниваются с результатами, полученными численным моделированием.

В фотонно-кристаллических системах полоса пропускания импульса может быть полностью сжата до нуля, что приводит к полностью оптической остановке и хранению световых импульсов на кристалле, как обсуждает в статье [8]. Когда в фотонно-кристаллические системы вводится динамическое поведение, открываются новые удивительные возможности. Например, полосу пропускания импульса можно полностью сжать до нуля, что приведёт к полностью оптической остановке и хранению световых импульсов на кристалле. Спектр импульса также можно инвертировать вокруг центральной частоты, чтобы повернуть время оптического импульса вспять.

В статье [9] фотонно-кристаллический пластинчатый волноводный резонатор с наноструктурным нелинейным оптическим полимером второго порядка использовался для электрооптической модуляции с чувствительностью менее 1 В. Электрооптически перестраиваемые фотонные кристаллы демонстрируют линейную электрооптическую модуляцию, основанную на эффекте Погкельса, что обеспечивает чувствительность менее 1 В и сверхбыстрый отклик для нанофотонных устройств. В статье [9] сообщается об электрооптической модуляции с чувствительностью менее 1 В в фотонно-кристаллическом пластинчатом волноводном резонаторе, который содержит наноструктурированный нелинейный оптический полимер второго порядка. Электрооптическая восприимчивость в активной зоне была вызвана поляризацией сильного электрическо-

го поля. Квадратная решётка отверстий, несущих линейный дефект, была перенесена в пластину с помощью электронно-лучевой литографии и реактивного ионного травления, в результате чего был создан резонатор на основе фотонно-кристаллической пластины. Приложение внешнего напряжения электрической модуляции к электродам приводит к линейному электрооптическому сдвигу резонансного спектра и, следовательно, к модуляции пропускания на фиксированной длине волны на основе поляризации электронного смещения в нецентросимметричной среде (эффект Поккельса). Таким образом, этот эффект по своей природе быстрее, чем другие известные эффекты электрооптической модуляции в нанопотонике.

В работе [10] описано распространение света через электрооптический кристалл описывается на основе феноменологической теории и обсуждаются различные экспериментальные методы измерения этих физических эффектов, включая объёмные модуляторы, дефлекторы, а также модуляторы сосредоточенных и бегущих волн, изготовленные из волноводов. Распространение света через электрооптический кристалл описывается на основе феноменологической теории. Приведены некоторые физические аспекты, определяющие величину электрооптических эффектов, и обсуждаются различные экспериментальные методы измерения этих эффектов. В работе [10] в качестве показательных примеров важных электрооптических материалов LiNbO_3 , тетрагональные бронзы, перовскиты, KDP и полупроводники со структурой сфалерита характеризуются с точки зрения роста кристаллов, методов получения и диэлектрических свойств. Критически рассмотрены величины их электрооптических коэффициентов. Обсуждаются основные идеи различных типов модуляторов и последние достижения в производстве устройств. К ним относятся объёмные модуляторы, дефлекторы, а также модуляторы сосредоточенных и бегущих волн, изготовленные из волноводов. Наконец, в работе [10] объяснены электрооптическая бистабильность и фоторефрактивный эффект, который лежит в основе голографической памяти. Статья [10] может служить введением в электрооптические эффекты и документацией по специальным применениям кристаллов.

Фотонные кристаллы привлекли внимание благодаря их потенциалу в передовых оптических приложениях, чему способствовали достижения в области полупроводниковых технологий, позволяющие создавать структуры, сравнимые с длинами волн света. Фотонно-кристаллические устройства могут включать в себя различные компоненты, такие как диэлектрические подложки с изменяющейся диэлектрической проницаемостью, подвижные части, изменяющие структуру фотонных зон, оптические волноводы, резонаторы и слои графена. Используя периодичность наноразмерных структур с фотонными кристаллами, фотонные кристаллы обладают уникальными свойствами для управления и направления света, открывая возможности для инновационных оптических устройств и систем. Квантовые эмиттеры в твердотельных кристаллах привлекли значительное внимание благодаря быстрому развитию приложений квантовых технологий, таких как квантовые вычисления, квантовая связь и квантовое зондирование [11–14].

Двойные полудираковские конусы, возникающие из пары сосуществующих трижды вырожденных мод, могут быть проанализированы с помощью теории эффективного гамильтониана и эффективной среды, что сопровождается топологическими переходами на равночастотных поверхностях и значительными изменениями в электромагнитных откликах. В статье [15] обнаружено, что фотонный кристалл демонстрирует сильно анизотропные свойства переноса волн, то есть совершенно разные свойства переноса волн с разными направлениями волновых векторов в частотном диапазоне между двумя полудираковскими частотами. Однако на частотах полудираковских точек фотонный кристалл ведёт себя как эффективная двухнулевая среда для двух направлений распространения и как однонулевая среда для остальных направлений, особенно для

ортогональных поляризации. В статье [15] получены результаты, которые дают ценную информацию о трёхмерных искусственных материалах, демонстрируя особенности, отсутствующие в двумерных системах.

Искусственные периодические структуры, включая фотонные кристаллы и метаструктурные материалы, широко используются для управления распространением оптического излучения, тогда как их эффективный относительный импеданс и показатель преломления обычно связаны вместе, и их трудно проектировать отдельно. В статье [16] продемонстрировано, что с помощью вращательных деформаций внутри элементарных ячеек относительный импеданс Z_r двумерного фотонного кристалла можно гибко регулировать, при этом показатель преломления практически не изменяется. Это соответствует переходу эффективной относительной проницаемости, связанной с топологическим свойством нижней зоны. Таким образом, нулевое отражение при $Z_r = 1$ достигается в широком диапазоне частот вблизи краёв зоны, что важно для создания высокопроизводительных фотонных устройств.

В статье [17] исследуется, как изменение геометрии интерфейса с зигзага на интерфейс плоскости скольжения между двумя топологически различными объектами, имитирующими фотонные кристаллы, глубоко влияет на краевые состояния. В статье [17] экспериментально наблюдается переход от бесщелевых краевых состояний к щелевым, сопровождающийся появлением медленного света внутри зоны Бриллюэна, а не на её краю. В статье [17] численно моделируется распространение и измеряем коэффициент пропускания модифицированных краевых состояний через специально разработанный дефект, сохраняющий долину. Устойчивость к обратному рассеянию постепенно снижается, что указывает на нарушение переноса, зависящего от долины. В статье [17] продемонстрировано значение геометрии интерфейса для бесщелевых краевых состояний в долине Холла, имитирующей фотонные кристаллы.

Нанопотонные структуры, особенно содержащие фотонные кристаллы, открывают уникальные возможности в оптомеханике полостей, фотонике и сенсорных приложениях. Используя фотонно-кристаллические мембраны, можно создать новые оптомеханические платформы, позволяющие захватывать свет на неопределённый срок и облегчающие различные оптомеханические связи [18]. Кроме того, использование фотонных кристаллов в нанопучках на подложках из пористого кремния повышает чувствительность обнаружения олигонуклеотидов без меток, сочетая в себе высококачественный фактор с большей активной чувствительной областью [19]. Сверхрешётки плазмонных наночастиц с контролируемым расстоянием и высокими показателями преломления представляют собой альтернативу традиционным фотонным кристаллам, предлагая широкие фотонные полосы задерживания и высокие свойства отражения [20]. Эти достижения демонстрируют потенциал наноструктур с фотонными кристаллами в революционном преобразовании оптомеханических систем, сенсорных технологий и конструкции фотонных устройств [21].

В статье [18] нанопотонная структура используется для получения доступа к ранее недоступным режимам в оптомеханике резонаторов, таким как линейная или квадратичная связь дисперсионного или диссипативного типа, путём настройки фотонного рисунка и длины резонатора. Поскольку микроэлектронная технология приближается к пределу того, чего можно достичь с точки зрения скорости и уровня интеграции, растёт интерес к переходу от электроники к фотонике, где фотоны и световые лучи заменяют электроны и электрические токи, что приведёт к более высоким скоростям обработки и более низкому энергопотреблению, как указано в статье [19]. Наноструктуры, такие как фотонные кристаллы, обладают уникальными оптическими свойствами, что позволяет добиться прогресса в фотонике и оптоэлектронике за счёт использования таких квантовых физических явлений.

В статье [20] показано, что фотонно-кристаллические нанолучи на твердотельных подложках из пористого кремния обеспечивают обнаружение олигонуклеотидов без меток с высокой чувствительностью, большой активной площадью и совместимостью с КМОП-обработкой и лабораторными системами. Эти фотонные структуры сочетают в себе большую активную область чувствительности, присущую датчикам на фотонных кристаллах, с высоким коэффициентом добротности и низкомодовым объёмом, характерным для компактных резонансных фотонных кристаллов в устройствах на основе структуры кремния на изоляторе.

В статье [21] излагается набор принципов проектирования для изготовления фотонных кристаллов с желаемыми свойствами фотонной полосы задерживания с использованием преимуществ группы прокладок, параметра проектирования, ставшего возможным благодаря недавним достижениям в процессах сборки снизу вверх. Сверхрешётки плазмонных наночастиц предлагают новый подход к созданию фотонных кристаллов с контролируемым расстоянием и высоким показателем преломления, что обеспечивает широкие фотонные полосы задерживания и высокий коэффициент отражения. Фотонные кристаллы широко изучаются благодаря их широкому технологическому применению в лазерах, датчиках, оптических телекоммуникациях и устройствах отображения. Обычно фотонные кристаллы представляют собой периодические структуры соприкасающихся диэлектрических материалов с чередующимися высокими и низкими показателями преломления, и на сегодняшний день интересующие переменные сосредоточены в первую очередь на симметрии кристаллов и показателях преломления составляющих их материалов, в первую очередь полимеров и полупроводников. Напротив, моделирование во временной области с конечной разностью предполагает, что сверхрешётки плазмонных наночастиц с спейсерными группами предлагают альтернативный путь к фотонным кристаллам из-за контролируемого расстояния между наночастицами и высокого показателя преломления решёток, даже вдали от плазмонной частоты, где потери невелики. В статье [21] охарактеризованы и сравнены особенности полос задерживания 13 решёток Браве, что приводит к изменению парадигмы принципов проектирования фотонных кристаллов. На основе этих правил проектирования прогнозируется, что простая кубическая структура с параметром решётки порядка 130 нм будет иметь широкую фотонную полосу задерживания, свойство, подтвержденное синтезом структуры с помощью программируемой сборки ДНК и её характеристикой с помощью измерений отражательной способности. В статье [21] с помощью моделирования показываем, что максимальный коэффициент отражения более 0.99 может быть достигнут в этих плазмонных фотонных кристаллах за счёт оптимизации состава наночастиц и структурных параметров.

Анализ научной литературы по фотонным кристаллам показывает актуальность темы исследования.

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

Фотонный кристалл представляет собой структуру, обладающую периодически изменяющейся комплексной диэлектрической проницаемостью (или комплексным показателем преломления) либо неоднородностью структуры, период которой сравним с длиной волны оптического излучения. В качестве модели для исследования оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами можно использовать многослойные наноструктуры, состоящие из чередующихся слоёв с различными показателями преломления. Такие структуры обладают фотонными запрещёнными зонами, которые можно настраивать, изменяя параметры структуры (толщину слоёв, показатель преломления). Фотонные кристаллы с фотонными запрещёнными зонами, внутри которых свет не мо-

жет распространяться, могут быть использованы для создания фильтров, волноводов, брэгговских зеркал и других оптоэлектронных устройств. Кроме того, можно использовать квантовомеханические модели, такие как метод эффективной массы, для описания движения электронов в наноструктурах.

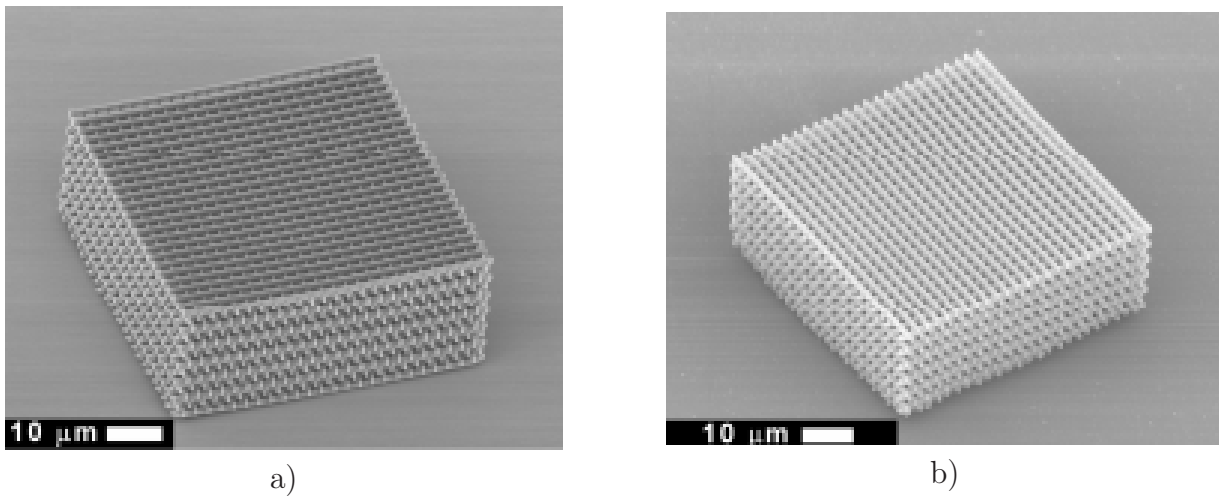


Рис. 1. Изображения полимерных фотонных кристаллов «стопка брёвен» с сканирующего электронного микроскопа до (а) и после (б) покрытия медью. Фотонные кристаллы были спроектированы так, чтобы иметь симметрию и параметры элементарной ячейки $b = a\sqrt{2} = 3.54 \mu\text{м}$ и $c = 3.60 \mu\text{м}$, где a и $c/4$ – межцентровое горизонтальное и вертикальное логарифмическое расстояние соответственно

На рис. 1 приведены изображения полимерных фотонных кристаллов «стопка брёвен» с сканирующего электронного микроскопа до (а) и после (б) покрытия медью. Фотонные кристаллы были спроектированы так, чтобы иметь симметрию и параметры элементарной ячейки $b = a\sqrt{2} = 3.54 \mu\text{м}$ и $c = 3.60 \mu\text{м}$, где a и $c/4$ – межцентровое горизонтальное и вертикальное логарифмическое расстояние соответственно.

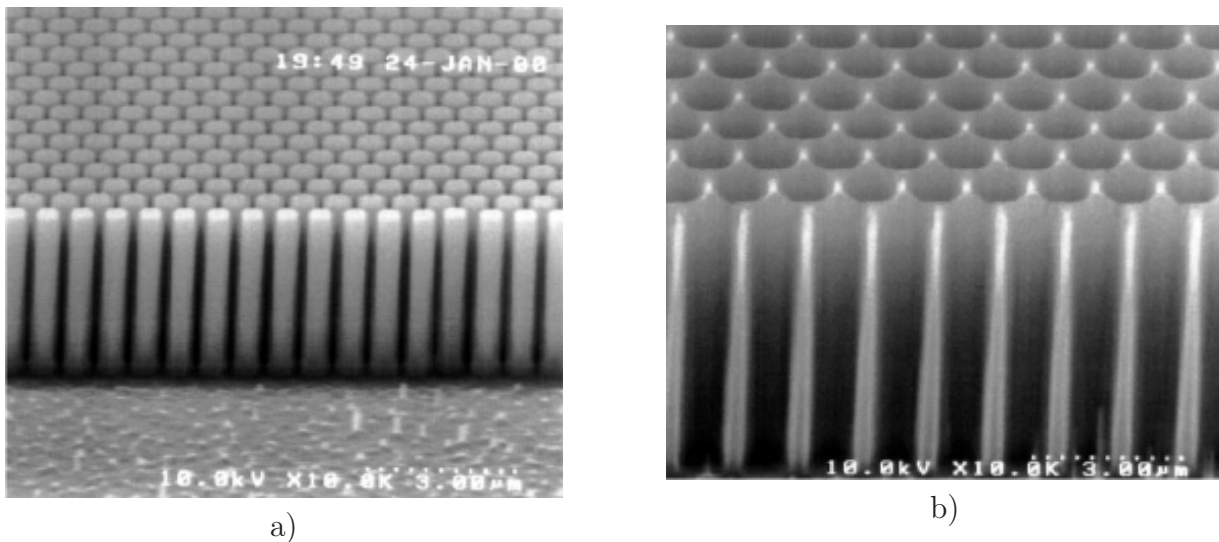


Рис. 2. Изображения диэлектрического стержня (а) и воздушного столба (б) фотонных структур с треугольной решёткой с сканирующего электронного микроскопа, полученных методом реактивного ионного травления Si. В (а) постоянная решётки равна 700 нм, диаметр стержня равен 500 нм, высота стержня равна 3.9 мкм. В (б) постоянная решётки 580 нм, радиус столбца 430 нм, высота столбца равна 4.2 мкм

На рис. 2 приведено изображение диэлектрического стержня (а) и воздушного столба (б) фотонных структур с треугольной решёткой с сканирующего электронного микроскопа, полученных методом реактивного ионного травления Si. В (а) постоянная решётки равна 700 нм, диаметр стержня равен 500 нм, высота стержня равна 3.9 мкм. В (б) постоянная решётки 580 нм, радиус столбца 430 нм, высота столбца равна 4.2 мкм.

Рассмотрим оптические процессы в фотонных кристаллах из периодически повторяющихся слоёв А и В.

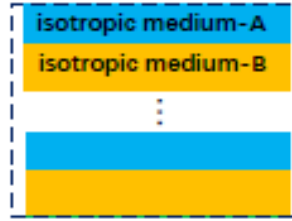


Рис. 3. Структура фотонного кристалла типа АВ

На рис. 3 приведено изображение структуры фотонного кристалла типа АВ.

Слой А имеет толщину d_A и показатель преломления n_A . Слой В имеет толщину d_B и показатель преломления n_B . Эффективная диэлектрическая проницаемость системы из двух слоёв А и В описывается тензором:

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

где

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

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

где N – число повторяющихся слоёв в структуре фотонного кристалла.

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

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

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

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

$$\varepsilon_{An} = \frac{1}{\frac{f_A}{\varepsilon_{Ai}} + \frac{(1-f_A)}{\varepsilon_{Am}}}, \quad (6)$$

$$\varepsilon_{Bn} = \frac{1}{\frac{f_B}{\varepsilon_{Bi}} + \frac{(1-f_B)}{\varepsilon_{Bm}}}. \quad (7)$$

Для системы включений воспользуемся формулой

$$\varepsilon_i = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}, \quad (8)$$

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:

$$k_A = n_A k_0 = n_A \frac{\omega}{c} = \sqrt{\varepsilon_A} \frac{\omega}{c} = n_A \frac{2\pi}{\lambda} . \quad (9)$$

Волновое число электромагнитной волны в слое В найдём по формуле:

$$k_B = n_B k_0 = n_B \frac{\omega}{c} = \sqrt{\varepsilon_B} \frac{\omega}{c} = n_B \frac{2\pi}{\lambda} . \quad (10)$$

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

$$\cos Kd = \cos k_A d_A \cos k_B d_B - \frac{1}{2} \left(\frac{k_B}{k_A} + \frac{k_A}{k_B} \right) \sin k_A d_A \sin k_B d_B . \quad (11)$$

Учитывая соотношения (9) и (10), получаем

$$\cos Kd = \cos k_A d_A \cos k_B d_B - \frac{1}{2} \left(\frac{n_B}{n_A} + \frac{n_A}{n_B} \right) \sin k_A d_A \sin k_B d_B . \quad (12)$$

Выражаем

$$Kd = \arccos \left(\cos k_A d_A \cos k_B d_B - \frac{1}{2} \left(\frac{n_B}{n_A} + \frac{n_A}{n_B} \right) \sin k_A d_A \sin k_B d_B \right) , \quad (13)$$

получим

$$K = \frac{1}{d} \arccos \left(\cos k_A d_A \cos k_B d_B - \frac{1}{2} \left(\frac{n_B}{n_A} + \frac{n_A}{n_B} \right) \sin k_A d_A \sin k_B d_B \right) . \quad (14)$$

Дополнительные ветви дисперсионной кривой находятся из соотношений:

$$K_+ = \frac{G_A}{2} \frac{k_A \Lambda}{\sqrt{\varepsilon_A + \frac{\Delta\varepsilon_A}{2}}} , \quad (15)$$

$$K_- = \frac{G_B}{2} \frac{k_B \Lambda}{\sqrt{\varepsilon_B - \frac{\Delta\varepsilon_B}{2}}} , \quad (16)$$

где

$$G_A = \frac{2\pi}{d_A} , \quad (17)$$

$$G_B = \frac{2\pi}{d_B} . \quad (18)$$

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_n - \varepsilon_t . \quad (19)$$

$$d = N (d_A + d_B) . \quad (20)$$

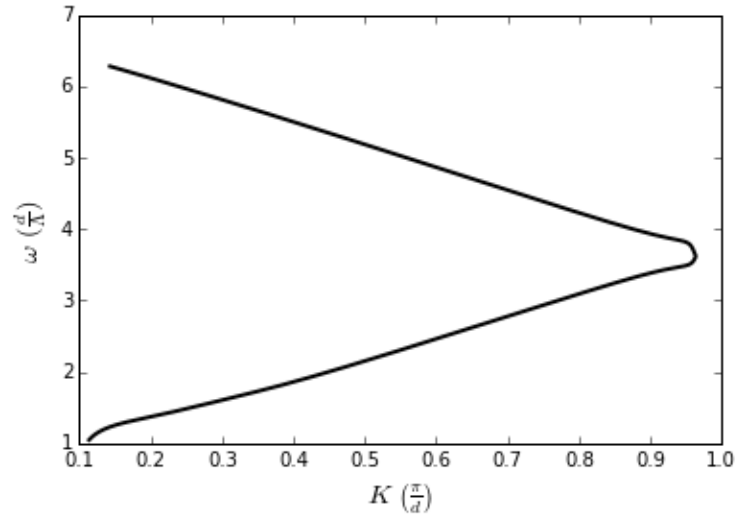


Рис. 4. Дисперсионная зависимость $\omega(K)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.05$, $f_B = 0.01$

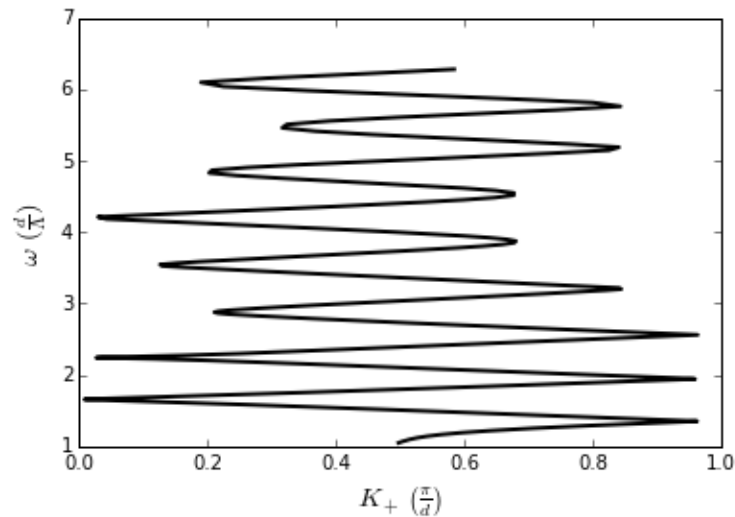


Рис. 5. Дисперсионная зависимость $\omega(K_+)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.05$, $f_B = 0.01$

Результаты численного решения дисперсионного уравнения для электромагнитных волн в наноструктурах с одномерными фотонными кристаллами типа АВ

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

На рис. 4 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.05$, $f_B = 0.01$.

На рис. 5 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K_+)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.05$, $f_B = 0.01$.

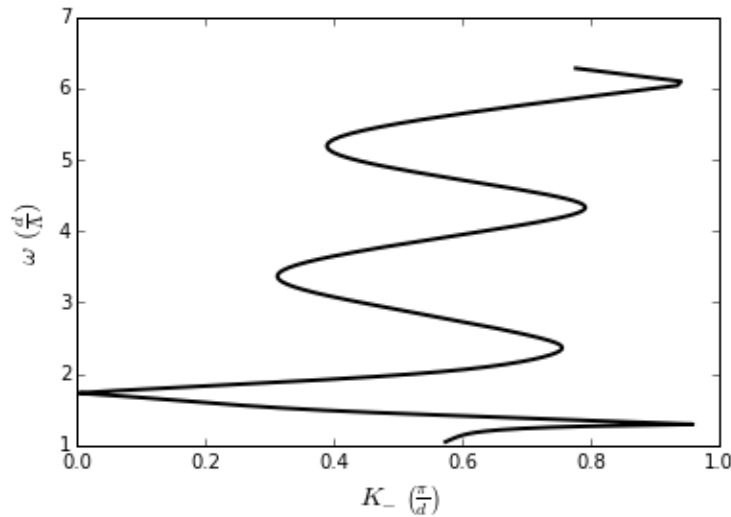


Рис. 6. Дисперсионная зависимость $\omega(K_-)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.05$, $f_B = 0.01$

На рис. 6 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K_-)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.05$, $f_B = 0.01$.

Изменим фактор заполнения среды А.

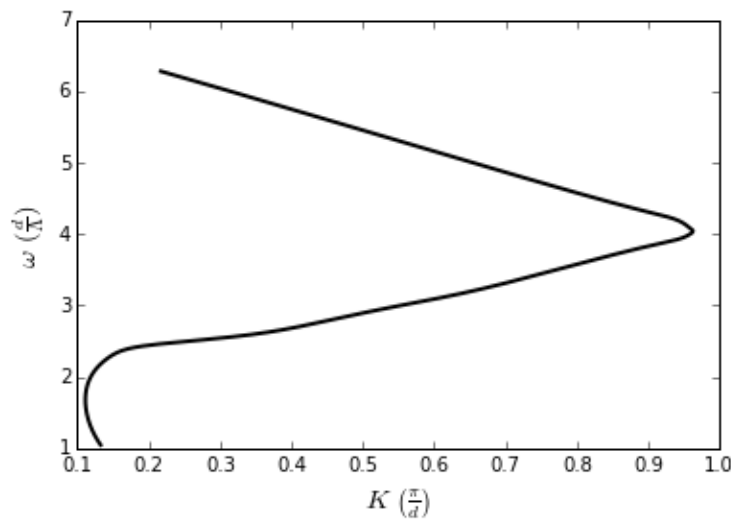


Рис. 7. Дисперсионная зависимость $\omega(K)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.2$, $f_B = 0.01$

На рис. 7 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.2$, $f_B = 0.01$.

На рис. 8 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K_+)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.2$, $f_B = 0.01$.

На рис. 9 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K_-)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм,

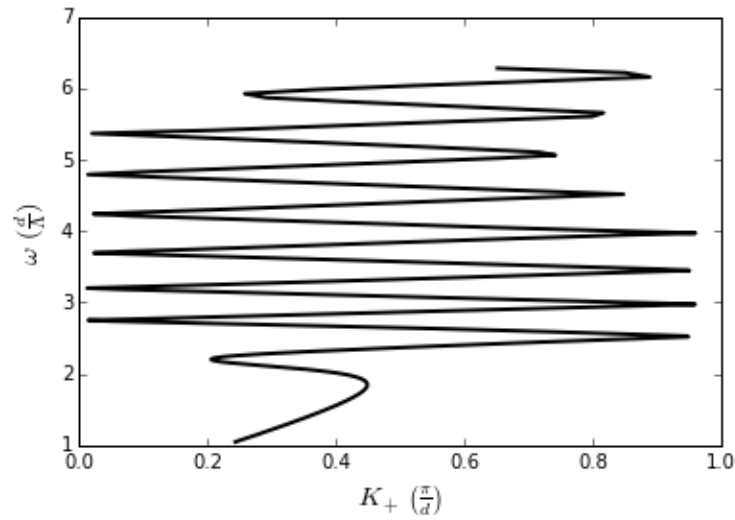


Рис. 8. Дисперсионная зависимость $\omega(K_+)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.2$, $f_B = 0.01$

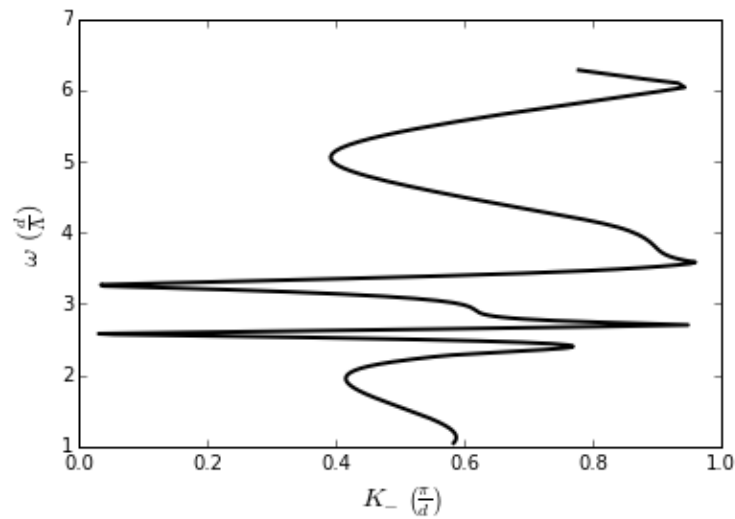


Рис. 9. Дисперсионная зависимость $\omega(K_-)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.2$, $f_B = 0.01$

$d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.2$, $f_B = 0.01$.

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

На рис. 10 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 100$, $f_A = 0.3$, $f_B = 0.01$.

На рис. 11 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K_+)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 100$, $f_A = 0.3$, $f_B = 0.01$.

На рис. 12 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K_-)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 100$, $f_A = 0.3$, $f_B = 0.01$.

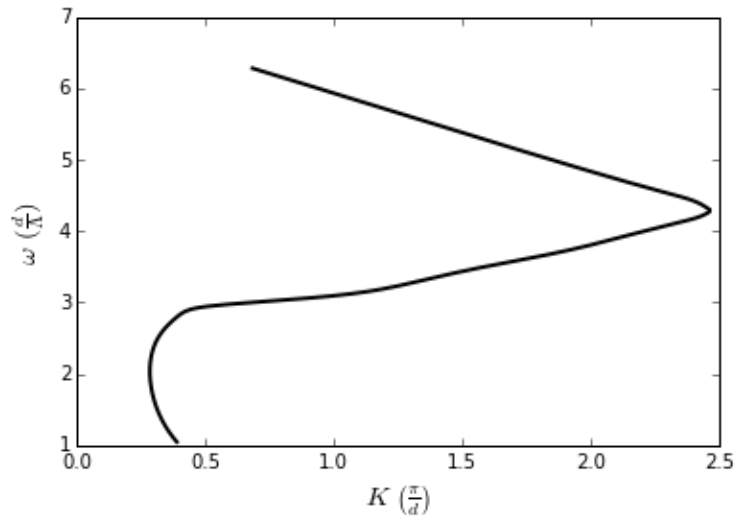


Рис. 10. Дисперсионная зависимость $\omega(K)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 100$, $f_A = 0.3$, $f_B = 0.01$

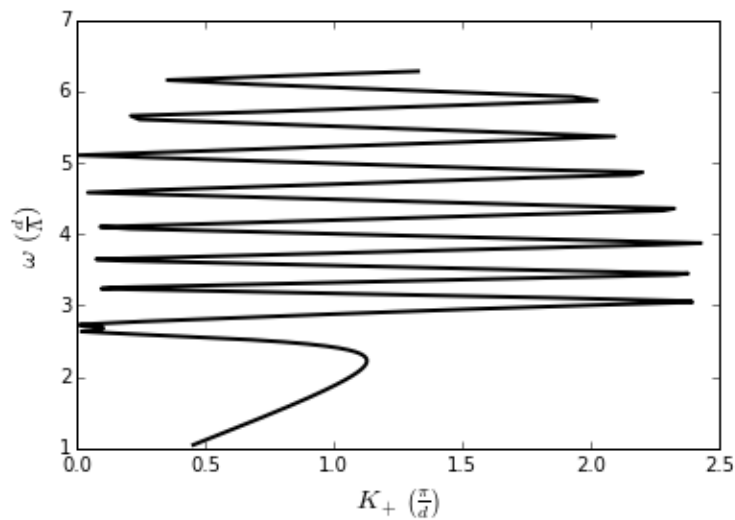


Рис. 11. Дисперсионная зависимость $\omega(K_+)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 100$, $f_A = 0.3$, $f_B = 0.01$

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

Гипотеза исследования, заключающаяся в том, что если выявить особенности оптических свойств фотонных кристаллов типа АВ, то курс квантовой оптики наноструктур можно наполнить теоретическими сведениями по фотонным кристаллам типа АВ, под-

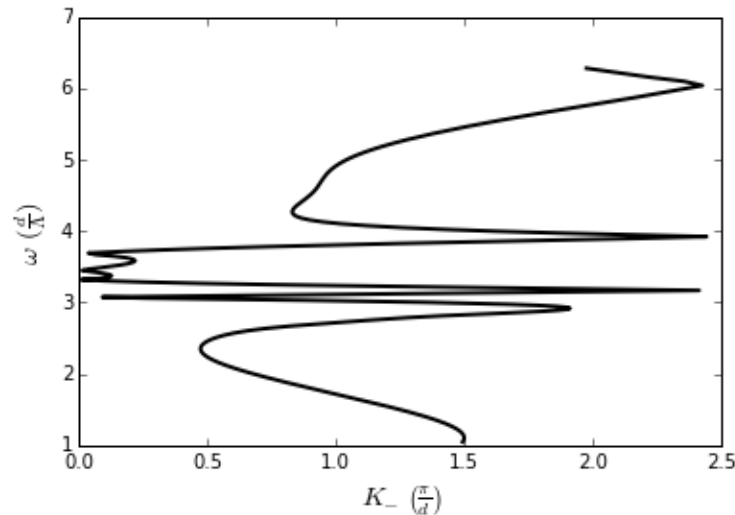


Рис. 12. Дисперсионная зависимость $\omega(K_-)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 100$, $f_A = 0.3$, $f_B = 0.01$

тверждена 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. Research of electrodynamic characteristics of nanophotonic structures / Genady P. Sinyavsky [et al.] // 2017 Radiation and scattering of electromagnetic waves. — IEEE, 2017. — jun. — P. 185–188. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/RSEMW.2017.8103624>.
2. Florous N. J., Koshiba M. Electrodynamics properties of photonic crystal circuits incorporating optically-active materials // 2005 Pacific Rim conference on lasers and electro-Optics. — IEEE, 2005. — P. 1136–1137. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/CLEOPR.2005.1569683>.
3. Nonlinear mechanics of photonic crystal deformable mirrors actuated via electrostatic force / A. Chowdhury [et al.] // 2015 International conference on optical MEMS and nanophotonics. — IEEE, 2015. — aug. — P. 1–2. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/OMN.2015.7288877>.

4. Narasimhamurty T. S. Electro-optic effects in crystals: pockels linear electro-optic and Kerr quadratic electro-optic effects // Photoelastic and electro-optic properties of crystals. — Springer US, 1981. — P. 345–419. — ISBN: 9781475700251. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4757-0025-1_8.
5. Novel optical phenomena with photonic crystals / Chiyan Luo [et al.] // UV/Optical/IR space telescopes: innovative technologies and concepts / Ed. by Howard A. MacEwen. — SPIE, 2004. — jan. — P. 1–13. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.507491>.
6. Nonadiabatic dynamics of the electromagnetic field and charge carriers in high-Q photonic crystal resonators / A. M. Yacomotti [et al.] // Physical Review Letters. — 2006. — mar. — Vol. 96, no. 9. — P. 093901. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PHYSREVLETT.96.093901>.
7. Vetluzhskii A. Yu., Lomukhin Yu. L. Analytical description of the electrodynamic properties of metallic photonic crystals // Optics and Spectroscopy. — 2017. — aug. — Vol. 123, no. 2. — P. 294–299. — URL: <http://dx.doi.org/10.1134/S0030400X17080240>.
8. Dynamic photonic crystals / Shanhui Fan [et al.] // Optics and Photonics News. — 2007. — mar. — Vol. 18, no. 3. — P. 41–45. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/OPN.18.3.000041>.
9. Electro-optically tunable photonic crystals / Jan H. Wülbern [et al.] // Photonic Crystal Materials and Devices III / Ed. by Ali Adibi, Shawn-Yu Lin, Axel Scherer. — SPIE, 2006. — apr. — P. 618210. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.667779>.
10. Weber Hans-J. Electrooptical effects, crystals and devices // Superhard materials, convection, and optical devices. — Springer Berlin Heidelberg, 1988. — P. 113–192. — ISBN: 9783642732058. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-73205-8_3.
11. Degen C. L., Reinhard F., Cappellaro P. Quantum sensing // Reviews of Modern Physics. — 2017. — jul. — Vol. 89, no. 3. — P. 035002. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.89.035002>.
12. Mukai Kanae, Hatano Naomichi. Discrete-time quantum walk on complex networks for community detection // Physical Review Research. — 2020. — jun. — Vol. 2, no. 2. — P. 023378. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/physrevresearch.2.023378>.
13. Quantum key distribution using a quantum emitter in hexagonal boron nitride / Ali Al-Juboori [et al.] // Advanced Quantum Technologies. — 2023. — jun. — Vol. 6, no. 9. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/qute.202300038>.
14. Free-space quantum key distribution with single photons from defects in hexagonal boron nitride / undefinedaglar Samaner [et al.] // Advanced Quantum Technologies. — 2022. — aug. — Vol. 5, no. 9. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/qute.202200059>.
15. Dual semi-Dirac cones in three-dimensional photonic crystals / Mingyan Li [et al.] // Physical Review B. — 2024. — mar. — Vol. 109, no. 12. — P. 125432. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.109.125432>.
16. Topological magnetic transition and impedance modulation based on rotational deformations / Xiaodong Sun [et al.] // Physical Review B. — 2024. — mar. — Vol. 109, no. 9. — P. 094430. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.109.094430>.

17. Yu D., Arora S., Kuipers L. Impact of transforming interface geometry on edge states in Valley photonic crystals // *Physical Review Letters*. — 2024. — mar. — Vol. 132, no. 11. — P. 116901. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.116901>.
18. Nanophotonic structures for cavity optomechanics / Jamie M. Fitzgerald [et al.] // 2021 Conference on lasers and electro-optics Europe and European quantum electronics conference (CLEO/Europe-EQEC). — IEEE, 2021. — jun. — P. 542–576. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/CLEO/EUROPE-EQEC52157.2021.9542576>.
19. Torres-Costa Vicente. Nanostructures for photonics and optoelectronics // *Nanomaterials*. — 2022. — may. — Vol. 12, no. 11. — P. 1820. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/nano12111820>.
20. Photonic crystal nanobeam biosensors based on porous silicon / Gilberto A. Rodriguez [et al.] // *Optics Express*. — 2019. — mar. — Vol. 27, no. 7. — P. 9536. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/OE.27.009536>.
21. Design principles for photonic crystals based on plasmonic nanoparticle superlattices / Lin Sun [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. — 2018. — jun. — Vol. 115, no. 28. — P. 7242–7247. — URL: <http://dx.doi.org/10.1073/PNAS.1800106115>.

Сведения об авторах:

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

Keywords: optical radiation, photonic crystal, nanostructure, electromagnetic wave, dispersion equation, photonic band gap

References

1. Research of electrodynamic characteristics of nanophotonic structures / Genady P. Sinyavsky [et al.] // 2017 Radiation and scattering of electromagnetic waves. — IEEE, 2017. — jun. — P. 185–188. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/RSEMW.2017.8103624>.
2. Florous N. J., Koshiba M. Electrodynamics properties of photonic crystal circuits incorporating optically-active materials // 2005 Pacific Rim conference on lasers and electro-optics. — IEEE, 2005. — P. 1136–1137. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/CLEOPR.2005.1569683>.
3. Nonlinear mechanics of photonic crystal deformable mirrors actuated via electrostatic force / A. Chowdhury [et al.] // 2015 International conference on optical MEMS and nanophotonics. — IEEE, 2015. — aug. — P. 1–2. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/OMN.2015.7288877>.
4. Narasimhamurty T. S. Electro-optic effects in crystals: pockels linear electro-optic and Kerr quadratic electro-optic effects // Photoelastic and electro-optic properties of crystals. — Springer US, 1981. — P. 345–419. — ISBN: 9781475700251. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4757-0025-1_8.

5. Novel optical phenomena with photonic crystals / Chiyao Luo [et al.] // *UV/Optical/IR space telescopes: innovative technologies and concepts* / Ed. by Howard A. MacEwen. — SPIE, 2004. — jan. — P. 1–13. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.507491>.
6. Nonadiabatic dynamics of the electromagnetic field and charge carriers in high-Q photonic crystal resonators / A. M. Yacomotti [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2006. — mar. — Vol. 96, no. 9. — P. 093901. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PHYSREVLETT.96.093901>.
7. Vetluzhskii A. Yu., Lomukhin Yu. L. Analytical description of the electrodynamic properties of metallic photonic crystals // *Optics and spectroscopy*. — 2017. — aug. — Vol. 123, no. 2. — P. 294–299. — URL: <http://dx.doi.org/10.1134/S0030400X17080240>.
8. Dynamic photonic crystals / Shanhui Fan [et al.] // *Optics and photonics news*. — 2007. — mar. — Vol. 18, no. 3. — P. 41–45. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/OPN.18.3.000041>.
9. Electro-optically tunable photonic crystals / Jan H. Wülbern [et al.] // *Photonic Crystal Materials and Devices III* / Ed. by Ali Adibi, Shawn-Yu Lin, Axel Scherer. — SPIE, 2006. — apr. — P. 618210. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.667779>.
10. Weber Hans-J. *Electrooptical effects, crystals and devices* // *Superhard materials, convection, and optical devices*. — Springer Berlin Heidelberg, 1988. — P. 113–192. — ISBN: 9783642732058. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-73205-8_3.
11. Degen C. L., Reinhard F., Cappellaro P. Quantum sensing // *Reviews of modern physics*. — 2017. — jul. — Vol. 89, no. 3. — P. 035002. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.89.035002>.
12. Mukai Kanae, Hatano Naomichi. Discrete-time quantum walk on complex networks for community detection // *Physical review research*. — 2020. — jun. — Vol. 2, no. 2. — P. 023378. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/physrevresearch.2.023378>.
13. Quantum key distribution using a quantum emitter in hexagonal boron nitride / Ali Al-Juboori [et al.] // *Advanced quantum technologies*. — 2023. — jun. — Vol. 6, no. 9. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/qute.202300038>.
14. Free-space quantum key distribution with single photons from defects in hexagonal boron nitride / undefinedaglar Samaner [et al.] // *Advanced quantum technologies*. — 2022. — aug. — Vol. 5, no. 9. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/qute.202200059>.
15. Dual semi-Dirac cones in three-dimensional photonic crystals / Mingyan Li [et al.] // *Physical Review B*. — 2024. — mar. — Vol. 109, no. 12. — P. 125432. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.109.125432>.
16. Topological magnetic transition and impedance modulation based on rotational deformations / Xiaodong Sun [et al.] // *Physical Review B*. — 2024. — mar. — Vol. 109, no. 9. — P. 094430. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.109.094430>.
17. Yu D., Arora S., Kuipers L. Impact of transforming interface geometry on edge states in Valley photonic crystals // *Physical Review Letters*. — 2024. — mar. — Vol. 132, no. 11. — P. 116901. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.116901>.

18. Nanophotonic structures for cavity optomechanics / Jamie M. Fitzgerald [et al.] // 2021 Conference on lasers and electro-optics Europe and European quantum electronics conference (CLEO/Europe-EQEC). — IEEE, 2021. — jun. — P. 542–576. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/CLEO/EUROPE-EQEC52157.2021.9542576>.
19. Torres-Costa Vicente. Nanostructures for photonics and optoelectronics // *Nanomaterials*. — 2022. — may. — Vol. 12, no. 11. — P. 1820. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/nano12111820>.
20. Photonic crystal nanobeam biosensors based on porous silicon / Gilberto A. Rodriguez [et al.] // *Optics Express*. — 2019. — mar. — Vol. 27, no. 7. — P. 9536. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/OE.27.009536>.
21. Design principles for photonic crystals based on plasmonic nanoparticle superlattices / Lin Sun [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. — 2018. — jun. — Vol. 115, no. 28. — P. 7242–7247. — URL: <http://dx.doi.org/10.1073/PNAS.1800106115>.

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