

04

Стеклообразная наноструктура, изготовленная методом лазерной нанолитографии

© И.И. Шишкин^{1,2}, К.Б. Самусев^{1,2}, М.В. Рыбин^{1,2}, М.Ф. Лимонов^{1,2}, Ю.С. Кившарь^{2,3},
А. Гайдукевичуте⁴, Р.В. Киян⁴, Б.Н. Чичков⁴

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия

² НИУ информационных технологий, механики и оптики,
Санкт-Петербург, Россия

³ Nonlinear Physics Center, Australian National University,
Canberra, Australia

⁴ Laser Zentrum Hannover,
Hannover, Germany

E-mail: M.Limonov@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 12 апреля 2012 г.)

Сообщается о синтезе стеклообразных наноструктур, каркас которых представляет собой гранецентрированную кубическую решетку инвертированного яблонювита с неупорядоченной стеклообразной сверхструктурой. Синтез выполнен методом нелинейной лазерной нанолитографии, основанной на двухфотонной полимеризации фоточувствительного материала. Полученные структуры исследованы с помощью сканирующей электронной микроскопии. Произведен теоретический расчет фотонной зонной структуры прямого и инвертированного яблонювита.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 11-02-00865), программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 24 и гранта правительства Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования (договор № 11.G34.31.0020 от 28 ноября 2010 г.).

1. Введение

Фотонные кристаллы представляют одно из современных, активно развивающихся направлений в физике твердого тела [1–3]. Это направление в свою очередь породило целый ряд новых тематик, одной из которых является синтез, исследование и применение фотонных стекол [3–5]. Фотонные кристаллы характеризуются строго упорядоченным расположением образующих структурных элементов в одном, двух или трех измерениях. Образующие элементы обычно считаются монодисперсными по геометрическим и идентичными по диэлектрическим параметрам. Благодаря периодичности фотонные кристаллы обладают зонной структурой в электромагнитном спектре, которая состоит из областей прозрачности для электромагнитного излучения и так называемых стоп-зон, связанных (в простейшем случае малого диэлектрического контраста) с брэгговским отражением света от систем плоскостей кристаллической решетки фотонного кристалла. В результате вне стоп-зон транспорт света носит баллистический характер, а в области стоп-зон наблюдается локализация света [6].

Термин „фотонное стекло“ был введен авторами работ [4,5] для описания неупорядоченных структур, созданных на основе монодисперсных структурных элементов. Следует сразу отметить, что именно монодисперсность по геометрическим и диэлектрическим параметрам отличает фотонное стекло от различных

неупорядоченных соединений, характеризующихся диффузным распространением света, таких, например, как порошки TiO_2 [7] или ZnO [8], которые образованы из зерен разной формы и размеров. В фотонном стекле монодисперсность позволяет реализовывать новые режимы распространения света и наблюдать резонансные спектроскопические эффекты [5,9], такие, например, как резонансы Ми на сферических частицах [10,11].

Фотонные стекла были впервые созданы на основе коллоидных сферических частиц [4,5], которые широко используются для создания опалоподобных фотонных кристаллов [3]. Опалоподобные фотонные кристаллы обычно выращиваются методом гравитационного осаждения частиц на дно цилиндрического сосуда, заполненного жидкостью, и дальнейшей их самоорганизации в плотноупакованную структуру сфер с точечным касанием. При этом в случае достаточно высокой монодисперсности сфер по размеру формируется двойниковая гранецентрированная кубическая (ГЦК) решетка. Задача создания неупорядоченной структуры фотонного стекла на основе монодисперсных сфер оказалась нетривиальной и была решена [4,5] благодаря созданию условий для формирования случайных кластеров, состоящих из разного количества сфер. В результате образования кластеров нарушался механизм упорядочения и образования плотноупакованной структуры фотонных кристаллов. Так были получены образцы фотонного стекла на основе полимерных сферических частиц полиметилметакрилата

и полистирола, которые существенно отличались по своим оптическим свойствам от фотонных кристаллов. В частности, вместо хорошо известной картины дифракции света на фотонных кристаллах, которая состоит из отдельных дифракционных пятен [12,13], при дифракции света на фотонном стекле наблюдались картины типа спеклов [5]. В фотонном стекле режим диффузного распространения света становится существенно зависимым от длины волны, причем наблюдается резонансный характер транспортных параметров, обусловленный резонансами Ми на каждой отдельной сферической частице.

Таким образом, фотонное стекло можно рассматривать как новый оптический материал, позволяющий осуществлять контроль транспорта света в неупорядоченных средах. Его основные оптические свойства зависят от индивидуальных рассеивателей, в то время как в фотонных кристаллах упорядоченный ансамбль рассеивателей определяет характер оптических спектров. В связи с этим встает вопрос о расширении набора материалов, пригодных для создания фотонного стекла, и о поиске новых методов синтеза фотонных стекол.

Одним из новых методов создания фотонных структур является метод трехмерной лазерной нанолитографии, известный также под названием „direct laser writing“ [14]. Метод основан на нелинейном процессе двухфотонной полимеризации фоточувствительного материала в фокусе луча фемтосекундного лазера. Высокое разрешение метода (поперечное разрешение не хуже 100 nm) обусловлено пороговым по интенсивности характером процесса полимеризации, который происходит в объеме, размеры которого значительно меньше размеров сфокусированного пучка. Метод лазерной нанолитографии позволяет получать объемные нано- и микроструктуры практически любой формы и произвольным образом располагать их в трехмерном пространстве. Компьютерное управление сканированием фокуса лазерного луча по объему фоточувствительного материала гарантирует строгое соответствие получаемых материалов запланированной структуре. Для получения фотонной структуры (фотонный кристалл или фотонное стекло) с воздушным заполнением необходимо после процесса полимеризации удалить материал, не подвергшийся воздействию интенсивного лазерного излучения, с помощью проявителя.

Метод трехмерной лазерной нанолитографии был использован нами в настоящей работе для создания фотонного материала, близкого по строению к фотонному стеклу. При этом в качестве образующего структурного элемента мы решили использовать не сферы, как это делалось в работах [4,5], а элементы другой формы. Мы использовали цилиндрические структуры, имеющие в среднем диаметр 400 nm и длину порядка нескольких микрон. Такие структурные элементы также будут обладать как поперечными, так и продольными резонансными частотами (типа резонанса Ми для несферических объектов [11]), причем с учетом их размеров резонансы

могут наблюдаться как в инфракрасной, так и в видимой области спектра.

2. Технология изготовления наноструктур

Задача синтеза фотонного стекла методом двухфотонной полимеризации решалась в данной работе в два этапа. На первом этапе была создана структура инвертированного яблоновита (рис. 1, *a*), а на втором этапе — образец с каркасом яблоновита и неупорядоченной стеклообразной сверхструктурой (рис. 1, *b, c*). Напомним, что фотонная структура яблоновита была названа в честь ее создателя Э. Яблоновича. Образец, созданный Яблоновичем, представлял собой диэлектрическую матрицу, механически просверленную в трех направлениях, совпадающих с тремя векторами примитивной ячейки ГЦК решетки [15]. Такую структуру принято называть прямым яблоновитом, подразумевая под инвертированным яблоновитом структуру заполненных отверстий и окружающую их воздушную матрицу. Образец, созданный Яблоновичем, являлся первой структурой, обладающей полной запрещенной фотонной зоной [16]. Для показателя преломления $n = 3.6$, типичного для полупроводников, полная запрещенная фотонная зона образуется между второй и третьей фотонными ветвями структуры яблоновита и имеет ширину $\sim 20\%$ от ее центральной частоты [15].

Структура инвертированного яблоновита была создана нами методом двухфотонной полимеризации гибридного органического–неорганического материала на основе пропоксида циркония с фотоинициатором Irgacure 369 (Ciba Specialty Chemicals Inc., США). Преимуществом этого материала является низкая усадка при полимеризации, что гарантирует высокое соответствие полученной структуры заданной математической модели [17]. Для изготовления структур капля фоторезиста наносилась на поверхность стеклянной подложки толщиной 150 μm и высушивалась при 60°C в течение 30 min. Лазерное излучение фокусировалось в объеме фоторезиста через стеклянную подложку с помощью 100x иммерсионного объектива с числовой апертурой 1.4 (Carl Zeiss MicroImaging GmbH, Германия). Источником фемтосекундных импульсов служил лазерный излучатель IC-80-400 fs Ti : Sapphire (High Q Laser Innovation GmbH, Австрия) с длиной волны излучения 800 nm, длительностью импульсов 60 fs и частотой повторения импульсов 73 MHz. Для регулировки мощности лазерного излучения в объеме фоторезиста использовался поляризационный attenuator, включавший полуволновую пластинку, установленную в управляемом компьютере моторизованном вращающемся столике, и поляризатор. Для быстрого включения/выключения лазерного излучения применялся затвор на основе акустооптического модулятора. Формирование структуры фотонного кристалла достигалось сканированием сфокусированного

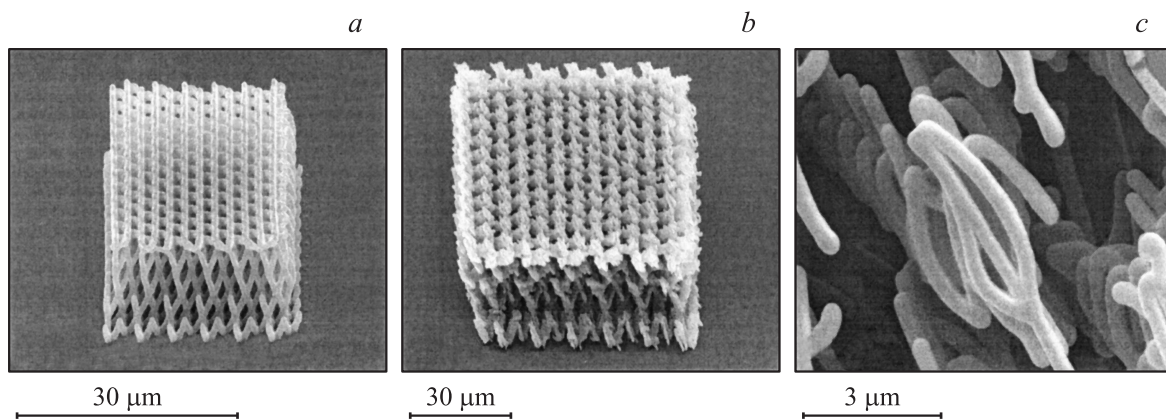


Рис. 1. *a)* Структура инвертированного яблонювита, полученная методом двухфотонной полимеризации. *b)* Стеклообразная структура, каркас которой представляет собой решетку инвертированного яблонювита с неупорядоченной стеклообразной сверхструктурой. *c)* Увеличенный фрагмент стеклообразной сверхструктуры. Изображения получены методом сканирующей электронной микроскопии.

лазерного излучения в объеме фоторезиста. Для этого образец был установлен на двухкоординатном моторизованном линейном трансляторе с пневматическим подвесом (Aerotech Inc., США). Этот двухкоординатный транслятор обеспечивал сканирование в горизонтальной плоскости по осям x , y . Для сканирования в вертикальном направлении по оси z фокусирующий объектив был установлен на аналогичном однокоординатном трансляторе с возможностью вертикального перемещения. Перемещением трансляторов, а также регулировкой мощности и коммутацией лазерного излучения управлял компьютер с программным обеспечением, разработанным в Lazer Zentrum Hannover.

Модель изготавливаемой структуры задается в формате STL. Программное обеспечение формирует сечения структуры в горизонтальных плоскостях, распределенных с заданным шагом по вертикали, и последовательно осуществляет сканирование в каждой из плоскостей. Для сокращения времени изготовления сканирование в каждой плоскости осуществлялось только по замкнутым контурам, ограничивающим структуру. В случае инвертированного яблонювита эти контуры представляют собой окружности.

Изготовление инвертированного яблонювита осуществлялось при средней мощности лазерного излучения 2.4 mW и скорости сканирования $10 \mu\text{m/s}$. Для получения стеклообразной структуры параметры изготовления были модифицированы. Скорость сканирования была увеличена до $500 \mu\text{m/s}$, при этом ускорение, развиваемое моторизованным столиком в горизонтальной плоскости, было ограничено. Для того чтобы сохранилась необходимая для полимеризации доза облучения, мощность лазерного излучения была увеличена до 40 mW . Вследствие высокой скорости движения по окружности при ограниченном ускорении симметрия сформированных контуров, ограничивающих структуру, понижалась, и они отличались от окружностей. Это при-

водило к появлению сверхструктуры в инвертированном яблонювите.

После завершения изготовления структуры образец проявлялся в изопропанолe для удаления неполимеризованного фоторезиста.

3. Изучение полученных наноструктур методом сканирующей электронной микроскопии

В результате описанной технологии были изготовлены два типа структур, которые изучались далее методом сканирующей электронной микроскопии (рис. 1). Во-первых, был получен ряд структур, образованных цилиндрами, которые направлены вдоль векторов примитивной ячейки ГЦК-решетки $(x + y)a/2$, $(x + z)a/2$ и $(y + z)a/2$, где a — постоянная кубической решетки. На рис. 1, *a* приведено изображение одной из таких структур, в данном случае кристалл имеет размер $31 \times 25 \times 12 \mu\text{m}$, постоянная решетки $a \sim 4.2 \mu\text{m}$, диаметр образующих цилиндров $\sim 740 \text{ nm}$. Такая структура в точности воспроизводит принцип, положенный в основу изготовления яблонювита [15], с той лишь разницей, что в яблонювите цилиндры представляли собой воздушные отверстия в матрице фотонного кристалла, а в нашей работе была получена инвертированная структура, в которой матрицу фотонного кристалла образуют сами цилиндры полимеризованного фоторезиста, окруженные воздухом. Видно, что изготовленная методом лазерной нанолитографии структура инвертированного яблонювита практически идеальна и не обладает теми многочисленными типами дефектов, которые характерны для синтетического опала, структура которого лишь в первом приближении соответствует ГЦК-решетке [2,18–20].

Однако наибольший интерес представляют структуры второго типа (рис. 1, *b, c*). Изучая их строение, мы прихо-

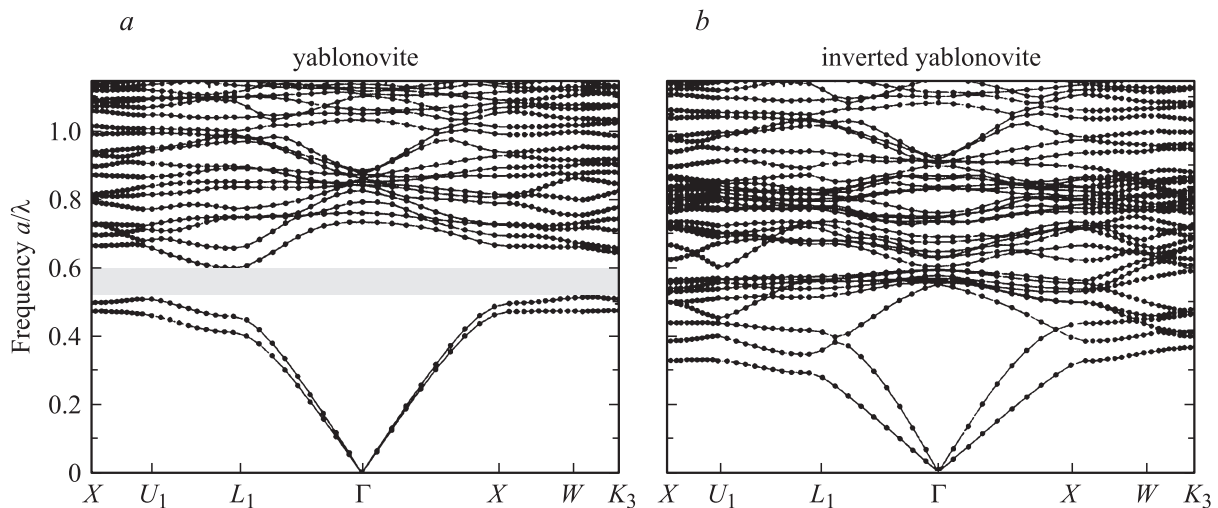


Рис. 2. Фотонная зонная структура прямого (а) и инвертированного (б) яблоновита. Вычисления выполнены для матрицы с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 13$ в воздушном окружении. Волновые вектора приведены для участка неприводимой зоны Бриллюэна, которая включает края полной запрещенной зоны указанных структур.

дим к выводу, что наиболее адекватной характеристикой такой структуры будет ее отнесение к стеклообразному состоянию. Действительно, была получена структура инвертированного яблоновита, каркас которой уже не образован цилиндрическими элементами с длиной, равной размеру фотонного кристалла в соответствующем направлении. Цилиндры обладают сверхструктурой, т.е. состоят из более мелких элементов и пустот (воздуха, рис. 1, d). При этом, судя по данным электронной микроскопии, нельзя говорить о строгом упорядочении этих сверхструктурных элементов ни в смысле дальнего, ни в смысле ближнего порядка. Эти элементы имеют цилиндрическую форму длиной в несколько μm и средним диаметром порядка 400 nm, причем этот параметр имеет незначительный разброс. Таким образом, полученная структура во многом аналогична фотонному стеклу, образованному монодисперсными неупорядоченными коллоидными сферическими частицами [4,5].

4. Теоретический анализ фотонных состояний прямого и инвертированного яблоновита

Как хорошо известно, яблоновит является первой рукотворной структурой, обладающей полной запрещенной фотонной зоной [15]. Для сравнения фотонных свойств прямого и инвертированного яблоновита мы провели расчет собственных электромагнитных состояний этих двух структур в единой модели с использованием векторного метода плоских волн. Использовался подход, предложенный в работе [21], согласно которому магнитное поле в периодической структуре можно записать в базисе обратного пространства следующим

образом:

$$\mathbf{H}_k(\mathbf{r}, t) = \exp(i(\omega t + \mathbf{k}\mathbf{r})) \sum_{\mathbf{g}} \exp(i\mathbf{g}\mathbf{r}) \mathbf{h}_{\mathbf{k},\mathbf{g}}, \quad (1)$$

где \mathbf{k} — волновой вектор, \mathbf{g} — вектор обратной решетки, ω — частота колебаний электромагнитного поля. На основании разложения (1) было записано волновое уравнение для магнитного поля. Ряд наименьших собственных частот, являющихся решением волнового уравнения, вычислялся с помощью варианта симметричной процедуры Ланцоша [22]. Для уменьшения числа плоских волн (т.е. числа векторов обратной решетки, по которым вычисляется разложение (1)) использовался метод эффективного тензора диэлектрической проницаемости [23,24]. Расчет эффективного тензора диэлектрической проницаемости основан на вычислении градиента диэлектрической проницаемости методом конечных разностей на мелкой сетке вблизи точки, в которой требуется найти значение этого тензора. В результате проделанных численных расчетов были определены зависимости частоты собственных состояний от волнового вектора \mathbf{k} для 25 фотонных зон с наименьшей частотой (рис. 2). Задача на собственные числа решалась с учетом 27 000 плоских волн с помощью разложения (1) по векторам обратной решетки, которые находятся в пределах параллелепипеда, построенного на примитивных векторах обратной решетки (сторона параллелепипеда составляла 30 примитивных векторов обратной решетки). Для вычисления эффективного тензора диэлектрической проницаемости примитивная ячейка разбивалась на 150^3 элементов (с помощью сетки $150 \times 150 \times 150$). При этом диэлектрическая проницаемость матрицы варьировалась в диапазоне $\epsilon = 1-20$, а заполнителем для достижения диэлектрического контраста считался воздух. На рис. 2 результаты вычислений представлены для $\epsilon = 13$.

5. Обсуждение результатов работы

На рис. 2 представлена фотонная зонная структура прямого и инвертированного яблоновита. Видно, что полная запрещенная зона, выделенная на рис. 2, *a* штриховкой, наблюдается только у структуры прямого яблоновита, а у обратного яблоновита (рис. 2, *b*) она отсутствует. У прямого яблоновита полная зона образуется между второй и третьей фотонными ветвями — результат, совпадающий с опубликованными ранее расчетами [15]. Что касается инвертированного яблоновита, то возникновение полной зоны выше 25 ветви кажется крайне маловероятным, так как с ростом частоты a/λ плотность фотонных ветвей только возрастает. Поэтому для получения полной запрещенной зоны в созданной структуре остается только один путь — инвертировать ее достаточно высококонтрастным веществом.

Отметим, что расчет фотонных свойств яблоновита со стекольной сверхструктурой (рис. 1, *b*) представляет собой крайне сложную задачу и будет нами выполнен в отдельной работе. Однако можно с большой долей уверенности предсказать ряд эффектов, которые должны наблюдаться в оптических спектрах такого материала. Он представляет собой высокоупорядоченный ГЦК-каркас прямого яблоновита с неупорядоченной стеклообразной сверхструктурой, т.е. материал с двумя существенно различающимися периодами: постоянная ГЦК-решетки составляет несколько μm , а диаметр элементов свехструктуры — несколько сотен нм. Такой фотонный кристалл будет обладать стоп-зонами начиная с ИК-диапазона, а диаметр элементов сверхструктуры ($\sim 400\text{ nm}$) определяет возможность их взаимодействия с излучением видимого диапазона. В этом случае высокоиндексные фотонные ветви окажутся существенно модифицированы по сравнению с изображенными на рис. 2, *b*.

Наличие сверхструктуры у элементов, образующих ГЦК-каркас, будет приводить к различным эффектам, часть из которых можно анализировать исходя из свойств фотонного кристалла, другие — по аналогии со свойствами фотонного стекла. В этом состоит отличие структуры, созданной в настоящей работе, от структуры опалоподобных фотонных стекол, которые характеризуются только одним ключевым геометрическим параметром — диаметром монодисперсных сферических частиц [4,5].

Как известно, у фотонного стекла монодисперсность сфер приводит к резонансным свойствам оптического отклика [3–5] на длинах волн, которые задаются резонансами Ми [10]. Следует отметить, что резонансными свойствами обладают также несферические частицы [11], достаточно напомнить классический пример — резонанс Фабри–Перо на плоскопараллельных пластинах. Таким образом, учитывая незначительную дисперсию по диаметру квазицилиндрических частиц, образующих синтезированную нами структуру, можно ожидать проявления

резонансных эффектов (типа резонанса Ми для несферических малых частиц [11]) в видимой области спектра, что является характерным признаком фотонного стекла.

Неоднородная структура цилиндрического каркаса ГЦК-решетки определяет также ряд эффектов, которые обсуждаются при излучении фотонных кристаллов. Во-первых, рассмотрим один из ключевых параметров — контраст диэлектрической проницаемости фотонного кристалла. В данном случае его можно менять не только путем заполнения пустот каким-либо веществом, но и путем варьирования средней диэлектрической проницаемости самого каркаса, меняя размер и концентрацию образующих его квазицилиндрических частиц в процессе синтеза самой структуры.

Далее рассмотрим аналогию обсуждаемой структуры и структуры фотонных кристаллов на основе опалов, состоящих из частиц аморфного кварца $a\text{-SiO}_2$. Неоднородность по диэлектрической проницаемости ансамбля частиц $a\text{-SiO}_2$, образующих конкретный образец опала, вызывает появление дополнительного фононного рассеяния. Это рассеяние, интерферируя с основным брэгговским рассеянием, приводит к резонансу Фано, который проявляется, в частности, в превращении брэгговских стоп-зон в брэгговские зоны пропускания [3,25,26]. В то же время неоднородность структуры каждой отдельной частицы $a\text{-SiO}_2$ приводит к такому нетривиальному оптическому эффекту, как селективное переключение стоп-зон при изменении каких-либо параметров фотонного кристалла, например — при варьировании диэлектрической проницаемости заполнителя опалов [3,19,20]. Оба эти эффекта мы вправе ожидать и при исследовании оптических свойств яблоновита со стеклообразной сверхструктурой.

В дополнение к сказанному отметим, что несменный интерес представляют вопросы локализации и делокализации света в такой стеклообразной структуре, так как процессы локализации света, характерные для фотонной структуры яблоновита, будут интерферировать с процессами локализации из-за случайного рассеяния света на сверхструктурных элементах.

6. Заключение

В работе методом трехмерной лазерной литографии впервые синтезирована стеклообразная наноструктура. На первой стадии в качестве пробной структуры был синтезирован трехмерный фотонный кристалл со структурой инвертированного яблоновита. На втором этапе работы была создана трехмерная фотонная структура, каркас которой представляет собой упорядоченную ГЦК-решетку инвертированного яблоновита с неупорядоченной стеклообразной сверхструктурой. Сверхструктура образована цилиндрическими элементами, имеющими в среднем диаметр 400 nm и длину порядка нескольких микрон. Так как под фотонным стеклом принято понимать неупорядоченные объекты, созданные

на основе монодисперсных структурных элементов [4,5], мы характеризуем нашу структуру как фотонное квазистекло (учитывая некоторый разброс, хотя и незначительный, в толщине цилиндрических элементов). Наличие сверхструктуры у ГЦК-каркаса может приводить к оригинальным оптическим эффектам — таким как резонансный оптический отклик типа резонанса Ми на несферических частицах [11], селективное переключение фотонных стоп-зон [19] или эффект Фано [3,25,26], — наблюдавшимся при исследовании синтетических опалов, образованных неоднородными частицами аморфного кварца α -SiO₂.

Авторы благодарят А.А. Каплянскою за обсуждение результатов работы и критические замечания, П.А. Белова — за обсуждение и всестороннюю поддержку работы.

Список литературы

- [1] E. Yablonovitch. Phys. Rev. Lett. **58**, 2059 (1987).
- [2] J.D. Joannopoulos, S.G. Johnson, J.N. Winn, R.D. Meade. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. 2nd Ed. Princeton Univ. Press (2008).
- [3] Optical properties of photonic structures: interplay of order and disorder / Eds. M.F. Limonov, R. De La Rue. CRC Press (2012).
- [4] P.D. Garcia, R. Sapienza, A. Blanco, C. López. Adv. Mater. **19**, 2597 (2007).
- [5] P.D. Garcí, R. Sapienza, C. López. Adv. Mater. **22**, 12 (2010).
- [6] S. John. Phys. Rev. Lett. **58**, 2486 (1987).
- [7] N. Garcia, A.Z. Genack. Phys. Rev. Lett. **63**, 259 (1989).
- [8] H. Cao, Y.G. Zhao, H.C. Ong, S.T. Ho, J.Y. Dai, J.Y. Wu, R.P.H. Cang. Appl. Phys. Lett. **73**, 3656 (1998).
- [9] P.D. García, R. Sapienza, J. Bertolotti, M.D. Martín, Á Blanco, A. Altube, L. Viña, D.S. Wiersma, C. López. Phys. Rev. A **78**, 023 823 (2008).
- [10] G.Mie. Ann. Phys. **25**, 77 (1908).
- [11] C.F. Bohren, D.R. Huffman. Absorption and Scattering of Light by Small Particles. Wiley, New York (1983).
- [12] A.V. Baryshev, A.A. Kaplyanskii, V.A. Kosobukin, K.B. Samusev, D.E. Usvyat, M.F. Limonov. Phys. Rev. B **70**, 113 104 (2004).
- [13] A.V. Baryshev, V.A. Kosobukin, K.B. Samusev, D.V. Usvyat, M.V. Limonov. Phys. Rev. B **73**, 205 118 (2006).
- [14] M. Farsari, B.N. Chichkov. Nature Photonics, **3**, 450 (2009).
- [15] E. Yablonovitch, T.J. Gmitter, K.M. Leung. Phys. Rev. Lett. **67**, 2295 (1991).
- [16] E. Yablonovich. Phys. Rev. Lett. **58**, 2059 (1987).
- [17] A. Ovsianikov, J. Viertl, B. Chichkov, M. Oubaha, B. MacCraith, I. Sakellari, A. Giakoumaki, D. Gray, M. Vamvakaki, M. Farsari, C. Fotakis. ACS Nano **2**, 2257 (2008).
- [18] М.В. Рыбин, К.Б. Самусев, М.Ф. Лимонов. ФТТ **49**, 2174 (2007).
- [19] A.V. Baryshev, A.B. Khanikaev, M. Inoue, P.B. Lim, A.V. Sel'kin, G. Yashin, M.F. Limonov. Phys. Rev. Lett. **99**, 063 906 (2007).
- [20] M.V. Rybin, A.V. Baryshev, A.V. Khanikaev, M. Inoue, K.B. Samusev, A.V. Sal'kin, G. Yusin, M.F. Limonov. Phys. Rev. B **77**, 205 106 (2008).
- [21] K.M. Ho, C.T. Chan, C.M. Soukoulis. Phys. Rev. Lett. **65**, 3152 (1990).
- [22] D.S. Watkins. Fundamentals of Matrix Computations. John Wiley & Sons, Inc., New York (2002).
- [23] R.D. Meade, A.M. Rappe, K.D. Brommer et al. Phys. Rev. B **48**, 8434 (1993).
- [24] S.G. Johnson, J.D. Joannopoulos. Opt. Express, **8**, 173 (2001).
- [25] M.V. Rybin, A.B. Khanikaev, M. Inoue, K.B. Samusev, M.J. Steel, G. Yushin, M.F. Limonov. Phys. Rev. Lett. **103**, 023 901 (2009).
- [26] M.V. Rybin, A.B. Khanikaev, M. Inoue, A.K. Samusev, M.J. Steel, G. Yushin, M.F. Limonov. Photon. Nanostruct.: Fund. Appl. **8**, 86 (2010).