

УДК 541.147 : 541.65 : 535.421

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДЕЛЕЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ*

Е. Ф. Пен, И. Г. Шаталов

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: pen@iae.nsk.su*

Представлена методика расчёта спектральных характеристик модельных голографических фотонных кристаллов (ФК), в том числе с дефектами пространственной структуры. Основу методики составляют модель многослойной системы тонких диэлектрических плёнок и расчётное распределение показателя преломления структуры ФК вдоль выбранных кристаллографических направлений. Приведены результаты расчётов исследуемых характеристик для различных примеров структур ФК.

Ключевые слова: фотонные кристаллы, моделирование, голографическая литография, спектр отражения.

Введение. Фотонные кристаллы (ФК) являются новым видом искусственных оптических материалов с особыми дифракционными и спектральными свойствами [1, 2]. Среди известных методов формирования трёхмерных ФК широкое распространение получила голографическая (интерференционная) литография [3], заключающаяся в регистрации в объёме подходящей светочувствительной среды картины интерференции нескольких некопланарных когерентных пучков света. С помощью этого метода сравнительно просто можно изготовить шаблоны бездефектных ФК больших размеров (0,1–10 см²), в том числе примитивные кубические кристаллы (SCC — Simple Cubic Crystals), гранцентрированные (FCC — Face Centered Crystals), объёмно центрированные (BCC — Body Centered Crystals), квазикристаллы и др.

Процессу физического изготовления голографических ФК обычно предшествует этап моделирования их пространственной структуры [4, 5], позволяющий наглядно представить её облик и, в частности, ориентацию относительно плоскости подложки. Вместе с тем публикации о компьютерном моделировании пространственной структуры ФК [4] не содержат данных об их спектральных характеристиках, например спектрах отражения в определённых кристаллографических направлениях. Отметим также, что известные пакеты по расчёту зонной структуры ФК [6], позволяющие получить эти спектры, требуют сложной подготовительной работы для ввода исходных данных, которую необходимо выполнять заново при расчёте даже близких по строению структур ФК.

Спектральные характеристики приобретают особую актуальность в случае ФК с дефектами пространственной структуры, сформированными целенаправленно или образовавшимися в результате деформации регистрирующей среды при её технологической обработке [2, 7]. Анализ компьютерных моделей ФК, естественно, не заменяет экспериментальных исследований, однако позволяет существенно сократить их объём и получить важные сведения о свойствах ФК более простым путём.

Цель данной работы — создание методики определения спектральных характеристик трёхмерных ФК, в том числе с дефектами структуры, путём расчёта спектров отражения моделей кристаллов в определённых кристаллографических направлениях.

*Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-02-00732).

Моделирование пространственной структуры ФК. Под моделированием структуры голографических ФК в данной работе понимается вычисление функции пространственного распределения показателя преломления регистрирующей среды $n(x, y, z)$, которая, в свою очередь, предполагается линейно-пропорциональной распределению интенсивности картины интерференции N пучков света (без учёта поляризации):

$$I(x, y, z) = \left| \sum_{i=1}^N A_i \exp[k_{ix}x + k_{iy}y + k_{iz}z] \right|^2,$$

или в дискретной форме:

$$I(l, m, n) = \left| \sum_{i=1}^N A_i \exp[k_{ix}\Delta xl + k_{iy}\Delta ym + k_{iz}\Delta zn] \right|^2, \quad (1)$$

где k_i и A_i — волновое число и амплитуда электрической напряжённости пучка i соответственно; Δx , Δy и Δz — шаги дискретизации пространства; l , m , n — количество отсчётов дискретизации. Волновой вектор \mathbf{k} в пространстве разлагается на компоненты k_x , k_y , k_z .

Физически фотоиндуцированное изменение $n(x, y, z)$ в зависимости от дозы облучения происходит непрерывно, при этом разница между максимальным n_{\max} и минимальным n_{\min} значениями показателя преломления вначале растёт, но по достижении некоторого порогового значения n_{\max} уменьшается. При моделировании для отображения размеров структурных элементов («атомов») ФК вычисляется поверхность равной интенсивности. Участки структуры ФК, соответствующие меньшей интенсивности, не отображаются.

Далее для описания пространственной ориентации вектора \mathbf{k} будем использовать ортонормированный базис XYZ . В этом случае выражение $\mathbf{k} = \frac{2\pi}{\lambda}(1, 0, 0)$ соответствует ориентации вектора в направлении оси OX , а $\mathbf{k} = \frac{2\pi}{\lambda}(\sqrt{2}/2, 0, \sqrt{2}/2)$ — ориентации в направлении диагонали квадранта XOZ , λ — длина световой волны (в воздухе).

На рис. 1 показаны два варианта конфигураций (схем) интерферирующих пучков, обычно применяемых при получении трёхмерных ФК. В конфигурации «зонтик» [8], изображённой на рис. 1, *a*, три пучка направлены аксиально симметрично ($\psi = 120^\circ$), а четвёртый распространяется во встречном направлении по нормали к поверхности регистрирующей среды. Для этой схемы векторы \mathbf{k}_i имеют следующий вид:

$$\mathbf{k}_0 = (-k \sin \theta, 0, k \cos \theta), \quad \mathbf{k}_1 = \left(\frac{1}{2} k \sin \theta, \frac{\sqrt{3}}{2} k \sin \theta, k \cos \theta \right),$$

$$\mathbf{k}_2 = \left(\frac{1}{2} k \sin \theta, -\frac{\sqrt{3}}{2} k \sin \theta, k \cos \theta \right), \quad \mathbf{k}_3 = (0, 0, -k).$$

В частности, при $\theta \approx 38,94^\circ$ (в среде) может быть изготовлен шаблон FCC, а при $\theta \approx 109,47^\circ$ — шаблон ВСС с периодом решётки $d \approx 0,87\lambda$ [8].

Однако при экспериментальной реализации такой схемы возникают сложности расщепления интерферирующих пучков и их совмещения в пространстве, т. е. трудно обеспечить одинаковое состояние поляризации всех интерферирующих пучков. В связи с этим большее распространение получила конфигурация, изображённая на рис. 1, *b*, использующая азимутальную и сагиттальную суперпозиции картин интерференции лишь пары

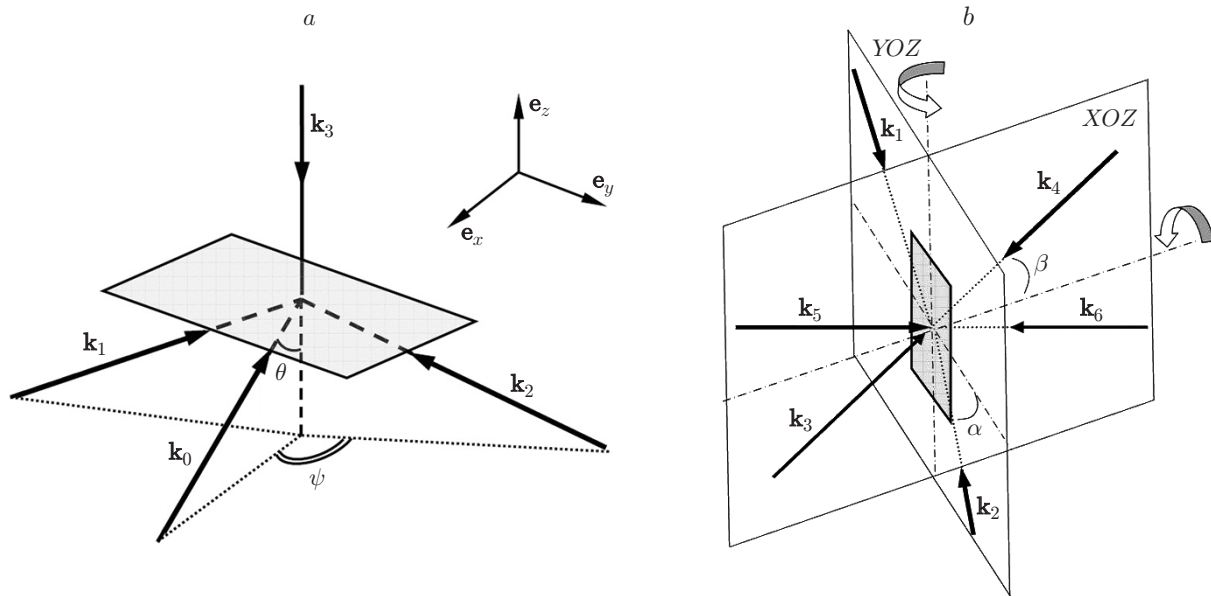


Рис. 1. Варианты конфигураций интерферирующих пучков при формировании ФК: *a* — конфигурация «зонтик», *b* — схема с двумя ортогональными плоскостями

пучков, причём возможны варианты, когда когерентные между собой пучки попарно распространяются в попутном направлении или контрнаправленно. В этой схеме при необходимости формирования SCC с ориентацией кристаллографических направлений [110] или [111] по нормали к плоскости подложки требуется задать следующие значения векторов записывающих пучков соответственно:

$$\mathbf{k}_1 = \frac{2\pi}{\lambda} (0, 0, 1), \quad \mathbf{k}_2 = \frac{2\pi}{\lambda} (0, 0, -1), \quad \mathbf{k}_3 = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\sqrt{2}}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2}, 0 \right),$$

$$\mathbf{k}_4 = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{-\sqrt{2}}{2}, \frac{-\sqrt{2}}{2}, 0 \right), \quad \mathbf{k}_5 = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\sqrt{2}}{2}, \frac{-\sqrt{2}}{2}, 0 \right), \quad \mathbf{k}_6 = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{-\sqrt{2}}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2}, 0 \right)$$

или

$$\mathbf{k}_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\sqrt{2}}{2}, 0, \frac{\sqrt{2}}{2} \right), \quad \mathbf{k}_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{-\sqrt{2}}{2}, 0, \frac{-\sqrt{2}}{2} \right), \quad \mathbf{k}_3 = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\sqrt{2}}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2}, 0 \right),$$

$$\mathbf{k}_4 = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{-\sqrt{2}}{2}, \frac{-\sqrt{2}}{2}, 0 \right), \quad \mathbf{k}_5 = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\sqrt{2}}{2}, \frac{-\sqrt{2}}{2}, 0 \right), \quad \mathbf{k}_6 = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{-\sqrt{2}}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2}, 0 \right).$$

Изображения фрагментов моделей пространственных структур таких кристаллов приведены на рис. 2, *a, b*, где хорошо видны периодичность расположения атомов и ориентации кристаллографических направлений относительно плоскости подложки.

Расчёт спектров отражения в определённых кристаллографических направлениях. Наряду с пространственной структурой практический интерес представляют спектральные характеристики ФК, в частности спектр отражения. Для ФК с периодической структурой расчёт таких спектров вдоль какого-либо выделенного кристаллографического направления возможен при использовании модели многослойной структуры тонких диэлектрических плёнок [9, 10].

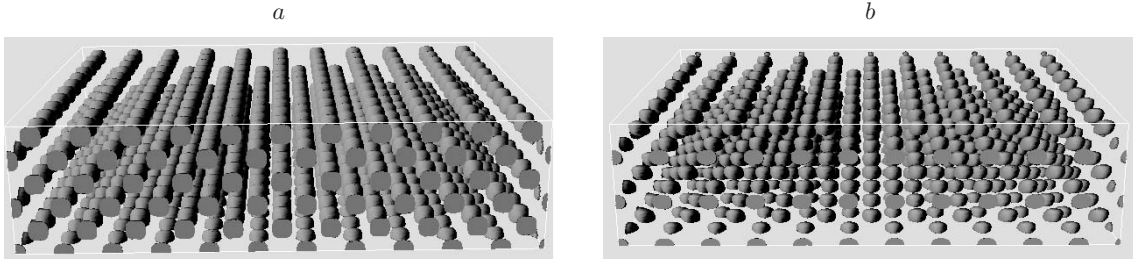


Рис. 2. Изображения пространственных структур SCC: с ориентациями кристаллографических направлений [110] (a) и [111] (b) по нормали к плоскости подложки

Известно [9], что для S -поляризованной волны в случае её нормального падения на одиночный диэлектрический слой толщиной d с показателем преломления n матрица переноса, описывающая связь компонент этой волны на входе и выходе слоя, имеет вид

$$M_0 = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \frac{-i \sin \varphi}{n} \\ -in \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $\varphi = (2\pi/\lambda)nd$ — набег фазы световой волны длиной λ от одной границы слоя до другой.

Матрица переноса M через структуру из N последовательно расположенных диэлектрических слоёв есть произведение матриц переноса M_j отдельных слоёв начиная с той стороны, на которую падает свет:

$$M = \prod_{j=1}^N M_j. \quad (3)$$

Амплитудный коэффициент отражения такой структуры связан с элементами матрицы переноса M выражением

$$r = \frac{(M_{11} + M_{12}n_1)n_c - (M_{21} + M_{22}n_s)}{(M_{11} + M_{12}n_1)n_c + (M_{21} + M_{22}n_s)}, \quad (4)$$

где n_c — показатель преломления полубесконечной среды, из которой свет проникает в ФК (обычно это покровный слой), а n_s — показатель преломления подложки.

В свою очередь, энергетический коэффициент отражения всей структуры $R = |r|^2$. Для простейшего случая одномерного голографического ФК пространственное распределение показателя преломления $n(x)$ имеет гармонический вид:

$$n(x) = n_0 + \Delta n \cos \left(\frac{2\pi}{d} x \right), \quad (5)$$

где n_0 — среднее значение показателя преломления регистрирующей среды после её облучения и постобработки; Δn — амплитуда модуляции фотоиндуцированного изменения показателя преломления среды (например, вследствие фотополимеризации); $(n_0 + \Delta n)$ и $(n_0 - \Delta n)$ — максимальное и минимальное значения показателя преломления соответственно; d — период решётки кристалла.

В простейшей модели структуры ФК непрерывное распределение (5) вдоль какого-либо кристаллографического направления можно заменить набором из периодически повторяющихся P пар диэлектрических слоёв a и b толщиной $d/2$ с показателями преломления $n_a = (n_0 + \Delta n)$ и $n_b = (n_0 - \Delta n)$. В этом случае, как известно, $M = (M_{ab})^P$, где M_{ab} —

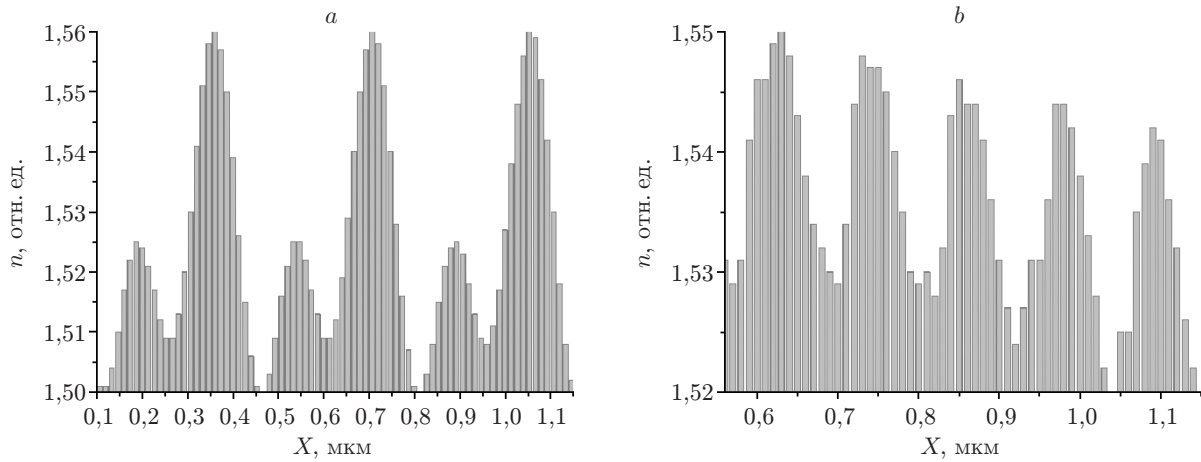


Рис. 3. Примеры дискретных распределений значений показателя преломления ФК вдоль заданных кристаллографических направлений: [210] (а) и [110] (б)

матрица переноса пары слоёв a и b . В общем случае распределение $n(x)$ может иметь сложный, в том числе неперриодический, вид. Подобное распределение заменим последовательностью L диэлектрических слоёв со значениями показателя преломления $n_l = n(x_l)$ и толщиной $D/L \ll d$, где D — толщина фотонного кристалла, $l = 1, 2, \dots, L$.

Примеры такой замены изображены на рис. 3, a , иллюстрирующем распределение $n(x_l)$ для структуры SCC вдоль кристаллографического направления [210], и на рис. 3, b — вдоль направления [110] для этой же структуры, но испытавшей неоднородную (по глубине) усадку толщины в указанном направлении. Далее при вычислении матрицы передачи будем использовать общее выражение (3).

Примеры расчётов спектральных характеристик моделей ФК. Рассмотрим примеры спектральных характеристик моделей ФК для конкретных распределений $n(x)$. На рис. 4, a, b изображены фрагменты модельных кристаллов типов SCC и ВСС и линии их зондирования. Эти линии формируются путём задания параметров зондирующего пучка в программе моделирования и анализа структуры ФК [5]. Видно, что атомы рас-

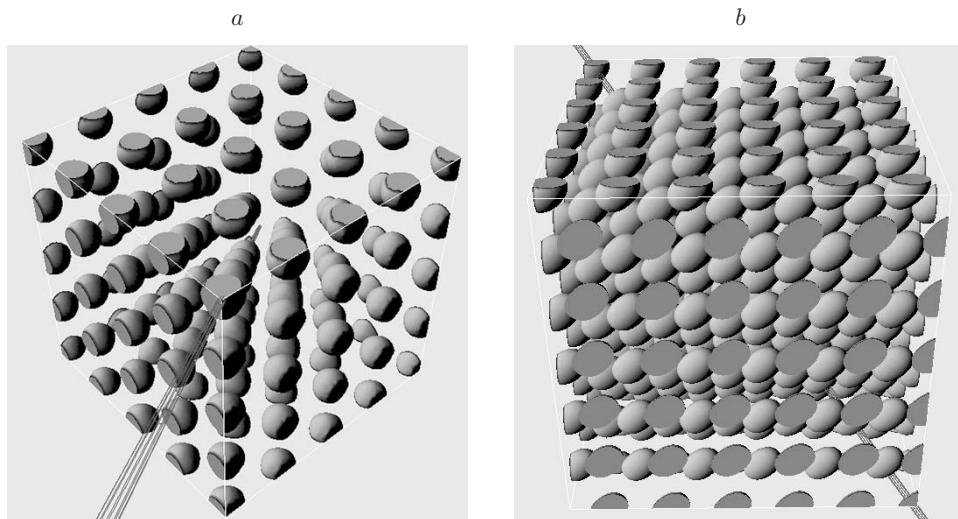


Рис. 4. Изображения пространственных структур модельных кристаллов и линий их зондирования в кристаллографическом направлении [111]: SCC (а), ВСС (б)

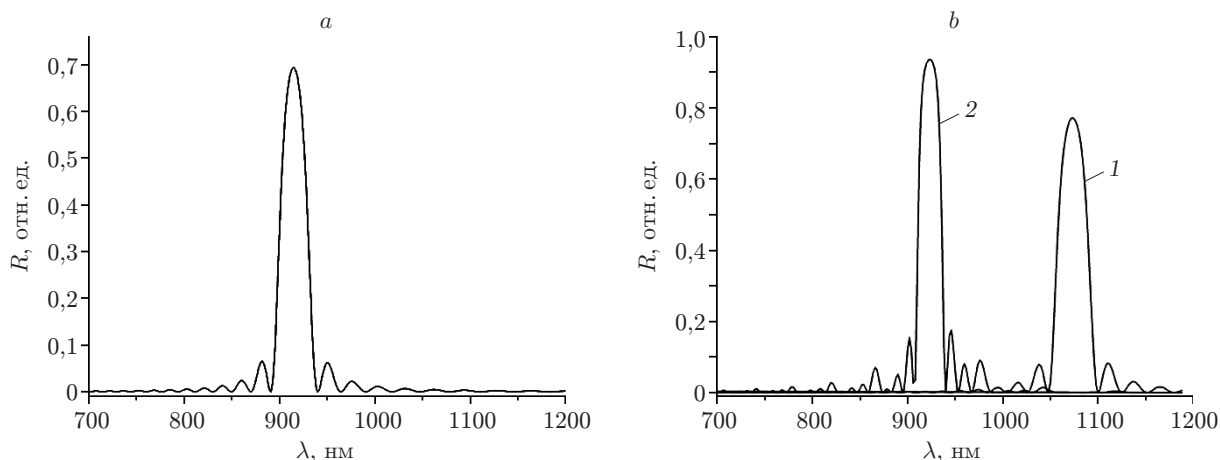


Рис. 5. Графики спектров отражения модельных кристаллов: *a* — SCC в направлении [111]; *b* — VCC в направлениях [100] (кривая 1) и [111] (кривая 2)

положены точно вдоль диагонали кубических решёток с периодом, который определяется параметрами интерферирующих пучков.

Например, при использовании лазерного излучения с длиной волны 532 нм (в воздухе) период решётки SCC в направлении [100] $d_{100} = 175$ нм, а в направлении [111] $d_{111} = \sqrt{3}d_{100} = 303$ нм и тем самым определяет положение центра стоп-зоны 921 нм в спектре отражения (рис. 5, *a*).

Примеры спектров отражения структуры VCC (полученной с помощью схемы «зонтик» при $\theta = 90^\circ$) в кристаллографических направлениях [100] и [111] изображены на рис. 5, *b*. Периоды решёток в этих направлениях по расчётам составили $d_{100} = 350$ нм и $d_{111} = (\sqrt{3}/2)d_{100} = 151,5$ нм, а соответствующие им главные рефлексы имеют максимумы при 1090 и 921 нм. Глубина и ширина стоп-зон зависят от амплитуды модуляции фотоиндуцированного изменения показателя преломления и толщины кристалла, которые для приведённых примеров составляли $\Delta n = 0,04$ и $d = 12$ мкм соответственно. Поскольку нас интересуют спектральные характеристики структур собственно ФК, то в расчётах

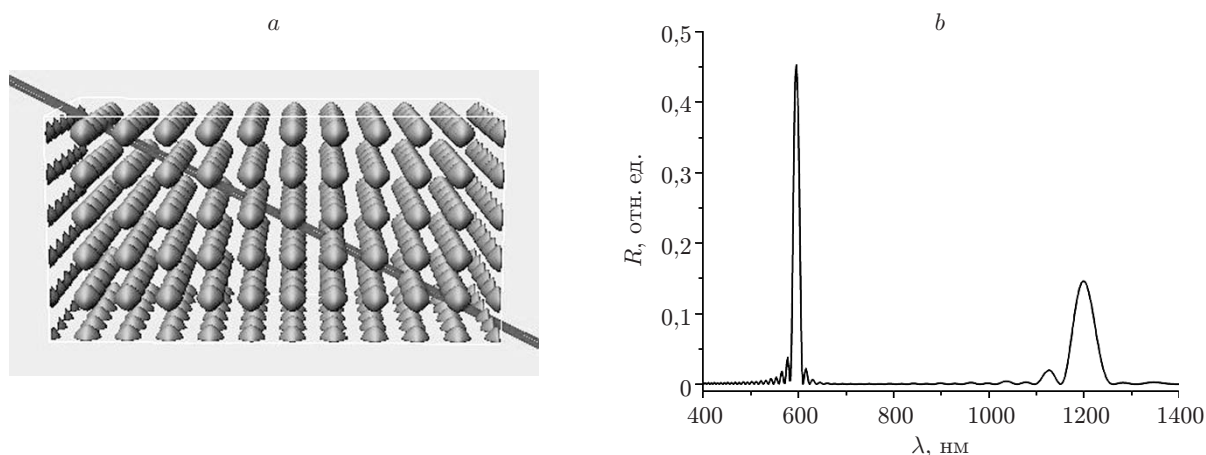


Рис. 6. Структура и спектр отражения модельного ФК: *a* — изображение пространственной структуры SCC и линии его зондирования в кристаллографическом направлении [210]; *b* — вид спектра отражения в этом направлении

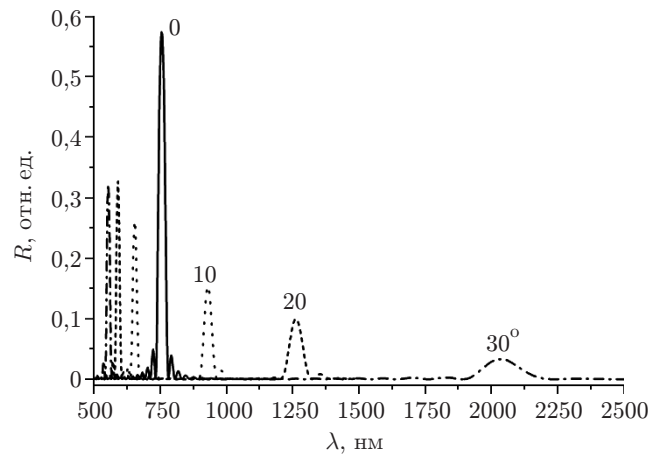


Рис. 7. Графики угловой зависимости спектров отражения модельного кристалла SCC

предполагалось $n_c = n_s = n_0 = 1,52$ (здесь можно не учитывать интерференционные эффекты при отражении света на границах ФК — подложка и ФК — покровный слой). Отметим, что для этих кристаллов в указанных направлениях наблюдается лишь один рефлекс. Приведённые примеры спектров отражения модельных ФК качественно согласуются с экспериментальными данными, приведёнными, например, в [11].

Внешний вид модели пространственной структуры ФК типа SCC и спектр его отражения этого ФК в кристаллографическом направлении [210] изображены на рис. 6. Наличие двух рефлексов в спектре свидетельствует о том, что в данном направлении можно выделить две периодические системы рассеивающих (отражающих) плоскостей, однако при конечных размерах кристалла количество таких плоскостей оказывается заметно различным (доминирует система с меньшим периодом), соответственно их вклад в степень отражения рефлекса также различен.

Компьютерное моделирование позволяет легко получать сведения о важных свойствах ФК, экспериментальные исследования которых весьма трудоёмки. В частности, это относится к угловой селективности спектров отражения, т. е. их зависимости от угла падения зондирующего пучка света. Такая зависимость для кристалла типа SCC, исследуемого в окрестности углов относительно кристаллографического направления [110], изображена на рис. 7. Видно, что по мере увеличения угла падения зондирующего пучка света вид спектра отражения существенно меняется: один рефлекс трансформируется в два рефлекса, свидетельствующих о наличии двух периодических систем в структуре ФК, причём один из них по мере увеличения угла зондирования смещается в коротковолновую область спектра, а второй, наоборот, в длинноволновую, при этом степень отражения рефлекса уменьшается, что указывает на снижение доли соответствующей периодической системы в структуре ФК.

Спектральные характеристики ФК с дефектами пространственной структуры. Приведённые выше примеры структур ФК по существу являются шаблонами для последующего создания каких-либо функциональных элементов (волноводов, ответвителей, фильтров и др.). В связи с этим представляют интерес ФК с модифицированной пространственной структурой, сформированной целенаправленно или образовавшейся вследствие деформации регистрирующей среды при её технологической обработке [7, 12, 13]. В частности, при использовании органических материалов (фотополимеров, фоторезистов) наблюдается усадка толщины ФК, в результате чего нарушается его периодичность, а следовательно, должны измениться спектральные характеристики.

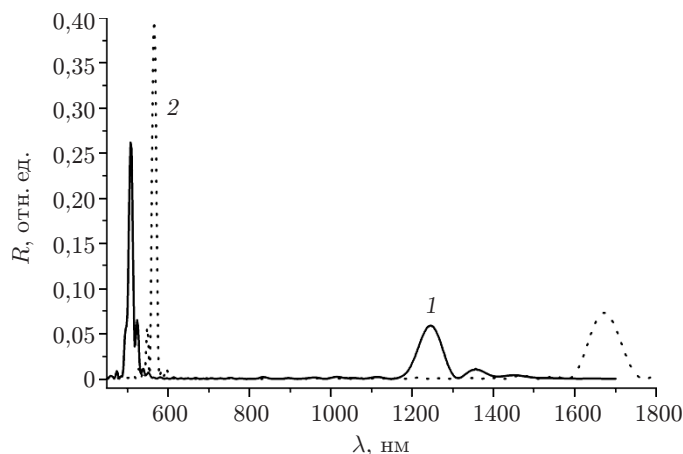


Рис. 8. Сравнение спектров отражения ФК в случае однородной усадки (кривая 1) и при её отсутствии (кривая 2)

Рассмотрим типичные ситуации:

1) однородная усадка, происходящая одинаковым образом по всей площади ФК преимущественно в направлении, нормальном к поверхности подложки;

2) неоднородная усадка с неодинаковой степенью на разных участках ФК.

Влияние однородной усадки на изменение спектра отражения SCC с ориентацией структуры по нормали к подложке ФК иллюстрирует рис. 8, где показаны рефлекс в кристаллографическом направлении [210] в случае усадки и при отсутствии таковой. Хорошо видно, что вследствие уменьшения периода структуры ФК, обусловленного усадкой, происходит сдвиг рефлекса в коротковолновую область спектра на величину, пропорциональную степени усадки. Отметим также, что наряду с этим происходит уменьшение амплитуды рефлекса (степени отражения). Такой эффект объясняется тем, что при усадке в основном уменьшается объём той области структуры ФК, у которой плотность вещества, а значит, и показатель преломления меньше. Таким образом, при усадке амплитуда модуляции показателя преломления снижается, вследствие чего уменьшается и степень отражения.

В случае различной величины усадки по плоскости ФК (что может возникнуть в результате дополнительной засветки, а также процессов постобработки фотополимерного материала) характер искажений спектральных характеристик совсем иной. Рис. 9 демонстрирует влияние неоднородной усадки структуры модельного двухмерного SCC на его спектр отражения. Видно, что из-за неоднородности усадки толщины ФК периодичность его структуры нарушается неодинаковым образом (рис. 9, *a*), поэтому возникают множественные рефлексы малой величины, смещённые в коротковолновую область (рис. 9, *b*).

Даже при отсутствии усадки спектральные характеристики ФК могут быть искажены из-за изменения фазового контраста между атомами и окружающей средой в разных частях ФК (в частности, по его глубине относительно внешней поверхности). Такое изменение является следствием неоднородного распределения амплитуды модуляции показателя преломления голографического ФК при его изготовлении с использованием материалов с сильным поглощением света. В этом случае по глубине материала амплитуда модуляции показателя преломления будет уменьшаться. Пример картины подобного распределения для SCC в направлении [111] приведён на рис. 10, *a*. Поскольку периодичность структуры ФК здесь не нарушается, то длина волны рефлекса не отличается от идеального кристалла, но интенсивность рефлекса заметно меньше, как это показано на рис. 10, *b*. В данном примере максимальное значение амплитуды модуляции показателя преломления в расчётах составляло 0,04.

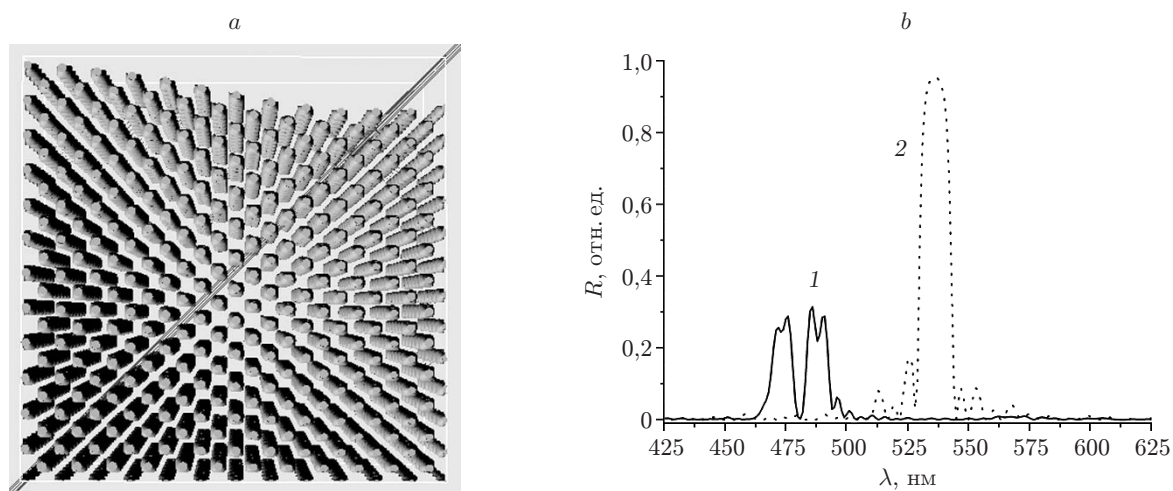


Рис. 9. Влияние неоднородной усадки структуры ФК на его спектр отражения: *a* — пример структуры модели двухмерного SCC с неоднородной усадкой в среднем 3 %; *b* — спектр отражения этого кристалла вдоль кристаллографического направления [110] (кривая 1) в сравнении со спектром без усадки (кривая 2)

В последнее время большой интерес вызывают свойства квазикристаллов, не имеющих, как известно, ближнего порядка пространственной структуры, но обладающих дальним порядком периодичности [5, 14].

На рис. 11, *a* показан внешний вид модели 2D-квазикристалла, полученного путём четырёхкратного аксиального мультиплицирования (через 45°) одномерного ФК с периодом 175 нм, а на рис. 11, *b* — спектры отражения такого кристалла при его зондировании под углами 22, 45, 90° в плоскости подложки, рассчитанные по вышеизложенной методике. Видно, что при углах зондирования, совпадающих с углами мультиплицирования, спектры имеют одинаковый вид рефлексов (различия в степени отражения связаны с разной протяжённостью кристалла в направлении зондирования), указывающих на преобла-

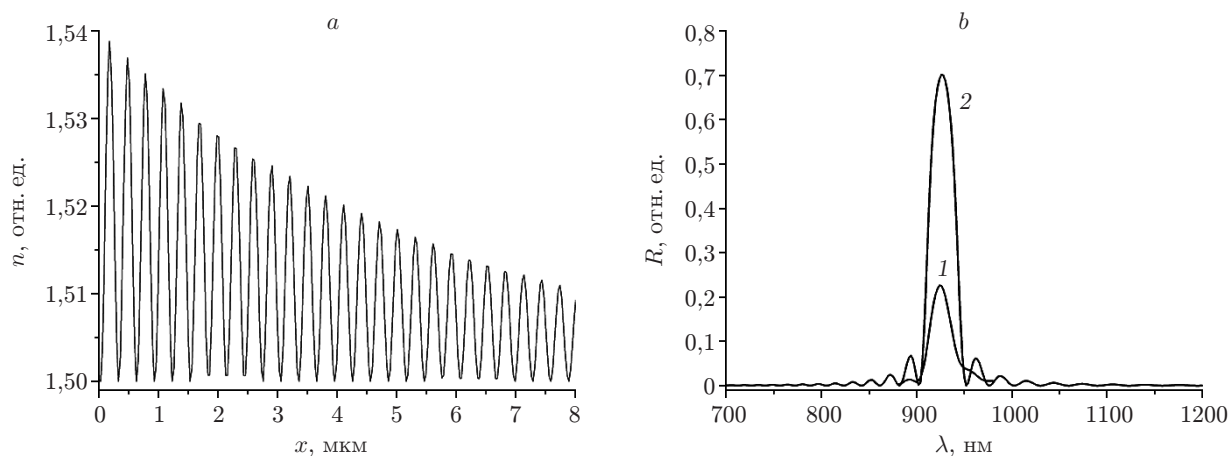


Рис. 10. Влияние вида распределения амплитуды модуляции показателя преломления по глубине кристалла на его спектр отражения: *a* — распределение с экспоненциальным затуханием амплитуды; *b* — спектр отражения искажённого кристалла с затуханием (кривая 1) в сравнении с идеальным без затухания (кривая 2)

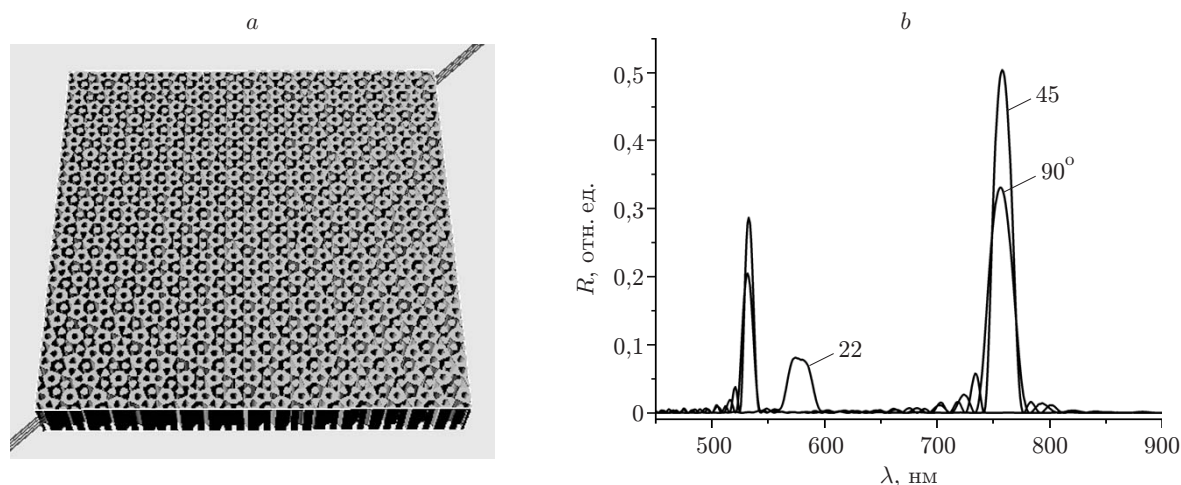


Рис. 11. Пространственная структура и спектральные характеристики квазикристалла: *a* — модельный 2D-квазикристалл; *b* — его спектры отражения при зондировании под различными углами

дание двух периодических структур. Однако спектр, полученный при зондировании под углом 22° , свидетельствует о слабой степени периодичности ФК в этом направлении.

Заключение. В данной работе предложена методика расчёта спектральных характеристик модельных трёхмерных фотонных кристаллов, в том числе с дефектами пространственной структуры. Методика использует модель многослойной системы тонких диэлектрических плёнок и расчётное распределение показателя преломления структуры ФК вдоль заданного кристаллографического направления. Проведены расчёты спектров отражения для кристаллов типов SCC, FCC, BCC в направлениях [111], [100], [110], [210], а также квазикристаллов, изучены их угловые характеристики. Показано, что вследствие уменьшения периода структуры ФК, обусловленного усадкой, происходит сдвиг рефлекса в коротковолновую область спектра, наряду с этим происходит уменьшение амплитуды рефлекса (степени отражения). Данный эффект объясняется тем, что при усадке в основном уменьшается объём той области структуры ФК, у которой плотность вещества, а значит, и показатель преломления меньше. Таким образом, при усадке амплитуда модуляции показателя преломления снижается и, следовательно, степень отражения уменьшается. В случае неоднородной усадки толщины фотонного кристалла периодичность его структуры нарушается неодинаковым образом в различных местах, и в результате возникают множественные рефлексы малой величины, смещённые в коротковолновую область.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Yablonovitch E.** Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics // *Phys. Rev. Lett.* 1987. **58**, N 20. P. 2059–2062.
2. **Фотонные кристаллы и нанокompозиты: структурoобразование, оптические и диэлектрические свойства** / Отв. ред. В. Ф. Шабанов, В. Я. Зырянов. Новосибирск: Изд. СО РАН, 2009. 257 с.
3. **Campbell M., Sharp D. N., Harrison M. T. et al.** Fabrication of photonic crystals for the visible spectrum by holographic lithography // *Nature*. 2000. **404**. P. 53–56.
4. **Rumpf R. C., Johnson E. G.** Fully three-dimensional modeling of the fabrication and behavior of photonic crystals formed by holographic lithography // *JOSA A*. 2004. **21**, Is. 9. P. 1703–1713.

5. **Пен Е. Ф., Шаталов И. Г., Шелковников В. В.** Экспериментальные исследования и моделирование голографических фотонных кристаллов с дефектами пространственной и зонной структур // Автометрия. 2010. **46**, № 3. С. 64–73.
6. **MIT Photonic-Bands (MPB) package.** URL: http://ab-initio.mit.edu/wiki/index.php/MIT_Photonic_Bands (дата обращения: 21.06.2013).
7. **Braun P. V., Rinne S. A., García-Santamaría F.** Introducing defects in 3D photonic crystals: State of the art // *Adv. Mater.* 2006. **18**, N 20. P. 2665–2678.
8. **Meisel D. C., Wegener M., Busch K.** Three-dimensional photonic crystals by holographic lithography using the umbrella configuration: Symmetries and complete photonic band gaps // *Phys. Rev. B.* 2004. **70**, Is. 16. 165104.
9. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики. М.: Наука, 1970. 855 с.
10. **Yariv A., Yeh P.** *Optical Waves in Crystals.* N. Y.: Wiley, 1984. 589 p.
11. **Zhong Y., Wu L., Su H., Wong K. S.** Fabrication of photonic crystals with tunable surface orientation by holographic lithography // *Opt. Express.* 2006. **14**, N 15. P. 6837–6943.
12. **Meisel D. C., Diem M., Deubel M. et al.** Shrinkage precompensation of holographic three-dimensional photonic-crystal templates // *Adv. Mater.* 2006. **18**, Is. 22. P. 2964–2968.
13. **Пен Е. Ф., Родионов М. Ю.** Неоднородные и нестационарные брэгговские голограммы: модели и методы исследований // Автометрия. 2005. **41**, № 2. С. 98–114.
14. **Gauthier R. C., Ivanov A.** Production of quasi-crystal template patterns using a dual beam multiple exposure technique // *Opt. Express.* 2004. **1**, N 6. P. 990–1003.

Поступила в редакцию 21 июня 2013 г.
