

## Двумерная дифракция света на тонких опаловых пленках

© А.К. Самусев, К.Б. Самусев, М.В. Рыбин, М.Ф. Лимонов, Е.Ю. Трофимова,  
Д.А. Курдюков, В.Г. Голубев

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

E-mail: A.Samusev@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 18 октября 2010 г.)

Экспериментально и теоретически исследована дифракция света на тонких пленках синтетического опала. Картины дифракции изучались визуально и регистрировались в различных геометриях рассеяния при освещении пленок опалов белым неполяризованным светом. При освещении пленки световым пучком вдоль оси [111], перпендикулярной поверхности пленки, картина дифракции характеризуется симметрией  $C_6$  и состоит из шести интенсивных рефлексов, симметрично расположенных относительно падающего пучка. Эта картина существенно усложняется при освещении пленки белым светом под произвольным углом относительно оси [111]. В результате экспериментального исследования спектральных и угловых зависимостей дифракционных картин установлена достаточно полная картина трансформации дифракционных рефлексов при изменении угла падения света на пленку опала. Прекрасное совпадение экспериментальных и расчетных данных однозначно указывает на двумерный характер дифракции света на тонких опаловых пленках.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 08-02-00642 и 08-02-450) и правительства Санкт-Петербурга (грант 2010г для студентов, аспирантов вузов и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга).

### 1. Введение

Синтетические опалы являются фотонными кристаллами (ФК), которые обладают стоп-зонами в видимом спектральном диапазоне благодаря характерному размеру образующих их частиц  $\alpha\text{-SiO}_2$  в несколько сотен нанометров. Это дает уникальную возможность изучать фотонные свойства не только традиционными методами, регистрируя с помощью спектрометра пропускание либо отражение, но и непосредственно наблюдать картины дифракции света на экране, окружающем образец. Возможность визуально изучать формирование и перестройку фотонной зонной структуры в зависимости от условий дифракционного эксперимента и параметров образца была продемонстрирована в работах [1–4]. Картины дифракции света экспериментально исследовались в различных геометриях рассеяния при освещении белым или монохроматическим светом объемных образцов синтетических опалов [1,3–5], тонких кремнеземных и полимерных опаловых пленок, а также объемных коллоидных кристаллов [6–10].

В экспериментах на объемных образцах опалов исследовалась брэгговская дифракция света. Теория трехмерной (3D) брэгговской дифракции поляризованного света в опалах, обладающих плотноупакованной гранецентрированной кубической (ГЦК) структурой, построена на основе электродинамического метода функций Грина и представлена в работах [2,3]. Интенсивность брэгговской дифракции света с преобразованием волнового вектора  $\mathbf{k} \rightarrow \mathbf{k}'$  ( $\mathbf{k}$  и  $\mathbf{k}'$  — волновые векторы падающей и рассеянной световой волны) задается, в частности, структурным фактором, имеющим максимумы в направлениях рассеяния  $\mathbf{k}'$ , которые определяются системой уравнений Лауэ

$\mathbf{k}' = \mathbf{k} + \mathbf{g}_{hkl}$ , где  $\mathbf{g}_{hkl}$  — вектор обратной решетки, перпендикулярный плоскости с индексами Миллера ( $hkl$ ). В упорядоченном трехмерном ФК брэгговская дифракция происходит по закону зеркального отражения от кристаллической плоскости ( $hkl$ ) с нормалью  $\mathbf{g}_{hkl}$ .

Экспериментальные исследования трехмерной брэгговской дифракции света проводились на объемных образцах разного качества — от высокоупорядоченных до сильно разупорядоченных структур. Измерения проводились как в поляризованном, так и в неполяризованном свете [1,3–5].

Однако в нашем случае особый интерес представляют работы [6–9], в которых представлены результаты исследования дифракции света на тонких опаловых пленках. Работа [6] является одним из первых теоретических и экспериментальных исследований дифракции света на полимерных (полиметилметакрилат) опаловых пленках. При нормальном падении пучка на пленку в прошедшем свете наблюдались в зависимости от образца либо три, либо шесть дифракционных рефлексов. Экспериментальные данные интерпретировались на основе расчета картин рассеяния с учетом формфактора, вычисленного в рамках теории Ми [11]. Дифракционная картина, полученная на пленках опала  $\text{SiO}_2$  высокого качества [7], также содержит шесть точек, однако авторы интерпретировали ее как результат дифракции на плоскостях  $\{110\}$  ГЦК-решетки. В работе [8] картины дифракции лазерного (HeNe) луча использовались в первую очередь для проверки качества и ориентации полимерных (полистирен) опаловых пленок. В зависимости от толщины и качества пленки различные дифракционные картины, состоящие из шести либо трех рефлексов, наблюдались в работе [9]. Наконец, в [10] исследовались образцы, состоящие из полимерных сфер, которые авторы

характеризуют как трехмерные фотонные кристаллы. В зависимости от параметров образца, в том числе от контраста диэлектрической проницаемости матрица-заполнитель, наблюдались либо шесть, либо три дифракционных рефлекса, причем авторы не смогли однозначно указать причины трансформации дифракционных картин.

В настоящей работе проведено подробное исследование картин дифракции белого света на пленках кремнеземного синтетического опала и выполнены расчеты, которые позволили интерпретировать экспериментальные данные в рамках модели двумерной дифракции. В разделе 2 описаны образцы пленок опала, исследованные в настоящей работе, в разделе 3 — методика проведения дифракционного эксперимента. В разделе 4 представлены результаты экспериментального исследования дифракции света на опаловых пленках. Раздел 5 посвящен изложению результатов расчета картин двумерной дифракции света на опаловых пленках. Обсуждение экспериментальных данных и основные выводы работы представлены в разделе 6.

## 2. Экспериментальные образцы

В настоящей работе исследовались опаловые пленки, образованные сферическими частицами  $\alpha$ -SiO<sub>2</sub>, осажденные на подложки плавленного кварца. Сферические частицы были получены методом медленного щелочного гидролиза тетраэтоксисилана в водно-спиртовой среде (метод Штобера–Финка–Бона [12]). Диаметр частиц определялся по данным атомно-силовой микроскопии и составил  $720 \pm 20$  nm. Методом вертикального осаждения на кварцевой подложке [13] был выращен ряд трехмерно-упорядоченных пленок с различным числом плотноупакованных монослоев сфер  $\alpha$ -SiO<sub>2</sub>. Эти слои будем называть ростовыми слоями, а соответствующую им плоскость — ростовой плоскостью (111). При плотной упаковке гексагональные ростовые слои (111) могут занимать друг относительно друга лишь три различных положения, которые обычно обозначаются в литературе как *A*, *B* и *C* [14]. Чередование этих слоев приводит к формированию двойникованной ГЦК-решетки, которая образуется из двух зеркально-симметричных реализаций упорядоченных ГЦК-упаковок — *ABCABC* (ГЦК-I) и *CBACBA* (ГЦК-II). В синтетических опалах эти два типа ГЦК-упаковок чередуются случайным образом [3,15]. Отметим, что двойникование ГЦК-решетки присуще подавляющему большинству реальных образцов синтетических опалов.

## 3. Методика эксперимента

Эксперименты по дифракции света на пленках синтетических опалов проводились на установке, схематически изображенной на рис. 1. В качестве источника белого света использовалась лампа Microrack HL-2000-FHSA мощностью 7 W (1). Пучок формировался с помощью

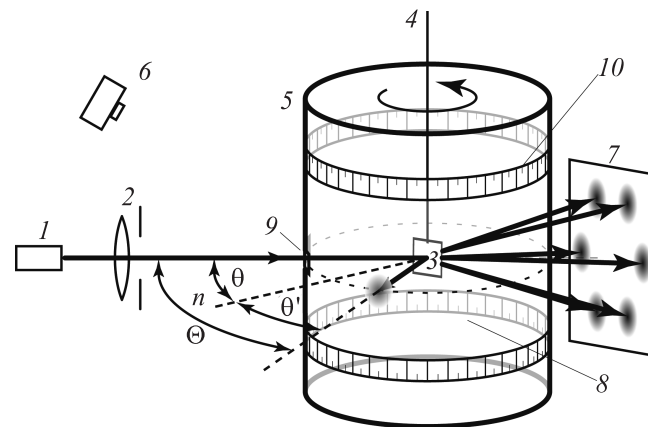


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. Подробное описание установки приведено в тексте.

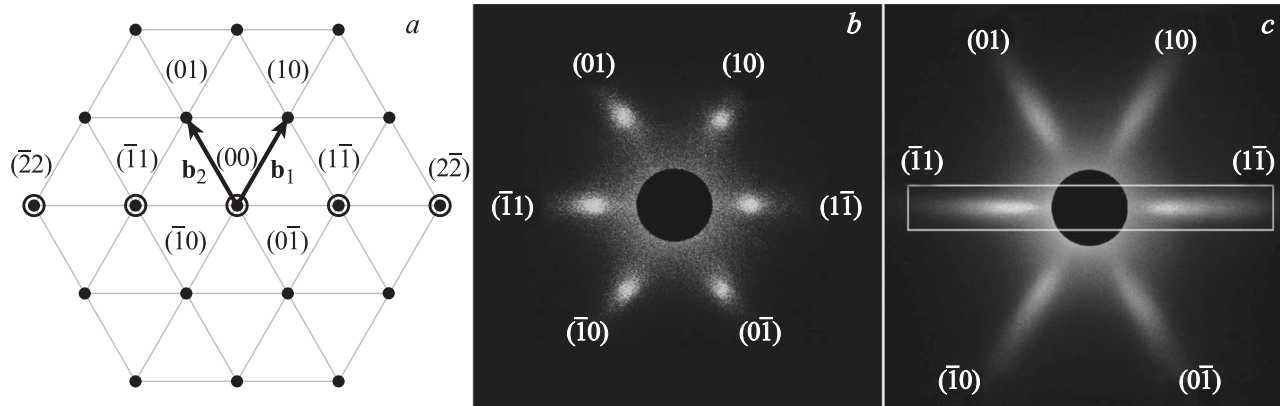
линзы и диафрагмы 2. Пленка опала 3 крепилась на вертикальном держателе 4 в центре цилиндрической кюветы 5 диаметром 9 см.

При вращении держателя с пленкой вокруг вертикальной оси угол падения светового пучка на ориентированную пленку менялся в пределах  $-90^\circ < \theta < 90^\circ$ . Угол падения  $\theta$  отсчитывался от направления роста кристалла [111]. Дифракционные картины наблюдались визуально и фиксировались цифровой камерой Olympus C-2040zoom в двух различных геометриях наблюдения. Во-первых, для изучения рассеяния, прошедшего сквозь пленку „вперед“, использовался плоский экран 7, установленный за образцом (при этом кювета 5 не использовалась). Во-вторых, для получения полной картины рассеяния, включая рассеяние „назад“, полупрозрачный экран 8 закреплялся на внешней поверхности цилиндрического сосуда. Экран имел квадратное отверстие 9 для светового пучка и шкалу 10, которая позволяла определять угловое положение дифракционных рефлексов ( $\Theta = \theta + \theta'$ ) с точностью  $2^\circ$ . Фотографирование дифракционных рефлексов на цилиндрическом экране проводилось с трех различных фиксированных точек, что позволяло при обработке изображений сформировать общую картину дифракции света в диапазоне углов  $-140^\circ < \Theta < 140^\circ$ .

В настоящей работе экспериментально исследовался ряд выращенных пленок, на которых были получены в целом аналогичные результаты. Далее приводятся данные, полученные при изучении опаловой пленки с шестью ростовыми слоями (111), образованными частицами  $\alpha$ -SiO<sub>2</sub> диаметром 720 nm.

## 4. Экспериментальное исследование дифракции света на опаловых пленках

Результаты экспериментального исследования дифракции белого света на пленке опала приведены на рис. 2



**Рис. 2.** *a)* Обратная гексагональная решетка, состоящая из набора узлов, которые задаются двумерным вектором внутри слоя  $\mathbf{g}_{hk} = h\mathbf{b}_1 + k\mathbf{b}_2$ , где  $\mathbf{b}_1$  и  $\mathbf{b}_2$  — базисные векторы обратной решетки,  $h, k$  — целые числа. Окружностями обведены узлы обратной решетки, отвечающие за порядки дифракции, наблюдавшиеся в эксперименте с вращением образца. *b)* Картина дифракции монохроматического света ( $\lambda = 532 \text{ nm}$ ) на пленке опала (диаметр частиц  $a\text{-SiO}_2$  720 nm, число ростовых слоев 6) при нормальном падении лазерного луча на образец. Отмечены пары индексов  $(hk)$  двумерной дифракции, отвечающие наблюдаемым рефлексам. *с)* Картина дифракции белого света на той же пленке опала при нормальном падении светового пучка на образец. Рамкой обведены рефлекссы, изучавшиеся в экспериментах с вращением образца.

и 3. На рис. 2, *b, c* представлена картина дифракции монохроматического и белого света при нормальном падении ( $\theta = 0$ ) пучка на образец пленки, находящийся в воздухе (цилиндрическая кювета отсутствует). Фотографировался плоский экран, установленный за образцом на расстоянии 10 mm. Видно, что дифракционная картина в такой геометрии наблюдения состоит из шести рефлексов, расположение которых характеризуется симметрией  $C_6$  относительно падающего пучка. Пленка опала ориентирована таким образом, чтобы два из шести рефлексов располагались в горизонтальной плоскости, перпендикулярной оси вращения образца. Шесть дифракционных рефлексов в данной геометрии рассеяния могут наблюдаться в двух случаях. Во-первых, при двумерной дифракции на гексагональном ростовом слое ( $111$ ) симметрии  $C_6$  и, во-вторых, при трехмерной брэгговской дифракции на двойникованной ГЦК-решетке, когда каждый из ГЦК-двойников, имеющих в направлении  $[111]$  симметрию  $C_3$ , определяет тройку дифракционных рефлексов. Так как в ГЦК-решетке двойники различаются поворотом на  $60^\circ$  вокруг оси  $[111]$ , результирующая картина дифракции будет обладать симметрией  $C_6$  и совпадать с картиной, представленной на рис. 2, *b, c*.

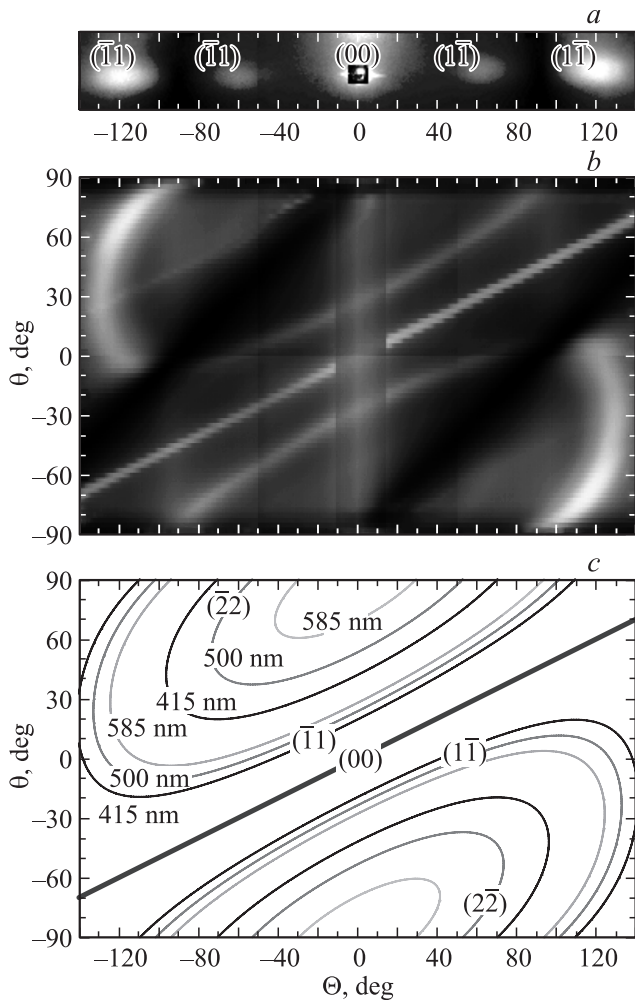
Чтобы различить два этих случая, т.е. определить, двумерная или трехмерная дифракция наблюдается в настоящей работе, были проведены следующие эксперименты. Пленка опала помещалась в цилиндрический сосуд с закрепленным на нем цилиндрическим экраном (рис. 1). На рис. 3, *a* приведена „развертка“ дифракционной картины, наблюдаемой на цилиндрическом экране в горизонтальной плоскости при нормальном падении пучка на пленку ( $\theta = 0$ ). В этой работе мы анализируем картины дифракции в горизонтальной плоскости, поэтому на рисунке приведена только узкая „картина-полоска“, соответствующая развертке по углам

$-140^\circ < \Theta < 140^\circ$ , которая была получена в результате обработки трех фотографий, снятых из трех фиксированных точек вокруг цилиндра, с помощью специально разработанной программы. На рис. 3, *a* хорошо различимы четыре дифракционных рефлекса при углах рассеяния  $\Theta \approx \pm 60^\circ$  и  $\Theta \approx \pm 120^\circ$ . Эти рефлексы образуются при дифракции „назад“ и „вперед“ соответственно и отвечают узлам двумерной обратной решетки  $(\bar{1}1)$  и  $(1\bar{1})$ . Пара рефлексов, расположенных под углами  $\Theta \approx \pm 120^\circ$ , соответствует двум из шести рефлексов на плоском экране (рис. 2, *b, c*).

В серии последующих экспериментов пленка вращалась вокруг вертикальной оси: угол падения света на образец относительно ростовой оси  $[111]$  изменялся в пределах  $-90^\circ < \theta < 90^\circ$ . Фотографирование дифракционных картин производилось с каждой из трех фиксированных точек для углов падения  $\theta$  из указанного диапазона с шагом  $\Delta\theta = 2.5^\circ$ . Таким образом, были получены 72 узкие „картины-полоски“, каждая для своего значения угла падения  $\theta$ , аналогичные полоске на рис. 3, *a*. Итоговый экспериментальный результат, представленный на рис. 3, *b* в координатах  $(\Theta, \theta)$ , был составлен из всех 72 узких полосок, объединенных в единый рисунок. Отметим, что „полоска“ на рис. 3, *a* представляет собой изображение, полученное на цилиндрическом экране, в то время как рис. 3, *b* составлен из „полосок“ полученных в результате усреднения таких изображений по вертикали. Вклад каждой такой полоски на рис. 3, *b* составляет  $1/72$  высоты рисунка. Рис. 3, *b* демонстрирует полную картину трансформации дифракционных рефлексов (в горизонтальной плоскости) при изменении угла падения света  $\theta$  на пленку опала. Как видно из рис. 3, *b*, при изменении угла  $\theta$  дифракционные рефлекссы описывают сложные дугообразные траектории. Отметим, что обе интенсивные дуги пропадают в областях  $\theta' = \pm 90^\circ$ . Это

связано с тем, что данная геометрия рассеяния подразумевает распространение дифрагированного света внутри пленки (угол  $\theta'$  отсчитывается от нормали) и соответственно выход излучения из ее торцов, что существенно ослабляет интенсивность регистрируемого света.

Кроме двух интенсивных дуг на рис. 3, *b* различимы более слабые по интенсивности рефлексы в областях  $\Theta = -(60 \div 90)^\circ$ ,  $\theta = 40 \div 70^\circ$  и  $\Theta = 60 \div 90^\circ$ ,  $\theta = -(40 \div 70)^\circ$ . Также на рис. 3, *b* присутствует яркая диагональная полоса белого (недифрагированного) света, которая соответствует условию  $\theta' = \theta$  ( $\Theta = 2\theta$ ) и связана с зеркальным отражением падающего пучка от поверхности опаловой пленки (нулевой порядок дифракции). Насколько нам известно, экспериментальная картина, представленная на рис. 3, *b*, публикуется впервые.



**Рис. 3.** Дифракция белого света на пленке опала (диаметр частиц  $a\text{-SiO}_2$  720 нм, число ростовых слоев 6). *a*) Картина дифракции света в горизонтальной плоскости, содержащей падающий пучок и дифракционные рефлексы  $(\bar{1}1)$ ,  $(00)$  и  $(1\bar{1})$ , при нормальном падении светового пучка на пленку ( $\theta = 0$ ). Угол рассеяния света  $\Theta$  отсчитывается от направления, противоположного падающему пучку. *b*) Общая картина дифракции света в горизонтальной плоскости при изменении угла падения светового пучка на пленку ( $\theta$ ). *c*) Расчет положения дифракционных рефлексов, выполненный по формуле (3).

## 5. Двумерная дифракция света на пленке опала: расчет

В общем случае дифракция света на системе периодических рассеивателей определяется уравнениями Лауэ [14]

$$\Delta \mathbf{k} \cdot \mathbf{a}_1 = 2\pi h, \quad (1a)$$

$$\Delta \mathbf{k} \cdot \mathbf{a}_2 = 2\pi k, \quad (1b)$$

$$\Delta \mathbf{k} \cdot \mathbf{a}_3 = 2\pi l, \quad (1c)$$

В этих уравнениях  $\Delta \mathbf{k} = \mathbf{k}' - \mathbf{k}$ , где  $\mathbf{k}$  и  $\mathbf{k}'$  — волновые векторы падающей и рассеянной волн,  $\mathbf{a}_1$ ,  $\mathbf{a}_2$ ,  $\mathbf{a}_3$  — векторы прямой решетки,  $h$ ,  $k$ ,  $l$  — целые числа.

Для интерпретации экспериментальных данных необходимо проанализировать дифракцию света на ростовом слое опалов  $(111)$ , который образован плотно упакованными в гексагональную решетку сферами  $a\text{-SiO}_2$ . С этой целью рассмотрим двумерную дифракцию света на системе эквивалентных сферических рассеивателей, лежащих в одной плоскости, причем центры сфер расположены в узлах гексагональной решетки Браве с периодом  $D$ . Поскольку двумерная гексагональная решетка обладает симметрией  $C_6$  можно предположить, что дифракционные картины в случае нормального падения также будут обладать симметрией  $C_6$ , т.е. число дифракционных рефлексов должно быть кратно 6.

Из системы уравнений (1a), (1b) получаем условие дифракции

$$\Delta \mathbf{k}_{\parallel} = \mathbf{g}_{hk}, \quad (2)$$

где  $\Delta \mathbf{k}_{\parallel}$  — компонента вектора  $\mathbf{k}' - \mathbf{k}$  в плоскости, в которой лежат рассеиватели, т.е. в ростовой плоскости  $(111)$ ;  $\mathbf{g}_{hk} = h\mathbf{b}_1 + k\mathbf{b}_2$  — двумерный вектор обратной решетки гексагональной плоскости (рис. 2, *a*).

Формула (2) сводится к выражению

$$\lambda_{hk} = \frac{D n_{\text{eff}}}{2} \left( \frac{3}{h^2 + hk + k^2} \right)^{1/2} (\sin \theta' - \sin \theta), \quad (3)$$

где  $\theta$  и  $\theta'$  — углы падения и рассеяния соответственно, отсчитываемые от нормали к плоскости (рис. 2),  $h$  и  $k$  — целые числа,  $n_{\text{eff}}$  — эффективный показатель преломления,  $D$  — период решетки (диаметр сферических частиц).

Из формулы (3) следует, что нулевому (нижнему) порядку 2D-дифракции соответствует условие  $(h^2 + hk + k^2)^{1/2} = 0$ . В этом случае выражение (3) имеет решения лишь при  $\sin \theta' = \sin \theta$ , что соответствует зеркальному отражению пучка от гексагональной плоскости на всех длинах волн. Нулевым порядком дифракции наблюдается экспериментально и проявляется на рис. 3, *b* в виде яркой белой диагональной полосы. Первый порядок дифракции отвечает условию  $(h^2 + hk + k^2)^{1/2} = 1$ . Это условие выполняется только для пар индексов  $(h, k)$ , равных  $(\bar{1}1)$ ,  $(1\bar{1})$ ,  $(1,0)$ ,  $(01)$ ,  $(0\bar{1})$ ,  $(\bar{1}0)$  (рис. 2, *a*).

На рис. 3, *c* представлен теоретический расчет по формуле (3) для монохроматического света с длинами

волн  $\lambda = 415, 500, 585 \text{ nm}$  и  $Dn_{\text{eff}} = 720 \text{ nm}$ . Из расчета видно, что при данных параметрах образца для указанных длин волн можно ожидать наблюдение рефлексов, отвечающих  $h = -k = 0, \pm 1, \pm 2$ . Теоретические зависимости представляют собой вложенные замкнутые кривые, причем для данной длины волны замкнутая кривая, отвечающая большему порядку дифракции, находится внутри замкнутой кривой с меньшим порядком.

## 6. Обсуждение результатов и выводы

Экспериментальные результаты, полученные в настоящей работе и представленные на рис. 2, 3, качественно отличаются от результатов исследования дифракции света на объемных образцах синтетического опала [1,3–5]. В дифракционных экспериментах на объемных образцах наблюдались изолированные рефлексы, пространственное положение которых, подчинялось брэгговским условиям зеркального отражения ( $\theta = \theta'$ ) от различных плоскостей двойникованной ГЦК-решетки. Отметим, что экспериментально наблюдалась в основном трехмерная брэгговская дифракция на системах плоскостей  $\{111\}$ .

В то же время при дифракции света на тонкой пленке опала условие Брэгга не выполняется, и дифрагированные пучки наблюдаются при углах  $\theta \neq \theta'$ . Прекрасное совпадение экспериментальных и расчетных данных однозначно указывает на двумерный характер дифракции на тонких опаловых пленках.

Отметим, что в литературе приводятся различные дифракционные картины, полученные на опаловых пленках при распространении падающего пучка по направлению  $[111]$ . Экспериментально наблюдались три рефлекса [6], шесть рефлексов одинаковой интенсивности [6,10] и шесть рефлексов, образованные двумя тройками разной интенсивности [10]. Эти расхождения могут быть связаны в первую очередь с параметрами образцов (число слоев, размер сферических частиц, диэлектрическая проницаемость сфер). При увеличении толщины пленки происходит переход от двумерной к трехмерной брэгговской дифракции света. В случае дифракции света на изолированном гексагональном слое симметрии  $C_6$  или достаточно тонкой пленке, где свойства одного слоя еще являются определяющими, картина дифракции имеет ту же симметрию, причем шесть дифракционных рефлексов первого порядка являются наиболее интенсивными. При увеличении толщины образца формируются условия, определяющие трехмерную дифракцию света. Как известно, ГЦК-решетка по оси  $[111]$  обладает симметрией  $C_3$  и, следовательно, при распространении пучка вдоль  $[111]$  картина дифракции также должна обладать симметрией  $C_3$ . Поэтому при увеличении толщины пленки и формировании ГЦК-решетки объемного образца можно ожидать, что картина дифракции, представленная на рис. 2, *b,c* будет трансформироваться следующим образом. По своему поведению рефлексы разделятся на две тройки (каждая из которых обладает симметрией  $C_3$ ), одна из которых будет постепенно

возгораться, а другая — погасать, пока не пропадет совсем. Оставшаяся тройка рефлексов будет определяться брэгговской дифракцией света на трех различных системах плоскостей семейства  $\{111\}$ . Однако, если объемный образец опала будет двойникованным, т.е. состоящим из двух типов доменов ГЦК-I и ГЦК-II, которые переходят друг в друга при повороте на  $60^\circ$  вокруг оси  $[111]$ , будет наблюдаться другая картина. Каждый из доменов будет определять три дифракционных рефлекса, а их результирующая картина будет повторять рис. 2, *b,c*. Разница будет состоять лишь в относительной интенсивности рефлексов: две тройки рефлексов могут иметь разную интенсивность, определяемую долей соответствующей фазы (ГЦК-I и ГЦК-II) в объеме образца.

Итак, в зависимости от параметров конкретного образца опала при распространении падающего пучка по направлению  $[111]$  могут наблюдаться три типа дифракционных картин: 1) на тонких пленках наблюдается картина симметрии  $C_6$ , причем шесть рефлексов первого порядка имеют одинаковую интенсивность; 2) в случае объемного образца с ГЦК-решеткой наблюдается картина симметрии  $C_3$ , в которой наиболее интенсивными являются три рефлекса, определяемые брэгговской дифракцией на плоскостях  $(\bar{1}11)$ ,  $(1\bar{1}1)$  и  $(11\bar{1})$ ; 3) в случае двойникованной ГЦК-решетки наблюдается картина симметрии  $C_3$ , в которой наиболее интенсивными являются две тройки рефлексов, определяемых брэгговской дифракцией на плоскостях  $(\bar{1}11)$ ,  $(1\bar{1}1)$  и  $(11\bar{1})$  решеток ГЦК-I и ГЦК-II.

Таким образом, в настоящей работе на пленке, образованной шестью гексагональными слоями сферических частиц  $\alpha\text{-SiO}_2$  (общая толщина  $\sim 3.5 \mu\text{m}$ ), наблюдалась дифракционная картина, которая описывается уравнениями Лауэ для случая двумерной дифракции. Этот вывод был сделан благодаря сравнению результатов расчета с экспериментальными данными, полученными при изучении дифракционных картин в зависимости от угла падения  $\theta$  светового пучка на пленку опала. Наиболее интенсивными являются шесть рефлексов, соответствующих первому порядку дифракции. Кроме того, экспериментально наблюдались рефлексы, соответствующие второму порядку дифракции.

Авторы благодарны А.А. Каплянскому за поддержку и критические замечания, И.С. Синеву — за помощь в проведении расчетов, А.Б. Певцову и Ю.Э. Китаеву — за обсуждение результатов работы.

## Список литературы

- [1] 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).
- [2] В.А. Кособукин. ФТТ **47**, 1954 (2005).
- [3] A.V. Baryshev, V.A. Kosobukin, K.B. Samusev, D.E. Usvyat, M.F. Limonov. Phys. Rev. B **73**, 205 118 (2006).
- [4] M.V. Rybin, A.V. Baryshev, M. Inoue, A.A. Kaplyanskii, V.A. Kosobukin, M.F. Limonov, A.K. Samusev, A.V. Sel'kin. Photonics and Nanostructures **4**, 146 (2006).

- [5] А.В. Барышев, А.А. Каплянский, В.А. Кособукин, М.Ф. Лимонов, К.Б. Самусев, Д.В. Усвят. ФТТ **45**, 434 (2003).
- [6] R.M. Amos, J.G. Rarity, P.R. Tapster, T.J. Shepherd, S.C. Kitson. Phys. Rev. E **61**, 2929 (2000).
- [7] Yu.A. Vlasov, X.Z. Bo, J.C. Sturm, D.J. Norris. Nature **414**, 289 (2001).
- [8] K. Wostyn, Y. Zhao, B. Yee, K. Clays, A. Persoons, G. Schaetzen, L. Hellemans. J. Chem. Phys. **118**, 10 752 (2003).
- [9] L.M. Goldenberg, J. Wagner, J. Stumpe, B.R. Paulke, E. Gornitz. Physica E **17**, 433 (2003).
- [10] F. Garcia-Santamaria, J.F. Galisteo-López, P.V. Braun, C. López. Phys. Rev. B **71**, 195 112 (2005).
- [11] C.F. Bohren, D.R. Huffman. Absorption and scattering of light by small particles. Wiley, N. Y. (1983).
- [12] W. Stöber, A. Fink, E. Bohn. J. Colloid Interface Sci. **26**, 62 (1968).
- [13] P. Jiang, J.F. Bertone, K.S. Hwang, V.L. Colvin. Chem. Mater. **11**, 2132 (1999).
- [14] C. Kittel. Introduction to solid state physics. 4<sup>th</sup> ed. John Wiley & Sons, Inc., N. Y. (1971).
- [15] L.M. Sorokin, V.N. Bogomolov, J.L. Hutchison, D.A. Kurdykov, A.V. Chernyaev, T.N. Zaslavskaya. Nanostruct. Mater. **12**, 1081 (1999).