

Поляризационная анизотропия монокристаллических пленок опала

© А.И. Плеханов, В.П. Чубаков, П.А. Чубаков

Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
Новосибирск, Россия

E-mail: fractal@iae.nsk.su

Методами подвижного мениска и гравитационной укладки получены монокристаллические пленки опала. Коноскопией и спектральной эллипсометрией установлено, что данные фотонно-кристаллические пленки опала обладают двулучепреломлением, при этом оптическая индикатриса представляет собой трехосный эллипсоид. Ось индикатрисы N_g направлена вдоль оси роста кристалла, ось N_m лежит в плоскости пленки и ортогональна оси N_g , а ось N_p совпадает с нормалью к кристаллографической плоскости (111), что соответствует триклинной сингонии кристалла.

Работа выполнена по интеграционному проекту СО РАН № 17 и гранту НШ-4339.2010.2.

1. Введение

В последние годы наблюдается огромный интерес к изучению трехмерных (3D) фотонных кристаллов (ФК), распространение света в которых во всех направлениях подавлено для фотонов с длиной волны в пределах ширины запрещенной зоны, что может обеспечить беспрецедентный контроль над эмиссией и распространением света [1]. Многообещающим направлением развития методов создания ФК является коллоидная самосборка. Однако многошаговый путь от коллоидных кристаллов до ФК может значительно изменить конечную 3D-структуру ФК. В коллоидном кристалле можно ожидать несколько типов беспорядков. В дополнение к различным дефектам роста коллоиды обладают врожденной полидисперсностью размеров частиц, которая способствует беспорядку в коллоидном кристалле и вызывает появление различных областей внутренних напряжений, искажающих решетку на дальнем порядке, что имеет фундаментальное значение, так как это сильно влияет на скорость кристаллизации и обуславливает размер выращенных кристаллитов. Монокристаллические 3D ФК можно получить методом подвижного мениска (МПМ) [2,3], а также методом гравитационной укладки (МГУ) [4]. Примечательно, что количество структурных дефектов для ФК-пленок, полученных этими методами, на один-два порядка меньше, чем у 3D ФК, полученных методом седиментации [2,3]. Однако в процессе формирования ФК пленки из-за сил поверхностного натяжения в мениске или при сушке капли могут возникать одноосные напряжения. Индикатриса показателя преломления может стать анизотропной с главными осями, направленными вдоль напряжений. Такие уникальные оптические свойства ФК могут дать новый подход для разработки фотонных устройств с использованием поляризованного излучения.

Анизотропия распространения света в тонких пленках опала и опалах, полученных седиментацией, исследовалась в работах [5–7]. Установлено, что зависимость пропускания света в пленке опала от направления распространения и поляризации света является следствием

того, что фотонные запрещенные зоны не перекрывают весь телесный угол ни при каком значении длины волны [6]. Экспериментально определенная зависимость энергетического положения фотонных зон от направления волнового вектора света хорошо описывается расчетной дисперсионной зависимостью брэгговских длин волн при дифракции света на системе плоскостей (hkl) ГЦК-решетки [5]. Спектры пропускания стоп-зоны в окрестности особой точки L на поверхности зоны Бриллюэна ГЦК-решетки, принадлежащие семейству (111), не выявили явных поляризационных особенностей. В то же время в работах [8,9] отмечали наличие слабого двулучепреломления ($\Delta n \sim 10^{-4}$) в образцах опалов в спектральной области стоп-зоны. Существование двулучепреломления объясняется напряжениями внутри опала после отжига и несовершенством его структуры.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований оптической анизотропии монокристаллических пленок опала, которые имеют минимум структурных дефектов, а поверхность пленки отвечает плоскости (111). Измерения проведены в наиболее часто используемой конфигурации, когда направление падения пучка света совпадает с нормалью к поверхности пленки.

2. Экспериментальная часть

В работе исследовались пленки, полученные двумя различными методами: методом подвижного мениска и методом гравитационной укладки [10].

Формирование ФК-пленки опала в области мениска из суспензии лиофобных монодисперсных сферических частиц кремнезема (МСЧК) при испарении дисперсионной среды позволяет получать монокристаллические (без доменов) ФК. Их толщина от 2–3 до 20 слоев МСЧК регулируется концентрацией МСЧК. Коэффициент отражения ФК-пленки опала в области стоп-зоны может достигать 90%. При движении мениска осуществляется нанокристаллизация МСЧК на наклонную стеклянную подложку под действием сил молекулярного

притяжения масс, отталкивания двойного электрического слоя и гравитационной силы. Послойный рост кристалла происходит в направлении проекции действия гравитационной силы. Поэтому в пленках, сформированных МПМ, имеется пространственно выделенное направление вдоль действия проекции гравитационной силы [3]. Проблема предотвращения образования трещин разрыва в ФК-пленке решалась путем добавления в исходную суспензию МСЧК спиртового раствора поливинилового спирта (ПВС) с концентрацией менее 0.5%. Мономолекулярный слой ПВС предотвращает жесткое сцепление МСЧК и обеспечивает некоторую их подвижность друг относительно друга. Это облегчает движение возникающих дислокаций, являющихся зародышами для трещин [11], вплоть до их выхода на поверхность пленки.

Другой способ получения ФК-пленок основан на укладке МСЧК с лиофилизированной поверхностью в регулярную структуру под действием гравитационных сил в поверхностно-активной среде, защищающей МСЧК от непосредственного соприкосновения. В качестве дисперсной среды был выбран диметилсульфоксид (ДМСО). Методика получения суспензии МСЧК в ДМСО описана в [12]. В способе получения ФК-пленок по МГУ из лиофильных суспензий МСЧК достаточно обеспечить хорошую смачиваемость поверхности подложки. В пленке суспензии, нанесенной на подложку, из-за медленного испарения ДМСО происходит гравитационное осаждение МСЧК. Таким образом, формируется коацерват с упорядоченным расположением МСЧК, в котором расстояние между частицами непрерывно уменьшается, а упорядочение частиц совершенствуется под действием гравитационных сил и затем молекулярного притяжения. Когда поверхность ДМСО приходит в соприкосновение с коацерватом, дальнейшее сжатие пленки коацервата происходит под действием сил поверхностного натяжения и капиллярных сил без нарушения упорядоченности. Толщина получаемых монокристаллических пленок опала может составлять 3–5 μm , т.е. 10–20 слоев МСЧК, что фактически является 3D ФК. В этом методе все направления ФК в плоскости подложки равноправны. Коэффициент отражения такой ФК-пленки опала в области стоп-зоны может достигать 95%. Исследования показывают, что данный метод позволяет получать ФК-пленки с полным отсутствием доменов и двойников при толщине 25–30 слоев МСЧК. Редкие точечные дефекты — вакансии МСЧК и микротрещины в пленках — представляют практически единственный вид дефектов. Микротрещины не являются трещинами разрыва, а идут вдоль рядов МСЧК, представляя собой незначительное локальное раздвигание рядов частиц, подчеркивающее их гексагональную укладку. Данный метод не исключает появления трещин в пленках на последующих этапах их приготовления, когда процедура заполнения пористой структуры пленки сопряжена с нагревом, поскольку МСЧК состоят из более мелких микрочастиц размером 5–8 нм и имеют

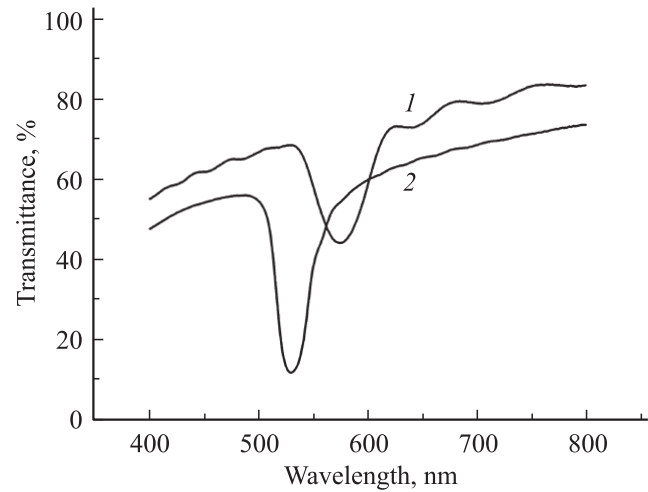


Рис. 1. Спектры пропускания ФК-пленок, полученных МПМ (1) и МГУ (2). Угол падения света $\theta = 0^\circ$.

внутреннюю пористость. При их нагреве происходит усадка МСЧК и вслед за этим всей структуры.

В наших экспериментах использовались неотожженные образцы.

Структурные свойства полученных пленок опала контролировались электронно-микроскопическими измерениями. В обоих методах пленки формируются из гексагонально упакованных слоев МСЧК. Эти слои параллельны поверхности подложки и соответствуют плоскости (111) ГЦК. Анализ изображений поверхностей и срезов показывает, что основными дефектами образцов являются трещины вдоль направления [111]. Размер областей, свободных от видимых дефектов, достигает 100–200 μm . При этом пространственная ориентация кристаллической решетки сохраняется на значительно больших размерах. Учитывая, что случайные дефекты должны приводить лишь к диффузионному рассеянию света, можно рассматривать данные пленки как монокристаллические на размерах до нескольких миллиметров.

Спектральные зависимости коэффициентов пропускания и отражения при различных углах падения θ для разных поляризаций света могут дать информацию о степени кристалличности пленок. В нашем случае исследуемая площадь поверхности пленки составляла $\sim 3 \text{ mm}^2$, а падающий монохроматический пучок света имел расходимость $\sim 2^\circ$. Характерные спектры пропускания ФК-пленок опала приведены на рис. 1. Положение стоп-зоны определяется брэгговским условием: $\lambda_B = 2d_{(111)}\sqrt{n_{\text{eff}}^2 - \sin^2 \theta}$, где $d_{(111)}$ — расстояние между плоскостями (111), $n_{\text{eff}}^2 = f \cdot n_{\text{SiO}_2}^2 + (1-f)n_{\text{Air}}^2$ — эффективный показатель преломления, $f = 0.74$ — фактор заполнения, $n_{\text{SiO}_2} = 1.46$, $n_{\text{Air}} = 1.0$ — показатели преломления МСЧК и воздуха, θ — полярный угол падения света на пленку. По измеренным значениям λ_B для кривых 1 и 2 на рис. 1 были оценены параметры

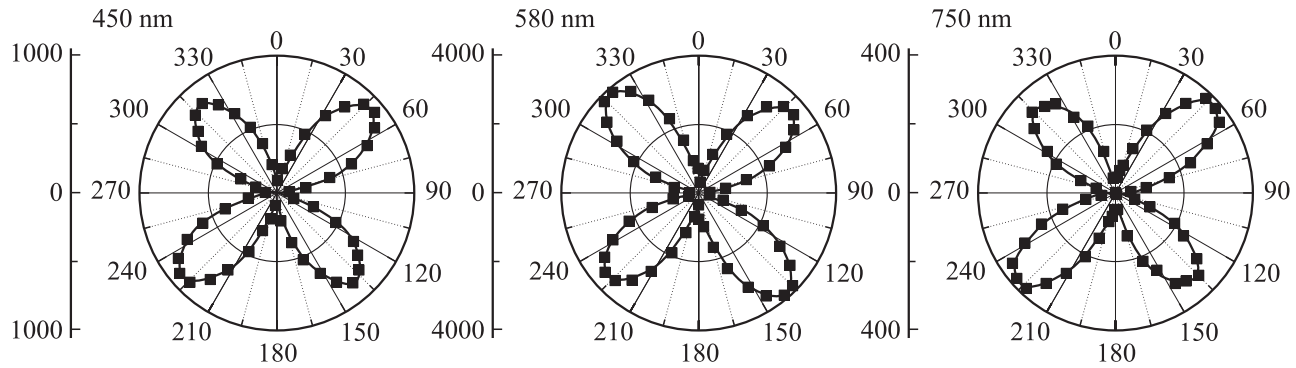


Рис. 2. Азимутальные угловые диаграммы пропускания света в скрещенных поляризаторах на 450, 580 и 750 nm для ФК-пленки опала, полученной МПМ.

решеток $d_{(111)}$, которые соответствовали размеру МСЧК $2r = d_{(111)}/0.816 = 266$ и 245 nm соответственно. Эти значения совпадают с измеренными с помощью сканирующей электронной микроскопии.

Исследование пропускания помещенного в скрещенные поляризаторы кристаллического образца в параллельных лучах является очень чувствительным методом измерения оптических неоднородностей, в частности двулучепреломления [13]. В нашем случае пленка ФК помещалась между двумя поляризаторами (призмами Глана) в скрещенном положении. Оптическая ось системы соответствовала нормальному падению света ($\theta = 0^\circ$) на плоскость (111) ФК-пленки. Излучение галогеновой лампы через диафрагму 2 mm направлялось вдоль оси оптической системы. Для обоих образцов регистрировались спектры пропускания данной системы в зависимости от азимутальной ориентации ФК-пленки опала. Азимутальный угол φ отсчитывался относительно направления падающей поляризации с шагом 6° . При измерениях использовался спектрометр Avantes AvaSpec 2048TEC-USB2 с оптическим диапазоном измерения 400–800 nm. По полученным спектрам строились азимутальные диаграммы в зависимости от длины волны падающего излучения. Для образцов, полученных МПМ, нулевой азимутальный угол $\varphi = 0^\circ$ соответствовал направлению роста пленки. Ориентация пленок, полученных МГУ, выбиралась произвольно.

Характерные азимутальные зависимости пропускания на трех различных длинах волн для пленок, полученных МПМ, изображены на рис. 2 и представляют собой четырехлистник, вид которого сохраняется при измерениях в различных точках поверхности ФК-пленок во всем спектральном диапазоне. Данные диаграммы имеют минимумы интенсивности пропускания вдоль направления послойного роста и ортогонально ему. Таким образом, пленки имеют две поляризационные оси вдоль этих направлений.

Азимутальные диаграммы пропускания света пленками, полученными МГУ, имеют схожий характер, но в зависимости от места измерения диаграммы для одного

и того же образца могут ориентироваться различным образом (рис. 3). Причина такой неоднородности связана с методом получения таких ФК-пленок. При высыхании лиофильных суспензий в МГУ пленки опала формируются под действием радиальных сил поверхностного натяжения. Их толщина увеличивается от периферии к центру. Вследствие этого формируются радиально направленные поляризационные оси, как и в случае МПМ.

Известно, что анизотропия среды может обуславливаться как анизотропией составляющих ее частиц, так и их расположением. При выравнивании диэлектрического контраста пленок заполнением иммерсионной жидкостью азимутальные зависимости исчезали для ФК-пленок, полученных обоими методами. Это свидетельствует о том, что поляризационные свойства ФК-пленок опала непосредственно связаны с их структурой. Стеклоподложка поляризационными свойствами не обладала.

2.1 Эллипсометрические измерения. Подобные азимутальные диаграммы можно получить лишь в случае линейного поляризатора или двулучепреломляющего кристалла. Для линейного поляризатора азимутальные диаграммы описываются законом Малюса применительно к данной системе [14]

$$I_p(\varphi, \lambda) = \cos^2(\varphi) \sin^2(\varphi) I_{\text{trans}}(\lambda). \quad (1)$$

В случае наличия двулучепреломления кристалла пропускание света описывается формулой

$$I_b(\varphi, \lambda) = 2(1 - \cos(\Delta)) \cos^2(\varphi) \sin^2(\varphi) I_{\text{trans}}(\lambda), \quad (2)$$

где $I_p(\lambda)$, $I_b(\lambda)$ — интенсивности (амплитуды) поля на выходе системы, $I_{\text{trans}}(\lambda)$ — спектральная зависимость пропускания образцом света, имеющего собственную поляризацию, Δ — вносимый образцом фазовый сдвиг. Для обоих случаев, согласно формулам (1) и (2), амплитуда пропускания равна нулю при $\varphi = 0, 90^\circ$ и достигает максимума при $\varphi = 45^\circ$, $I_{p,\text{max}}(\lambda) = I_p(45^\circ, \lambda) = 0.25I_{\text{trans}}(\lambda)$, $I_{b,\text{max}}(\lambda) = I_b(45^\circ, \lambda) = 0.5(1 - \cos(\Delta))I_{\text{trans}}(\lambda)$.

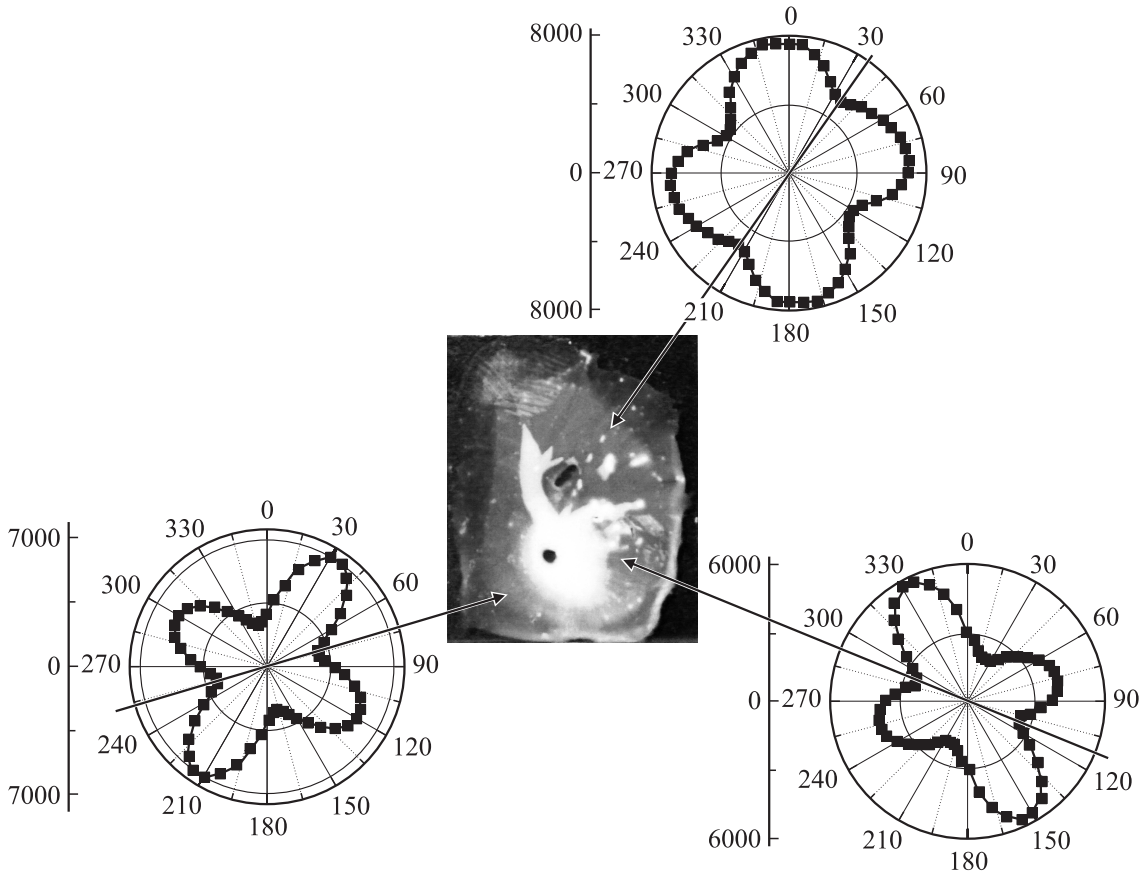


Рис. 3. Ориентация азимутальных диаграмм, измеренных на длине волны 565 нм, в различных областях пленки, полученной МГУ. Линии от центра к периферии — направления действия сил поверхностного натяжения во время формирования пленки. В центре — фотография пленки опала на стеклянной подложке.

Для определения характера и величины поляризационных свойств производились исследования ФК-пленок на спектральном эллипсометре „Эллипс-1891“ производства ИФП СО РАН. Эллипсометрические параметры Ψ и Δ , характеризующие амплитудные и фазовые изменения световой волны, измерялись при нормальном падении света на образец. При эллипсометрическом исследовании образцов в пропускании отношение коэффициентов отражения для световой волны p - и s -поляризации в уравнении $R_p/R_s = \text{tg } \Psi e^{i\Delta}$ заменится отношением коэффициентов пропускания [15]. Таким образом, эллипсометрический угол Ψ будет отвечать за то, насколько коэффициент пропускания для s -поляризации больше, чем для p , т.е. за свойство ФК-пленки как поляризатора. Угол Δ будет равен набегу фаз между p - и s -поляризациями, т.е. отвечает за двулучепреломление образца.

Полученные зависимости эллипсометрических углов Ψ и Δ в проходящем свете для пленки опала, полученной МПМ, представлены на рис. 4. Видно, что величина измеренного угла Ψ мало отличается от значения 45° . В то же время ненулевое значение Δ означает, что ФК-образец обладает двулучепреломлением. Таким

образом, определяющим поляризационным эффектом ФК-пленок является двулучепреломление.

Используя измеренные зависимости углов Ψ и Δ от длины волны, мы рассчитали спектры пропускания ФК-пленок в скрещенных поляризаторах. Результаты расчетов хорошо согласуются с данными эксперимента.

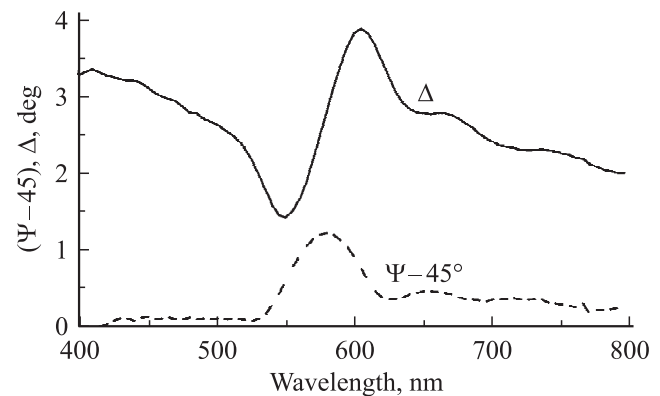


Рис. 4. Измеренные эллипсометрические углы Ψ и Δ для ФК-пленки, полученной МПМ. Поляризация падающего света составляет 45° с направлением послынного роста пленки.

Таким образом, измеренные углы Ψ и Δ полностью определяют полученные выше азимутальные зависимости.

Методом отражательной эллипсометрии были найдены толщины ФК-пленок. Типичная толщина образцов ФК-пленок, полученных МПМ, составила $\sim 2.3 \mu\text{m}$, что соответствует ~ 11 слоям МСЧК. По измеренному углу Δ и толщине было рассчитано среднее двулучепреломление Δn . В плоскости подложки разность максимального и минимального показателей преломления составила $\Delta n \sim 2 \cdot 10^{-3}$. В случае пленок, полученных МГУ, также было выявлено наличие двулучепреломления, однако оно меняется в зависимости от места на образце. Вдали от центра двулучепреломление одной из пленок, полученной МГУ, составило $\Delta n \sim 0.5 \cdot 10^{-3}$, т.е. сравнимо с двулучепреломлением пленок, полученных МПМ. Следует заметить, что в центральной области той же пленки двулучепреломление равно нулю.

2.2. Коноскопические измерения. Для определения типа сингонии ФК-кристалла и характеристик его оптической индикатрисы проводились коноскопические измерения на поляризационном микроскопе ПОЛАМ С-111.

При наблюдении коноскопических картин в тубус микроскопа вводилась линза Бертрана. Для двусосного кристалла наблюдаемые коноскопические картины свойственны срезу, перпендикулярному биссектрисе острого угла между оптическими осями. В случае нулевого угла предметного столика коноскопическая картина имела вид креста. При вращении предметного столика он разрывался на две изогирь (ветви гиперболы), расходящиеся по диагонали. В центре каждой изогоры имеется выход оптической оси кристалла. Полученная картина однозначно указывает на двусосность ФК-пленки опала. При повороте столика на 45° изогоры расходятся на предельное расстояние. Если рассматривать коноскопическую картину при ориентации образца под 45° , то ось индикатрисы \mathbf{N}_m направлена между изогорами и ортогональна линии, соединяющей точки выхода оптических осей. По максимальной величине расхождения изогор D рассчитывается угол между оптическими осями кристалла $2V$ по формуле [13]

$$\sin 2V = KD/n_m, \quad (3)$$

где K — коэффициент, характеризующий оптическую систему микроскопа (коноскопический угол объектива, цену деления окуляр-микрометра и т.д.). Этот коэффициент определялся по измерению эталонного образца — слюдяной пластинки (мусковит) ($n_m = 1.582$, $2V = 35^\circ$) [16]. Также из сравнения двулучепреломления слюдяной пластинки, для которой $D = 33$ малых делений окуляра микрометра, а для ФК-пленки опала $D = 14$, полагая $n_m \cong n_0 = 1.356$, где n_0 — средний показатель преломления опаловой пленки, получаем из (3) для ФК-пленки $2V \sim 16.5^\circ$.

Известно, что коноскопическая картина не является изображением поверхности минерала, а представляет

собой фокальную плоскость микрообъектива. Каждой точке данного изображения соответствует угол, под которым лучи проходят через исследуемый образец. Следовательно, если использовать осветитель с параллельным ходом лучей, например лазер, то его изображение будет фокусироваться в единственную точку на коноскопической картине. Вращая источник, можно непосредственно каждой точке получаемого изображения сопоставить соответствующий угол. В качестве осветителя в данном случае использовался полупроводниковый лазер. Поворотом луча лазера измерялся угол между оптическими осями кристалла. Данным методом было получено значение $2V = 17.2^\circ$. В итоге с учетом толщины изогир получаем $2V = 17 \pm 1^\circ$.

Знак оптической индикатрисы ФК-пленок определялся с помощью кварцевой пластинки. Предметный столик поворачивался на 45 и -45° . В случае 45° ось \mathbf{N}_m образца совпадала с осью \mathbf{N}_p кварца. При вводе кварцевой пластинки область между изогорами окрашивалась в синий цвет. По ньютоновской шкале спектра изменение красной окраски в синюю означает суммирование набега фаз. При вводе кварцевой пластинки и повороте столика на -45° область между изогорами окрашивается в оранжевый цвет, т.е. набег фаз вычитается, что подтверждает предыдущий результат. Таким образом, наибольшие оси кварцевой пластинки и образца совпадали в плоскости ФК-пленки. Между изогорами ортогонально \mathbf{N}_m направлена ось \mathbf{N}_g , что соответствует направлению послынного роста кристалла. Ось \mathbf{N}_p должна быть ортогональна поверхности ФК-пленки. Таким образом, данная ориентация осей отвечает отрицательному двусосному кристаллу. Значит, измеренное эллипсометрическим методом Δn соответствует $n_g - n_m \cong 2 \cdot 10^{-3}$. По измеренному углу между оптическими осями $2V$ и величине $n_g - n_m$ можно оценить величину $n_g - n_p$ из формулы [13]

$$\text{tg}^2 V = \frac{n_g^2(n_m^2 - n_p^2)}{n_p^2(n_g^2 - n_m^2)}. \quad (4)$$

Расчет по формуле (4) показывает, что $n_g - n_p \cong (8 \pm 0.9) \cdot 10^{-2}$. Величина двулучепреломления $n_g - n_p \cong 8 \cdot 10^{-2}$ относится к сильному двулучепреломлению, что не характерно для кубической сингонии.

Двусосные кристаллы относятся к низшей категории. Это наименее симметричные кристаллы с ярко выраженными анизотропными свойствами. В свою очередь низшая категория делится в зависимости от симметрии кристаллической решетки на три сингонии: ромбическую (орторомбическую), моноклинную и триклинную. Ориентация индикатрисы, в частности, задается симметрией кристалла и соответственно в общем случае связана с его сингонией. В триклинной сингонии ($a \neq b \neq c$, $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$) примитивная ячейка самая несимметричная [17]. Все оси координат не заданы элементами симметрии, а выбираются по ребрам кристалла при обязательном условии $c < a < b$. Оси индикатрисы в

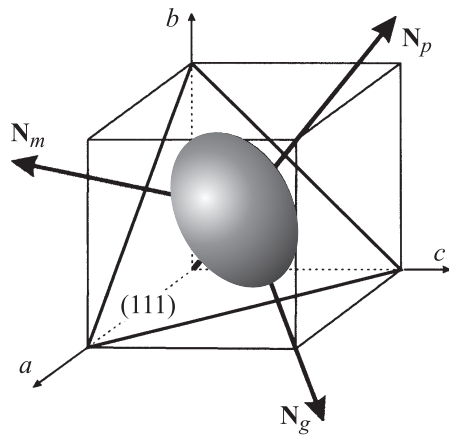


Рис. 5. Положение оптической индикатрисы ФК-пленки опала относительно кристаллической ГЦК-структуры. Направление послойного роста пленки совпадает с осью N_g .

общем случае не параллельны кристаллографическим осям.

Для определения сингонии ФК-пленок соотносились оси индикатрисы N_g , N_m , N_p и кристаллографические оси решетки. Исходя из снимков электронной микроскопии поверхность ФК-пленки с хорошей точностью представляет плотноупакованные слои (111), параллельные подложке. В первом приближении можно считать, что образцы имеют ГЦК-решетку (рис. 5). Таким образом, ось индикатрисы N_g направлена вдоль оси роста кристалла, N_m лежит в плоскости пленки и ортогональна N_g , а ось N_p совпадает с нормалью к плоскости (111). Так как для ФК-опаловых пленок ни одна из осей индикатрисы не совпадает с кристаллографической осью координат, следует заключить, что их сингония триклинная.

3. Заключение

Вследствие формирования направленных дефектов кристаллическая структура ФК-образцов может отличаться от кубической. Случайные неупорядоченные дефекты будут вносить дополнительное рассеяние при взаимодействии света с ФК. В случае направленности данных дефектов кубическая сингония может деформироваться в другие шесть (гексагональную, тригональную, тетрагональную, ромбическую, моноклинную, триклинную) и обладать характерными для них свойствами, в частности двулучепреломлением. При этом в отличие от электронной и атомно-силовой микроскопии оптические поляризационные методы выявляют интегральные по объему направленные дефекты структуры, что важно для создания различных приложений на основе ФК.

В настоящей работе впервые выявлено наличие поляризационных осей у монокристаллических пленок опала, полученных широко используемыми методами МПМ и МГУ. Наличие поляризационных свойств обусловлено

формированием направленных дефектов при получении ФК-пленок. Дефекты формируются вдоль действия нескомпенсированных сил поверхностного натяжения. Подобные поляризационные свойства могут формироваться и при использовании других методов получения ФК-пленок.

Методом коноскопии установлено, что оптическая индикатриса ФК-пленок отвечает отрицательному двусосному кристаллу, у которого оси индикатрисы не совпадают с кристаллографическими координатными осями. Этот факт свидетельствует о триклинной сингонии элементарной ячейки ФК.

Результаты проведенных измерений однозначно показывают отличие кристаллической решетки полученных пленок от ГЦК в силу отсутствия характерной симметрии. Причинами деформации решетки могут служить как асферическая форма отдельных частиц [18], так и анизотропия их пространственного расположения. Анализ снимков электронной микроскопии не выявил того или иного механизма. Многократно проверенные результаты оптической анизотропии на различных образцах с использованием поляризационных методов на данный момент не могут свидетельствовать в пользу ни одного из рассмотренных механизмов формирования анизотропии.

Следует полагать, что характерный размер деформации решетки может быть значительно меньше отдельных МСЧК. Причины могут быть установлены на основе соображений симметрии. Решающим также может стать численный расчет искажения ГЦК-решетки для проявления полученных двулучепреломляющих свойств.

Маловероятно, что возможные трещины в пленке ФК, которые сонаправлены с осью роста кристалла, могут привести к двулучепреломлению образца. При нормальном падении света наличие ансамбля сонаправленных иглообразных дефектов (например, трещин), ориентированных вдоль поверхности образца, обычно приводит к поляризационному дихроизму, который свойствен линейным поляризаторам [15].

Обнаруженные поляризационные особенности ФК-пленок следует учитывать при создании элементов фотоники и различных сенсоров.

Авторы благодарят Д.В. Калинина за предоставление лиофильных и лифобных суспензий МСЧК.

Список литературы

- [1] K. Sakoda. Optical properties of photonic crystals. Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg (2005). 253 p.
- [2] Y.V. Vlasov, X.-Zh. Bo, J.C. Sturm, D.J. Norris. Nature **414**, 15, 289 (2001).
- [3] А.И. Плеханов, Д.В. Калинин, В.В. Сердобинцева. Рос. нанотехнологии **1**, 245 (2006).
- [4] Д.В. Калинин, В.В. Сердобинцева, В.Ф. Шабанов. ДАН **419**, 609 (2008).
- [5] М.В. Рыбин, К.Б. Самусев, М.Ф. Лимонов. ФТТ **49**, 2174 (2007).

- [6] С.Г. Романов. ФТТ **49**, 512 (2007).
- [7] J.F. Galisteo-Lopez, F. Lopez-Tejeira, S. Rubio, C. Lopez. Appl. Phys. Lett. **82**, 4068 (2003).
- [8] A. Reza, R. Tamasevicius, J. Babonas, Z. Balevicius, V. Vaicikaus, V. Golubev, D. Kurdyukov. Phys. Status Solidi C **5**, 1391 (2008).
- [9] J. Sabataityte, I. Simkiene, G.-J. Babonas, A. Reza, M. Baran, R. Szymczak, R. Vaisnoras, L. Rasteniene, V. Golubev, D. Kurdyukov. Mater. Sci. Eng. C **27**, 985 (2007).
- [10] Фотонные кристаллы и нанокompозиты: структурообразование, оптические и диэлектрические свойства / Под ред. В.Ф. Шабанова, В.Я. Зырянова. Изд-во СО РАН, Новосибирск (2009). 257 с.
- [11] Д.В. Калинин, В.В. Сердобинцева, В.Ф. Шабанов. ДАН **420**, 179 (2008).
- [12] Д.В. Калинин, В.В. Сердобинцева, В.Ф. Шабанов. ДАН **416**, 610 (2007).
- [13] М.П. Шаскольская. Кристаллография. Высш. шк., М. (1976). 391 с.
- [14] О.С. Литвинов, В.С. Горелик. Электромагнитные волны и оптика. Изд-во МГТУ им. Баумана, М. (2006). 448 с.
- [15] Р. Аззам, Н. Башара. Эллипсометрия и поляризованный свет. Мир, М. (1981). 538 с.
- [16] Пластины слюдяные для приборостроения. Технические условия. ГОСТ 13750-88. Изд-во стандартов, М. (1999). 12 с.
- [17] С.Г. Раутиан. Введение в физическую оптику. ЛИБРОКОМ, М. (2009). 265 с.
- [18] А.Г. Баженова, А.В. Селькин, А.Ю. Меньшикова, Н.Н. Шевченко. ФТТ **49**, 2010 (2007).