

05;07;12

Резонансная доменная фоторефрактивность в структуре жидкий кристалл—фотопроводящий ориентирующий слой

© А.В. Агашков

Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Белоруссии,
220072 Минск, Белоруссия
e-mail: agashkov@inel.bas-net.by

(Поступило в Редакцию 6 октября 2009 г.)

Исследованы фоторефрактивные свойства нематических жидкокристаллических ячеек с фотопроводящими ориентирующими слоями. Предложен новый механизм, основанный на резонансном взаимодействии переходных и квазистационарных доменных структур с оптическим интерференционным пучком. При выполнении условий резонанса получено увеличение дифракционной эффективности решеток на два порядка.

Введение

Фоторефрактивные материалы имеют многочисленные потенциальные применения в таких областях, как устройства с оптической адресацией, корректоры фронта волны и др. [1]. Диапазон их применения был расширен открытием одного из наиболее интересных и технологически многообещающих явлений: индуцированная светом модуляция показателя преломления и запись решеток показателя преломления в жидких кристаллах (ЖК), активированных красителем [2–4]. Механизм генерации решетки, возникающей в области пространственного заряда, был назван ориентационным фоторефрактивным (ОФР) эффектом [5,6]. ОФР-эффект наблюдается при одновременном воздействии неоднородного освещения, обычно реализуемого с помощью оптического интерференционного поля, и внешнего постоянного электрического поля. В общем случае свет может индуцировать генерацию зарядов как в объеме ЖК-ячейки, так и в фоточувствительных ориентирующих слоях или в интерфейсе ЖК — ориентирующий слой.

Главное внимание исследований было направлено на увеличение эффективности дифракции записываемых решеток, что достигалось как с помощью конструктивных решений, так и применением новых материалов. Режим управления и условия эксплуатации ЖК-ячеек существенно влияют на проявление фоторефрактивных свойств ЖК-структур. Известно, что эффективность волнового смещения монотонно возрастает с увеличением угла падения до 45° [7,8]. Зависимость дифракционной эффективности от внешнего постоянного электрического поля имеет максимум, в отсутствие поля фоторефрактивный эффект практически отсутствует [3–5]. Приложение к ЖК-ячейке переменного электрического поля с частотой ~ 1 Hz позволяет управлять пиковой дифракционной эффективностью, увеличивая или уменьшая ее [9–16]. Еще одним фактором, определяющим дифракционную эффективность, является соотношение между периодом решетки Λ и толщиной ячейки d . Теоретическая оценка, проведенная в работах [7,17,18], показала, что максимальная дифракционная эффективность

достигается при определенном значении периода решетки $\Lambda_{\max} \approx 2d$. Экспериментальные исследования [19–21] подтвердили данную оценку.

В работе [22] впервые наблюдалось упорядочение доменной структуры, возбужденной знакопеременным электрическим полем, при облучении ЖК-излучением He–Ne-лазера малой мощности (1 mW). При резонансном взаимодействии нестабильностей, возбужденных в ЖК-ячейке внешним переменным электрическим полем, и оптического интерференционного поля в режиме дифракции Рамана-Натта зарегистрировано импульсное увеличение эффективности вырожденного волнового смещения на два порядка [23,24]. В схеме вырожденного четырехволнового смещения (ВЧВС) с обращением волнового фронта (ОВФ) получено в импульсе максимальное значение коэффициента фазово-сопряженного отражения $R = 800\%$ (суммарная плотность мощности излучения на входе ~ 200 mW/cm²). В среде без инверсии эффективность ВЧВС с ОВФ выше 100% была достигнута впервые. Механизм фоторефрактивности в нематических ЖК-ячейках, основанный на возбуждении в слое жидкого кристалла под воздействием внешнего переменного электрического поля квазипериодических доменов и их переориентации полем зарядов, индуцированных на поверхности ориентирующего слоя интерференционным оптическим полем, был назван динамической фоторефрактивностью [25]. В данной работе методом прямого наблюдения проведено исследование резонансной записи голографических решеток Рамана-Натта как в импульсном, так и в квазинепрерывном режиме. Установлены необходимые требования для такой записи.

Описание образцов

Фоторефрактивный эффект исследовался в планарной ячейке с толщиной ЖК-слоя $d = 9 \mu\text{m}$ (ячейки изготовлены в Institute of Applied Physics, MUT, Warsaw). Стекланные подложки ячейки покрыты прозрачными проводящими электродами из ITO, на которые мето-

дом центрофугирования нанесены слои из полипиромеллитимида диаминодифенилоксида (полиимид PMDA-ODA, полиимид (PI) Kapton фирмы Dupont является его коммерческим аналогом). Подложки выдерживались в течение 10 минут при температуре 60°C для удаления растворителя, а затем в течение 90 минут — при 190°C. В результате толщина ориентирующих слоев из PI составляла 0.12–0.16 μm . После натирания велюром они обеспечивали строгую планарную ориентацию ЖК 6СНВТ с углом преднаклона $\sim 10^\circ$. Структурная формула PI PMDA-ODA и предполагаемый механизм фотопроводимости, основанный на адсорбции/десорбции ионов из ориентирующих слоев под воздействием света и приложенного напряжения, приведен в [26].

Ячейка заполнена нематическим ЖК 4-транс-4'-н-гексил-циклогексил-изотиоцианатобензолом (6СНВТ), активированным смесью антрахиновых красителей AD-1 и AD-2 (коэффициенты поглощения $\alpha_{\parallel} = 3300$ и $\alpha_{\perp} = 800 \text{ cm}^{-1}$) [24]. Нематик 6СНВТ имеет положительную диэлектрическую анизотропию $\Delta\epsilon = 8$ с компонентами диэлектрической проницаемости $\epsilon_{\parallel} = 12$ и $\epsilon_{\perp} = 4$. Оптическая анизотропия характеризуется значением $\Delta n = 0.152$ ($n_0 = 1.520$, $n_e = 1.672$) на длине волны 632.8 nm. Для приведения в рабочее состояние свежеприготовленные ячейки выдерживались при постоянном напряжении 50 V в течение 5 min. По истечении этого времени плотность тока, протекающего через ячейки J , составляла 1–25 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, $J = I_U/S$, где I_U — ток, а S — площадь рабочей части ячейки. Зависимость плотности тока J от приложенного постоянного напряжения U хорошо описывается формулой $J = a_1U + a_3U^3$, где a_1 и a_3 — постоянные коэффициенты [27]. Наблюдалась некоторая асимметрия $J(U)$, отношение численных значений коэффициентов составляло $a_1/a_3 \sim 1000$ для положительной и ~ 500 — для отрицательной ветви графиков. По-видимому, это связано со способом перевода ячеек в рабочее состояние. В диапазоне напряжений от -5 до 5 V плотность тока через ячейки J пропорциональна приложенному напряжению U . При больших напряжениях (свыше 40 V) $J \sim U^3$. Все эксперименты проводились при температуре образца 16–18°C.

Эксперимент

Для регистрации отклика ЖК-ячейки на одновременное воздействие электрического поля и оптического интерференционного поля малой мощности была использована установка [27], схематически представленная на рис. 1. Для записи решеток используется излучение одномодового He–Ne-лазера (1) с длиной волны 633 nm мощностью 0.7 mW. В установке используется обычная наклонная геометрия, суммарная плотность мощности излучения на входе составляет $\sim 30 \text{ mW}/\text{cm}^2$. Пучок излучения одномодового He–Ne-лазера (1) делится с помощью зеркал (2, 3) на два записывающих пучка

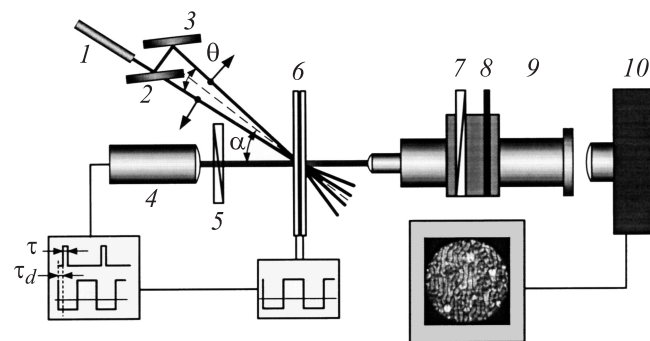


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки.

равной интенсивности, пучки имеют p -поляризацию (поляризованы в плоскости рисунка). Нормаль к ячейке \mathbf{N} лежит в плоскости рисунка. Углы пересечения пучков θ и наклона α ЖК-ячейки (6) к биссектрисе выбраны из условия „углового резонанса“ [23,24]. На ячейку (6) с выхода генератора знакопеременного электрического напряжения (12) подаются электрические импульсы (меандр) или постоянное напряжение. Частота следования импульсов, скважность, амплитуды положительной и отрицательной полуволн регулируются независимо. Режим работы системы освещения на основе светодиода (4) определяется электронной схемой (11), которая в импульсном режиме синхронизируется от генератора (12) или от другого источника, и позволяет задавать длительность τ импульса подсветки и его задержку τ_d относительно положительного или отрицательного фронтов электрических импульсов генератора (12). Для поляризации излучения подсветки используется поляризатор (5). Свет, прошедший через ЖК-ячейку (6), далее проходит через анализатор (7) и, при необходимости, через цветной светофильтр (8). Поляризатор (5) и анализатор (7) имеют шкалы для определения угла пропускания. Система освещения может обеспечиваться „белым“ или цветными светодиодами. Для упрощения конструкции установки был изготовлен тубус микроскопа длиной 180 mm. В микроскопе использованы объектив 9 \times , окуляр 12.5 \times , поляризатор и анализатор из комплекта к микроскопу МИН-8. Микроскоп закреплен в юстировочном механизме, обеспечивающем тонкие перемещения в поперечном и вертикальном направлениях, а также фокусировку на объект. Изображение структуры, возбужденной в ЖК-ячейке (6), с помощью микроскопа (9) проецируется на фотоматрицу цветной цифровой камеры (10), видеосигнал с выхода которой подается на вход контрольного монитора (13). При необходимости в эксперименте можно также использовать оптическое и цифровое увеличение камеры.

Для масштабирования получаемых изображений использовалось фотографирование тестовой решетки с периодом 10 μm , а также расчет по входным углам. К настоящему времени опубликовано достаточно много статей, посвященных дифракции Рамана-Натта при на-

клонной геометрии записи голографических решеток в ЖК-ячейках. В большинстве работ расчет периода Λ записанной решетки показателя преломления проводился по формуле

$$\Lambda = \lambda/2 \sin \theta/2, \quad (1)$$

где λ — длина волны записывающего света, а θ — угол пересечения пучков в воздухе [21,28,29]. Использовалась также формула [30,31]

$$\Lambda = \lambda/2n \sin \theta/2, \quad (2)$$

где n — показатель преломления среды. Физически это означает, что вектор решетки показателя преломления параллелен вектору возбуждающей оптической решетки. По известному периоду Λ на основе приведенных выше выражений рассчитывались углы дифракции. В наших работах [22,32] было установлено, что вектор индуцированной решетки показателя преломления \mathbf{S} параллелен ориентирующей поверхности ЖК-ячейки, а использование формул (1) и (2) дает неверный результат. Поэтому период записываемых решеток S рассчитывался по методике из работы [32], применимой к тонким решеткам или периодическим структурам, параллельным ограничивающим плоскостям анизотропной среды:

а) по углам на входе α и θ

$$S = \lambda/(2 \cos \alpha \cdot \sin(\theta/2)), \quad (3)$$

где α — угол наклона ЖК-ячейки;

б) измеренным углам дифракционных максимумов порядка m (относительно нормали к ячейке)

$$S = 2m\lambda/(|\sin \alpha_{i,m} - \sin \alpha_{i,-m}|), \quad (4)$$

где m — номер дифракционного порядка, $m = 0, 1, 2, \dots$; $i = 1, 2$ — номер пучка; $\alpha_{1,m+1} = \alpha_{2,-m}$ и $\alpha_{2,m+1} = \alpha_{1,-m}$.

Для определения углов использовалась схема, представленная на рис. 2. В соответствии с ней $\alpha_{i,\pm m} = \arctg D/l_{i,\pm m}$, где D — расстояние от ЖК-ячейки

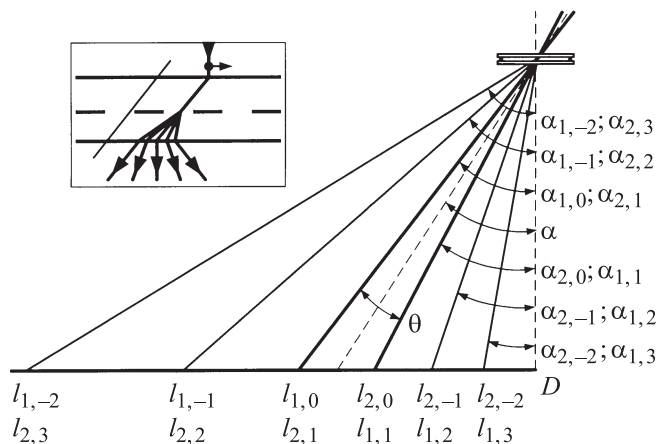


Рис. 2. Схема определения углов падения пучков и их дифракционных порядков.

до параллельного ей экрана, $l_{i,\pm m}$ — смещение дифракционного пятна на экране; $\alpha = (\alpha_{1,0} + \alpha_{2,0})/2$, $\theta = \alpha_{1,0} - \alpha_{2,0}$. Рисунок на врезке показывает, что даже в простейшем случае нормального падения e -поляризованной волны на анизотропный слой с оптической осью под углом к его поверхности модель дифракции — нетривиальная задача. Использование стандартных формул, описывающих дифракцию при наклонном падении лучей на тонкую решетку, обоснованно, и результаты расчетов верны только в том случае, когда значения S , полученные по формулам (3) и (4), совпадают в пределах погрешности измерений. Периоды решеток, рассчитанных по формулам (1) и (3), соотносятся как $S = \Lambda/\cos \alpha$. Таким образом, период решетки показателя преломления равен проекции периода оптической решетки на ориентирующую поверхность.

Результаты и их обсуждение

Геометрия эксперимента с продольными модами: ячейка ориентировалась азимутально таким образом, чтобы направление натирания (ориентация директора \mathbf{n} без внешнего поля) было перпендикулярно плоскости записывающих пучков. Вектор решетки $\mathbf{S} \perp \mathbf{n}$, направление пропускания поляризатора $\mathbf{P} \parallel \mathbf{n}$. Плоскость $Nn \perp Sn$ ($\mathbf{N}, \mathbf{n} \in Nn$; $\mathbf{S}, \mathbf{n} \in Sn$). Для возбуждения в ЖК-ячейке квазистационарной текстуры, которая вблизи порога имела вид, характерный для продольных доменов (полосы параллельны начальной ориентации директора), использовались следующие режимы подачи электрического напряжения: постоянное величиной 5–8 В; постоянное 5–8 В плюс переменное обратной полярности (амплитуда ≤ 10 В, скважность > 10); периодическое прерывистое с амплитудой ≤ 10 В, частотой 1 Нз–10 кНз и скважностью > 10 (источник внешнего напряжения периодически отключался и подключался к ЖК-ячейке). Следует отметить, что продольные домены ассоциируются с флексоэлектрическими свойствами ЖК [33]. При увеличении напряжения выше порога на 30% возникали заметные деформации доменов.

На рис. 3 представлены результаты воздействия интерференционного поля на продольную доменную структуру, возбужденную в ЖК-ячейке постоянным напряжением 6.8 В. Наиболее контрастная картина получается, когда угол между анализатором и поляризатором $\alpha_{an} = 67.5^\circ$. Как видно из приведенного рисунка, интерференционное поле с периодом, близким к периоду возбужденной доменной структуры, эффективно воздействует на нее. Дифракционная эффективность решеток при записи в обычном режиме равна 0.2% (рис. 3, б), а в режиме резонанса — $\sim 7\%$ (рис. 3, с). Следует отметить, что с течением времени (через 5–10 мин) наблюдалась деградация решетки, что, вероятнее всего, связано с разделением зарядов в объеме ЖК-слоя и их приходом на ориентирующие слои. Для предотвращения этого нежелательного явления использовался режим

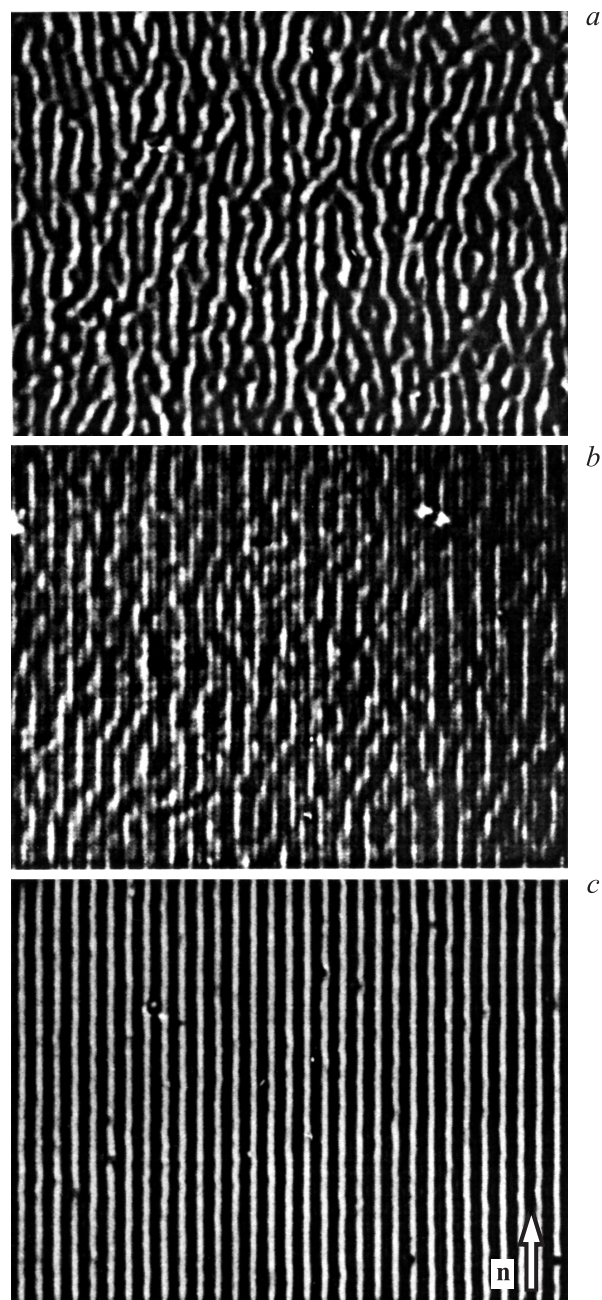


Рис. 3. Управление квазистационарной продольной доменной структурой в ЖК-ячейке: *a* — интерференционное поле не включено; период решетки $S = 4.7$ (*b*) и $10.9 \mu\text{m}$ (*c*).

кратковременного переключения полярности напряжения, приложенного к ЖК-ячейке. Так при переключении напряжения с $+6.8$ на -2 V на время 50 ms с частотой 1 Hz качество решетки не ухудшалось в течение часов.

Геометрия эксперимента с поперечными модами: директор \mathbf{n} без внешнего поля лежит в плоскости записывающих пучков; $S\mathbf{n} \parallel N\mathbf{n}$; $\mathbf{S} \parallel \mathbf{n} \parallel \mathbf{P}$. Переходная доменная структура (ПДС) возбуждалась знакопеременным электрическим напряжением. Ячейка ориентировалась азимутально таким образом, чтобы ориентация дирек-

тора \mathbf{n} без внешнего поля была в плоскости рисунка. Вблизи порога полосы были перпендикулярны начальной ориентации директора, с увеличением размаха знакопеременного напряжения домены деформировались. Результат воздействия интерференционного поля на ПДС, возбужденную знакопеременным электрическим полем с прямоугольной формой импульсов ($U_+ = +32 \text{ V}$, $U_- = -8 \text{ V}$, 1 Hz), представлен на рис. 4. Длительность существования структуры — 40 ms . Дифракционная эффективность решетки в максимуме импульсов достигала 10% .

Самостоятельный интерес представляет исследование взаимодействия области, находящейся под воздействием оптического интерференционного поля, с окружающей структурой. Результат проиллюстрирован на рис. 5. Оче-

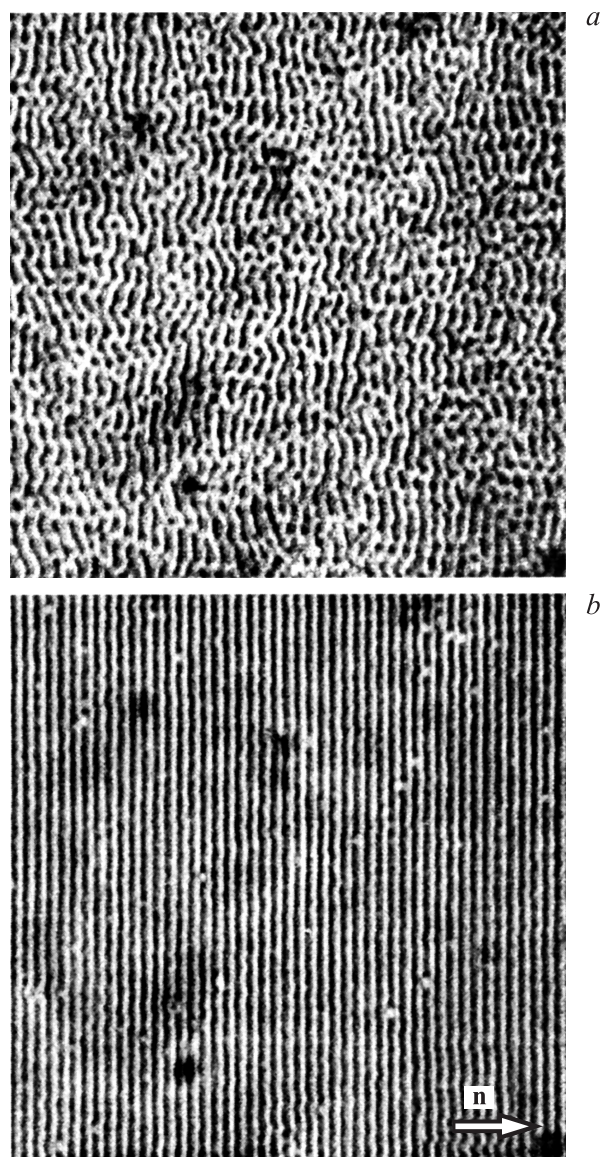


Рис. 4. Переходная доменная структура без оптического интерференционного поля (*a*) и после его включения (*b*); период решетки $S = 4.4 \mu\text{m}$, съемка без анализатора через синий светофильтр.

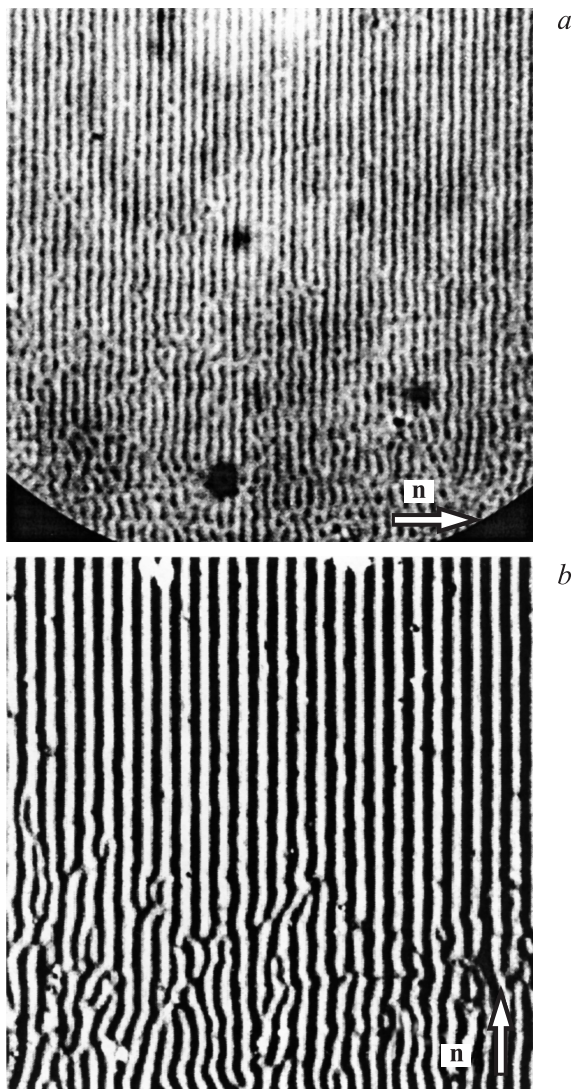


Рис. 5. Стабилизация доменной структуры интерференционным оптическим полем малой мощности. Область воздействия находится выше центра рисунка: *a* — импульсная решетка, $S = 4.4 \mu\text{m}$, без анализатора; *b* — квазистационарная решетка, $S = 9.5 \mu\text{m}$, $\alpha_{\text{ан}} = 67.5^\circ$.

видно, что как в квазистационарном, так и в переходном режиме управляемая область доменов не имеет четкой границы с неуправляемой. Данное обстоятельство является прямым подтверждением факта, что решетка представляет собой доменную структуру с управляемым периодом и фазой. В случае с переходной структурой ранее было показано, что в ЖК-ячейке формируется решетка голографического качества [23,24].

Для установления различия в природе доменов, используемых в нашей схеме записи голографических решеток, была исследована связь импульса первого порядка дифракции с импульсом переходного тока, экспериментальная схема аналогична приведенной в работе [34].

На рис. 6 представлены результаты исследования режима записи решеток на поперечных доменах. Как

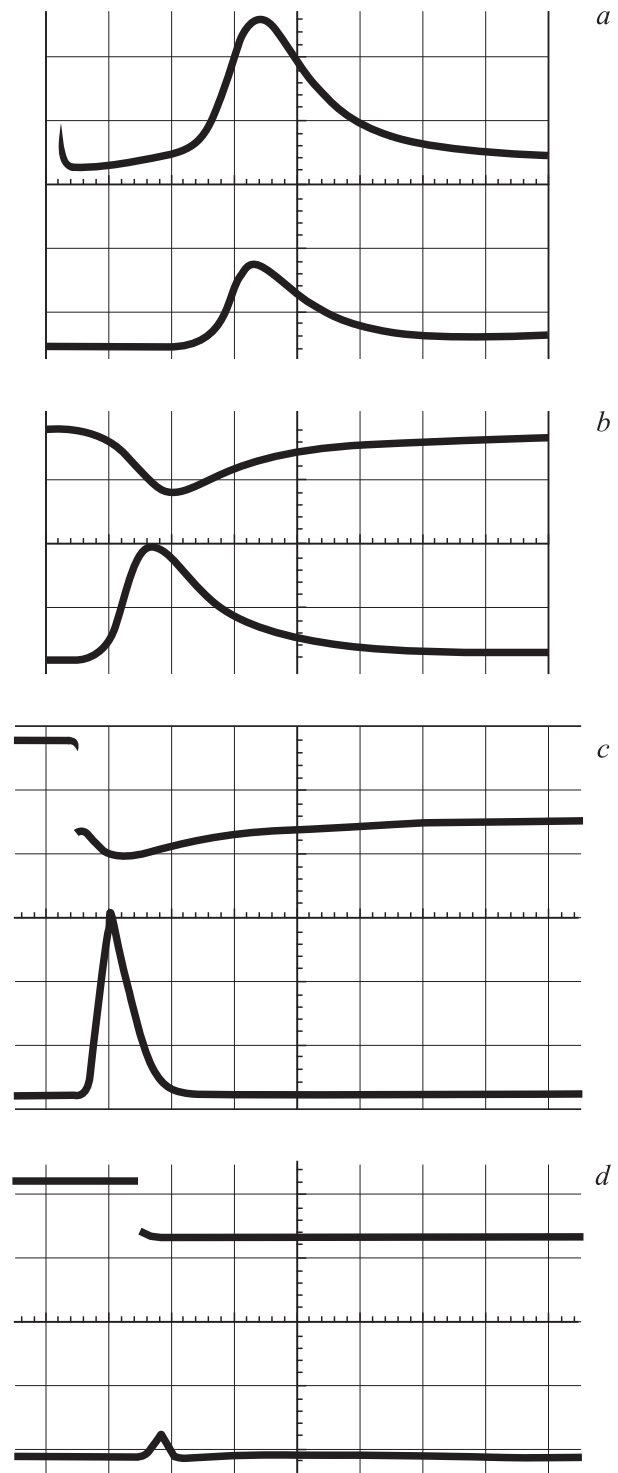


Рис. 6. Исследование корреляции импульса переходного тока и импульса первого порядка дифракции при резонансной записи решеток на поперечных доменах: знакопеременное напряжение частотой 1 Hz, полупериод положительного напряжения 30 V (*a*) и отрицательного напряжения 7 V (*b*). Ступенчатое уменьшение напряжения от 30 V до нуля (*c*), отключение ячейки от источника напряжения 30 V (*d*). Развертка 20ms^{-1} (*a, b*) и 0.2s^{-1} (*c, d*). Верхний луч — импульс тока через ячейку, нижний — первый порядок дифракции. Чувствительность входов с сигналами фотоприемника 0.5 (*c*) и 0.1V^{-1} (*d*).

видно из приведенного рисунка, импульс переходного тока коррелирует во времени с импульсом дифракции, хотя их максимумы могут иметь временной сдвиг, достигающей 20% длительности (рис. 6, *a, b*). При подаче на ЖК-ячейку знакопеременного напряжения с частотой 1 Hz дифракция наблюдается, когда скважность импульсов < 50 . Следует отметить, что дифракция не наблюдается при подаче ступеньки напряжения, переводящего ячейку из исходного планарного в переориентированное состояние. Обратный переход в планарное состояние может происходить двумя способами: первый — уменьшение внешнего электрического поля до нуля, второй — отключение ячейки от источника напряжения. Сравнение соответствующих осциллограмм рис. 6, *c* и *d* показывает, что импульс первого порядка дифракции при ступенчатом уменьшении внешнего электрического поля до нуля имеет пиковую мощность, в ~ 35 раз большую, чем аналогичный импульс, возникающий при отключении ячейки от источника напряжения.

После размыкания ячейка переходит в планарное состояние за время $\tau_1 \sim 100$ ms, что свидетельствует о нулевом (или ниже порога Фредерикса U_F) поле в слое ЖК. Однако после короткого замыкания обкладок ячейки ее пропускание вновь увеличивается за время ~ 10 ms, а затем падает до стационарного значения с постоянной времени $\tau_2 \sim 1$ s. В эксперименте даже через 30 s после отключения ячейки от источника напряжения она выходила из планарного состояния при замыкании ее обкладок [34]. Заряды на поверхности ориентирующих слоев связаны с зарядами токопроводящих слоев и формируют долгоживущую структуру. Вследствие этого ток через ЖК-слой отсутствует, переходные поперечные домены не формируются. При этом импульсного усиления фоторефрактивности не наблюдается.

Резонансная переориентация продольных доменов была реализована во всех использованных режимах подачи напряжения. На рис. 7 приведены осциллограммы импульсов первого порядка дифракции и переходного тока через ЖК-ячейку для варианта периодического прерывания подачи напряжения. Анализ показал, что при периодическом подключении-отключении напряжения в ЖК-ячейке наблюдаются два типа импульсов дифракции. Короткий импульс с длительностью $\sim 1-10$ ms коррелирует во времени с фронтом импульса переходного тока через ЖК-ячейку, который регистрируется во внешней цепи. После отключения ЖК-ячейки от источника напряжения наблюдается длинный импульс дифракции $\sim 50-100$ ms, ток во внешней цепи отсутствует. Интересен факт наблюдения импульсов дифракции с частотой 1 Hz при скважности подключенного состояния ~ 200 .

Дифракционная эффективность не менее 70% от максимального значения наблюдалась при резонансной записи решеток с периодом $S_{\max} = 4-5.5 \mu\text{m}$ в переходном режиме (поперечные домены, режим динамической фоторефрактивности в соответствии с [25]) и периодом $S_{\max} = 9-10.5 \mu\text{m}$ в квазистационарном режиме

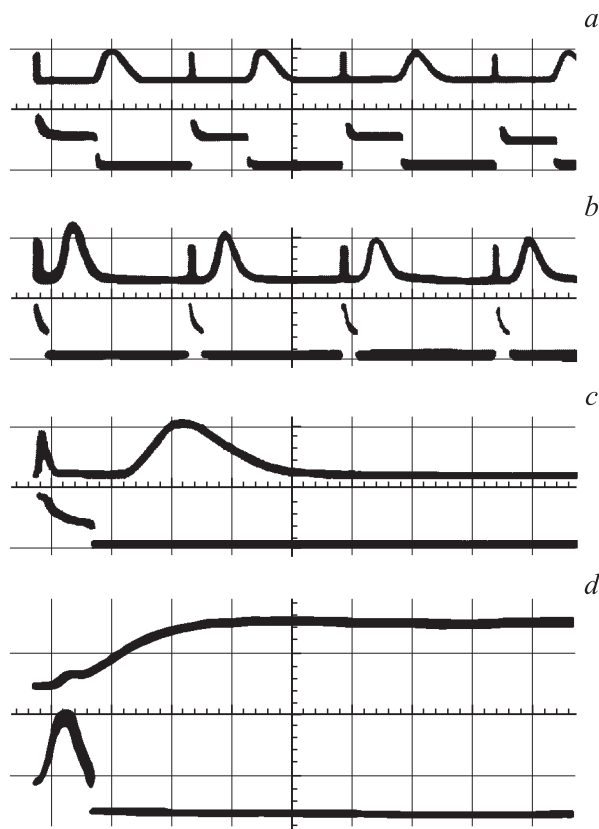


Рис. 7. Исследование корреляции импульса переходного тока и импульса первого порядка дифракции при резонансной записи решеток на продольных доменах: частота подключения ЖК-ячейки к источнику напряжения — 1 Hz. Длительность подключенного состояния — 200 (*a*), 50 (*b, c*) и 5 ms (*d*). Шкала времени — 0.2 (*a, b*), 0.05 (*c*) и 0.005 s^{-1} (*d*). Амплитуда подключаемого напряжения 30 (*a-c*) и 20 V (*d*).

(продольные домены). Для динамических и квазистационарных решеток отклонение расчетных результатов, полученных по входным (3) и выходным (4) параметрам, не превышало 0.5%. Это доказывает обоснованность использования в нашем эксперименте стандартных формул расчета углов дифракции при наклонном падении лучей на тонкую решетку.

Чтобы объяснить полученные результаты, предлагается использовать следующий механизм, схематически представленный на рис. 8. При подаче знакопеременного электрического напряжения герцовой частоты с прямоугольной формой импульсов происходит периодическое движение зарядов через объем ячейки. Однако большую часть времени они находятся на ограничивающих поверхностях, уменьшая поле, проникающее в объем ЖК. В освещенной области за счет фотопроводимости этот компенсирующий заряд уменьшается, а действие внешнего поля соответственно увеличивается. Под воздействием внешнего переменного поля в слое НЖК возбуждается система ориентационных квазипериодических нестабильностей (см. рис. 8, *a*). НЖК 6СНВТ характеризуется достаточно большой положительной анизотро-

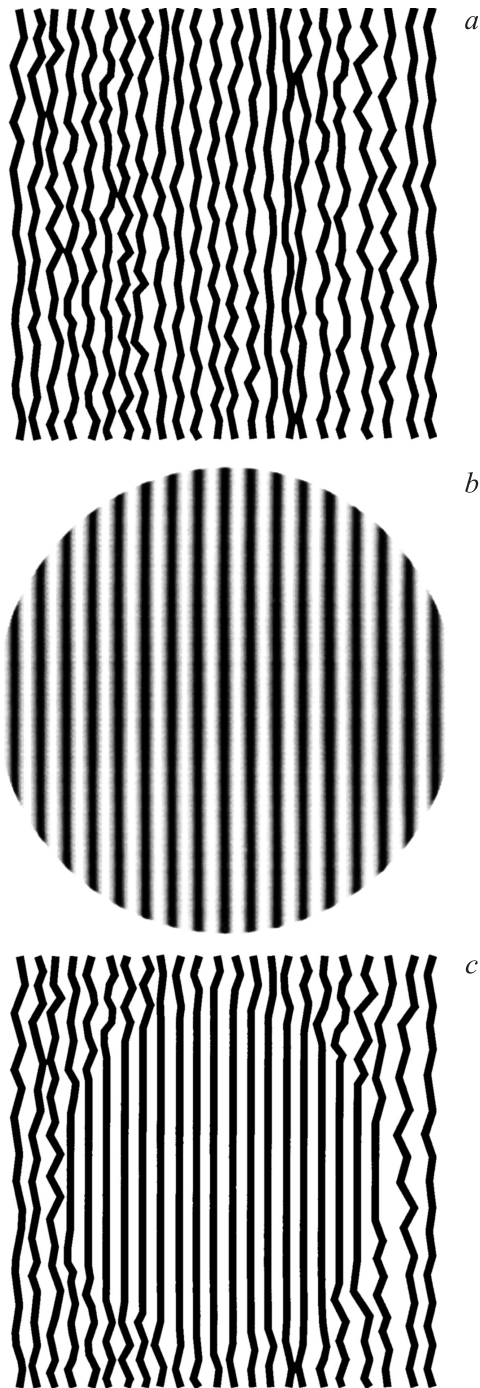


Рис. 8. Схематическое представление механизма резонансной доменной фоторефрактивности в ЖК-ячейке: *a* — электрическое поле возбуждает систему квазипериодических доменных структур; *b* — интерференционное оптическое поле индуцирует на поверхности фоточувствительного ориентирующего слоя решетку заряда, тем самым модулируя силу поверхностного сцепления и поле в слое ЖК; *c* — решетка поверхностных зарядов действует на доменную квазипериодическую структуру, стабилизируя ее период и фазу.

пией $\Delta\epsilon = 8$, поэтому нестабильности наблюдаются только как переходной процесс. Полагаем, что в варианте поперечных доменов девиация директора происходит в плоскости, перпендикулярной ориентирующему слою в направлении, перпендикулярном полосам. При прохождении через ЖК-ячейку одиночного лазерного пучка поляризация рассеянного излучения имеет радиальную симметрию [25,35]. Амплитуда решетки (отклонение директора) зависит от приложенного электрического поля и параметров ЖК, таких как анизотропия, постоянные упругости и т.д. Интерференционное оптическое поле фактически индуцирует на поверхности ориентирующих слоев решетку заряда за счет фотопроводимости в освещенных областях (рис. 8, *b*), модулируя как сцепление молекул ЖК с поверхностью, так и проникновение внешнего поля в слой ЖК [10].

Очевидно, что периодическое пространственно модулированное поле зарядов эффективно воздействует на доменную структуру, которая имеет период, близкий к его собственному периоду. Оно стабилизирует фазы и период полос в соответствии с собственными параметрами (рис. 8, *c*). В результате возникает решетка показателя преломления, приближенно воспроизводящая структуру обычной поверхностной фоторефрактивной решетки, индуцируемой двумя пересекающимися когерентными пучками. После перестройки доменной структуры в соответствии с картиной интерференционного поля колебания необыкновенной волны происходят в плоскости Nn . Сохранение линейной поляризации излучения в первом порядке дифракции подтверждает этот факт. Вектор резонансной решетки в оптимальном варианте параллелен направлению натирания. Ее амплитуда может значительно превышать значение, достигаемое в классическом ориентационном эффекте. Естественно, верхняя граница спектра пространственных частот данной динамической структуры ограничена пространственной частотой доменов. Как было экспериментально установлено в работах [23,24], качество динамической решетки приемлемо для обращения сферических аберраций. Полного обращения волнового фронта сложного оптического поля не было получено, возможно, вследствие достаточного большого периода решетки $\sim 6 \mu\text{m}$.

При подаче на ЖК-ячейку постоянного или прерывистого поля с амплитудой 6–8 В в ней возбуждаются продольные домены. Вектор резонансной решетки в оптимальном варианте перпендикулярен направлению натирания. Воздействие на нее интерференционного оптического поля происходит аналогичным образом. Однако девиация директора выходит из плоскости Nn , что проявляется как в эллиптической поляризации излучения в первом порядке дифракции, так и в наибольшем контрасте картины решетки при $\alpha_{\text{an}} \neq 0$ или 90° ($\alpha_{\text{an}} = 67.5^\circ$).

Резюмируя, можно утверждать, что резонансные решетки на продольных и поперечных доменах имеют сходство и различия. Общими для них являются следующие характеристики: геометрия записи — наклонная;

Резонансная доменная фоторефрактивность

Параметр	Импульсный режим	Квазистационарный или периодический режим
Оптимальная структура доменов	Поперечная	Продольная
Оптимальное положение вектора \mathbf{S} индуцируемой решетки показателя преломления относительно начальной ориентации директора \mathbf{n}	$\mathbf{S} \parallel \mathbf{n}$	$\mathbf{S} \perp \mathbf{n}$
Взаимное положение вектора \mathbf{S} и нормали к ориентирующим слоям \mathbf{N}	$\mathbf{S} \perp \mathbf{N}$	$\mathbf{S} \perp \mathbf{N}$
Возбуждающее электрическое напряжение	Знакопеременное, асимметричное с размахом не менее 30 V	Постоянное 6–8 V; постоянное плюс переменное, скважность > 10 ; периодическое прерывистое, частота 1 Hz – ~ 10 kHz, скважность > 10
Корреляция дифракции и тока через ячейку	Обязательна	Не обязательна
Период резонансной решетки S_{\max}	$\sim d/2$	$\sim d$
Тип решетки	Тонкая	Тонкая
Временной режим дифракции	Импульсный	Квазистационарный, периодический
Геометрия считывающего и записывающих пучков	Наклонная	Наклонная оптимальна
Поляризация считывающего и записывающих пучков	p -Поляризация	p -Поляризация оптимальна
Отношение сигнал/шум	Высокое	Среднее

тип решетки — тонкая (решетка Рамана-Натта); вектор решетки параллелен ориентирующим слоем; считывающий и записывающие пучки имеют p -поляризацию.

Особенности записи решеток на поперечных доменах: возбуждающее электрическое напряжение — знакопеременное, асимметричное с размахом не менее 30 V, режим существования — импульсный; импульсы тока через ячейку и импульсы дифракции коррелируют во времени (режим прерывания подачи напряжения не обеспечивает записи резонансной решетки); векторы индуцируемой решетки показателя преломления \mathbf{S} и начальной ориентации директора \mathbf{n} параллельны ($\mathbf{S} \parallel \mathbf{n}$); оптический период S порядка половины толщины ячейки d ($S \sim d/2$), отношение сигнал/шум — высокое.

Для записи решеток на продольных доменах характерно следующее: возбуждающее электрическое напряжение — постоянное 6–8 V, или постоянное плюс переменное со скважностью > 10 , или периодическое прерывистое с частотой 1 Hz – ~ 10 kHz и скважностью > 10 ; режим существования — квазистационарный или периодический; корреляция во времени импульсов тока через ячейку и импульсов дифракции не обязательна (режим прерывания подачи напряжения обеспечивает запись резонансной решетки); вектор индуцируемой решетки показателя преломления \mathbf{S} перпендикулярен вектору начальной ориентации директора \mathbf{n} ($\mathbf{S} \perp \mathbf{n}$); оптический период $S \sim d$; отношение сигнал/шум — среднее.

Требования к записи резонансных решеток и их особенности сведены в таблице.

Следует отметить, что эффект резонансной доменной фоторефрактивности наблюдается и при произвольном азимутальном повороте ячейки, при этом дифракци-

онная эффективность решеток падает с ростом угла. При развороте в 90° дифракционная эффективность резонансной решетки на поперечных доменах падает в ~ 2 раза, а на продольных — в 5 раз. Результаты эксперимента будут представлены позднее.

Свойства динамических систем, обладающих способностью к спонтанному появлению пространственно-периодических структур под воздействием таких факторов, как градиент температуры, внешнее электрическое или магнитное поле, могут быть достаточно точно определены при условии приложения соответствующей внешней силы. Если период этой силы находится внутри интервала собственных значений периода системы, то при соответствующих условиях происходят стабилизация системы и ее фазировка с вынуждающей периодической силой. Результаты настоящей работы показывают, что данное явление реализуется при резонансной записи решеток.

Заключение

Экспериментально установлено, что резонансная запись голографических решеток в ЖК-ячейке с фотопроводящими ориентирующими слоями основана на управлении доменной структурой с помощью оптического интерференционного слоя. Определены необходимые требования для такой записи. Получено увеличение дифракционной эффективности решеток на два порядка как в переходном, так и в квазистационарном режиме.

Выражаю искреннюю благодарность проф. Яношу Парке из Института прикладной физики (Варшава) за помощь в работе.

Список литературы

- [1] *Yeh P.* Introduction to photorefractive nonlinear optics. NY: Wiley Interscience, 1993. 410 p.
- [2] *Janossy I., Kosa T.* // Opt. Lett. 1992. Vol. 17. P. 1183–1185.
- [3] *Руденко Е.В., Сухов А.В.* // Письма в ЖЭТФ. 1994. Т. 59. № 2. С. 133–136.
- [4] *Руденко Е.В., Сухов А.В.* // ЖЭТФ. 1994. Т. 105. № 6. С. 1621–1634.
- [5] *Khoo I.C., Li H., Liang Y.* // Opt. Lett. 1994. Vol. 19. P. 1723–1725.
- [6] *Khoo I.C.* // IEEE J. Quant. Electron. 1996. Vol. 32. P. 525–534.
- [7] *Khoo I.C.* // Opt. Lett. 1995. Vol. 20. P. 2137–2139.
- [8] *Khoo I.C., Guenther B.D., Wood M.V., Chen P., Shih M.Y.* // Opt. Lett. 1997. Vol. 22. P. 1229–1231.
- [9] *Miniewicz A., Bartkiewicz S., Kajzar F.* // Nonlinear Opt. 1998. Vol. 19. P. 157–175.
- [10] *Zhang J., Ostroverkhov V., Singer K.D., Reshetnyak V., Reznikov Yu.* // Opt. Lett. 2000. Vol. 25. N 6. P. 414–416.
- [11] *Klysubun P., Indebetouw G.* // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 91. N 3. P. 897–903.
- [12] *Kaczmarek M., Shih M.Y., Cudney R.S., Khoo I.C.* // IEEE J. Quant. Electron. 2002. Vol. 38. N 5. P. 451–457.
- [13] *Lee W., Wang Y.L.* // J. Phys. D. 2002. Vol. 35. P. 850–853.
- [14] *Lee W., Hsiao K.C.* // Appl. Phys. B. 2004. Vol. 78. N 3–4. P. 377–380.
- [15] *Song L., Lee W.K., Wang X.* // Opt. Exp. 2006. Vol. 14. N 6. P. 2197–2202.
- [16] *Lucchetti L., Gentili M., Simoni F.* // Opt. Exp. 2006. Vol. 14. N 6. P. 2236–2241.
- [17] *Khoo I.C.* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1996. Vol. 282. P. 53–66.
- [18] *Zhang G., Montemezzani G., Günter P.* // J. Appl. Phys. 2000. Vol. 88. N 4. P. 1709–1717.
- [19] *Parka J.* // Opto-Electron. Rev. 2002. Vol. 10. N 1. P. 83–87.
- [20] *Klysubun P., Indebetouw G.* // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 91. N 3. P. 897–903.
- [21] *Ono H., Shimokawa H., Emoto A., Kawatsuki N.* // J. Appl. Phys. 2003. Vol. 94. N 1. P. 23–30.
- [22] *Agashkov A., Parka J., Serak S., Davidovich T.* // Proc. SPIE. 2001. Vol. 4418. P. 54–59.
- [23] *Agashkov A., Serak S., Parka J.* // Proc. SPIE. 2002. Vol. 4759. P. 343–349.
- [24] *Agashkov A.V., Kovalev A.A., Serak S.V., Parka J.* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2002. Vol. 375. P. 269–280.
- [25] *Agashkov A.V., Kovalev A.A., Parka J.* // Opto-Electron. Rev. 2004. Vol. 12. N 3. P. 271–275.
- [26] *Boichuk V., Kucheev S., Parka J., Reshetnyak V., Reznikov Yu., Shiyanovskaya I., Singer K.D., Slussarenko S.* // J. Appl. Phys. 2001. Vol. 90. N 12. P. 5963–5967.
- [27] *Agashkov A.V., Kovalev A.A., Parka J.* // Opto-Electron. Rev. 2009. Vol. 17. N 2. P. 99–104.
- [28] *Kim H.-W., Min W., Jung S., Yoon C.-S., Kim J.-D.* // Jpn. J. Appl. Phys. 2003. Vol. 42. Pt 2. N 1A/B. P. L44–L47.
- [29] *Korneichuk P., Reznikov Yu., Tereshchenko O., Reshetnyak V.* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2004. Vol. 422. P. 27–36.
- [30] *Myśliwiec J., Miniewicz A., Bartkiewicz S.* // Opto-Electron. Rev. 2002. Vol. 10. N 1. P. 53–58.
- [31] *Lee W., Chen H.-Y., Yeh S.-L.* // Opt. Exp. 2002. Vol. 10. N 11. P. 482–487.
- [32] *Agashkov A., Kovalev A., Parka J.* // Proc. SPIE. 2005. Vol. 5947. P. 257–265.
- [33] *Блинов Л.М.* Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М.: Наука, 1978. 384 с.
- [34] *Agashkov A.V., Kovalev A.V., Parka J.* // Proc. SPIE. 2007. Vol. 6725. P. 672 511.
- [35] *Агашков А.В., Ковалев А.А., Парка Я.* // Опт. и спектр. 2005. Т. 98. № 6. С. 1021–1026.