

ОПТИМИЗАЦИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОДОЛЬНЫХ ФЛЕКСОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДОМЕНОВ (УСТРОЙСТВА ПЕРЕМЕННОЙ РЕШЕТКИ) ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ ДЕЙСТВИИ ПЕРЕМЕННОГО И ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЙ

© 2005 г. **Й. Г. Маринов**, канд. физ. наук; **Хр. П. Хинов**, канд. физ. наук

Институт физики твердого тела, Болгарская академия наук, г. София, Болгария

E-mail: Ymarinov@issp.bas.bg, hinov@issp.bas.bg

Получено точное решение, описывающее анизотропное поведение флексоэлектрических доменов Вистина–Пикина–Бобилева (a variable grating mode (VGM)), возбужденных одновременным действием ориентирующего высокочастотного и постоянного напряжений. На основании этого решения вычислены точные формулы, описывающие пороговые напряжения U_c и волновое число q_c как функции высокочастотного напряжения U_{ac} и физических параметров жидкого кристалла (ЖК) в случае жесткого сцепления ЖК на поверхности ЖК-ячеек. Установлена прямая связь между U_c и q_c после исключения U_{ac} . На основании полученных формул сделаны компьютерные расчеты, определяющие оптимальные значения физических параметров нематика. Они могут улучшить качество как ЖК-устройств, построенных на принципе VGM, так и решеток, построенных на основе флексоэлектрических доменов.

Коды OCIS: 160.3710, 170.0180, 230.1950, 230.3720.

Поступила в редакцию 30.06.2005.

1. Введение

Вистинь [1, 2] и независимо от него Greuble и Wolff [3] наблюдали впервые образование статических доменов, ориентированных в направлении начальной ориентации нематического жидкого кристалла (ЖК), когда он возбужден постоянным электрическим полем, напряженность которого превышает определенную пороговую величину. Бобылев и Пикин [4] показали теоретически, что эти домены флексоэлектрические. Начальная теория этих авторов была расширена на случай анизотропной упругости [5]. Барник и соавторы [6, 7] провели тщательные экспериментальные исследования продольных флексоэлектрических доменов. Подобные домены были использованы в ЖК-устройствах, состоящих из фотопроводящего и ЖК-слоя (VGM). Это устройство используется как оптический преобразователь изображений в реальное время. Такой преобразователь может быть использован при выполнении нелинейных операций в произвольной точке входных изображений. VGM удобно применять для логической обработки, так как входной и выходной лучи физически разделены. Подробности о практическом применении VGM в ЖК-устройствах описаны в статьях [10–15]. Здесь необходимо упомянуть, что часто в ЖК-слоях, использованных в VGM-устройствах, наблюдается множество дефектов таких, как, например, дисинклинации и дислокации, которые ухудшают качество изображения. В этой статье предложен простой способ, который может улучшить качество VGM-визуализирующих устройств с использованием ЖК, основанный на идее об одновременном воздействии ориентирующего высоко-

частотного (с частотами выше 5 кГц) и постоянного напряжений на флексоэлектрические домены. Такой способ одновременного действия обоих напряжений успешно использован для исследования поверхностно-индуцированных флексоэлектрических стен [16] или для электрического уничтожения (стирания) электрически-полярных поверхностных доменов, наблюдаемых в нематических ЖК с положительной диэлектрической анизотропией [17]. С другой стороны, наши начальные расчеты, базирующиеся на упрощенной теории Бобылева–Пикина [4], были подтверждены нами при проведении экспериментальных исследований ЖК *n*–*n*-бутил-*n*-метоксиазоксибензола [18]. Дальше мы продолжили теоретические расчеты Романова и Складенко, описывающие упруго-флексоэлектрические флуктуации нематического директора [19, 20] в случаях появления флексоэлектрических доменов в присутствии обоих напряжений – высокочастотного и постоянного. Экспериментальные [18] и теоретические результаты показали возможность возрастания величины q_c доменов при повышении обоих напряжений – постоянного и переменного. Этот факт демонстрирует большое преимущество способа, так как, во-первых, он дает возможность получить бездефектные флексоэлектрические домены и, во-вторых, становится возможным теоретический расчет U_c и q_c как функций высокочастотного напряжения. В результате были определены пороговые характеристики. Затем с помощью компьютерных расчетов мы установили оптимальные значения физических параметров ЖК. Таким образом, мы смогли указать, какие из физических параметров могут привести к улучшению работы VGM-устройства с использованием ЖК.

2. Теория

“Электрическая энтальпия” (H_E) ЖК состоит из трех частей: упругой, флексоэлектрической и ди-

электрической [21, 22]:

$$H_E = \int_V \left\{ \frac{1}{2} \left(K_{11} (\text{div} \mathbf{n})^2 + K_{22} (\mathbf{n} \text{rot} \mathbf{n})^2 + K_{33} (\mathbf{n} \times \text{rot} \mathbf{n})^2 \right) - e_{1z} \mathbf{E} \text{div} \mathbf{n} - e_{3x} \mathbf{E} (\text{rot} \mathbf{n} \times \mathbf{n}) - \frac{|\Delta \epsilon|}{8\pi} \left((\mathbf{n} \times \mathbf{E})^2 + (\mathbf{n} \times \mathbf{E}_{ac})^2 \right) dV \right\}, \quad (1)$$

где $\mathbf{n}$ – вектор нематического директора; K_{11} , K_{22} , K_{33} – модули поперечного изгиба, кручения и продольного изгиба; e_{1z} и e_{3x} – флексоэлектрические модули поперечного и продольного изгибов; $\Delta \epsilon$ – диэлектрическая анизотропия (в нашем случае отрицательная); $\mathbf{E}$ – вектор постоянного электрического поля и $\mathbf{E}_{ac}$ – вектор ориентирующего высокочастот-

ного электрического поля. Вводя компоненты векторов $n_x = \cos \theta \cos \varphi$, $n_y = \cos \theta \sin \varphi$, $n_z = \sin \theta$, $E_z = E$ и $E_{ac} = E_{ac}$ и принимая, что для случая продольных флексоэлектрических доменов $n_x = 1$, выразим электрическую энтальпию через компоненты директора n_y и n_z и их производные по отношению к координатам y и z :

$$H_E = \iint \left\{ \frac{1}{2} \left(K_{11} \left(\frac{\partial n_y}{\partial y} + \frac{\partial n_z}{\partial z} \right)^2 + K_{22} \left(\frac{\partial n_z}{\partial y} - \frac{\partial n_y}{\partial z} \right)^2 \right) - e_{1z} E n_z \left(\frac{\partial n_y}{\partial y} + \frac{\partial n_z}{\partial z} \right) - e_{3x} E n_y \left(\frac{\partial n_z}{\partial y} - \frac{\partial n_y}{\partial z} \right) + \frac{|\Delta \epsilon|}{8\pi} n_z^2 (E^2 + E_{ac}^2) \right\} dy dz. \quad (2)$$

Выражение (2) показывает, что в упругую энергию входят только деформации поперечного изгиба и кручения [5]. Исходя из этого решения, приведенного в деталях Романовым и Скляренко [19, 20], мы получили впервые точное решение рассматриваемой проблемы. Это верно также и для случая, когда высокочастотное электрическое поле отсутствует. Нахождение минимума функционала электрической эн-

тальпии, выраженной уравнением (2), приводит к решению, имеющему следующую форму:

$$\begin{aligned} n_y &= f_1(z) \sin qy, \\ n_z &= f_2(z) \cos qy \end{aligned} \quad (3)$$

(периодическая деформация по оси OY была использована впервые в [4]), где

$$f_1(z) = \sqrt{\frac{K_{22}}{K_{11}}} \left\{ \left[(w-p) (A_1 e^{Qz} + A_2 e^{-Qz}) + (w+p) (B_1 e^{Pz} + B_2 e^{-Pz}) \right] \cos \alpha + u \sin \alpha \left[A_1 e^{Qz} + A_2 e^{-Qz} + B_1 e^{Pz} + B_2 e^{-Pz} \right] \right\} \quad (4a)$$

и

$$f_2(z) = \left[(w-p) (A_1 e^{Qz} + A_2 e^{-Qz}) + (w+p) (B_1 e^{Pz} + B_2 e^{-Pz}) \right] \sin \alpha - u \cos \alpha \left[A_1 e^{Qz} + A_2 e^{-Qz} + B_1 e^{Pz} + B_2 e^{-Pz} \right]. \quad (4б)$$

Входящие в (4a), (4б) величины определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} a &= \left(\frac{1}{2} + \frac{3}{4} \frac{K_{22}}{K_{11}} - \frac{1}{4} \frac{K_{11}}{K_{22}} \right) q^2 + \frac{|\Delta \epsilon|}{4\pi K_{11}} (E^2 + E_{ac}^2), \\ b &= \left(\frac{1}{2} + \frac{3}{4} \frac{K_{11}}{K_{22}} - \frac{1}{4} \frac{K_{22}}{K_{11}} \right) q^2, \\ f &= \frac{e_{1z} - e_{3x}}{\sqrt{K_{11} K_{22}}} E q, \quad \alpha = \frac{1}{2} \frac{K_{11} - K_{22}}{\sqrt{K_{11} K_{22}}} q z, \\ p &= \sqrt{\left(\frac{a-b}{2} \right)^2 + f^2}, \end{aligned} \quad (4в)$$

$$w = -a \sin^2 \alpha - b \cos^2 \alpha - f \sin 2\alpha + \frac{a+b}{2},$$

$$\begin{aligned} u &= \frac{a-b}{2} \sin 2\alpha + f \cos 2\alpha, \\ P &= \sqrt{\frac{a+b}{2} + \sqrt{\frac{(a-b)^2}{4} + f^2}}, \\ Q &= \sqrt{\frac{a+b}{2} - \sqrt{\frac{(a-b)^2}{4} + f^2}}. \end{aligned}$$

Интегральные константы, обозначенные как A_1, A_2, B_1, B_2 , могут быть определены граничными условиями. Остальные величины в уравнении (3) связа-

ны с физическими параметрами нематического ЖК и с напряженностями обоих полей, возбуждающих ЖК. В решение дополнительно входят толщина ЖК d и пороговое волновое число q флексоэлектрических доменов. Кроме того, мы приняли, что ЖК жестко связан с обеими стеклянными пластинами, ограничивающими слой ЖК (отметим, что это условие работы VGM-устройства с ЖК):

$$f_1(\pm d/2) = f_2(\pm d/2) = 0, \quad (5)$$

где $\pm d/2$ обозначает верхнюю и нижнюю границы ЖК-слоя. Воспользовавшись процедурой решения [20], мы получили следующее пороговое условие

$$E^2 \left\{ \frac{(e_{1z} - e_{3x})^2}{K_{11}K_{22}} q^2 - \frac{|\Delta\epsilon|}{4\pi K_{11}} \left[\left(\frac{1}{2} + \frac{3}{4} \frac{K_{11}}{K_{22}} - \frac{1}{4} \frac{K_{22}}{K_{11}} \right) q^2 + \left(\frac{\pi}{d} \right)^2 \right] \right\} =$$

$$= \left[\left(\frac{\pi}{d} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} + \frac{3}{4} \frac{K_{11}}{K_{22}} - \frac{1}{4} \frac{K_{22}}{K_{11}} \right) q^2 \right] \left[\left(\frac{\pi}{d} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} + \frac{3}{4} \frac{K_{22}}{K_{11}} - \frac{1}{4} \frac{K_{11}}{K_{22}} \right) q^2 + \frac{|\Delta\epsilon|}{4\pi K_{11}} E_{ac}^2 \right]. \quad (7)$$

Минимизирование $E(q)$ приводит к следующим

для случая жесткой связи планарного нематического слоя при одновременно действующих по оси OZ электрических полях – переменном и постоянном:

$$\operatorname{tg}(iQd) = 0, \pm iQd = \pi. \quad (6)$$

Наконец, следуя за авторами [4] и принимая во внимание результаты [20], мы получили связь между напряженностью постоянного электрического поля E и волновым числом q . Порог возникновения рассматриваемой неустойчивости определяется минимумом $E = E_c$ при $q = q_c$ на кривой $E(q)$, описываемой уравнением

выражениям для порогового напряжения

$$U_c^2 = \frac{\pi^2 K_{11} K_{22}}{(e_{1z} - e_{3x})^2} \frac{\left[1 + b_1 \left(\frac{\mu}{1 - b_1 \mu} + \frac{1}{1 - b_1 \mu} P_{\text{SQR}} \right) \right] \left[1 + a_1 \left(\frac{\mu}{1 - b_1 \mu} + \frac{1}{1 - b_1 \mu} P_{\text{SQR}} \right) + \left(\frac{U_{ac}}{U_0} \right)^2 \right]}{P_{\text{SQR}}}, \quad (8)$$

где

$$P_{\text{SQR}} = \sqrt{\frac{(1 - b_1 \mu) \left(1 + (U_{ac}/U_0)^2 \right) + a_1 \mu}{a_1 b_1}},$$

и для порогового волнового числа

$$q_c^2 = \left(\frac{\pi}{d} \right)^2 \left(\frac{\mu}{1 - b_1 \mu} + \frac{1}{1 - b_1 \mu} P_{\text{SQR}} \right), \quad (9)$$

где

$$\mu = (|\Delta\epsilon| K_{22}) / 4\pi (e_{1z} - e_{3x})^2,$$

$$a_1 = \frac{1}{2} + \frac{3}{4} \frac{K_{22}}{K_{11}} - \frac{1}{4} \frac{K_{11}}{K_{22}}, \quad (10)$$

$$b_1 = \frac{1}{2} + \frac{3}{4} \frac{K_{11}}{K_{22}} - \frac{1}{4} \frac{K_{22}}{K_{11}}, \quad U_0 = \pi \sqrt{\frac{4\pi K_{11}}{|\Delta\epsilon|}}.$$

Из выражения (9) видно, что должно выполняться неравенство

$$q_c^2 > \mu \left(\frac{\pi}{d} \right)^2 \frac{1}{1 - b_1 \mu}. \quad (11)$$

Из выражений (8) и (9) можно исключить U_{ac} , и таким образом получим простую связь между U_c и q_c :

$$U_c = \frac{\pi K_{11}}{e_{1z} - e_{3x}} \left(1 + b_1 \left(\frac{d}{\pi} \right)^2 q_c^2 \right) \sqrt{\frac{K_{22}}{K_{11}}} a_1. \quad (12)$$

Необходимо отметить, что это выражение справедливо для любых значений U_c и q_c , определяемых уравнениями (8) и (9). Необходимо также подчеркнуть, что соотношение (12) очень важно, так как в некоторых случаях только оно помогает полному решению рассматриваемой проблемы (см. следующую часть статьи, где даны компьютерные расчеты). Кроме того, из этой связи можно легко оценить важные физические параметры нематика.

3. Числовые компьютерные расчеты, полученные на основании формул (8), (9) и (12)

Цель настоящего исследования – определить рабочие интервалы значений физических параметров, характеризующих продольные флексоэлектрические домены, которые могут использоваться

или в VGM, или при формировании дифракционных решеток, построенных на основе этих доменов. Расчеты были проведены с помощью компьютерной программы "Origin 6.0" с использованием нескольких параметров (максимально 4) в каждом конкретном примере, связывающем естественным образом физические параметры нематика и решения. Так, например, пороговое постоянное напряжение U_c было вычислено как функция высокочастотного напряжения согласно следующей формуле:

$$300PIP1\text{SQRT}(P2)\text{SQRT}(\text{SQRT}((1 + P3(P2 - (1/P2))) + (1 - (0,5 + 0,75(1/P2) - 0,25P2) \times (P3)(X/P4)^2)((0,5 + 0,75P2 - 0,25(1/P2))) \times (0,5 + 0,75(1/P2) - 0,25P2))^{-1})) \times \text{SQRT}(1 + (0,5 + 0,75(1/P2) - 0,25P2) \times (1 - (0,5 + 0,75(1/P2) - 0,25P2)P3)^{-1} \times (P3 + \text{SQRT}((1 + P3(P2 - (1/P2))) + (1 - (0,5 + 0,75 \times (1/P2) - 0,25P2)P3)(X/P4)^2)((0,5 + 0,75P2 - 0,25 \times (1/P2))(0,5 + 0,75(1/P2) - 0,25P2)))^{-1})) \times \text{SQRT}(1 + (0,5 + 0,75P2 - 0,25(1/P2)) \times (1 - (0,5 + 0,75(1/P2) - 0,25P2)P3)^{-1} \times (P3 + \text{SQRT}((1 + P3(P2 - (1/P2))) + (1 - (0,5 + 0,75(1/P2) - 0,25P2)P3)(X/P4)^2 \times (((0,5 + 0,75P2 - 0,25(1/P2))(0,5 + 0,75(1/P2) - 0,25P2)))^{-1})) + (X/P4)^2), \quad (13a)$$

где мы ввели 4 параметра

$$P1 = K_{11}/(e_{1z} - e_{3x}), \quad P2 = K_{22}/K_{11}, \quad (13b)$$

$$P3 = \mu = (|\Delta\epsilon|K_{22})/4\pi(e_{1z} - e_{3x})^2,$$

$$P4 = U_0 = \pi \sqrt{\frac{4\pi K_{11}}{|\Delta\epsilon|}}.$$

Пороговое волновое число q_c было вычислено как функция напряжения U_{ac} согласно формуле

$$(PI/P1)\text{SQRT}((1 - (0,5 + 0,75(1/P2) - 0,25P2)P3)^{-1} \times (P3 + \text{SQRT}((1 + P3(P2 - (1/P2))) + (1 - (0,5 + 0,75 \times (1/P2) - 0,25P2)P3)(X/P4)^2(((0,5 + 0,75P2 - 0,25(1/P2))(0,5 + 0,75(1/P2) - 0,25P2)))^{-1}))), \quad (14a)$$

где мы снова ввели 4 параметра:

$$P1 = d, \quad P2 = K_{22}/K_{11}, \quad P3 = \mu, \quad P4 = U_0. \quad (14b)$$

Нужно отметить, что, следуя требованиям программы, мы обозначили различные величины од-

ним и тем же параметром: см., например, уравнения (13б) и (14б). Наконец, связь между U_c и q_c была вычислена согласно формуле

$$300PIP1(1 + (0,5 + 0,75(1/P2) - 0,25P2)(P3/P1)^2X^2) \times \text{SQRT}(P2(0,5 + 0,75P2 - 0,25(1/P2))), \quad (15a)$$

где

$$P1 = K_{11}/(e_{1z} - e_{3x}), \quad P2 = K_{22}/K_{11}, \quad P3 = d. \quad (15b)$$

Оптимизирование параметров было проведено следующим образом: во-первых, мы фиксировали три из четырех параметров, задав им значения, приемлемые с экспериментальной точки зрения [18]; во-вторых, мы изменяли значение четвертого параметра в границах, разрешенных теорией. Наконец, мы приняли за оптимальное значение каждого конкретного параметра значение, дающее наибольшее изменение волнового числа q_c при минимальном изменении постоянного напряжения. Высокочастотное ориентирующее напряжение изменяли от 0 до $70V_{rms}$. Следуя принятому способу решения, на рис. 1 мы показываем расчетные кривые для функций $U_c(U_{ac})$, $q_c(U_{ac})$ и $U_c(q_c)$ для параметра $P2$, меняющегося между 0,34 и 2. Требования

$$a_1 > 0, \quad b_1 > 0 \quad \text{и} \quad (1 - b_1\mu) > 0 \quad (16)$$

приводят к ограничению параметров K_{22}/K_{11} и μ :

$$1/3 < K_{22}/K_{11} < 3, \quad |\mu| < 1/b_1. \quad (17)$$

Таким образом, мы вычислили пороговые характеристики всех параметров, описывающих поведение флексоэлектрических доменов. Сначала мы определили оптимальную величину отношения между модулями упругости K_{22} и K_{11} . Кривые на рис. 1, случаи а-в, ясно показывают, что самое оптимальное значение параметра $P2$ для технического применения флексоэлектрических доменов составляет 0,34. Второй шаг заключается в варьировании параметра μ (см. уравнение (13б)). В этот параметр входят три физические величины: диэлектрическая анизотропия жидкого кристалла $\Delta\epsilon$, модуль кручения K_{22} и разность между флексоэлектрическими модулями поперечного и продольного изгибов $e_{1z} - e_{3x}$. Параметр μ должен дополнительно удовлетворять неравенству (17). Как мы и ожидали, конкретные вычисления, результаты которых показаны на рис. 2, демонстрируют, что именно в этой области кривые самые чувствительные к изменениям постоянного и переменного напряжений. Следовательно, изменения этих кривых самые большие для величин μ в диапазоне от 0,37 до 0,38. В качестве оптимального значения μ для практического использования мы приняли величину 0,2, так как при этом значении постоянное напряжение, необходимое для работы VGM-устройства

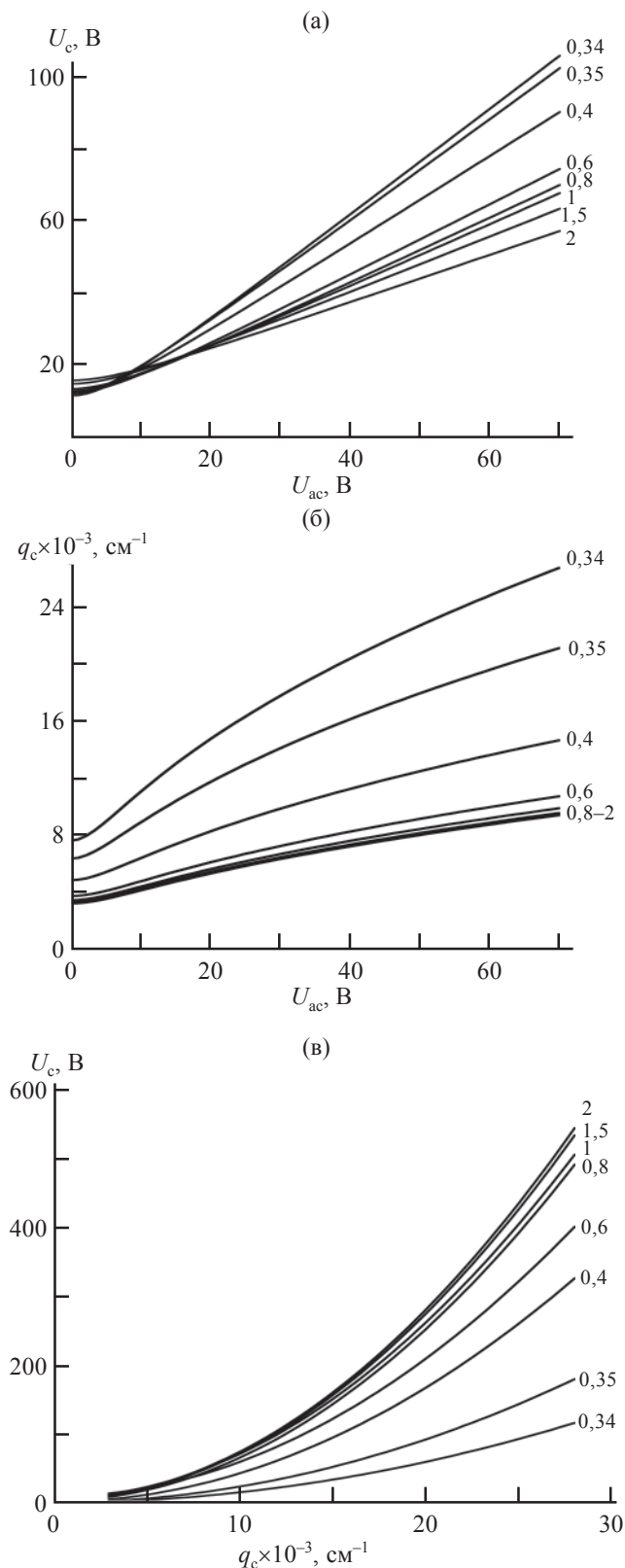


Рис. 1. Пороговые характеристики флексоэлектрических доменов при изменении параметра K_{22}/K_{11} . а – $U_c(U_{ac})$: $P1 = K_{11}/(e_{1z} - e_{3x})$, $P2 = K_{22}/K_{11}$, $P3 = \mu$, $P4 = U_0$. $P1 = 0,005$, $P2 = 0,34-2$, $P3 = 0,3$, $P4 = 6,5$. б – $q_c(U_{ac})$: $P1 = d$, $P2 = K_{22}/K_{11}$, $P3 = \mu$, $P4 = U_0$. $P1 = 0,0012$, $P2 = 0,34-2$, $P3 = 0,3$, $P4 = 6,5$. в – $U_c(q_c)$: $P1 = K_{11}/(e_{1z} - e_{3x})$, $P2 = K_{22}/K_{11}$, $P3 = d$. $P1 = 0,005$, $P2 = 0,34-2$, $P3 = 0,0012$. Здесь и далее: цифры при кривых – значения изменяемого параметра.

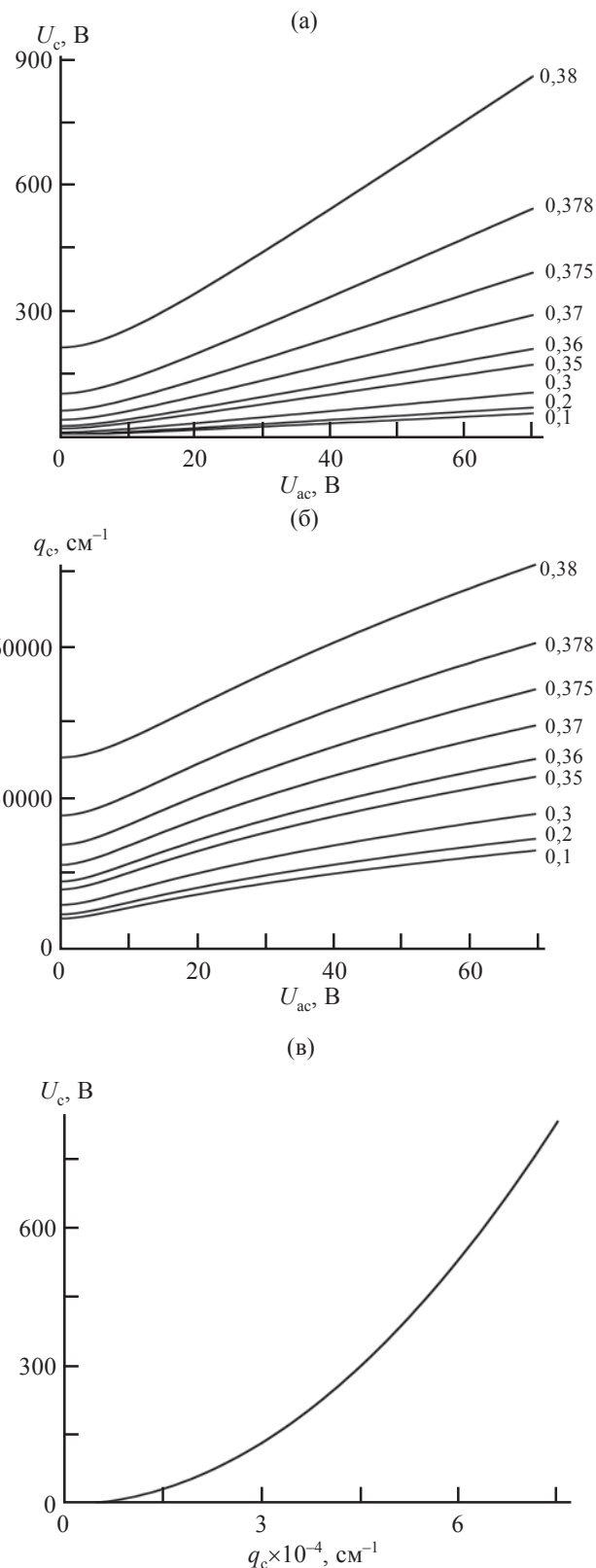


Рис. 2. Пороговые характеристики флексоэлектрических доменов при изменении параметра μ . а – $U_c(U_{ac})$: $P1 = K_{11}/(e_{1z} - e_{3x})$, $P2 = K_{22}/K_{11}$, $P3 = \mu$, $P4 = U_0$. $P1 = 0,005$, $P2 = 0,34$, $P3 = 0,1-0,38$, $P4 = 6,5$. б – $q_c(U_{ac})$: $P1 = d$, $P2 = K_{22}/K_{11}$, $P3 = \mu$, $P4 = U_0$. $P1 = 0,0012$, $P2 = 0,34$, $P3 = 0,1-0,38$, $P4 = 6,5$. в – $U_c(q_c)$: $P1 = K_{11}/(e_{1z} - e_{3x})$, $P2 = K_{22}/K_{11}$, $P3 = d$. $P1 = 0,005$, $P2 = 0,34$, $P4 = 0,0012$.

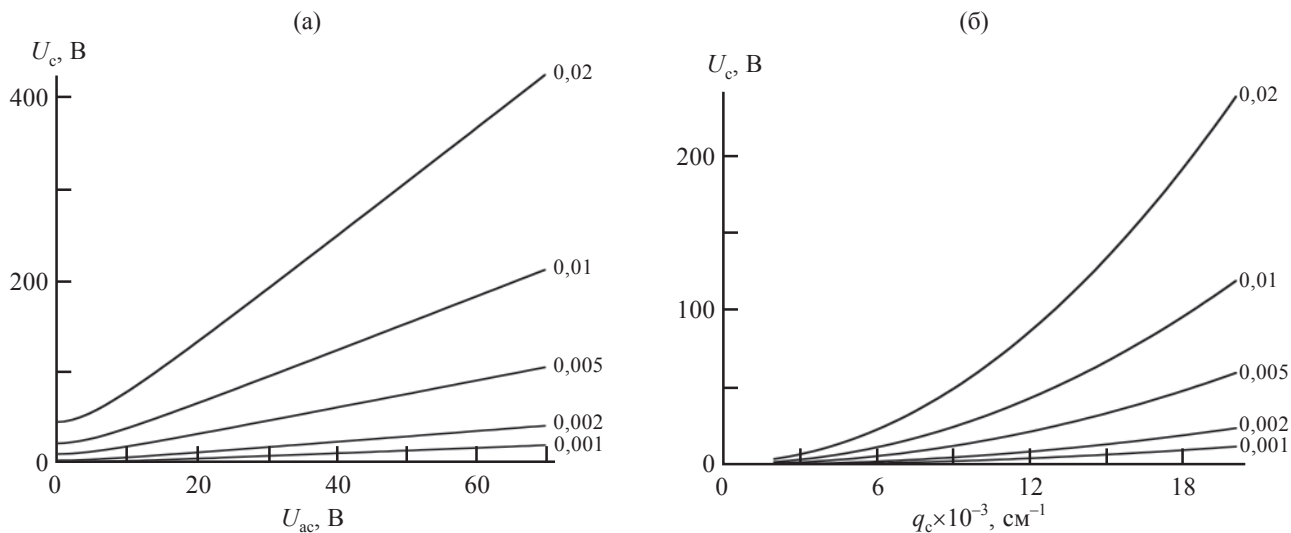


Рис. 3. Пороговые характеристики флексоэлектрических доменов при изменении параметра $K_{11}/(e_{1z} - e_{3x})$:
 а – $U_c(U_{ac})$: $P1 = K_{11}/(e_{1z} - e_{3x})$, $P2 = K_{22}/K_{11}$, $P3 = \mu$, $P4 = U_0$. $P1 = 0,02-0,001$, $P2 = 0,34$, $P3 = 0,3$, $P4 = 6,5$.
 б – $U_c(q_c)$: $P1 = K_{11}/(e_{1z} - e_{3x})$, $P2 = K_{22}/K_{11}$, $P3 = d$. $P1 = 0,02-0,001$, $P2 = 0,34$, $P3 = 0,0012$.

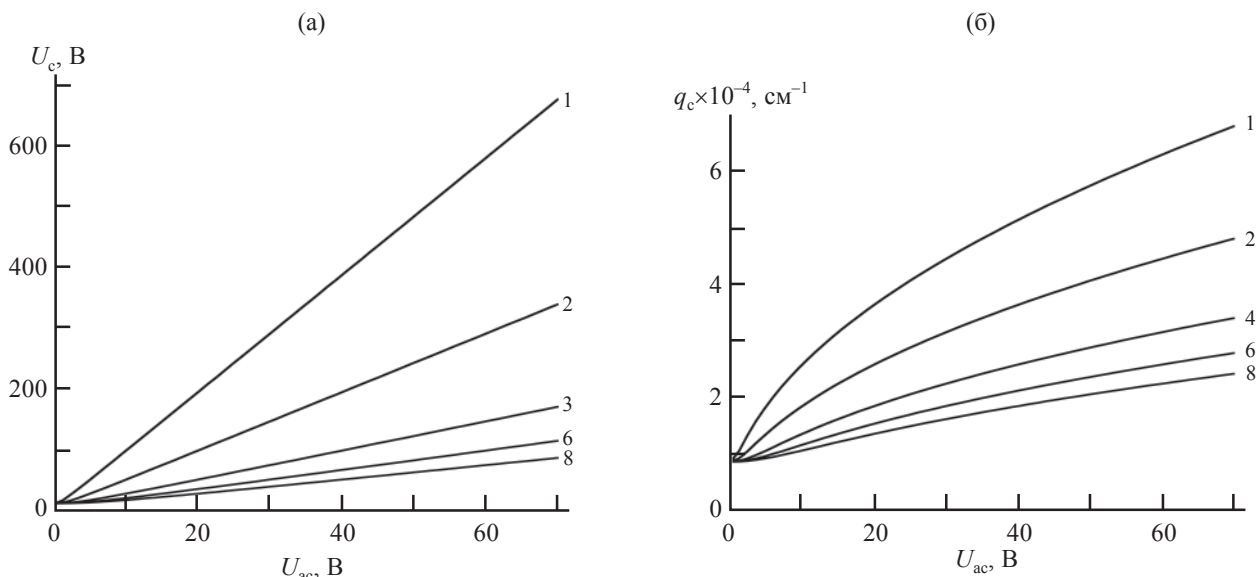
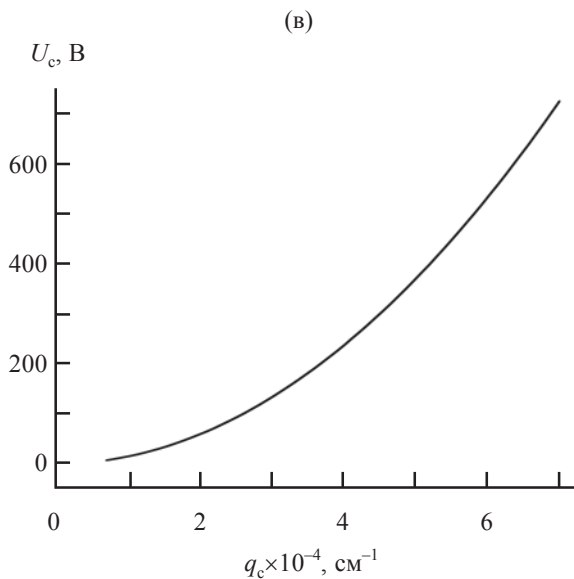


Рис. 4. Пороговые характеристики флексоэлектрических доменов при изменении параметра U_0 . а – $U_c(U_{ac})$: $P1 = K_{11}/(e_{1z} - e_{3x})$, $P2 = K_{22}/K_{11}$, $P3 = \mu$, $P4 = U_0$. $P1 = 0,005$, $P2 = 0,34$, $P3 = 0,3$, $P4 = 1-8$.
 б – $q_c(U_{ac})$: $P1 = d$, $P2 = K_{22}/K_{11}$, $P3 = \mu$, $P4 = U_0$. $P1 = 0,0012$, $P2 = 0,34$, $P3 = 0,3$, $P4 = 1-8$. в – $U_c(q_c)$: $P1 = K_{11}/(e_{1z} - e_{3x})$, $P2 = K_{22}/K_{11}$, $P3 = d$. $P1 = 0,005$, $P2 = 0,34$, $P3 = 0,0012$.



с ЖК, относительно низкое по величине. Третий шаг состоял в варьировании параметра $K_{11}/|e_{1z} - e_{3x}|$. Соответствующие кривые показаны на рис. 3. В этом случае мы выбрали значение 0,005 $\text{дин}^{1/2}$ как оптимальный параметр. Затем варьировался параметр U_0 (см. уравнение (13б)). В этот параметр входят модуль поперечного изгиба K_{11} и диэлектрическая анизотропия $\Delta\epsilon$. Соответствующие кривые показаны на рис. 4. Ясно, что для данного параметра нужно выбрать наибольшее возможное значение (в нашем слу-

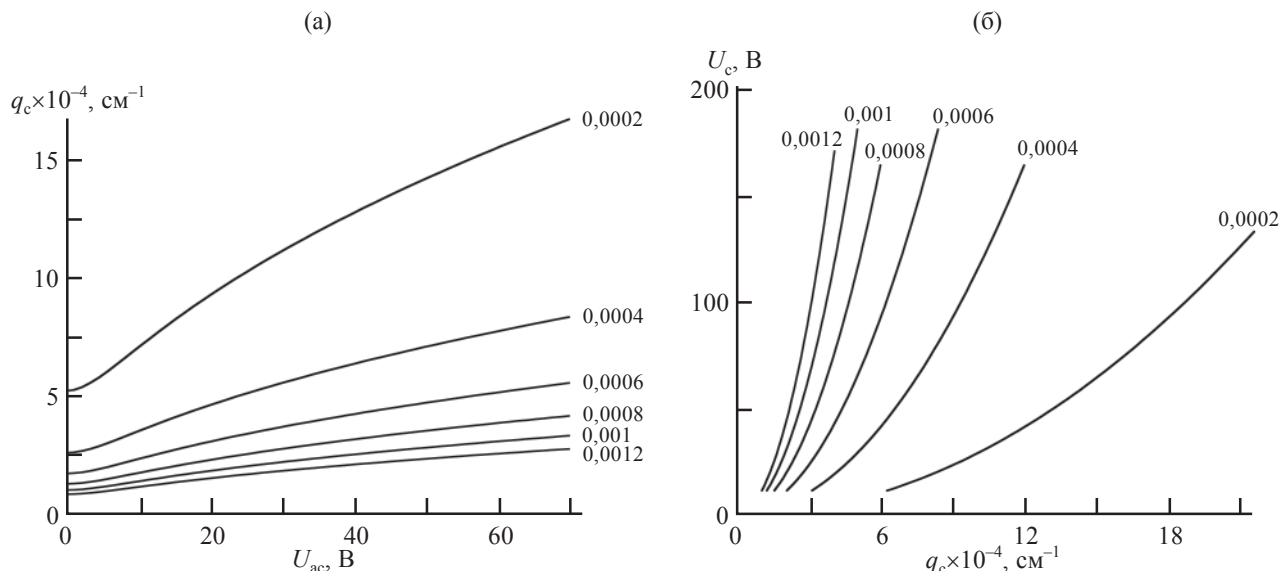


Рис. 5. Пороговые характеристики флексоэлектрических доменов при изменении параметра d . а – $q_c(U_{ac})$: $P1 = d$, $P2 = K_{22}/K_{11}$, $P3 = \mu$, $P4 = U_0$. $P1 = 0,0002$ – $0,0012$, $P2 = 0,34$, $P3 = 0,3$, $P4 = 6$. б – $U_c(q_c)$: $P1 = K_{11}/(e_{1z} - e_{3x})$, $P2 = K_{22}/K_{11}$, $P3 = d$. $P1 = 0,005$, $P2 = 0,34$, $P3 = 0,0002$ – $0,0012$.

чае оно составляет 8 В или 8/300 статвольт в системе CGSE). Наконец мы включили в расчеты и толщину (d) ЖК-ячейки. Соответствующие кривые показаны на рис. 5. Эти кривые показывают, что оптимальное значение толщины ЖК-ячейки должно равняться 2 мкм. Видно однако, что и значения d от 4 до 12 мкм приемлемы для применения в ЖК-устройствах.

4. Обсуждение результатов

При совместном действии ориентирующего высокочастотного и флексоэлектрически-деформирующего постоянного напряжений на планарно-ориентированном нематическом слое с отрицательной диэлектрической анизотропией можно управлять появлением и исчезновением флексоэлектрических доменов, а также изменять пороговое напряжение и волновое число в широком диапазоне их значений. Теоретически были получены точные пороговые характеристики для случая анизотропной упругости и флексоэлектричности и были исполнены

компьютерные числовые расчеты на основании принятой программы. На базе полученных теоретических результатов и численных расчетов были выбраны оптимальные значения параметров для практических применений. Оптимальные значения параметров позволяют улучшить работу VGM-устройств с ЖК [8–14]. Полезность предлагаемого способа выражается в том, что он является всеохватным. Из литературы [23–25] хорошо известно, что нелинейные эффекты оказывают заметное влияние как на работу VGM-устройств, так и на характеристики дифракции [25], и что они приводят к возникновению большинства дефектов в структуре флексоэлектрических доменов [24], ухудшающих качество решеток. При совместном действии обоих напряжений можно избежать появления большинства дефектов, как это иллюстрировано на рис. 6. Второе, очень важное преимущество предложенного способа – это возможность контролировать значение порогового волнового числа q_c . Это невозможно для случая, когда высокочастотное электрическое



Рис. 6. Вид флексоэлектрических доменов в поляризованном свете в слегка расскращенных николях. а – $U_c = 30 \text{ В}$, $U_{ac} = 0 \text{ В}$ (видно большинство дефектов). б – $U_c = 30 \text{ В}$, $U_{ac} = 25 \text{ В}_{rms}$ (видны хорошо ориентированные флексоэлектрические домены). Длинная сторона снимка соответствует 1057 мкм, температура комнатная.

поле отсутствует (кроме случаев ограниченного охвата [8–14]). Третье преимущество предлагаемого способа – это возможность контролировать ток, распределение ионов и проявление электрогидродинамических неустойчивостей, так как флексоэлектрические домены обычно создаются при постоянном электрическом поле [26]. Известно из эксперимента, что флексоэлектрические домены (особенно в ЖК-ячейках с толщиной более 15 мкм) появляются в большинстве случаев вместе с инжекционными электрогидродинамическими доменами [16]. Двулучепреломление может заметно изменять дифракционные свойства объемных решеток, как отмечено в работе [27]. Такое изменение двулучепреломления можно легко осуществить с помощью флексоэлектрических доменов при одновременном действии переменного высокочастотного и постоянного напряжений. С другой стороны, волновые числа этих доменов можно изменять, что представляет собой преимущество в сравнении с электрическими свойствами так называемых бинарных фазовых решеток [28–30].

Заключение

Теоретически получены пороговые характеристики жестко-закрепленных флексоэлектрических доменов Вистина–Пикина–Бобылева при одновременном воздействии переменного высокочастотного и постоянного напряжений. Теоретически получена и дополнительная связь между пороговым постоянным напряжением и пороговым волновым числом доменов после выключения высокочастотного напряжения. Выполнены компьютерные числовые вычисления порогового постоянного напряжения U_c и порогового волнового числа q_c как функции ориентирующего высокочастотного напряжения U_{ac} , а также связи между U_c и q_c . На основании анализа полученных данных были оценены оптимальные значения параметров появления доменов. Они могут улучшить работу VGM-устройств с ЖК, а также свойства дифракционных решеток, которые могли бы быть построены на базе флексоэлектрических доменов. Определение задачи и ее решение показывают, что ЖК снова демонстрируют свою пригодность для применения в оптических жидкокристаллических устройствах, как недавно было отмечено Томилиным [31].

ЛИТЕРАТУРА

1. Вистинь Л.К. Электроструктурный эффект и оптические свойства определенного класса жидких кристаллов и их бинарных смесей // Кристаллография. 1970. Т. 15. С. 594–595.
2. Вистинь Л.К. Новое электроструктурное явление в жидких кристаллах нематического типа // ДАН СССР. 1970. Т. 194. С. 1318–1321.
3. Greubel W., Wolff U. Electrically controllable domains in nematic liquid crystals // Appl. Phys. Lett. 1971. V. 19. P. 213–215.
4. Бобылев Ю.П., Пикин С.А. Пороговая пьезоэлектрическая неустойчивость в жидком кристалле // ЖЭТФ. 1977. Т. 72. С. 369–374.
5. Bobylev Y.P., Chigrinov V.G., Pikin S.A. Threshold flexoelectric effect in nematic liquid crystal // J. Phys. (Paris) Colloq. 1979. V. 40. P. C3-331–C3-333.
6. Барник М.И., Блинов Л.М., Труфанов А.Н., Уманский Б.А. Флексоэлектрические домены в нематических жидких кристаллах // ЖЭТФ. 1977. Т. 73. С. 1936–1943.
7. Barnik M.I., Blinov L.M., Trufanov A.N., Umanski B.A. Flexo-electric domains in liquid crystals // J. Phys. (Paris). 1978. V. 39. P. 417–422.
8. Pollack J.M., Flannery J.B. SID Int. Symposium. Digest of Technical papers. N. Y.: Lewis Winner, 1976. P. 142–143.
9. Pollack J.M., Flannery J.B. Domain formation in homogeneous nematic liquid crystals // Liquid Crystals and Ordered Fluids / Ed. by Johnson J., Porter R. N. Y.: Plenum Press. 1974 V. 1. P. 557–571.
10. Soffer B.H., Boswell D., Lackner A.M., Tanguay A.R., Jr., Strand T.C., Sawchuk A.A. Variable grating mode liquid crystal device for optical processing // Pros. Soc. Photo-opt. Instrum. Engin. 1980. V. 218. P. 81–87.
11. Chavel P., Sawchuk A.A., Strand T.C., Tanguay A.R., Jr., Soffer B.H. Optical logic with variable-grating-mode liquid-crystal devices // Opt. Lett. 1980. V. 5. P. 398–400.
12. Soffer B.H., Margerum J.D., Lackner A.M., Boswell D., Tanguay A.R., Jr., Strand T.C., Sawchuk A.A., Chavel P. Variable grating mode liquid crystal device for optical processing and computing // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1981. V. 70. P. 145–161.
13. Tanguay A.R., Jr., Wu C.S., Chavel P., Strand T.C., Sawchuk A.A., Soffer B.H. Physical characterization of the variable grating mode liquid crystal devices // Opt. Engin. 1983. V. 22. P. 687–694.
14. Tanguay A.R., Jr., Chavel P., Strand T.C., Wu C.S., Soffer B.H. Polarization properties of the variable-grating mode liquid-crystal device // Opt. Lett. 1984. V. 9. P. 174–176.
15. Вистинь Л.К., Яковенко С.С. Определение структуры продольных доменов в нематиках с помощью дифракции // Кристаллография. 1983. Т. 28. С. 992–997.
16. Hinov H.P., Bivas I., Mitov M.D., Shoumarov K., Marinov Y. A further experimental study of parallel surface-induced d.c. flexoelectric domains (PSIFED) (flexodielectric walls) // Liq. Cryst. 2003. V. 30. P. 1293–1317.
17. Lavrentovich O.D., Nazarenko V.G., Sergan V.V., Durand G. Dielectric quenching of dielectric polar surface instability in a nematic liquid crystal // Phys. Rev. A. 1992. V. 45. P. R6969–R6972.

18. *Marinov Y., Hinov H.P., Petrov A.G.* Longitudinal flexoelectric domains in BMAOB nematic layers under the joint action of d.c. and a.c. voltages // *J. Optoelectronics and Adv. Materials*. 2005. V. 7. P. 277–280.
19. *Романов В.П., Скляренко Г.К.* Флуктуации в жидких кристаллах при наличии флексоэлектрического эффекта // *ЖЭТФ*. 1997. Т. 116. С. 1675–1693.
20. *Романов В.П., Скляренко Г.К.* Пороговые эффекты в гомеотропно ориентированных нематических жидких кристаллах во внешнем электрическом поле // *ЖЭТФ*. 1999. Т. 116. С. 543–550.
21. *De Gennes P.-G.* The physics of liquid crystals. Oxford: Clarendon Press, 1974. 333 p.
22. *Meyer R.B.* Piezoelectric effects in liquid crystals // *Phys. Rev. Lett.* 1969. V. 22. P. 918–921.
23. *Pikin S.A.* Structural Transformations in Liquid Crystals, N. Y.: Gordon & Breach, 1991. Ch. 10.
24. *Терентьев Е.М., Пикин С.А.* Нелинейные эффекты в реальной флексоэлектрической структуре // *ЖЭТФ*. 1982. Т. 83. С. 1038–1044.
25. *Cama A., Galatola P., Odano C., Rajteri M.* Non-linear theory of flexoelectrically induced periodic distortions in nematic liquid crystals // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1995. V. 261. P. 177–185.
26. *Watson P.K., Pollack J.M., Flannery J.B.* Conduction currents associated with the variable grating modes in nematic liquid crystals // *Liquid Crystals and Ordered Fluids* / Ed. by Johnson J., Porter R. N. Y.: Plenum Press, 1978. V. 3. P. 421–441.
27. *Butler J.J., Malcuit M.S., Rodrigues M.A.* Diffractive properties of highly birefringent volume gratings: investigation // *JOSA. B*. 2002. V. 19. P. 183–189.
28. *Chen J., Bos P.J., Vithana R., Johnson D.L.* An electro-optically controlled liquid crystal diffraction grating // *Appl. Phys. Lett.* 1995. V. 67 P. 2588–2590.
29. *Bouvier M., Scharf T.* Analysis of nematic-liquid-crystal binary gratings with high spatial frequency // *Opt. Engin.* 2000. V. 39. P. 2129–2137.
30. *Park Jae-Hong, Yu Chang-Jae, Kim Jinyool, Chung Sung-Yeop, Lee Sin-Doo.* Concept of a liquid-crystal polarization beamsplitter based on binary phase gratings // *Appl. Phys. Lett.* 2003. V. 83. P. 1918–1920.
31. *Томилин М.Г.* Жидкие кристаллы: восхождение в третье тысячелетие // *Оптический журнал*. 2001. Т. 68. № 3. С. 78–83.