

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 535.012.21; 535.016; 535.557

СИММЕТРИЧНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ОТКЛИК В ГИБРИДНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ТВИСТ-СТРУКТУРЕ ДВУХЧАСТОТНОГО НЕМАТИЧЕСКОГО ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА

© 2014 г. А. В. Иванов, канд. физ.-мат. наук; Д. А. Вакулин;

Е. А. Коншина, доктор физ.-мат. наук

НИУ ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: avivanov@mail.ifmo.ru

В рамках континуальной теории исследована динамика переориентации директора, влияющая на оптический отклик двухчастотного нематического жидкого кристалла, под действием электрического поля в ячейках с гибридно-ориентированной твист-структурой. Предложенная модель позволяет находить распределение углов директора при произвольных значениях как упругих констант, так и начальных углов наклона. Расчеты проводились без учета гидродинамического потока. Показано, что для двухчастотного жидкого кристалла времена включения и выключения ячейки при приложении к ней импульсов синусоидальных сигналов с низкой и высокой частотами при определенных напряжениях могут быть равны.

Ключевые слова: двухчастотный жидкий кристалл, гибридно-ориентированные структуры, динамика переключения.

Коды OCIS: 160.3710, 230.3720, 120.6780, 130.6780.

Поступила в редакцию: 04.10.2013.

Введение

Гибридно-ориентированные структуры нематического жидкого кристалла (hybrid alignment nematic – HAN) образуются, когда условия межфазного взаимодействия на противоположных границах раздела с ориентирующей поверхностью различаются, например, если одна из ориентирующих поверхностей обеспечивает параллельную ориентацию молекул жидкого кристалла (ЖК), а другая – вертикальную. Для таких структур характерны мультистабильные состояния, быстрое переключение между которыми происходит при более низком пороговом и управляющем напряжениях по сравнению с ячейками с планарной или гомеотропной ориентациями молекул [1–5]. Устройства на основе HAN-структур представляют практический интерес и могут использоваться в переключателях для телекоммуникационных систем. В твист-ячейке с гибридной структурой и углом закрутки, равным 120° ,

было достигнуто время включения, равное 1 мс при толщине слоя нематического ЖК около 4 мкм, однако время выключения было в четыре раза больше и составляло 16 мс [6].

Использование гибридных структур на основе двухчастотного (ДЧ) нематического ЖК (НЖК) позволяет существенно снизить время выключения за счет управления релаксацией молекул путем изменения частоты электрического сигнала [5]. Это обусловлено особенностью частотной дисперсии диэлектрической проницаемости. С увеличением частоты приложенного электрического поля компонент диэлектрической проницаемости, параллельный директору ϵ_{\parallel} , уменьшается, в то время как компонент, перпендикулярный директору ϵ_{\perp} , остается постоянным. В результате наблюдается инверсия знака диэлектрической анизотропии $\Delta\epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$ на переходной частоте f_c . Ниже этой частоты диэлектрическая анизотропия положительна $\Delta\epsilon > 0$, а выше – отрицательна $\Delta\epsilon < 0$.

Результаты исследований гибридных ячеек с ЖК-1001 (НИОПИК, Москва), проведенные ранее, свидетельствуют о том, что динамика процесса переключения гибридно-ориентированных структур представляет собой сложный процесс, на который влияют не только граничные условия, которые определяют начальный угол наклона директора, но и параметры управляющих электрических полей, которые вызывают сложные электрофизические процессы, происходящие в слое ДЧ НЖК. Время переключения в ДЧ НЖК НАН-ячеек с помощью низкочастотного напряжения было меньше, чем время переключения при приложении к ячейке высокочастотного напряжения [7]. В твист-ячейке с гибридной структурой двухчастотного ЖК-1001 был получен симметричный оптический отклик V-образной формы при последовательном приложении синусоидального напряжения с частотами 1 кГц и 30 кГц [8].

Основной целью данной работы было показать возможность симметричного оптического отклика твист-ячейки с гибридно-ориентированной структурой ДЧ НЖК, используя компьютерное моделирование.

Теоретические методы исследования

Для математического описания электрооптических и магнитооптических явлений в ЖК-среде пространственное распределение молекул заменяют распределением директора $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$, который является единичным псевдовектором и характеризует два эквивалентных направления преимущественной ориентации молекул. При этом предполагается, что распределение директора является однородным. Директор, заданный в некоторой точке пространства, определяет локальную систему координат, в которой тензор диэлектрической проницаемости имеет диагональный вид. Для НЖК направление директора совпадает с локальным направлением оптической оси, поэтому оптические свойства ЖК однозначно связаны с расположением директора относительно плоскости поляризации падающего на кристалл света. Для описания самих оптических свойств необходимо уметь определять ориентацию директора при изменении воздействующих на ЖК-среду условий [9].

Под временем включения гибридной структуры с исходной наклонной ориентацией понимается изменение угла наклона директора

в центре ЖК-слоя при переориентации из стационарного в гомеотропное состояние. Таким образом, время выключения τ_{off} определяется временем управляемого переключения полярного угла наклона директора к начальному углу наклона θ_p при приложении напряжения с высокой частотой $f_{\text{ВЧ}}$. Время τ_{off} для ДЧ НЖК, управляемого электрическим полем, будет всегда меньше в несколько раз, чем время естественной релаксации ЖК, и зависит от величины приложенного напряжения, так же как и время отклика на низкой частоте $\tau_{\text{он}}$.

Динамика изменения углов наклона директора ЖК теоретически описывается теорией упругости Франка–Озеена [10, 11], получившей полное экспериментальное подтверждение, теорией гидродинамики Эриксона–Лесли для нематической фазы [12], а также системой электромагнитных уравнений Максвелла. Ввиду сложности получаемой системы уравнений для определения временных зависимостей полярного и азимутального углов наклона директора ЖК необходимо использовать численные методы расчета. Вместе с тем, для ряда частных случаев, например, в случае симметричных граничных условий или в случае равенства значений констант упругости, удается найти аналитическое решение системы указанных дифференциальных уравнений, применяя некоторые приближения [13, 14].

Задача поиска численного решения системы при произвольных граничных условиях сопряжена с выбором алгоритма решения устойчивого к заданию начального приближения [15, 16]. Неверный выбор алгоритма приводит к большому количеству вычислений и малому быстродействию программ.

Методы получения численных решений для расчета углов ориентации оптической оси НЖК при произвольных граничных условиях, в том числе для гибридно-ориентированных твист-структур, были предложены в работах [15–17]. Оптимизация алгоритмов численного решения системы дифференциальных уравнений в указанных методах сводится к определению дополнительных параметров, которые облегчают процедуру интегрирования. Такими параметрами могут быть начальные условия для дифференциальных уравнений или экстремальное значение угла наклона директора.

Численный метод расчета динамики изменения полярного угла для гибридной структуры ДЧ НЖК был предложен в работе [18],

где для описания процесса диэлектрической релаксации применялась теория Дебая. В настоящей работе мы обобщаем эту теорию для твист-структуры ДЧ НЖК с произвольными начальными углами директора на границах ячейки.

В оптической области частот значения компонентов диэлектрической проницаемости НЖК определяются электронными переходами и соответствующими поляризуемостями. Полная поляризация ЖК-среды может быть представлена в виде суммы вкладов электронной и ориентационной составляющих $\mathbf{P} = \mathbf{P}^e + \mathbf{P}^o$. Ввиду наличия диэлектрической анизотропии каждую из составляющих также удобно разделить еще на два компонента – параллельный и перпендикулярный директору $\mathbf{P} = \mathbf{P}_{\parallel} + \mathbf{P}_{\perp}$.

В связи с тем, что электронные поляризационные механизмы релаксации проявляются в области частот порядка 10^9 Гц [19], вклад в поляризацию электронной составляющей становится существенным на значительно меньшем временном отрезке, чем период прикладываемого осциллирующего поля. Таким образом, электронная диэлектрическая проницаемость может считаться постоянной для низких частот управляющего сигнала. Для ориентационной составляющей, перпендикулярной директору, релаксация проявляется в интервале единиц мегагерц [19, 20], поэтому в области частот управляющего сигнала её можно считать постоянной величиной. На рис. 1 представлен типичный график диэлектрического

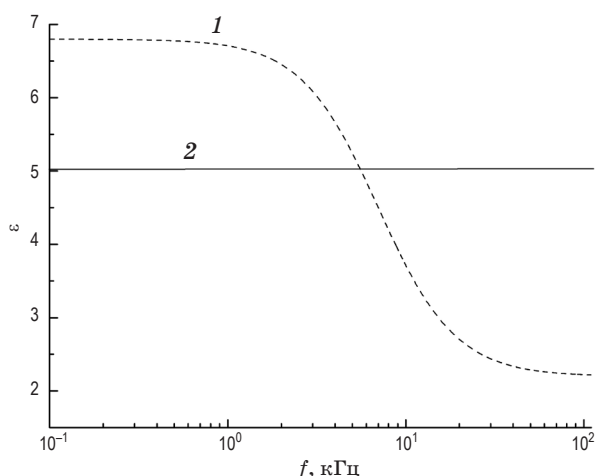


Рис. 1. Частотная зависимость компонентов диэлектрической проницаемости для параметров ЖК-1001. 1 – параллельный компонент, 2 – перпендикулярный компонент директора.

спектра ДЧ НЖК вблизи переходной частоты для параллельной и перпендикулярной составляющих диэлектрической проницаемости.

Ориентационная составляющая поляризации, параллельная директору, удовлетворяет уравнению ланжевеновского типа, которое может быть представлено в виде уравнения Лорентца для дипольной релаксации [18] –

$$\tau \frac{dP_{\parallel}^o}{dt} + P_{\parallel}^o = \alpha E_{\parallel}, \quad (1)$$

где τ – время релаксации для параллельной ориентационной поляризации P_{\parallel}^o , α – константа связи с электрическим полем. Для синусоидального управляющего сигнала $E = E_0 \exp(i2\pi ft)$ уравнение (1) имеет следующее решение:

$$P_{\parallel}^o = \frac{\alpha E_{\parallel}}{1 + i2\pi f\tau}. \quad (2)$$

Расчеты, выполненные в настоящей работе, проводились для твист-структуры, сформированной в ячейке с тонким слоем ДЧ НЖК, заключенным между двумя стеклянными подложками, покрытыми прозрачным проводящим и ориентирующим слоями, обеспечивающими разные начальные углы наклона директора. Ось z системы координат, отнесенной к ячейке, направлена перпендикулярно подложкам, поэтому физические величины, используемые в расчетах, являются функциями, зависящими только от переменной z . Предполагается, что скольжение молекул ЖК в плоскости подложек отсутствует, т.е. граничные условия соответствуют сильному сцеплению. Считается также, что все параметры, за исключением диэлектрической анизотропии, сохраняют свои значения при замене частоты f_1 на f_2 , а сам ЖК не содержит примесей и ионов.

Систему дифференциальных уравнений для расчета динамики изменения угла наклона директора НЖК в гибридно-ориентированной твист-структуре запишем в приближении, когда моментом инерции молекул и потоковыми эффектами, по сравнению с константами упругости и вязкости, можно пренебречь. Представим директор \mathbf{n} в полярной системе координат в виде

$$\mathbf{n} = \cos\theta \cos\varphi \mathbf{x} + \cos\theta \sin\varphi \mathbf{y} + \sin\theta \mathbf{z}, \quad (3)$$

где \mathbf{x} , \mathbf{y} , \mathbf{z} – единичные орты, $(\pi/2 - \theta)$ – полярный угол, φ – азимутальный угол. Выполним

стандартные вариационные процедуры, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \gamma_1 \frac{\partial \theta}{\partial t} &= (K_{33} - K_{11}) \sin \theta \cos \theta \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^2 + \\ &+ f_1(\theta) \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + g(\theta) \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 + P_z(\theta) E_z, \\ \gamma_1 \cos^2 \theta \frac{\partial \varphi}{\partial t} &= g(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \cos^2 \theta f_2(\theta) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2}, \\ \tau \frac{dP_{\parallel}^o}{dt} + P_{\parallel}^o &= \chi_{\parallel}^o \varepsilon_0 E_z \sin \theta, \\ f_i(\theta) &= K_{ii} \cos^2 \theta + K_{33} \sin^2 \theta, \\ g(\theta) &= \sin 2\theta (2f_2(\theta) - K_{33}), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} P_z(\theta) &= (P_{\parallel}^e + P_{\parallel}^o) \cos \theta - (P_{\perp}^e + P_{\perp}^o) \sin \theta, \\ P_{\perp}^{e,o} &= \chi_{\perp}^{e,o} \varepsilon_0 E_z \cos \theta, \quad P_{\parallel}^e = \chi_{\parallel}^e \varepsilon_0 E_z \sin \theta. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь γ_1 – вращательная вязкость ЖК, ε_0 – электрическая постоянная, $\chi_i^{e(o)}$ – электронная (ориентационная) диэлектрическая восприимчивость для i -компонента поляризации, χ_{\parallel}^o – ориентационная диэлектрическая восприимчивость в низкочастотном пределе, K_{11} (splay), K_{22} (twist) и K_{33} (bend) – коэффициенты упругости Франка.

При проведении расчета наведенной поляризации в неоднородной ЖК-среде должны выполняться уравнения Максвелла $\nabla \cdot \mathbf{D} = 0$, $\nabla \times \mathbf{E} = 0$, где $\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}_{\parallel} + \mathbf{P}_{\perp}$ – вектор электрической индукции. Выражение для вектора электрической индукции написано в пренебрежении флексоэлектрическим эффектом. Используя уравнения Максвелла, напряженность электрического поля можно определить следующим образом:

$$E(z, t) = \frac{V(t)}{\varepsilon(z, t)} \left(\int_0^d \varepsilon(z, t)^{-1} dz \right)^{-1}, \quad (6)$$

где $V(t)$ – разность потенциалов между двумя электродами, d – толщина ЖК-слоя, а $\varepsilon(z, t)$ – диэлектрическая проницаемость, которая определяется как

$$\begin{aligned} \varepsilon(z, t) &= 1 + (\chi_{\parallel}^e + \chi_{\parallel}^o(z, t)) \sin^2 \theta(z, t) + \\ &+ (\chi_{\perp}^e + \chi_{\perp}^o) \cos^2 \theta(z, t). \end{aligned} \quad (7)$$

Следует обратить внимание на то обстоятельство, что величина χ_{\parallel}^o зависит от частоты управляющего сигнала (2). Таким образом, для описания динамики изменения углов наклона

директора под действием электрического поля требуется найти самосогласованное решение системы уравнений (4) – (7) для начальных значений углов директора.

Результаты моделирования и их обсуждение

Компьютерное моделирование проводилось с помощью программного пакета Математика 8 (Wolfram research), адаптивные алгоритмы которого позволяют эффективно получить стабильное решение системы уравнений. В качестве начальных условий задавалось стационарное распределение директора путем численного решения системы уравнений с начальными углами в отсутствие управляющего напряжения. Временной отрезок действия управляющего сигнала делился на большое количество малых участков, в пределах которых управляющее напряжение можно было считать постоянным. После этого для каждого такого участка задавалась зависимость напряженности электрического поля (6) от координаты z и вычислялись зависимости поляризации (5) от координаты. Эти зависимости использовались для расчета углов директора как функции координаты и времени. Значения, взятые на границе временного отрезка, подставлялись в выражение для напряженности электрического поля, и цикл повторялся вновь для следующего временного участка. Точность получаемых значений углов наклона оптической оси оптимизировалась относительно величины временного отрезка.

Расчеты были выполнены с использованием следующих параметров, близких к параметрам ЖК-1001: $\gamma_1 = 0.377$ Па с, $f_c = 5.92$ кГц, $\Delta\varepsilon(3 \text{ кГц}) = 1.26$, $\Delta\varepsilon(30 \text{ кГц}) = -2.55$, $\chi_{\perp} = 5.0$, $\chi_{\parallel}^e = 2.2$, $\chi_{\parallel}^o = 4.8$, $d = 8.0$ мкм. При вычислениях использовались следующие значения коэффициентов упругости: $K_{11} = 15$ пН, $K_{33} = 24$ пН, $K_{22} = 10$ пН, порядок величины которых и соотношение между которыми выбирались на основании известных из литературы данных о ДЧ НЖК [18, 22]. Необходимо отметить и то обстоятельство, что в рассматриваемом нами случае влияние управляющего напряжения на вращение ЖК-молекул превосходит действие упругих сил, и, как следствие, вариация значений коэффициентов упругости незначительно сказывается на результатах расчета динамики изменения углов. Значение

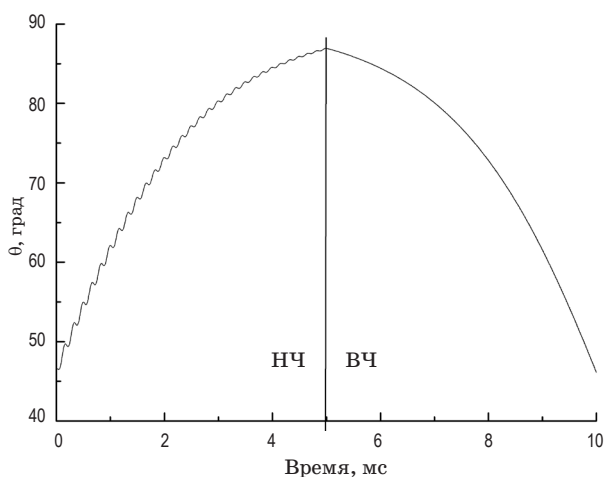


Рис. 2. Изменение угла наклона директора ДЧ НЖК в зависимости от времени. Зависимость получена с помощью компьютерного моделирования при приложении к ячейке синусоидального напряжения с амплитудами 51 В на низкой частоте (НЧ) 3 кГц и 37.2 В на высокой частоте (ВЧ) 30 кГц.

времени релаксации для параллельной составляющей ориентационной поляризации определялось из частотной зависимости (2) и соответствовало $\tau = 22.7$ мкс.

Результаты расчета представлены на рис. 2, где показана временная зависимость полярного угла наклона директора θ в центре ЖК-ячейки при последовательном приложении к ячейке синусоидального напряжения с амплитудами 51 и 37.2 В на частотах 3 и 30 кГц соответственно. При этом угол наклона директора в плоскости xz изменяет свое значение от 46° до 87° и обратно за одинаковые промежутки времени, равные 5 мс.

Полученные в результате численного расчета времена близки к экспериментальным результатам для твист-ячейки с гибридной ориентацией и толщиной слоя ЖК-1001 равной 8 мкм [8]. Для получения гибридной структуры на подложки плоскопараллельной ячейки наносили разные ориентирующие слои. Наклонная вертикальная ориентации на одной из подложек ЖК-ячейки создавалась путем осаждения слоя двуокиси церия, полученного наклонным напылением с помощью лазера в вакууме. Эта технология позволяет варьировать начальный угол наклона директора в интервале от 36° до 84° путем модификации нанотекстуры поверхности CeO_2 [7]. Для получения гомогенной ориентации молекул ЖК с углом наклона, близким к нулю, на противоположную подложку наносили слой а-С:Н, получен-

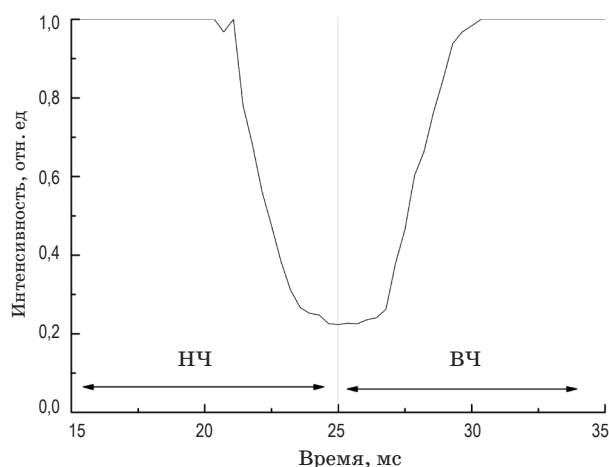


Рис. 3. Симметричный оптический отклик гибридно-ориентированной твист-ячейки с толщиной слоя ЖК-1001, равной 8 мкм, экспериментально полученный при приложении синусоидального напряжения 50 В на частоте 1 кГц и 38 В на частоте 30 кГц [6].

ный осаждением паров ацетона в плазме тлеющего разряда на постоянном токе под углом 5° по отношению к вертикальной оси устройства. Твист-ячейка собиралась таким образом, чтобы проекции вертикальных осей при осаждении ориентирующих слоев были перпендикулярны, что обеспечивало ортогональное положение проекций осей молекул ЖК вблизи границы раздела сред на противоположных подложках. Оптический отклик гибридной твист-ячейки имел V-образную форму при последовательном приложении синусоидальных напряжений 50 и 38 В на частотах 1 и 30 кГц соответственно (рис. 3), а времена включения и выключения были около 5 мс. Экспериментально было установлено, что при понижении напряжения до 30 В наблюдалось значительное снижение интенсивности отклика при сохранении его формы. При изменении формы переменного электрического сигнала с синусоидальной на меандр или приложении к этой ячейке импульса постоянного напряжения характер отклика изменялся, а время реакции существенно увеличивалось.

Отсутствие точных данных о параметрах ДЧ НЖК, таких как переходная частота, коэффициенты упругости, частотная зависимость диэлектрической проницаемости и время релаксации τ , привело к некоторому отличию теоретически полученных характеристик управляющего электрического сигнала от экспериментальных данных, полученных ранее [8].

Заключение

В результате компьютерного моделирования теоретически была подтверждена возможность получения симметричного оптического отклика ДЧ НЖК при определенных параметрах управляющих электрических сигналов. Отличие теоретических значений характеристик управляющего сигнала от экспериментальных связано с отсутствием точных данных о параметрах ДЧ НЖК, а также с тем, что решение системы дифференциальных уравнений соответствовало условиям сильного сцепления на

межфазной границе ЖК с обеими ориентирующими поверхностями, что не характерно для гибридных структур. Полученные результаты моделирования оптического отклика ЖК-устройств на основе двухчастотных нематических смесей имеют практическую ценность и были использованы при разработке переключателей для телекоммуникационных систем.

Работа была начата при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках контракта 11.519.11.4010 и продолжена при финансировании из централизованных средств НИУ ИТМО.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Derfel G.* Stationary states of hybrid aligned flexoelectric nematic layers // *Liquid Crystals*. 2007. V. 34. № 10. P. 1201–1214.
2. *Lu Y.-Q., Liang X., Wu Y.-H., Du F., Wu S.-T.* Dual-frequency addressed hybrid-aligned nematic liquid crystal // *Appl. Phys. Lett.* 2004. V. 85. № 16. P. 3354–3356.
3. *Seog Gwag J., Sohn K., Kim Y.-K., Kim J.-H.* Electro-optical characteristics of a chiral hybrid in-plane switching liquid crystal mode for high brightness // *Optics Express*. 2008. V. 16. №. 16. P. 12220–12226.
4. *Drolet J.-J. P., Patel J. S., Haritos K. G., Xu W., Scherer A., Psaltis D.* Hybrid-aligned nematic liquid-crystal modulators fabricated on VLSI circuits // *Optics Letters*. 1995. V. 20. № 21. P. 2222–2224.
5. *Jewell S.A., Taphouse T.S., Sambles J.R.* Rapid switching in a dual-frequency hybrid aligned nematic liquid crystal cell // *Appl. Phys. Lett.* 2005. V. 87. P. 021106(3).
6. *Kubono A., Kyokane Y., Akiyama R., Tanaka K.* Effects of cell parameters on the properties of hybrid twisted nematic displays // *Appl. Phys.* 2001. V. 90. № 12. P. 5859–5865.
7. *Коншина Е.А., Иванова Н.Л., Парфенов П.С., Федоров М.А.* Динамика переориентации двухчастотного нематического жидкого кристалла с квазигомеотропной структурой // *Оптический журнал*. 2010. Т. 77. № 12. С. 45–51.
8. *Коншина Е.А., Вакулин Д.А., Иванова Н.Л., Гавриш Е.О., Васильев В.Н.* Особенности оптического отклика гибридно-ориентированных ячеек с двухчастотным нематическим жидким кристаллом // *ЖТФ*. 2012. Т. 82. № 5. С. 66–70.
9. *Палто С.П.* Алгоритм решения оптической задачи для слоистых анизотропных сред // *ЖЭТФ*. 2001. Т. 119. С. 638–648.
10. *Oseen C.W.* The theory of liquid crystals // *Trans. Faraday Soc.* 1933 V. 29. P. 883–899.
11. *Frank F.C.* Liquid crystals on the theory of liquid crystals // *Discuss. Faraday Soc.* 1958. V. 25. P. 19–28.
12. *Leslie F.M.* Some constitutive relations for liquid crystals // *Arch. Ration. Mech. Anal.* 1968. V. 28 P. 265–283.
13. *Stewart I.W.* The Static and Dynamic Continuum Theory of Liquid Crystals // London. Taylor & Francis. 2004. 360 p.
14. *Dayton D., Browne S., Gonglewski J., and Restaino S.* Characterization and control of a multielement dual-frequency liquid-crystal device for high-speed adaptive optical wave-front correction // *Appl. Opt.* 2001. V. 40. P. 2345–2355.
15. *Chen C.-J., Lien A., Nathan M.I.* Simple method for the calculation of the deformation profiles in chiral nematic liquid crystal cells with asymmetric pretilt // *J. Appl. Phys.* 1997. V. 81. P. 70–73.
16. *Симоненко Г.В., Цой В.И., Яковлев Д.А.* Метод вычисления углов ориентации оптической оси ЖК, находящегося во внешнем электрическом поле // *Комп. опт.* 2001. Т. 21. С. 88–91.

17. *Deuling H.J.* Deformation pattern of twisted nematic liquid crystal layers in an electric field // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1974. V. 27. P. 81–93.
18. *Mottram N.J., Brown C.V.* Pulsed addressing of a dual-frequency nematic liquid crystal // *Phys. Rev. E.* 2006. V. 74. P. 031703(7).
19. *Kresse H.* *Physical Properties of Liquid Crystals: Nematics.* London: IEEE, 2001. 671 p.
20. *Maier W., Meier G.* Eine einfache Theorie der dielectricischen Eigenschaftenhomologen orientierter Kristallin-flüssiger Phasen des Nematischen Typs // *Z. Naturforsch. A.* 1961. V. 16. P. 262–267.
21. *De Gennes P.G., Prost J.* *The Physics of Liquid Crystals.* Oxford: Oxford Science, 1993. 616 p.
22. *Палто С.П.* Электрооптика и фотоника жидких кристаллов // *УФН.* 2005. Т. 175. № 7. С. 784–790.