

Для МГОУ это был первый международный симпозиум, организованный и проведенный университетом. В работе симпозиума и молодежной школы приняли участие около 140 специалистов, преподавателей, аспирантов, студентов. Кроме организаций из стран СНГ, в нем участвовали представители организаций Южной Кореи, Гонконга, Германии. Был представлен 71 доклад и 7 изобретений на конкурс.

Состоявшийся симпозиум ADLT-13 явился важным этапом консолидации и координации исследований и разработок, выполняемых по его тематике в Белоруссии, Украине и России.

**INTERNATIONAL SYMPOSIUM
«ADVANCED DISPLAY & LIGHTING TECHNOLOGIES» (ADLT-13)
IN MOSCOW REGION STATE UNIVERSITY (MRSU)**

V. Belyaev*, I. Kompanets, A. Bugrimov***

**Moscow Region State University*

10A, Radio str., Moscow, 105005, Russia

***P.N.Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences*

53, Leninskiy prospekt, Moscow, 119991, , Russia

Abstract. An analysis of organization as well as scientific reports of the 21st International symposium «Advanced display & lighting technologies» (ADLT-13) held in Moscow Region State University (MRSU) in April 2013 is presented.

Keywords: display devices and systems, lighting technology

УДК 535.012.2

**ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖК ЯЧЕЕК
С ПРОИЗВОЛЬНЫМ КРАЕВЫМ УГЛОМ НАКЛОНА ДИРЕКТОРА**

В.В.Беляев, А.С.Соломатин, Д.Н.Чаусов

**Московский государственный областной университет
105005, Москва, ул. Радио, 10а*

Аннотация. Выполнена теоретическая и компьютерная модель зависимости разности фазовой задержки $\Delta\Phi$ от угла преднаклона θ_0 директора ЖК в ячейках как с однородным, так и с неоднородным распределением $\theta(z)$ директора по толщине ячейки. Рассмотрены конфигурации как с одинаковыми углами на противоположащих подложках ячейки, так и с разными углами. Предложен метод расчета зависимости нормированной разности фазовых задержек в зависимости от закона распределения угла наклона директора по толщине ячейки или, при известном законе распределения, от краевых углов (одинаковых или разных на

противоположных сторонах). Метод применим для различных типов ячеек ЖК, с положительной или отрицательной диэлектрической анизотропией, однородно или неоднородно распределенных. В частности, он может применяться для расчета оптических компенсаторов.

Ключевые слова: ЖК ячейка, директор ЖК, краевой угол, гибридная ячейка.

1. Введение и постановка задачи

Во многих типах современных ЖК дисплеев используется наклонное и/или неоднородное распределение ЖК директора [1-3]. Это может улучшить время электрооптического отклика или диапазон углов обзора дисплея [4]. Следовательно, актуальны исследования оптических свойств и, в частности, двулучепреломления, в зависимости от распределения директора ЖК в ячейке. Двулучепреломление, в зависимости от распределения директора ЖК в ячейке, определяет разность фазовой задержки обыкновенного и необыкновенного лучей при их прохождении через ячейку, расположенную между скрещенными поляризаторами. Данная зависимость хорошо исследована для однородных планарно или гомеотропно ориентированных ячеек. Однако нет достаточных данных по ячейкам с неоднородным распределением директора ЖК. Расчет зависимости разности фазовой задержки от угла преднаклона директора ЖК как в однородно, так и в неоднородно распределенных ячейках является одной из целей данной работы.

В предыдущих публикациях [5, 6] эта задача уже затрагивалась как для случая одинаковых углов на противоположных сторонах слоя ЖК, так и для разносторонних ячеек. Использовалось одноконстантное приближение (константы упругости Франка для нематических ЖК $K_{11}=K_{33}$) для упрощения расчетов. При одноконстантном приближении, упругая энергия ЖК не зависит от локального угла наклона директора, и угол линейно зависит от координаты по толщине ячейки [5]. Углы рассматривались в диапазоне от 0° до 90° .

Рассмотрены были как типичные для нематических ЖК распределения угла наклона директора (геометрия поперечного изгиба или «splay» для $\theta_0 < 45^\circ$ и геометрия продольного изгиба или «bend» для $\theta_0 > 45^\circ$), так и не реализующиеся обычно распределения («splay» $\theta_0 > 45^\circ$ или «bend» для $\theta_0 < 45^\circ$) (рис.1). Такие нетипичные распределения могут возникать при динамическом переключении [2,3], а также при нанесении на поверхность ячеек слоев двулучепреломляющего материала, например, полимерного ЖК [7,8].

В данной работе представлены результаты компьютерного моделирования зависимости нормированной фазовой задержки $\Phi(\theta_0)$ от угла преднаклона для различных типов двулучепреломляющих пленок с неоднородным распределением угла наклона директора ЖК или эквивалентного ему двулучепреломляющего материала (например, в полимерах):

- Нематическая ЖК ячейка с симметричными краевыми углами ($0^\circ < \theta_0 < 90^\circ$) наклона директора на противоположащих сторонах, как с положительным (рис.2), так и с отрицательным двулучепреломлением.
- Нематическая ЖК ячейка с несимметричными краевыми углами ($0^\circ < \theta_0 < 90^\circ$) наклона директора на противоположащих сторонах (разносторонняя).
- Нематическая ЖК ячейка с углом преднаклона директора $\theta_0 > 90^\circ$.

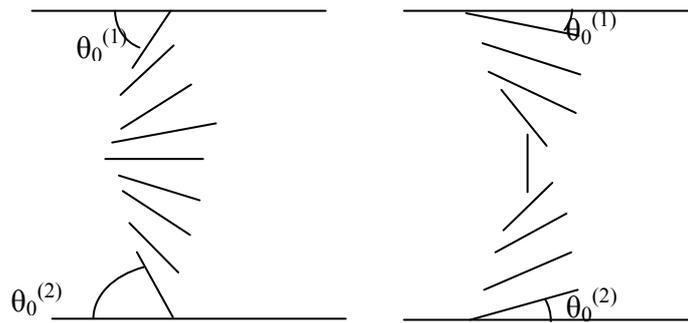


Рис.1. ЖК ячейка с симметричными углами на противоположных сторонах ($\theta_0^{(1)}=\theta_0^{(2)}$). С слева и В справа [5].

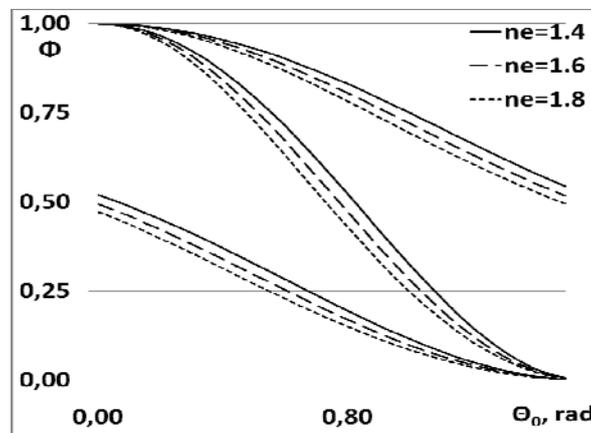


Рис.2. Зависимость разности фазовых задержек Φ от угла преднаклона θ_0 директора ЖК с «spray» (верх), однородная (посередине) и «bend» (нижняя кривая), $n_o=1,5$, n_e представлены различные.

2. Результаты

Во всех случаях, рассмотренных в данной работе, разность фазовых задержек $\Delta\Phi$ определяется выражением (1):

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\int_0^L \frac{n_o n_e dz}{(n_o^2 \cos^2 \theta(z) + n_e^2 \sin^2 \theta(z))^{1/2}} - n_o L \right], \quad (1)$$

где L толщина ячейки, λ длина волны, n_o и n_e показатели преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей, соответственно, $\theta(z)$ зависимость угла наклона директора от координаты по толщине ячейки.

Свет падает нормально к поверхности, принято одноконстантное приближение, то есть константы упругости Франка $K_{11}=K_{33}$.

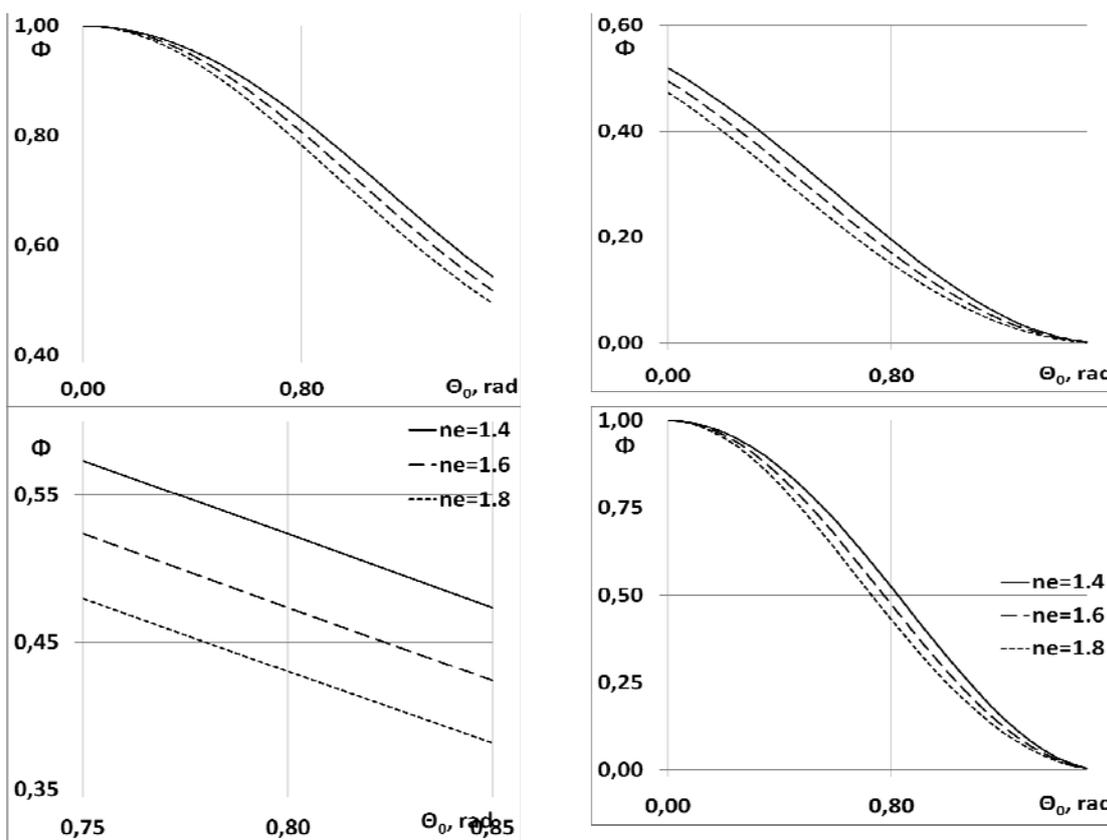


Рис.3. Зависимости $\Phi(\theta_0)$ для ЖК ячеек с положительной и отрицательной оптической анизотропией и законом распределения, сверху по часовой стрелке: «splay»; «bend»; однородным зависимостью $\Phi(\theta_0)$ для однородного распределения при $\theta_0 \approx \pi/4$. $n_o=1,5$.

Нормированная разность фазовых задержек $\Phi = \Delta\Phi / \Delta\Phi_{\max}$ введена в [5]. Разность фазовых задержек $\Delta\Phi$ отнесена к ее максимальному значению $\Delta\Phi_{\max} = 2\pi\Delta nL/\lambda$, где $\Delta n = n_e - n_o$ двулучепреломление ЖК. Максимальная величина $\Delta\Phi_{\max}$ практически достижима в ячейках с планарной ориентацией ($\theta_0^{(1)} = \theta_0^{(2)} = 0$). Зависимость разности фазовых задержек $\Delta\Phi$ от угла преднаклона θ_0 была количественно определена для ЖК ячеек с различными (однородной, «splay» и «bend») законами распределения угла наклона по толщине ячейки (Рис.1) [5]. При симметричных краевых углах на противоположных сторонах реализуются «splay» или «bend» распределения. Типичная зависимость $\Phi(\theta_0)$ для S, H и V распределений при различных значениях n_e и одной и той же величине n_o изображена на рис.2. В [5] дана аналитическая аппроксимация для случаев $\theta_0 \ll 1$, $\theta_0 \rightarrow \pi/2$, $\theta_0 \sim \pi/4$.

На рис 3 показаны зависимости Φ от θ_0 ($0^\circ < \theta_0 < 90^\circ$) для $n_o=1,5$ и $n_e=1,4; 1,6; 1,8$. Зависимости $\Phi(\theta_0)$ для ЖК с положительной и отрицательной оптической анизотропией, в целом, подобны тем, которые найдены для ЖК с $\Delta n > 0$ [5], для них характерно увеличенное значение Φ , возрастающее по мере убывания n_e . Особенно наглядно это видно на квазилинейной части зависимости $\Phi(\theta_0)$ вблизи $\theta_0 \approx \pi/4$ (рис.3 слева внизу).

Это верно для всех трех рассмотренных в данной работе законов распределения.

Разносторонние ячейки трех разных типов (с несимметричными углами преднаклона директора ЖК на противоположных сторонах) рассмотрены (рис.4) в данной работе под следующими обозначениями: Нуб90°, НубS, и НубB. В каждом из этих случаев распределения директора ЖК, краевые углы $\theta_0^{(1)}$, $\theta_0^{(2)}$ изменяются в диапазоне от 0° до 90°. В случае Нуб90° угол наклона директора $\theta(z)$ изменяется от $\theta_0^{(1)}$ до $\theta_0^{(2)}$ и распределение может, при небольшом угловом диапазоне значений θ , быть сопоставимо с однородным при одинаковых краевых углах. По мере роста углового диапазона (вплоть до 90°), такая аналогия уже неприемлема. В случаях НубS и НубB угловой диапазон, в котором изменяется угол наклона директора, может приближаться к 180°. А если использовать полимерные двулучепреломляющие материалы, то угловой диапазон может быть многократно больше.

В случае конфигурации НубS, распределение угла $\theta(z)$ по толщине ячейки таково, что угол наклона в средней части ячейки равен нулю (в каком-то относительно тонком слое ЖК). Если краевые углы мало различаются, то сходно с «splay». В случае конфигурации НубB, распределение угла наклона директора $\theta(z)$ от толщины ячейки таково, что в некотором тонком слое ЖК угол равен 90°. При мало различающихся краевых углах, сходно с «bend». Распределение угла по толщине ячейки линейное.

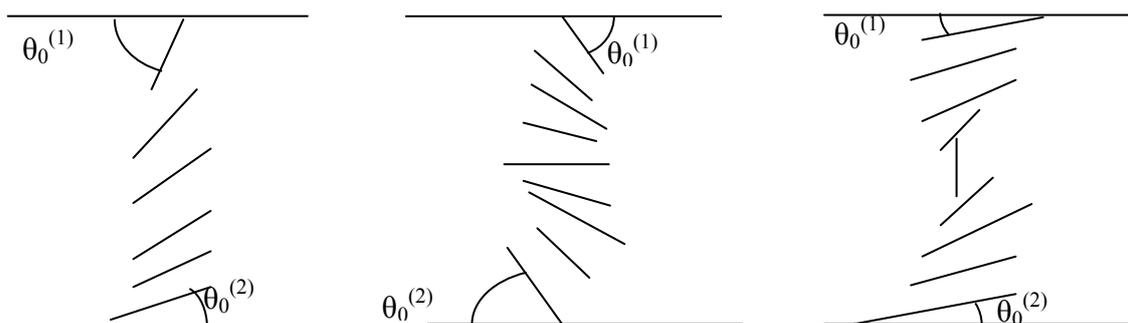


Рис 4. Разносторонние ЖК ячейки с несимметричными углами преднаклона директора ЖК на противоположных сторонах. Слева направо: Нуб90°, НубS, НубB.

В случае распределения Нуб90° (рис.5) диапазон изменения нормированной разности фазовых задержек Φ около 0.5. Отличия от 0.5 обусловлены величиной n_e . Кривые на рис.5(справа) несимметричны относительно кривой, соответствующей $\theta_0^{(2)}=0.25\pi$. Данные кривые показывают, как изменяется Φ при изменении одного из краевых углов от 0° до 90° при постоянном другом краевом угле (на противоположащей стороне). В [5] приведена кривая для $\Phi(\theta_0^{(1)}=\theta_0^{(2)})$ для случая однородного распределения директора ЖК в ячейке при таких же показателях преломления. Она показывает, что Φ изменяется от 0 до 1 по мере возрастания θ_0 . Таким образом, для разносторонних ячеек изменение Φ приблизительно вдвое меньше, чем для рассмотренного в [5].

Основные различия зависимости $\Phi(\theta_0^{(1)})$ для НубS, НубB от Нуб90° наблюдаются при $\theta_0^{(2)}\sim 0.5\pi$ (НубS; рис.5) и при малых значениях $\theta_0^{(2)}$ (НубB). При $\theta_0^{(2)}=0.45\pi$ зависимость $\Phi(\theta_0^{(1)})$ для НубS изменяется от 0.53 до 0.63 и кривая достигает максимума при

$\theta_0^{(1)} \rightarrow 0.2\pi$. Если $\theta_0^{(2)} = 0.45\pi$ то зависимость $\Phi(\theta_0^{(1)})$ для НубВ изменяется от 0.37 до 0.48 кривая достигает минимума при $\theta_0^{(1)} \rightarrow 0.3\pi$.

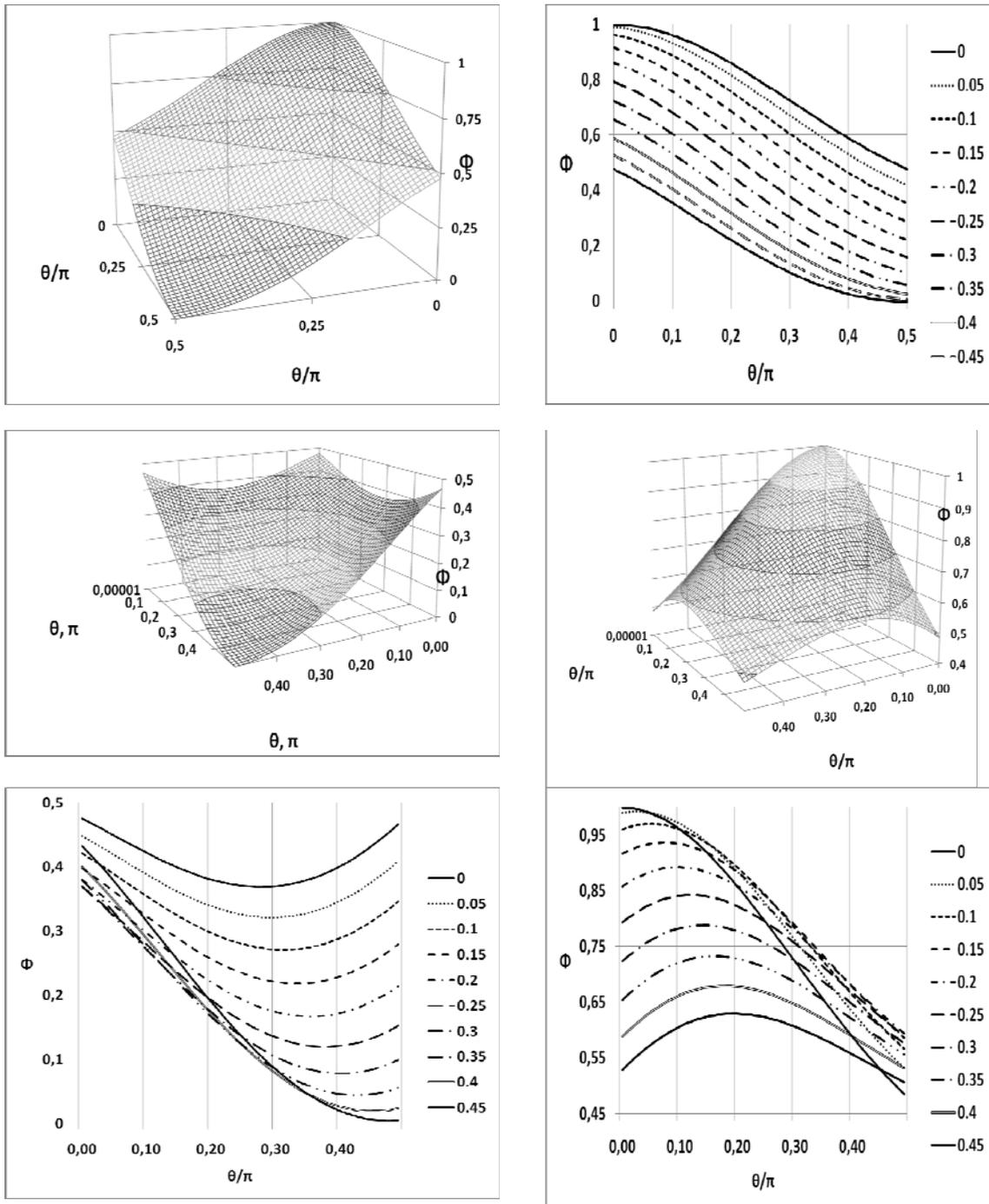


Рис.5. Зависимости $\Phi(\theta_0^{(1)}, \theta_0^{(2)})$ для распределения директора по типу Нуб90° (сверху). Зависимости $\Phi(\theta_0^{(1)}, \theta_0^{(2)})$ для НубS (слева) и для НубВ (справа) при постоянном значении $\theta_0^{(2)}$.

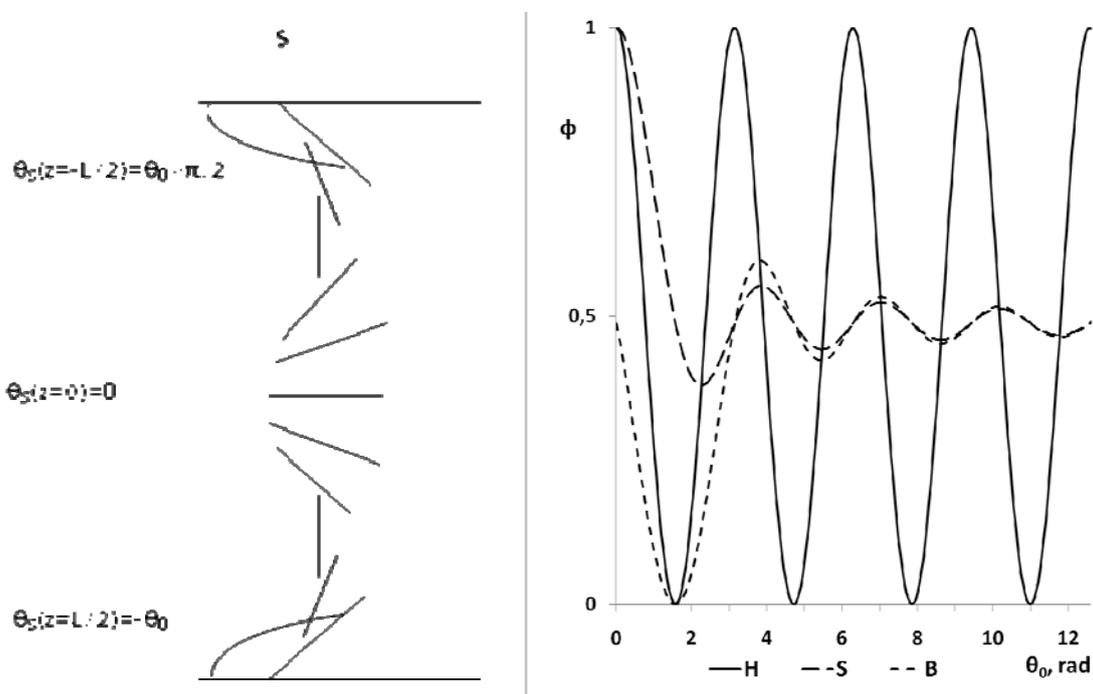


Рис.6. Распределение директора ЖК по толщине ячейки (слева) и зависимость $\Phi(\theta_0)$ для расширенного диапазона значений угла θ_0 (справа).

Выше уже упоминалась типичная ЖК ячейка со статическим распределением $0 \leq \theta_0 \leq \pi/2$. Распределение может быть типа «spray» в планарных ячейках (с положительной диэлектрической анизотропией) и типа «bend» в гомеотропных (с отрицательной диэлектрической анизотропией). Кроме того, возможно получение (временно, в моменты переключения напряжения) распределения с $\theta_0 > \pi/2$. Так, при больших значениях электрического поля ($U \gg U_{th}$), приложенного к ячейке, ориентация почти однородная (кроме узких приповерхностных слоев) и притом либо гомеотропная, либо планарная (в зависимости от диэлектрической анизотропии). Если выключить поле, то возможны сложные конфигурации распределения директора по толщине ячейки, быстро сменяющие друг друга. Таким образом, при переменном поле, в зависимости от профиля зависимости напряжения от времени, возможны многооборотные распределения угла наклона директора по толщине ЖК ячейки [9,10]. Также его можно получить, используя двулучепреломляющие полимеры, нанеся их послойно на подложки ячейки.

Рассмотрим зависимость $\Phi(\theta_0)$ для S- и B-геометрий, в случае если $\theta_0 > \pi/2$. На рис.6(слева) приведен пример такого распределения. Для него характерно наличие нескольких слоев ЖК, в которых директор ориентирован гомеотропно (B распределение с $\theta_0 > \pi/2$) или планарно (S распределение с $\theta_0 > \pi/2$). На рис.6 (справа) зависимость $\Phi(\theta_0)$ показана для всех трех конфигураций при широком диапазоне значений угла наклона директора ЖК. Хорошо заметно, что для неоднородных ячеек при больших углах (многих поворотах ЖК директора) становится неважно, как ориентирован директор в тон-

ком слое ЖК посередине ячейки, то есть принадлежит ли она к В или к S ячейкам, и нормированная разность фазовых задержек по мере роста угла постепенно стремится к значению $\Phi=0,5$. В отличие от неоднородных ячеек, однородные четко периодичны и эквивалентны обычным (малоугловым) однородным ячейкам по величине Φ , то есть для однородных ячеек $\Phi(\theta_0+2\pi N)=\Phi(\theta_0)$.

Выводы

Предложен метод расчета зависимости нормированной разности фазовых задержек в зависимости от закона распределения угла наклона директора по толщине ячейки или, при известном законе распределения, от краевых углов (одинаковых или разных на противоположных сторонах). Метод применим для различных типов ячеек ЖК, с положительной или отрицательной диэлектрической анизотропией, однородно или неоднородно распределенных. В частности, он может применяться для расчета оптических компенсаторов [5, 6, 11-18].

Работа была выполнена при поддержке по грантам РФФИ № 12-07-31172_мол-а, 12-07-90006-Бел_а и по грантам Президента Российской Федерации НШ-1495.2012.8 и МК-1969.2012.9

ЛИТЕРАТУРА

1. *Hanaoka K, Nakanishi Y, Inoue Y, Tanuma S, Koike Y.* SID'04 Digest. 2004. pp.1200-1203.
2. *Bos P.J.* 14th IDRC Proc. 1994. p.118.
3. *Mi X.-D, Xu M, Yang D.-K, Bos P.J.* SID'99 Digest. 1999. pp.24-27.
4. *Yang D.K, Wu S.T.* Fundamentals of Liquid Crystal Devices. NY.: Wiley. 2006.
5. *Belyaev V.V, Solomatin A.S, Chausov D.N, Gorbunov A.A.* SID'12 Digest. 2012. pp.1422-1425.
6. *Belyaev V.V, Solomatin A.S, Chausov D.N.* Optical properties of liquid crystal cells with hybrid orientation and negative birefringence. SID'13 Digest. 2013.
7. *Pochi Yeh, Claire Gu.* Optics of Liquid Crystal Displays. NY: Wiley Series in Pure and Applied Optics. 2009.
8. United States Patent 8377558.
9. *van Doorn C.Z.* Dynamic behavior of twisted nematic liquid crystal layers in switched fields. J. Appl. Phys. 46. 1975. pp.3738-3745.
10. *Беляев В.В, Гребенкин М.Ф, Калашиников А.Я.* Динамика электрооптического отклика в твист-ячейке с двухчастотной адресацией. 12-й Международный Симпозиум Дисплейных Технологий. Королев. 2003. 120 с.
11. *Herrington, Mark.* Electrical and optical effects in hybrid liquid crystal cells. University of Southampton, Faculty of Physical and Applied Sciences: Physics and Astronomy, Doctoral Thesis. 2011
12. *Jean-Jacques P. et al.* Optics Letters. 1995. Vol. 20. p.2222.
13. *Fuzi Yang et al.* Optics Express 2007. Vol. 15. Issue 7. pp. 4192-4197.
14. *Stephen B et al.* Optics Letters 2012. Vol. 37. Issue 13. pp. 2436-2438

15. *Beresnev G.A, Chigrinov V.G, Grebenkin M.F.* Crystallography Reports. 1982. 27, 1019-1021
16. *Dascalu C.* Revista Mexicana de Fisica. 2001. 47. 281-285.
17. *Nie X.* Anchoring energy and pretilt angle effects on liquid crystal response time. Ph.D. Thesis. University of Central Florida. 2007.
18. *Belyaev V.V, Mazaeva V.G.* SID'11 Digest 2011. pp.1412-1415.

OPTICAL PROPERTIES OF THE LIQUID CRYSTAL IN CELLS WITH ARBITRARY LC DIRECTOR PRETILT ANGLE

V. Belyaev*, A. Solomatin, D. Chausov****

**Lab for Theoretical and Applied Nanotechnology,
Moscow Region State University, Russia
10A, Radio str., Moscow, 105005, Russia*

***Moscow Region State University, Russia
10A, Radio str., Moscow, 105005, Russia*

Abstract. New optical and electro-optical methods of liquid crystal (LC) director pretilt angle measurement are described for LC cells with homogeneous and inhomogeneous LC director distribution. The LC pretilt on both LC substrates can have the same or opposite direction. Phase retardation difference of both extraordinary and ordinary polarized rays passing through a LC cell with homogeneous and inhomogeneous LC director distribution has been calculated vs. the LC pretilt angle θ_0 on the cell's substrates in the range $0 \leq \theta_0 \leq 90^\circ$. Experimental procedure of phase retardation difference determination by measurement the LC cell transmission between crossed polarizers for the cells with the LC tilted alignment is described. The method developed can be used also in optical compensator design. A new method has been developed to measure the LC pretilt angle in the cells with sophisticated director configuration. It provides accurate data without LC cell mechanical rotation. A method of calculation of increments of the phase retardation difference for the cells with different boundary conditions and LC polarity is developed. The approach developed allows also a selection of the LC director configuration to change the LC cell phase retardation difference that can be used in optical compensator design. The method can be used for different LC cells with an arbitrary given LC director distribution and symmetric or asymmetric boundary conditions. Influence of Franck elastic coefficients on optical properties of such cells should be investigated. Main restriction of the method described is necessity of knowledge of the director distribution in the LC cell. In the case of unknown geometry of the cell application of other method (e.g., total internal reflection at the LC-orienting layer interface or reflection from an LC cell vs. applied voltage) is to use. Besides of the liquid crystal any other birefringent material can be used to develop optical elements of different application.

Keywords: liquid crystal, LC director pretilt angle, LC director distribution, phase retardation difference