

УДК 535.012.2

DOI: 10.18384/2310-7251-2016-2-37-50

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ПОПЕРЕЧНОГО И ПРОДОЛЬНОГО ИЗГИБА НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГИБРИДНЫХ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЯЧЕЕК С ПРОИЗВОЛЬНЫМ УГЛОМ ПРЕНАКЛОНА НА ОРИЕНТИРУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Соломатин А.С., Беляев В.В.

*Московский государственный областной университет,
Учебно-научная лаборатория теоретической и прикладной нанотехнологии.
105005, г. Москва, ул. Радио, д. 10А, Российская Федерация*

Аннотация. Изложены результаты моделирования зависимости ориентационно-оптических свойств ЖК ячеек от деформации поперечного и продольного изгиба. Рассмотрены ЖК ячейки с произвольными приповерхностными углами и различными типами распределения директора ЖК для случая нематических ЖК с разными коэффициентами упругости ($K_{11} \neq K_{33}$). Уточнена, для многих практически важных случаев ЖК ячеек различной ориентационной конфигурации, применимость одноконстантного приближения ($K_{11} = K_{33}$).

Ключевые слова: оптические свойства, жидкокристаллические ячейки, фазовая задержка, упругие свойства.

OPTICAL PROPERTIES OF LIQUID CRYSTAL CELLS WITH OBLIQUE PRE-TILT ANGLE IN THE SPLAY AND BEND CASES OF DIRECTOR CONFIGURATION DEFORMATIONS

A. Solomatin, V. Belyaev

Education & Research Lab of Theoretical and Applied Nanotechnology, Moscow State Region University, ul. Radio 10a, 105005 Moscow, Russia

Abstract. We report the results of simulation of the dependence of the orientation-optical properties of liquid-crystal (LC) cells on splay and bend configuration deformations. We

consider LC cells with arbitrary pre-tilt angles and different types of LC director distributions for the case of nematic LCs with different elasticity coefficients ($K_{11} \neq K_{33}$). For many practically important cases of nematic LC cells with various K_{33}/K_{11} ratios, the applicability of the one-constant approximation ($K_{11} = K_{33}$) is specified.

Keywords: optical properties, liquid-crystal cells, phase retardation, elastic properties.

1. Введение

Во многих типах современных ЖК дисплеев используется наклонное и/или неоднородное распределение ЖК директора [1; 2]. Это может улучшить время электрооптического отклика или диапазон углов обзора дисплея [3]. 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 данной работе представлены результаты компьютерного моделирования зависимости нормированной фазовой задержки $\Phi(\theta_0)$ от угла преднаклона для различных типов двулучепреломляющих слоев с неоднородным распределением угла наклона директора ЖК или эквивалентного ему двулучепреломляющего материала (например, в полимерах).

Структура типичной жидкокристаллической ячейки описана в [6–9]. Она состоит из верхней и нижней подложек и ориентирующих слоев, задающих ориентацию различных типов (гибридной с несимметричными углами НубН, поперечного изгиба НубS, продольного изгиба НубВ). Изготовление ЖК ячеек, нанесение полиимидных пленок для ориентации ЖК, наклонная ориентация ЖК на ориентирующих поверхностях и способы получения таких ориентирующих покрытий описаны в [10–14]. Гибридная ориентация ЖК ячеек описана в [4–8]. Она обеспечивается созданием различных

приповерхностных углов наклона директора ЖК путем нанесения различных ориентирующих покрытий и/или различной их поверхностной обработкой, формирующей различные типы ориентирующего микрорельефа. У [15] решена задача расчета распределения директора ЖК при двух фиксированных углах. Разработан электрооптический метод определения отношения K_{33}/K_{11} . В [4–9] решена задача моделирования оптических свойств гибридных ячеек без учета K_{33}/K_{11} , в связи с чем актуальной задачей является определить влияние деформации поперечного и продольного изгиба на оптические свойства ЖК ячеек при произвольном ориентационном распределении. Ни в [15], ни в [4–9] не учитывается эффект хиральности, так как по [16] им можно пренебречь. В [17–21] показана востребованность исследований оптических свойств гибридных ЖК ячеек в различных прикладных аспектах.

2. Распределение угла наклона директора ЖК по толщине ячейки

В теоретической модели, как излагалось в [9], использовалось одноконстантное приближение (константы упругости Франка для нематических ЖК $K_{11}=K_{33}$) для упрощения расчетов. Условие $K_{11}=K_{33}$ означает линейное распределение угла наклона директора ЖК по оси координат, перпендикулярной поверхностям ЖК ячейки. При одноконстантном приближении, упругая энергия ЖК не зависит от локального угла наклона директора, и угол линейно зависит от координаты по толщине ячейки. Углы рассматривались в диапазоне от 0° до 90° . Однако в практическом применении важен случай нематических ЖК с $K_{11}\neq K_{33}$. Поэтому задачей работы является установление влияния анизотропии коэффициентов упругости ЖК на их оптический отклик и уточнение диапазонов параметров ячеек нематических ЖК, при которых актуальны разработанные модели и методики с $K_{11}=K_{33}$.

Рассматриваемые в [4–9] ячейки с линейным (при одноконстантном приближении) S (splay, НубS, поперечный изгиб) распределением и симметричными приповерхностными углами характеризуются углом наклона директора ЖК, равным нулю при координате по толщине ячейки, равной половине от толщины слоя ЖК в ячейке. Смоделированное для случая нематических ЖК с $K_{11}\neq K_{33}$ распределение директора ЖК по толщине S ячейки с симметричными краевыми углами показано на рис. 1 при краевых углах, изменяющихся от 15° до 90° . Показаны случаи с $K_{33}/K_{11}=0,5$ и $K_{33}/K_{11}=3$.

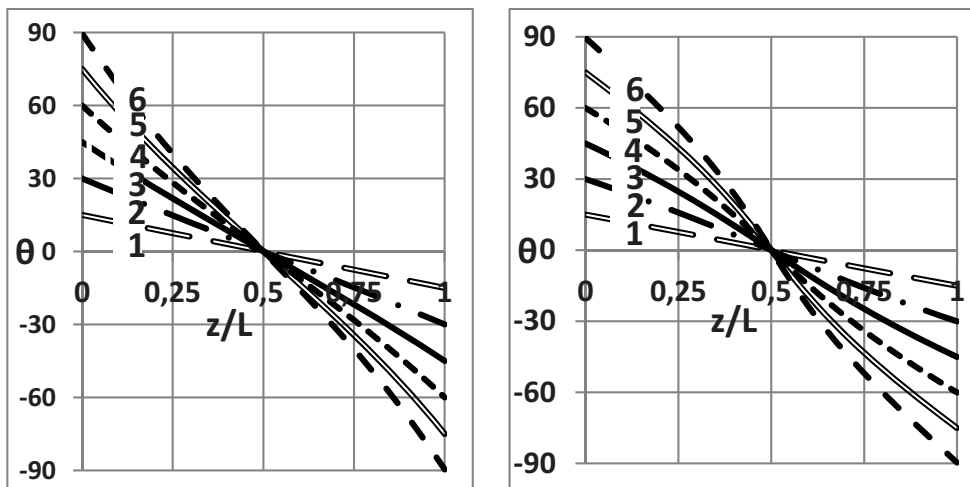


Рис. 1. Распределение директора ЖК по толщине S ячейки с симметричными краевыми углами, при краевых углах от 15° до 90° .

Слева $K_{33}/K_{11}=0,5$. Справа $K_{33}/K_{11}=3$.

Условные обозначения на рис 1:

- 1) $S15/0/15$ ячейка S типа, указаны углы краевые и посередине ячейки.
- 2) $S30/0/30$; 3) $S45/0/45$; 4) $S60/0/60$; 5) $S75/0/75$; 6) $S90/0/90$

Рассматриваемые в [4–9] ячейки с B (bend, НубВ, продольный изгиб) распределением и симметричными приповерхностными углами характеризуются углом наклона директора ЖК, равным $\pi/2$ при координате по толщине ячейки, равной половине от толщины слоя ЖК в ячейке. Смоделированное для случая нематических ЖК с $K_{11} \neq K_{33}$ распределение директора ЖК по толщине B ячейки с симметричными приповерхностными углами показано на рис. 2 при приповерхностных углах, изменяющихся от 15° до 90° . Показаны случаи с $K_{33}/K_{11}=0,5$ и $K_{33}/K_{11}=3$.

Рассматриваемые в [4–9] ячейки с Нуб90 (НубН, гибридные) распределением и несимметричными приповерхностными углами характеризуются изменяющимся по толщине ячейки углом наклона директора ЖК. Смоделированное для случая нематических ЖК с $K_{11} \neq K_{33}$ распределение директора ЖК по толщине Нуб90 ячейки с несимметричными углами показано на рис. 3 при углах, изменяющихся от 0° до 90° . Показаны случаи с разными приповерхностными углами и соотношениями коэффициентов упругости $K_{33}/K_{11} = 0,5$ (слева) и $K_{33}/K_{11} = 3$ (справа).

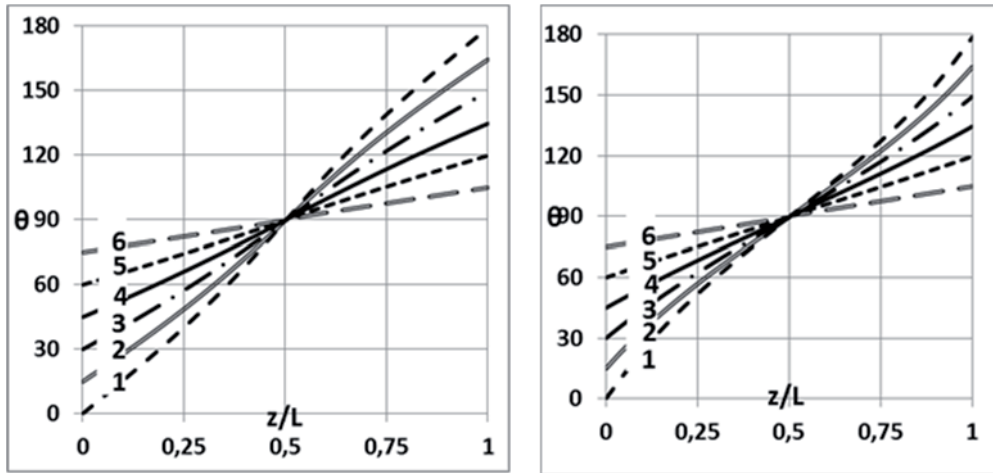


Рис. 2. Распределение директора ЖК по толщине V ячейки с симметричными приповерхностными углами от 15° до 90° . Слева $K_{33}/K_{11}=0,5$. Справа $K_{33}/K_{11}=3$
Условные обозначения на рис. 2.

- 1) $V_{0/90/0}$ ячейка V типа, указаны углы краевые и посередине ячейки.
2) $V_{15/90/15}$; 3) $V_{30/90/30}$; 4) $V_{45/90/45}$; 5) $V_{60/90/60}$; 6) $V_{75/90/75}$

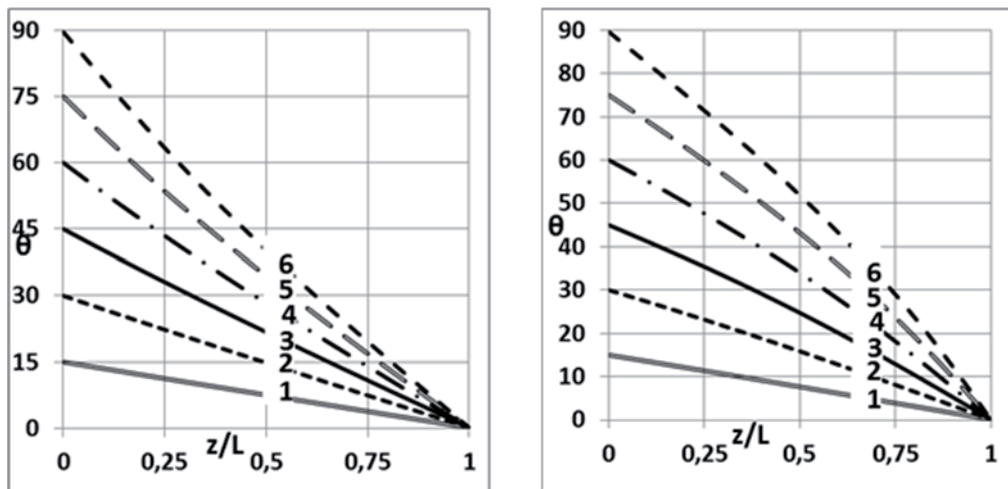


Рис. 3. Распределение директора ЖК по толщине $Nub90$ ячейки с несимметричными приповерхностными углами от 15° до 90° . Слева $K_{33}/K_{11}=0,5$. Справа $K_{33}/K_{11}=3$.
Условные обозначения на рис. 3.

- 1) $N_{15/0}$ ячейка $Nub90$ типа ($NubH$), указаны углы краевые
2) $N_{30/0}$ 3) $N_{45/0}$ 4) $N_{60/0}$ 5) $N_{75/0}$ 6) $N_{90/0}$

На рис. 4а показано распределение директора ЖК по толщине Нуб90 ячейки с несимметричными приповерхностными углами 0° и 90° и K_{33}/K_{11} от 0,5 до 3. На рис. 4б показано распределение директора ЖК по толщине НубS ячейки с симметричными приповерхностными углами 90° и K_{33}/K_{11} от 0,5 до 3. На рис. 4в показано распределение директора ЖК по толщине НубV ячейки с симметричными приповерхностными углами 0° и K_{33}/K_{11} от 0,5 до 3.

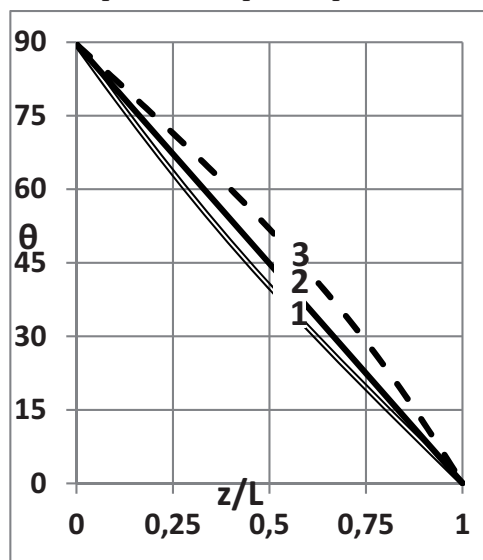


Рис. 4а. Распределение директора ЖК по толщине Нуб90 ячейки с несимметричными приповерхностными углами, при краевых углах 0° и 90° и K_{33}/K_{11} от 0,5 до 3.

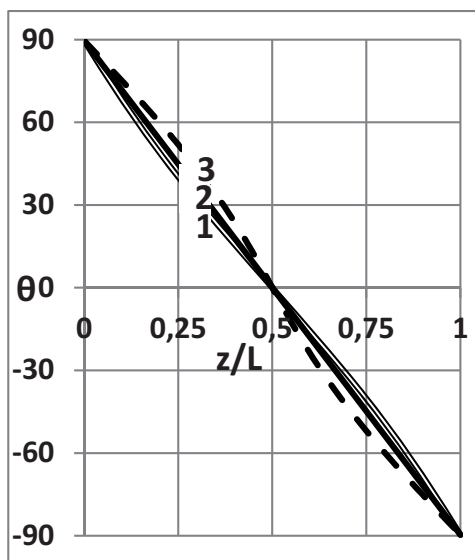


Рис. 4б. Распределение директора ЖК по толщине НубS ячейки с симметричными приповерхностными углами 90° и K_{33}/K_{11} от 0,5 до 3.

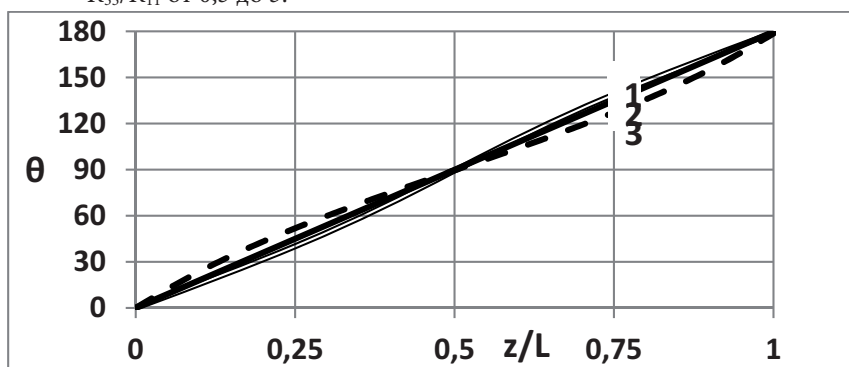


Рис. 4в. Распределение директора ЖК по толщине НубV ячейки с симметричными приповерхностными углами, при приповерхностных углах 0° и K_{33}/K_{11} от 0,5 до 3.

Условные обозначения на рис. 4.

1) $K_{33}/K_{11}=0.5$;

2) $K_{33}/K_{11}=1$;

3) $K_{33}/K_{11}=3$

3. Зависимость нормированной разности фазовых задержек $\Phi(\theta_0)$ от угла приповерхностного наклона для ячеек с различными типами неоднородных распределений угла наклона директора ЖК

Для ячеек с произвольным распределением угла наклона в слое ЖК введен, как было описано в [4], такой параметр, как нормированная разность фазовых задержек $\Phi = \Delta\Phi / \Delta\Phi_{\max}$. 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 приповерхностного наклона θ_0 была количественно определена в [4] для ЖК ячеек с различными законами распределения угла наклона по толщине ячейки. Для ячеек с симметричными граничными условиями были исследованы два типа ячеек: S «spray» или HуbS, он же поперечный изгиб; B «bend» или HуbB, он же продольный изгиб. Типичная зависимость $\Phi(K_{33}/K_{11})$ для S, B и Hуb90 распределений изображена на рис. 5, рис. 6 и рис. 7 соответственно.

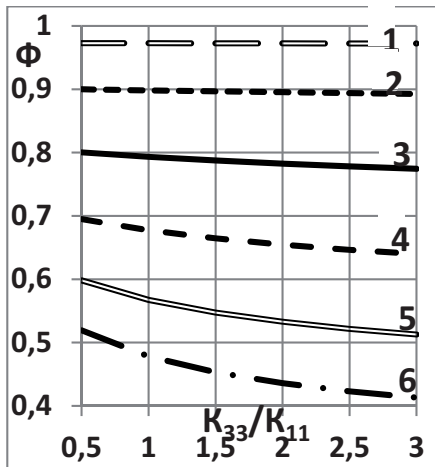


Рис. 5. Зависимость $\Phi(K_{33}/K_{11})$ для S распределения с симметричными приповерхностными углами от 15° до 90° и K_{33}/K_{11} от 0,5 до 3.

Условные обозначения на рис. 5.

- 1) S15/0/15; 2) S30/0/30; 3) S45/0/45;
4) S60/0/60; 5) S75/0/75; 6) S90/0/90

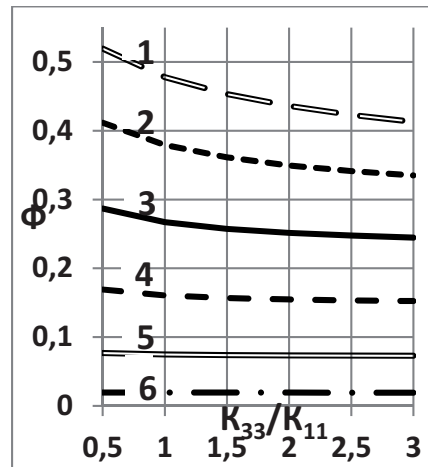


Рис. 6. Зависимость $\Phi(K_{33}/K_{11})$ для B распределения с симметричными приповерхностными углами от 0° до 75° и K_{33}/K_{11} от 0,5 до 3.

Условные обозначения на рис. 6.

- 1) B0/90/0; 2) B15/90/15; 3) B30/90/30;
4) B45/90/45; 5) B60/90/60; 6) B75/90/75

Хорошо видно из распределений, изображенных на рис. 5; 6, что нормированная разность фазовых задержек остается близка к случаю $K_{33}/K_{11}=1$ для многих смоделированных распределений, например, S15/0/15, S30/0/30, B60/90/60, B75/90/75. В этих обозначениях сначала указан тип (S или B), потом краевой угол, потом угол в слое ЖК, характерный для типа распределения (0 для S и 90 для B), и, наконец, второй краевой угол. Из этого можно сделать вывод, что при разнице приповерхностных углов и угла посередине до 30° , использованная в [4–9] модель (одноконстантная) вполне пригодна. А, как известно, и S-, и B- распределения в основном характеризуются именно такой разностью приповерхностных углов. В то же время необходимо отметить, что при большой разнице приповерхностных углов и угла посередине, например, S90/0/90, B0/90/0, изменение нормированной разности фазовых задержек может быть (между образцами с $K_{33}/K_{11}=0,5$ и $K_{33}/K_{11}=3$) до 30%, и с учетом того, что нормированная разность фазовых задержек при изменении ее на 20-30% может означать переход, например, от максимума пропускания до минимума, то полученные данные важны при проектировании различных оптических ЖК систем (например, в составе ЖК дисплеев).

Из рис. 7 хорошо видно, что нормированная разность фазовых задержек остается близка к случаю $K_{33}/K_{11}=1$ для многих смоделированных Hуб90 распределений, например, H15/0, H30/0, H30/15, H45/15, H45/30, H60/30, H60/45, H75/45, H75/60, H90/60, H90/75. В этих обозначениях сначала указан тип (H означает HубH или Hуб90), потом краевой угол, и, наконец, второй краевой угол. Из рис. 7 можно сделать вывод, что при разнице приповерхностных углов до 30° , предложенная в [4–9] модель (одноконстантная) вполне пригодна. В то же время необходимо отметить, что для случаев с большой разницей приповерхностных углов (например, H90/0) изменение нормированной разности фазовых задержек (для образцов с отношением $K_{33}/K_{11}=0,5$ и $K_{33}/K_{11}=3$) достигает 30%.

Следовательно, полученные результаты актуальны для определения оптических свойств ЖК систем с такими пространственными распределениями угла наклона директора (с большой разницей приповерхностных углов).

В сочетании с аналогичными по величине зависимостями разности фазовых задержек для S и B ячеек, рассмотренными выше для того же диапазона

упругих свойств ЖК, полученные результаты моделирования свойств Нуб90 ячеек позволяют провести аналогию между Нуб90 и S, В ячейками.

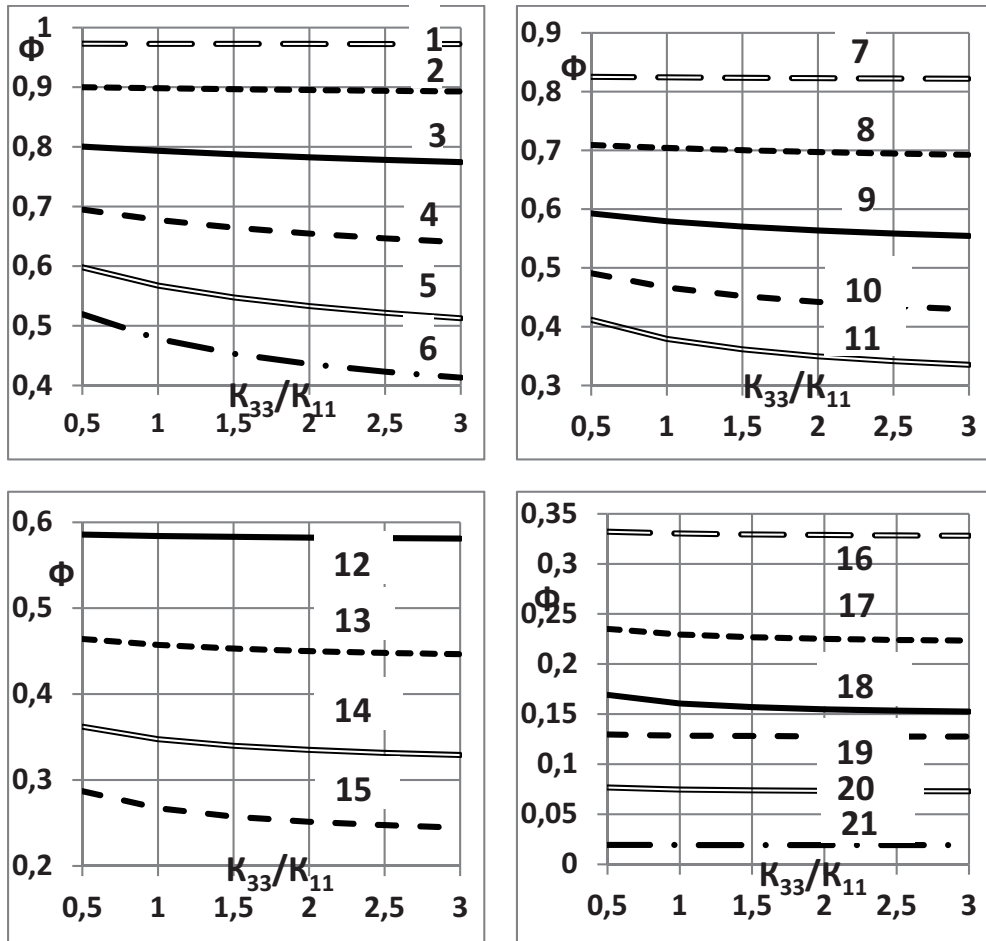


Рис. 7. Зависимость $\Phi(K_{33}/K_{11})$ для Нуб90 распределения с несимметричными приповерхностными углами от 0° до 90° и K_{33}/K_{11} от 0,5 до 3.

Условные обозначения на рис. 7. 1) Н15/0; 2) Н30/0; 3) Н45/0;
 4) Н60/0; 5) Н75/0; 6) Н90/0; 7) Н30/15; 8) Н45/15; 9) Н60/15;
 10) Н75/15; 11) Н90/15; 12) Н45/30; 13) Н60/30; 14) Н75/30; 15) Н90/30;
 16) Н60/45; 17) Н75/45; 18) Н90/45; 19) Н75/60; 20) Н90/60; 21) Н90/75

Можно на основании полученных данных рассматривать слой ЖК в S, В ячейках как оптически аналогичный паре Нуб90 ячеек, на одной стороне которых угол, равный приповерхностному углу для S, В ячеек, а на другой стороне угол 0 или 90° (в соответствии с углом посередине S или В ячейки). В [7] были смоделированы оптические свойства двулучепреломляющих систем с большими угловыми диапазонами.

Выводы

Смоделированы ориентационные и ориентационно-оптические свойства ЖК ячеек в зависимости от деформации поперечного и продольного изгиба, с произвольными приповерхностными углами для случая нематических ЖК с $K_{11} \neq K_{33}$. Выявлены диапазоны параметров ячеек нематических ЖК с $K_{11} \neq K_{33}$, при которых актуальны разработанные в [1] модели, основанные на одноконстантном приближении $K_{11} = K_{33}$.

Получены данные об оптических характеристиках (нормированная разность фазовых задержек) ЖК ячеек с различными типами распределений директора ЖК по толщине ячейки и различным отношением K_{33}/K_{11} (от 0,5 до 3), в том числе ячеек, для которых непригодно одноконстантное приближение. Они могут быть использованы для разработки элементов ЖК индикаторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hanaoka K., Nakanishi Y., Inoue Y., Tanuma S., Koike Y. A New MVA-LCD by Polymer Sustained Alignment Technology // SID'04 Digest. 2004. pp. 1200–1203.
2. Mi X.-D., Xu M., Yang D.-K., Bos P.J. Effects of Pretilt Angle on Electro-Optical Properties of Pi-Cell LCDs // SID'99 Digest. 1999. pp. 24–27.
3. Yang D.K., Wu S.T. Fundamentals of Liquid Crystal Devices. NY.: Wiley. 2006.
4. Belyaev V.V., Solomatin A.S., Chausov D.N. Phase retardation vs. pretilt angle in liquid crystal cells with homogeneous and inhomogeneous LC director configuration // Optics Express. 2013. Vol.21. pp. 4244–4249.
5. Беляев В.В., Соломатин А.С., Чаусов Д.Н. Оптические свойства ЖК ячеек с произвольным краевым углом наклона директора // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2013. № 1. С. 32–41.
6. Belyaev V.V., Solomatin A.S., Chausov D.N. Measurement of the liquid crystal pretilt angle in cells with homogeneous and inhomogeneous LC director configuration // Applied Optics. 2013. Vol. 52. Issue 13. pp. 3012–3019.
7. Belyaev V.V., Solomatin A.S., Kurilov A.D., Chausov D.N., Mazaeva V.G. Optical Properties of Hybrid Aligned Nematic (HAN) Cells with Different Pretilt Angles // Applied Optics. 2014. Vol. 53. Issue 29. pp. H51–H57.
8. Belyaev V.V., Solomatin A.S., Chausov D.N. Phase retardation difference of liquid crystal cells with symmetric and asymmetric boundary conditions // Molecular Crystals & Liquid Crystals. 2014. Vol.596. Issue 1. pp. 22–29.

9. Беляев В.В., Соломатин А.С. Оптические свойства гибридных жидкокристаллических ячеек при различных углах падения света // Оптический Журнал. 2015. Т.82. №1. С.41-48.
10. Мазаева В.Г., Беляев В.В., Нацюк С.Н., Скворцова Л.В., Соломатин А.С. Способ изготовления жидкокристаллической ячейки. Патент РФ №2491316 от 27.08.2013. Заявка на Патент РФ №2011154168 от 30.12.2011.
11. Belyaev V.V., Mazaeva V.G., Sobolevskii M.V., Kokaulina I.G., Solomatin A.S. Liquid crystal alignment on Langmuir-Blodgett organosilicon films // *Molecular Crystals & Liquid Crystals*. 2011. Vol. 546, pp. 17/[1487]-25/[1495].
12. Беляев В.В., Соломатин А.С., Чаусов Д.Н., Мазаева В.Г., Нацюк С.Н., Горбунов А.А., Шошин В.М., Бобылев Ю.П. Угол наклона и энергия сцепления в ЖК ячейках с кремнийорганической ориентирующей пленкой // Первая Всероссийская Конференция по Жидким Кристаллам (РКЖК-2012) Иваново. 17 –21 сентября 2012 г. Тез. докл. С. 106.
13. Belyaev V.V., Solomatin A.S., Chausov D.N., Shoshin V.M., Bobylev Y.P., Muravskii A.A., Muravskii A.A., Mazaeva V.G., Natsyuk S.N., Gorbunov A.A. Different Polarity NLC Alignment on Organosilicon Films of Varying Molecular Structure // *Proc. XXXI IDRC Eurodisplay 2011 (Arcachon, France, 19–22 September 2011)*, pp. 17-19.
14. Беляев В.В., Муравский Ал.Ан., Соломатин А.С., Мазаева В.Г., Нацюк С.Н., Чаусов Д.Н., Горбунов А.А., Муравский Ан.Ал., Шошин В.М., Бобылев Ю.П. Ориентация НЖК различной полярности на пленках кремнийорганических соединений различного молекулярного строения // Доклады БГУИР (Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники). 2011. С. 4.
15. Beresnev G.A. Chigrinov V.G., Grebenkin M.F. New method to determine K33/K11 ratio in nematic liquid crystals // *Crystallography Reports*. 1982. Vol.27. pp.1019-1021.
16. Gerritsma C.J., Lorteye J.H.J. A hybrid liquid-crystal display with a small number of interconnections // *Proceedings of the IEEE*. 1973. Vol.61. pp.829-832.
17. Гвоздарев А.Ю., Невская Г.Е. Оптические характеристики жидкокристаллических микролинз с планарной и гибридной гомеотропной ориентацией нематика // Оптический журнал. 2001. Т. 68. № 9. С. 61–65.
18. Гвоздарев А.Ю., Невская Г.Е., Юдин И.Б. Перестраиваемые жидкокристаллические микролинзы с гомеотропной ориентацией. // Оптический журнал. 2001. Т. 68. № 9. С. 55–60.
19. Невская Г.Е., Томилин М.Г., Адаптивные линзы на основе жидких кристаллов // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 9. С. 35–48.

20. Амосова Л.П., Парфенов П.С., Исаев М.В. Ориентация жидких кристаллов на наклонно напыленных слоях SiO₂ и CeO₂ // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 11. С. 88–95.
21. Коншина Е.А., Федоров М.А. Влияние граничных условий на фазовую модуляцию света в случае S-эффекта нематика // Письма в ЖТФ. 2006. Т.32. Вып. 22. С. 15–21.

REFERENCES

1. Hanaoka K., Nakanishi Y., Inoue Y., Tanuma S., Koike Y. A New MVA-LCD by Polymer Sustained Alignment Technology // SID'04 Digest. 2004. pp. 1200–1203.
2. Mi X.-D., Xu M., Yang D.-K., Bos P.J. Effects of Pretilt Angle on Electro-Optical Properties of Pi-Cell LCDs // SID'99 Digest. 1999. pp. 24–27.
3. Yang D.K., Wu S.T. Fundamentals of Liquid Crystal Devices. N.Y.: Wiley. 2006.
4. Belyaev V.V., Solomatin A.S., Chausov D.N. Phase retardation vs. pretilt angle in liquid crystal cells with homogeneous and inhomogeneous LC director configuration // Opt. Express. 2013. Vol.21. pp. 4244–4249.
5. Belyaev V.V., Solomatin A.S., Chausov D.N. Opticheskie svoystva ZhK yacheek s proizvol'nym kraevym uglom naklona direktora [Optical properties of LCD cells with an arbitrary boundary angle of the director] // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Fizika-Matematika. 2013. no. 1. pp. 32–41.
6. Belyaev V.V., Solomatin A.S., Chausov D.N. Measurement of the liquid crystal pretilt angle in cells with homogeneous and inhomogeneous LC director configuration // Appl. Opt. 2013. Vol. 52. Issue 13. pp. 3012–3019.
7. Belyaev V.V., Solomatin A.S., Kurilov A.D., Chausov D.N., Mazaeva V.G. Optical Properties of Hybrid Aligned Nematic (HAN) Cells with Different Pretilt Angles // Appl. Opt. 2014. Vol. 53. Issue 29. pp. H51–H57.
8. Belyaev V.V., Solomatin A.S., Chausov D.N. Phase retardation difference of liquid crystal cells with symmetric and asymmetric boundary conditions // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2014. Vol.596. Issue 1. pp. 22–29.
9. Belyaev V.V., Solomatin A.S. Opticheskie svoystva gibridnykh zhidkokristallicheskiy yacheek pri razlichnykh uglakh padeniya sveta [Optical properties of hybrid liquid crystal cells at various angles of incidence of light] // Opt. Zh. 2015. Vol. 82. no. 1. pp. 41–48.
10. Mazaeva V.G., Belyaev V.V., Natsyuk S.N., Skvortsova L.V., Solomatin A.S. Sposob izgotovleniya zhidkokristallicheskoj yacheiki. Patent RF №2491316 ot 27.08.2013. Zayavka na Patent RF [A method of manufacturing a liquid crystal cell. RF patent №2491316 dated 27.08.2013. The application for the Patent of the Russian Federation] no. 2011154168 dated 30.12.2011.

11. Belyaev V.V., Mazaeva V.G., Sobolevskii M.V., Kokaulina I.G., Solomatin A.S. Liquid crystal alignment on Langmuir-Blodgett organosilicon films // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2011. Vol. 546, pp. 17/[1487]–25/[1495].
12. Belyaev V.V., Solomatin A.S., Chausov D.N., Mazaeva V.G., Natsyuk S.N., Gorbunov A.A., Shoshin V.M., Bobylev Yu.P. Ugol naklona i energiya stsepleniya v ZhK yacheikakh s kremniorganicheskoi orientiruyushchei plenkoi [Angle of incidence and energy of adhesion in LCD cells with a silicon-organic orienting film] // *Pervaya Vserossiiskaya Konferentsiya po Zhidkim Kristallam (RKZHK-2012) Ivanovo. 17 –21 sentyabrya 2012 g. Tez. dokl. [The first all-Russian Conference on Liquid Crystals (RCLC-2012) Ivanovo. 17–21 September 2012. Report topics].* P. 106.
13. Belyaev V.V., Solomatin A.S., Chausov D.N., Shoshin V.M., Bobylev Y.P., Muravskii A.A., Muravskii A.A., Mazaeva V.G., Natsyuk S.N., Gorbunov A.A. Different Polarity NLC Alignment on Organosilicon Films of Varying Molecular Structure // *Proc. XXXI IDRC Eurodisplay 2011 (Arcachon, France, 19–22 September 2011)*, pp. 17–19.
14. Belyaev V.V., Muravskii A.I., Solomatin A.S., Mazaeva V.G., Natsyuk S.N., Chausov D.N., Gorbunov A.A., Muravskii A.I., Shoshin V.M., Bobylev YU.P. Orientatsiya NZhK razlichnoi polyarnosti na plenkakh kremniorganicheskikh soedinenii razlichnogo molekulyarnogo stroeniya [Orientation of nematic liquid crystals of different polarity on films of organosilicon compounds of different molecular structure] // *Dokl. Belorus. Gos. Univer. Inform. Radioelectron. (Belorusskii gosudarstvennyi universitet informatiki i radioelektroniki) [Reports BSUIR (Belarusian state University of Informatics and Radioelectronics)].* 2011. P. 4.
15. Beresnev G.A. Chigrinov V.G., Grebenkin M.F. New method to determine K33/K11 ratio in nematic liquid crystals // *Crystallogr. Rep.* 1982. Vol. 27. pp. 1019–1021.
16. Gerritsma C.J., Lorteye J.H.J. A hybrid liquid-crystal display with a small number of interconnections // *Proc. IEEE.* 1973. Vol.61. pp. 829–832.
17. Gvozdarev A.Yu., Nevskaya G.E. Opticheskie kharakteristiki zhidkokristallicheskich mikrolinz s planarnoi i gibridnoi gomeotropnoi orientatsiei nematika [Optical characteristics of liquid crystal microlenses with planar and hybrid homeotropic orientation of nematic] // *Opt. Zh.* Vol. 68. 2001. no. 9. pp. 61–65.
18. Gvozdarev A.YU., Nevskaya G.E., Yudin I.B. Perestraivaemye zhidkokristallicheskie mikrolinzy s gomeotropnoi orientatsiei. [Tunable liquid-crystal microlenses with homeotropic orientation.] // *Opt. Zh.* Vol. 68. 2001. no. 9. pp. 55–60.
19. Nevskaya G.E., Tomilin M.G. Adaptivnye linzy na osnove zhidkikh kristallov [Adaptive lenses based on liquid crystals] // *Opt. Zh.* Vol. 75. 2008. no. 9. pp. 35–48.

20. Amosova L.P., Parfenov P.S., Isaev M.V. Orientatsiya zhidkikh kristallov na naklonno napylennykh sloyakh SiO[2] i CeO[2] [Orientation of liquid crystals on oblique deposited layers of SiO[2] and CeO[2]] // Opt. Zh. Vol. 81. 2014. no. 11. pp. 88-95.
21. Konshina E.A., Fedorov M.A. Vliyanie granichnykh uslovii na fazovuyu modulyatsiyu sveta v sluchae S-effekta nematika [Influence of boundary conditions on phase modulation of light in the case of the S-effect of the nematic] // Pis'ma Zh. Teor. Fiz. 2006. Vol. 32. no. 22. pp. 15–21.

ИНФОМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Соломатин Алексей Сергеевич – кандидат физико-математических наук, инженер учебно-научной лаборатории теоретической и прикладной нанотехнологии, Московский государственный областной университет;
e-mail: Sotrudnica_UNC@mail.ru;

Беляев Виктор Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической физики, Московский государственный областной университет;
e-mail: vic_belyaev@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Solomatin Aleksei Sergeevich – candidate of physical and mathematical sciences, engineer of the Education & Science Lab for Theoretical and Applied Nanotechnology at the Moscow State Regional University;
e-mail: Sotrudnica_UNC@mail.ru;

Belyaev Victor Vasilyevich – doctor of technical sciences, professor, head of the Chair of the Department of Theoretical Physics at the Moscow State Regional University;
e-mail: vic_belyaev@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Соломатин А.С., Беляев В.В. Влияние деформации поперечного и продольного изгиба на оптические свойства гибридных жидкокристаллических ячеек с произвольным углом преднаклона на ориентирующей поверхности // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2016. № 2. С. 37–50.

DOI: 10.18384/2310-7251-2016-2-37-50.

BIBLIOGRAPHIC REFERENCE

A. *Solomatin*, V. *Belyaev*. Optical properties of liquid crystal cells with oblique pre-tilt angle in the splay and bend cases of director configuration deformations // Bulletin of Moscow State Regional University. Series: Physics and Mathematics. 2016. no. 2. pp. 37–50.

DOI: 10.18384/2310-7251-2016-2-37-50.