# УДК 535.012.2

В. В. Беляев<sup>1</sup>, А. С. Соломатин<sup>2</sup>

# ОРИЕНТАЦИОННЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛОЕВ ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА С ОДНОЙ ОРИЕНТИРУЮЩЕЙ И ОДНОЙ НЕОРИЕНТИРУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

<sup>1</sup> Учебно-научная лаборатория теоретической и прикладной нанотехнологии,

Московский государственный Областной университет, 105005 Москва, ул. Радио, 10-а. Е-mail: vic belyaev@mail.ru

<sup>2</sup> Кафедра информатики и компьютерного проектирования,

Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева,

пл. Миусская, 9, 125047 Москва, Россия. E-mail : sotrudnica unc@mail.ru

Рассмотрена ячейка, одна из сторон которой покрыта ориентирующим покрытием, обеспечивающим заданный угол преднаклона директора, а другая сторона ячейки не оказывает существенного ориентирующего влияния. Неориентирующая поверхность названа свободной, а ячейка ЖК с одной ориентирующей стороной названа «односторонне ориентированной», или «односторонней». При наличии приложенного к ячейке ориентирующего поля директор ЖК будет распределяться от заданного краевого угла и до планарного или гомеотропного (в зависимости от знака диэлектрической анизотропии). Предложен метод расчета распределения директора ЖК в односторонне ориентированной ячейки, которая покрыта ориентантом. Выполнена теоретическая и компьютерная модель зависимости разности фазовой задержки  $\Delta \Phi$ .

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

V. V. Belyaev<sup>1</sup>, A. S. Solomatin<sup>2</sup>

# ORIENTATIONAL AND OPTICAL PROPERTIES OF LIQUID CRYSTALLINE LAYERS WITH ORIENTING AND NON-ORIENTING SURFACES

 <sup>1</sup>Education & Research Lab of Theoretical and Applied Nanotechnology, Moscow Region State University,
Radio str., 10-a, 105005 Moscow, Russia. E-mail: vic\_belyaev@mail.ru
<sup>2</sup>Department of Computer and Computer Designing,
D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia,
Miusskaya sq., 9, 125047 Moscow, Russia. E-mail : sotrudnica\_unc@mail.ru

LC cell with one side covered by orienting coating providing a predetermined pretilt angle of director is examined. The other side of the cell has no significant orienting effect. Non-orienting surface of the cell is called «free» and the LC cell with one orienting side is called «one-side oriented» or «one-sided». When there is an orienting field applied to the cell, the LC director will be distributed from a given contact angle and to the planar or homeotropic ones (depending on the sign of the dielectric anisotropy). A method for calculating the distribution of the LC director to the one-side oriented cell depending on the thickness of the cell and the pretilt angle of the director on the side of the cell, which is covered with the orientant, is proposed. Theoretical and computer model of LC director distribution is performed. Theoretical and computer model of dependence of the difference of the phase retardation  $\Delta \Phi$  is carried out.

Key words: liquid crystal cell, director, contact angle, hybrid cell.

<sup>©</sup> Беляев В. В., Соломатин А. С., 2014

#### 1. Введение и постановка задачи

Структура, свойства и применение гибридных ЖК-ячеек описаны в [1].

В наших предыдущих статьях [1–6, 8] подробно описан метод расчета разности фазовой задержки  $\Delta \Phi$  обыкновенного и необыкновенного лучей, проходящих через ЖК-ячейку с неоднородным распределением директора ЖК.

Одной из целей настоящей работы является расчет ориентационных характеристик гибридных ЖК-ячеек оригинального типа. Одна из сторон ячейки ЖК покрыта ориентирующим покрытием, обеспечивающим заданный угол преднаклона (краевой угол) директора, а другая сторона ячейки не оказывает существенного ориентирующего влияния (в частности, в работах Коньяра рассмотрены неориентирующие покрытия). Такая (неориентирующая) поверхность в тексте названа свободной, а ячейка ЖК с одной ориентирующей стороной названа в тексте односторонней. При наличии приложенного к ячейке потенциала (ориентирующего электрического поля) директор ЖК с отрицательной диэлектрической анизотропией будет распределяться от заданного краевого угла и до планарного (параллельного стенке ячейки), а директор ЖК с отрицательной диэлектрической анизотропией будет распределяться от заданного краевого угла и до гомеотропного (перпендикулярного стенке ячейки). Толщина такого слоя, достаточная для переориентации ЖК по полю, называется длиной когерентности, или параметром Де Жена [9].

С этой целью данной работы непосредственно связана цель управлять совокупностью ориентационных характеристик гибридных ЖК-ячеек оригинального типа, изменяя (на этапе изготовления ячейки) ее толщину и угол преднаклона на той стороне, которая покрыта ориентантом, а также изменяя поле, приложенное к ячейке.

Также целью настоящей работы является расчет разности фазовой задержки  $\Delta \Phi$  в односторонней ячейке с отрицательной диэлектрической анизотропией в зависимости от толщины ячейки и угла преднаклона директора на той стороне ячейки, которая покрыта ориентантом.

С этой целью данной работы непосредственно связана цель управлять оптическими характеристиками ячейки путем регулирования ее ориентационных характеристик.

Предложен метод расчета распределения директора ЖК как с отрицательной, так и с положительной диэлектрической анизотропией в односторонней ячейке в зависимости от толщины ячейки и угла преднаклона директора на той стороне ячейки, которая покрыта ориентантом. Выполнена теоретическая и компьютерная модель распределения директора ЖК.

Выполнена теоретическая и компьютерная модель зависимости разности фазовой задержки  $\Delta \Phi$  от параметров ЖК-ячейки и угла преднаклона.

## 2. Методика расчета 2.1. Ориентация директора ЖК

Как и в [1–6, 8], использовалось одноконстантное приближение (константы упругости Франка для нематических ЖК  $K_{11} = K_{33}$ ), считалось, что во всем объеме ячейки, включая ее границы, изменение директора происходило в одной плоскости, перпендикулярной подложкам.

Эффект Фредерикса в магнитном поле при планарной начальной ориентации нематика в ЖК ячейке, и при условии, что поле перпендикулярно поверхности ячейки, описывается уравнением (так называемое «условие равновесия»)

$$\frac{d}{dz}\left[\left(K_{11}\cos^2\theta + K_{33}\sin^2\theta\right)\left(\frac{d\theta}{dz}\right)^2 + \chi_{\alpha}H^2\sin^2\theta\right] = 0.$$

Отсюда следует, что

$$\left\{2\left(\frac{d^2\theta}{dz^2}\right)\left(K_{11}\cos^2\theta + K_{33}\sin^2\theta\right) + 2\left(\frac{d\theta}{dz}\right)^2\left(\left(K_{33} - K_{11}\right)\sin\theta\cos\theta\right) + 2\chi_{\alpha}H^2\sin\theta\cos\theta\right)\left(\frac{d\theta}{dz}\right) = 0\right\}$$

Если рассмотреть вариант  $\frac{d\theta}{dz} = 0$ , то из

него следует, что ячейка имеет постоянный угол наклона директора ЖК. Например, она планарная, или гомеотропная, или с промежуточным между ними постоянным углом. Это верно при отсутствии поля.

Но при наличии поля распределение уже не будет линейным. И при одноконстантном приближении ( $K_{11} = K_{33}$ ) верно следующее

$$\left\{ \left(\frac{d^2\theta}{dz^2}\right) K_{11} + \chi_{\alpha} H^2 \sin \theta \cos \theta \right\} = 0.$$

После элементарных преобразований, получим

$$\left(\frac{d^2 \theta}{dz^2}\right) = -\frac{\chi_{\alpha} H^2 \sin \theta \cos \theta}{K_{11}}$$

Или, то же самое

$$\left(\frac{d \theta}{dz}\right) = \frac{\chi_{\alpha} H^{2} \cos^{2} \theta}{2 K_{11}}$$

Или, аналогично,

$$\left(\frac{d \theta}{dz}\right) = -\frac{\chi_{\alpha} H^2 \sin^2 \theta}{2K_{11}}$$

Необходимо отметить, что распределение угла наклона директора ЖК по толщине ячейки можно корректировать, вводя примесь в состав ЖК, состоящую из полимера с ферромагнитными частицами (так называемая «магнитная жидкость»), причем геометрические характеристики примеси можно подобрать аналогичные геометрическим характеристикам молекул нематического ЖК. Тогда, вполне равномерно распределяясь в объеме ЖК и не накапливаясь под действием магнитного поля у одной из сторон ячейки, эта примесь будет вносить свое влияние на распределение угла наклона по толщине ячейки.

Аналогично, переходя к электрическому полю, получаем следующее.

При одноконстантном приближении для ячеек ЖК с положительной диэлектрической анизотропией верно следующее:

$$\frac{d\theta}{dz} = M \cos^2 \theta$$

А для ячеек ЖК с отрицательной диэлектрической анизотропией верно следующее:

$$\frac{d\theta}{dz} = M\left(-\sin^2\theta\right),\,$$

где

$$M = \frac{\varepsilon_0 \Delta \varepsilon E^2}{2K_{11}},$$

где E = U/d – напряженность поля при толщине ячейки, равной d.

#### 2.2. Оптические свойства

Методика расчета зависимости нормированной разности фазовой задержки от углов на обеих сторонах гибридных ячеек ЖК описана в [1–3].

Рассмотрим случай наклонного падения поляризованного пучка света по методике, описанной в [2].

Угол падения равен  $\beta$ , плоскость падения *12* параллельна плоскости директора ЖК-ячейки *xz*. Тогда вектор электрического поля световой волны перпендикулярен этой плоскости. Эта геометрия эквивалентна геометрии гибридной ячейки с углами преднаклона  $\gamma^{(1)} = \theta_0^{(1)} + \beta$  и  $\gamma^{(2)} = \theta_0^{(2)} - \beta$  на противоположных подложках, соответственно (рис. 1, *a*). При этом эквивалентная толщина ячейки увеличивается в 1/соѕ $\beta$  раз.

Рассмотрим случай наклонного падения поляризованного пучка света, когда плоскость падения пучка 12 составляет угол  $\varphi$  с плоскостью директора ЖК-ячейки *xz* (рис. 1,  $\delta$ ). Угол падения равен  $\beta$ . Тогда вектор электрического поля световой волны составляет угол  $\pi/2 + \varphi$  по отношению к этой плоскости.

Для каждого угла  $\varphi$  падения света вид набора зависимостей  $\Phi(\theta_0, z)$  при разных величинах  $\beta$  мало изменяется при изменении угла  $\varphi$ , однако область значений  $\Phi(\theta_0, z)$  поднимается вверх и одновременно ее амплитуда уменьшается.

Слой ЖК в ячейке условно разбивается на тонкие слои с мало различающимися от слоя к слою значениями угла наклона директора ЖК.

Для каждого тонкого слоя рассчитывается его вклад, аналогичный вкладу тонкой ячейки ЖК с постоянным углом наклона директора ЖК, толщина которой равна толщине рассматриваемого слоя, угол равен углу наклона директора в рассматриваемом слое. Угол наклона директора ЖК распределен (в данной рассматриваемой модели ячейки ЖК) линейно по толщине ячейки. Таким образом, если тонкие слои ЖК равной толщины, то и угол наклона директора в них изменяется от слоя к слою на одинаковую малую величину.

На рис. 1, *в*, *г* показано, как различаются два возможных варианта падения луча (в плоскости директора ЖК).



Puc. 1: а – геометрия наклонного падения света на ЖК-ячейку с несимметричными граничными условиями. Луч света в плоскости директора; *б* – наклонное падение поляризованного пучка света с несовпадающими плоскостями падения пучка и плоскости директора ЖК-ячейки; *в*, *г* – для ячейки возможны два случая взаимного расположения директора ЖК и падающего луча

#### 3. Результаты моделирования

## 3.1. Ячейка, заполненная ЖК с отрицательной диэлектрической анизотропией. Распределение директора ЖК

Рассмотрим ниже ячейку, заполненную ЖК с отрицательной диэлектрической анизотропией. По мере нарастания поля она стремится к планарной ориентации директора ЖК, а толщина слоя (длина когерентности), где заметно влияние заданного ориентантом приповерхностного угла, уменьшается. Распределения угла наклона директора ЖК по толщине ячейки показаны ниже на рисунках при следующих значениях параметра *M*:

Параметр М	Рисунок
0,05	Рис. 2, <i>a</i> , <i>б</i> , <i>в</i>
0,1	Рис. 2, г, д
0,2	Рис. 2, е, ж
0,4	Рис. 2, 3, и
0.8	Рис. 2. к. л

На рис. 2, *а* изображено распределение директора ЖК в односторонней ячейке в зависимости от толщины ячейки и угла преднаклона директора на той стороне ячейки, которая покрыта ориентантом.

На рис. 2, б изображены продольные (вдоль оси z, т. е. по толщине ячейки) профили распределения директора ЖК при различных начальных углах наклона на ориентирующей стороне ячейки.

На рис. 2, в изображен угол на не покрытой

ориентантом стороне ячейки (назовем ее свободной стороной ячейки, так как на ней приповерхностный угол наклона директора ЖК свободен, в отличие от покрытой ориентантом стороны ячейки, которую будем называть ориентирующей стороной) в зависимости от толщины ячейки и угла преднаклона директора ЖК на ориентирующей стороне ячейки.

На рис. 2, *г* – *л* порядок расположения графиков такой же, как на рис. 2, *б*, *в*.



*Рис. 2, а.* Распределение директора ЖК в односторонней ячейке в зависимости от толщины ячейки и угла преднаклона директора на той стороне ячейки, которая покрыта ориентантом. Параметр *M* = 0,05 для рис. 2, *а, б, в* 



Рис. 2, б. Продольные (вдоль оси z, т. е. по толщине ячейки) профили распределения директора ЖК при различных начальных углах наклона на ориентирующей стороне ячейки



Рис. 2, в. Угол на не покрытой ориентантом стороне ячейки (назовем ее свободной стороной ячейки) в зависимости от толщины ячейки и угла преднаклона директора ЖК на ориентирующей стороне ячейки



*Рис. 2, г.* Профили распределения директора ЖК при различных начальных углах наклона. Параметр *M* = 0,1 для *2, г, д* 



*Рис. 2, е.* Профили распределения директора ЖК при различных начальных углах наклона. Параметр *M* = 0,2 для *2, е, ж* 



Рис. 2 д. Угол на не покрытой ориентантом стороне ячейки от толщины ячейки и угла преднаклона



*Рис. 2, ж.* Угол на не покрытой ориентантом стороне ячейки от толщины ячейки и угла преднаклона



*Рис. 2, з.* Профили распределения директора ЖК при различных начальных углах наклона. Параметр *M* = 0,4 для *2, з, и* 



Рис. 2, к. Профили распределения директора ЖК при различных начальных углах наклона. Параметр *M* = 0,8 для 2, к, л

## 3.2. Ячейка, заполненная ЖК с положительной диэлектрической анизотропией. Распределение директора ЖК

Рассмотрим ниже ячейку, заполненную ЖК с положительной диэлектрической анизотропией. По мере нарастания поля она стремится к гомео-



*Рис. 2, и.* Угол на не покрытой ориентантом стороне ячейки от толщины ячейки и угла преднаклона



*Рис. 2, л.* Угол на не покрытой ориентантом стороне ячейки от толщины ячейки и угла преднаклона

тропной ориентации директора ЖК, а толщина слоя (длина когерентности), где заметно влияние заданного ориентантом приповерхностного угла, уменьшается.

Распределения угла наклона директора ЖК по толщине ячейки показаны ниже на рисунках при следующих значениях параметра *M*:

Параметр М	Рисунок
0,05	Рис. 3, а, б, в
0,1	Рис. 3, г, д
0,2	Рис. 3, е, ж
0,4	Рис. 3, з, и
0,8	Рис. 3, к, л

На рис. 3, *а* изображено распределение директора ЖК в односторонней ячейке в зависимости от толщины ячейки и угла преднаклона директора на той стороне ячейки, которая покрыта ориентантом.

На рис. 3, б изображены продольные (вдоль оси z, т. е. по толщине ячейки) профили распреде-

ления директора ЖК при различных начальных углах наклона на ориентирующей стороне ячейки.

На рис. 3, *в* изображен угол на не покрытой ориентантом стороне ячейки (назовем ее свободной стороной ячейки, так как на ней приповерхностный угол наклона директора ЖК свободен, в отличие от покрытой ориентантом стороны ячейки, которую будем называть ориентирующей стороной) в зависимости от толщины ячейки и угла преднаклона директора ЖК на ориентирующей стороне ячейки.

На рис. 3, *г* – *л* порядок расположения графиков такой же, как на рис. 3, *б*, *в*.



*Рис. 3, а.* Распределение директора ЖК в односторонней ячейке в зависимости от толщины ячейки и угла преднаклона директора на той стороне ячейки, которая покрыта ориентантом. Параметр *M* = 0,05 для рис. 3, *а*, *б*, *в* 



Рис. 3, б. Продольные (вдоль оси z, т. е. по толщине ячейки) профили распределения директора ЖК при различных начальных углах наклона на ориентирующей стороне ячейки



*Рис. 3, в.* Угол на не покрытой ориентантом стороне ячейки (назовем ее свободной стороной ячейки) в зависимости от толщины ячейки и угла преднаклона директора ЖК на ориентирующей стороне ячейки



Рис. 3, г. Профили распределения директора ЖК при различных начальных углах наклона. Параметр M = 0,1 для 3, г, д



*Рис. 3, е.* Профили распределения директора ЖК при различных начальных углах наклона. Параметр *M* = 0,2 для рис. 3 *е, ж* 



Рис. 3, д. Угол на не покрытой ориентантом стороне ячейки от толщины ячейки и угла преднаклона



*Рис. 3, ж.* Угол на не покрытой ориентантом стороне ячейки от толщины ячейки и угла преднаклона



*Рис. 3, з.* Профили распределения директора ЖК при различных начальных углах наклона. Параметр *M* = 0,4 для рис. 3, *з. и* 



Рис. 3, к. Профили распределения директора ЖК при различных начальных углах наклона на ориентирующей стороне ячейки

## 3.3. Ячейка, заполненная ЖК с отрицательной диэлектрической анизотропией. Оптические свойства

Результаты расчета параметра  $\Phi$  (нормированная разность фазовых задержек) для обоих вариантов падения луча света (см. рис. 1, *б*, *в*) и гибридных односторонних ячеек с отрицательной ди-



Рис. 3, и. Угол на не покрытой ориентантом стороне ячейки от толщины ячейки и угла преднаклона



*Рис. 3, л.* Угол на не покрытой ориентантом стороне ячейки от толщины ячейки и угла преднаклона. Параметр M = 0.8 для рис. 3, к, л

электрической анизотропией приведены на рис. 4. Параметр M = 0,1.

В левом столбце на рис. 4 показаны случаи падения света, соответствующие рис. 1,  $\delta$ , в правом столбце на рис. 4 показаны случаи падения света, соответствующие рис. 1,  $\epsilon$ .

Параметр M = 0,1. Показатели преломления  $n_o = 1,5; n_e = 1,7. \Delta \epsilon < 0.$ 



*Рис. 4, а.* Угол падения  $\beta = 0^{\circ}$  и лежит в плоскости директора ЖК



*Рис. 4, б.* Угол падения  $\beta = 15^{\circ}$  и лежит в плоскости директора ЖК



*Рис. 4, в.* Угол падения  $\beta = 30^{\circ}$  и лежит в плоскости директора ЖК



*Рис. 4, г.* Угол падения  $\beta = 45^{\circ}$  и лежит в плоскости директора ЖК



*Рис. 4, д.* Угол падения  $\beta = 60^{\circ}$  и лежит в плоскости директора ЖК



*Рис. 4, е.* Угол падения β = 75° и лежит в плоскости директора ЖК

Проанализируем приведенные на рис. 4 зависимости  $\Phi(\theta_0, z)$ . Прежде всего, с ростом угла падения  $\beta$  возрастают различия между двумя вариантами падения луча света. При косом падении ( $\beta = 45^{\circ}$ ) зависимость  $\Phi(\theta_0, z)$  для обоих случае наиболее различается между собой. А затем по мере роста угла падения различия уменьшаются. При угле, равном нулю (нормальное падение света), оба варианта падения света дают одинаковую зависимость  $\Phi(\theta_0, z)$ . И чисто теоретически, при прямом угле (падение света вскользь вдоль поверхности ячейки) оба варианта падения света тоже дают одинаковую зависимость  $\Phi(\theta_0, z)$ .

## 3.4. Ячейка, заполненная ЖК с положительной диэлектрической анизотропией. Оптические свойства

Результаты расчета параметра  $\Phi$  (нормированная разность фазовых задержек) для обоих вариантов падения луча света (см. рис. 1, *б*, *в*, приведенный выше) и гибридных односторонних ячеек

с положительной диэлектрической анизотропией приведены на рис. 5. Параметр M = 0,1.

В левом столбце на рис. 5 показаны случаи падения света, соответствующие рис. 1,  $\delta$ , в правом столбце на рис. 5 показаны случаи падения света, соответствующие рис. 1,  $\epsilon$ .

Параметр M = 0,1. Показатели преломления  $n_o$  = 1,5;  $n_e$  = 1,7;  $\Delta \epsilon > 0$ .



*Рис. 5, а.* Угол падения  $\beta = 0^{\circ}$  и лежит в плоскости директора ЖК



*Рис. 5, б.* Угол падения β = 15° и лежит в плоскости директора ЖК



*Рис. 5, 6*. Угол падения  $\beta = 30^{\circ}$  и лежит в плоскости директора ЖК



*Рис. 5, г.* Угол падения  $\beta = 45^{\circ}$  и лежит в плоскости директора ЖК



*Рис. 5, д.* Угол падения  $\beta = 60^{\circ}$  и лежит в плоскости директора ЖК



*Рис. 5, е.* Угол падения  $\beta = 75^{\circ}$  и лежит в плоскости директора ЖК

Проанализируем приведенные на рис. 5 зависимости  $\Phi(\theta_0, z)$ . Прежде всего, с ростом угла падения  $\beta$  возрастают различия между двумя вариантами падения луча света. При косом падении ( $\beta = 45^{\circ}$ ) зависимость  $\Phi(\theta_0, z)$  для обоих случаев наиболее различается между собой. А затем по мере роста угла падения различия уменьшаются. При угле, равном нулю (нормальное падение света), оба варианта падения света дают одинаковую зависимость  $\Phi(\theta_0, z)$ . И чисто теоретически, при прямом угле (падение света вскользь вдоль поверхности ячейки) оба варианта падения света тоже дают одинаковую зависимость  $\Phi(\theta_0, z)$ .

#### Выводы

- Впервые предложено регулировать толщину переходного слоя (длину когерентности) ЖК, варьируя для этого комплексно параметры ячейки (угол преднаклона, связанный с поверхностной обработкой, и толщину) и прилагаемое поле с учетом упругих и диэлектрических свойств ЖК.
- Впервые предложено регулировать оптические свойства ЖК-ячейки, задавая геометрию ее переходного слоя.
- Предложен метод расчета распределения директора ЖК как с отрицательной, так и с положительной диэлектрической анизотропией в односторонней ячейке, в зависимости от толщины ячейки и угла преднаклона директора на той стороне ячейки которая покрыта ориентантом.
- Выполнена теоретическая и компьютерная модель распределения директора ЖК.
- 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 краевого угла на ориентирующей стороне ячейки.
- Смоделирована зависимость нормированной фазовой задержки Φ(θ<sub>0</sub>) от угла преднаклона, толщины ячейки и приложенного к ней поля для нематической ЖК-ячейки с несимметричными краевыми углами наклона директора на противолежащих сторонах (одна сторона покрыта ориентантом, другая сторона неориентирующая).

 Метод применим для различных типов ячеек ЖК с положительной или отрицательной диэлектрической анизотропией. В частности, он может применяться для расчета оптических компенсаторов.

Работа была выполнена при поддержке грантов РФФИ № 14-07-00574-а, № 12-07-90006-Бел\_а и гранта Президента Российской Федерации НШ-1495.2012.8.

#### Список литературы / References

- Беляев В. В., Соломатин А. С. Оптические свойства гибридных жидкокристаллических ячеек при различных углах падения света. // Оптический Журнал. 2014. Т. 81 (принята к печати). [Belyaev V. V., Solomatin A. S. Optical properties of hybrid liquid crystal cells at different light incidence angles // Journal of Optical Technology. 2014. Vol. 81 (accepted for publication)].
- 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. P. 4244–4249.
- 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. P. 3012–3019.
- Belyaev V. V., Solomatin A. S., Chausov D. N., Gorbunov A. A. Measurement of the LC pretilt angle and polar anchoring in cells with homogeneous and inhomogeneous LC director configuration and weak anchoring on organosilicon aligning films // SID'12 Digest. 2012. P. 1422–1425.
- Kim W. C., Jeong Y. H., Lee S. H. Electrooptic characteristics of a fringe-field driven hybrid aligned nematic liquid crystal cell using a liquid crystal with positive dielectric anisotropy // Japanese J. Appl. Phys. 2004. Vol. 43. P. 637–641.
- Belyaev V. V., Solomatin A. S., Chausov D. N. Optical properties of liquid crystal cells with hybrid orientation and negative birefringence // SID Symposium Digest of Technical papers. 2013. Vol. 44, Iss. 1. P. 1328–1331.
- Де Жен П. Физика жидких кристаллов. М. : Мир, 1977. 400 с. [De Gennes P.G. The physics of liquid crystals. Clarendon Press, Oxford, 1974].

Поступила в редакцию 17.04.2014 г.