

06.2;15

Метод определения угла преднаклона директора в ячейках с гибридной и гомеотропной ориентацией нематического жидкого кристалла

© Д.А. Вакулин

Университет информационных технологий, механики и оптики,
Санкт-Петербург
E-mail: vakulin.dmitry@gmail.com

Поступило в Редакцию 10 февраля 2015 г.

Разработан новый метод для определения угла преднаклона директора в ячейках с гибридной или гомеотропной ориентацией нематического жидкого кристалла. Для его реализации необходимо экспериментально определить пропускание оптической системы в параллельных поляризаторах и максимальное пропускание ячейки в скрещенных поляризаторах. Метод позволяет осуществлять локальный контроль ориентации директора жидкого кристалла на ориентирующей поверхности.

Оптические, электрические и динамические свойства зависят от распределения угла наклона директора в слое нематического жидкого кристалла (НЖК). Поэтому определение и контроль начального угла наклона директора (угла преднаклона) при создании устройств на основе НЖК имеют большое значение. Одним из альтернативных путей повышения быстродействия ЖК-устройств является использование гибридно-ориентированных нематических (hybrid alignment nematic — HAN) слоев с асимметричными условиями межфазного взаимодействия на противоположных границах раздела с ориентирующей поверхностью. В таких структурах отсутствует порог Фредерикса, что позволяет снизить рабочее напряжение, а использование двухчастотного НЖК существенно сокращает время оптического отклика за счет управления процессом релаксации жидкого кристалла электрическим полем [1,2].

Существующие методы определения углов преднаклона директора в гибридно ориентированных структурах обладают рядом недостатков: необходимостью использования в качестве подложек специального

вида призм, сложностью экспериментальной схемы и необходимостью воздействовать на ЖК-ячейку электрическим полем или переориентировать ее [3–5]. Такой процесс измерения углов преднаклона директора требует значительных затрат времени и создания специального экспериментального оборудования.

Известные методы определения угла преднаклона в однородно ориентированных ячейках: метод вращения ЖК-ячейки, емкостный метод и метод контроля угла по фазовой задержке света в ЖК-ячейке — основаны на измерении оптических или электрических свойств ЖК-ячеек [6,7]. Максимальное значение угла преднаклона, которое может быть измерено методом вращения для типичного НЖК $n_o = 1.55$ и $n_e = 1.74$, составляет 16.3° . Недостатком емкостного метода является влияние внешнего электрического поля на точность определения угла преднаклона в результате деформации слоя.

Задачей данной работы была разработка метода определения углов преднаклона директора для гибридно ориентированных структур НЖК, имеющих разные углы преднаклона на противоположных межфазных границах ЖК-слоя.

В ячейке с однородной ориентацией угол наклона директора в слое ЖК равен углу преднаклона директора на поверхности. Распределение угла наклона директора вдоль оси z в гибридно ориентированной ячейке с углами преднаклона на противоположных подложках θ_1 и θ_2 и толщиной слоя d можно рассчитать численно, используя теорию Франка–Озеена, в соответствии с которой

$$\frac{z}{d} = \frac{G(\theta_1, \theta)}{G(\theta_1, \theta_2)}, \quad (1)$$

$$G(\theta_1, \theta_2) = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sqrt{\cos^2 \theta + k \sin^2 \theta} d\theta, \quad (2)$$

где $k = K_{33}/K_{11}$, K_{11} и K_{33} — коэффициенты упругости Франка.

Для одноконстантной аппроксимации принимается, что $K_{11} = K_{33}$ и $k = 1$. Тогда распределение углов наклона директора выражается соотношением [8]

$$\theta(z, \theta_1, \theta_2) = \frac{z}{d} (\theta_2 - \theta_1) + \theta_1. \quad (3)$$

Интенсивность пропускания I и фазовая задержка Φ жидкокристаллической ячейки, размещенной между скрещенными поляризатором и анализатором, выражается соотношениями [9]:

$$I(\theta_1, \theta_2) = I_0 \sin^2 \frac{\Phi(\theta_1, \theta_2)}{2}, \quad (4)$$

$$\Phi(\theta_1, \theta_2) = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^d \left[\frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e^2 \sin^2 \theta(z, \theta_1, \theta_2) + n_o^2 \cos^2 \theta(z, \theta_1, \theta_2)}} - n_o \right] dz, \quad (5)$$

где n_o и n_e — показатели преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей и λ — длина волны.

Используя формулы (1)–(5), можно численно рассчитать зависимость интенсивности пропускания от начальных углов наклона директора на противоположных границах раздела НЖК с ориентирующими слоями.

Для проведения расчета углов преднаклона необходимо предварительно измерить толщину ЖК-ячейки интерферометрическим или емкостным методами [7]. Интенсивность пропускания оптической системы I_0 экспериментально определяется, когда оси поляризатора и анализатора параллельны. Затем измеряется интенсивность пропускания системы с ЖК-ячейкой, когда оси поляризатора и анализатора скрещены. Для получения максимального пропускания оптическая ось ЖК-ячейки должна составлять угол 45° с осью поляризатора. Экспериментальное значение интенсивности пропускания нормировалось относительно величины I_0 .

Теоретическая зависимость интенсивности пропускания от начальных углов наклона директора на противоположных ориентирующих слоях, рассчитанная по формуле (4), представляет собой поверхность $I(\theta_1, \theta_2)$. На рис. 1, *a* и 2, *c* показана моделируемая поверхность, рассчитанная с помощью уравнения (5) для различных углов преднаклона и длин волн 1500 и 650 nm. Моделирование проводилось для ячейки толщиной 6 μm , заполненной двухчастотным жидким кристаллом ЖК-1001 (НИОПИК, Москва) с показателями преломления $n_o = 1.54$ и $n_e = 1.70$ (1500 nm), $n_o = 1.58$ и $n_e = 1.82$ (650 nm). Линии, показанные на рис. 1, *b* и *d*, образуются в результате пересечения моделируемой поверхности с плоскостью, параллельной $\theta_1 0 \theta_2$, положение которой определяется координатой по оси $I = I_{\text{exp}}$ (рис. 1, *a* и 2, *c*).

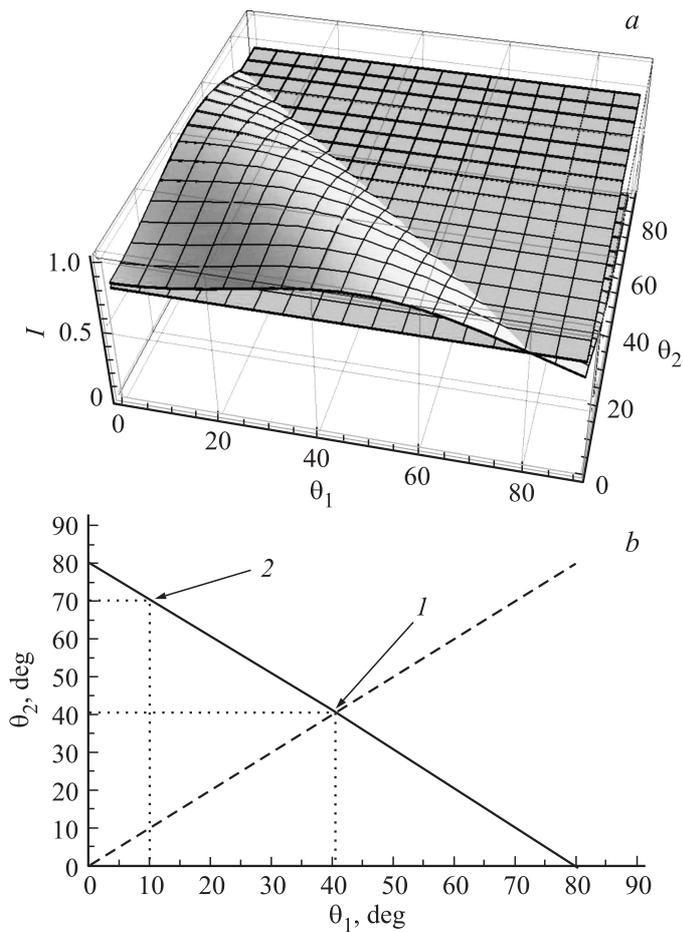


Рис. 1. Теоретическая зависимость интенсивности пропускания от углов преднаклона директора в НЖК-ячейке (поверхность) и экспериментальная интенсивность пропускания (плоскость) на длине волны 1500 (а) и 650 nm (с); *b* и *d* — проекции линий пересечения поверхности и плоскости, показанных на графике *a* и *c* соответственно. Координаты точки пересечения *1* (*b*) соответствуют углу преднаклона в однородной ячейке, *2* — соответствуют углу преднаклона гибридно ориентированной ячейки. *e* — определение углов преднаклона в гибридно ориентированной ячейке при использовании двух длин волн как координаты точки пересечения линий, показанных на *b* и *d*.

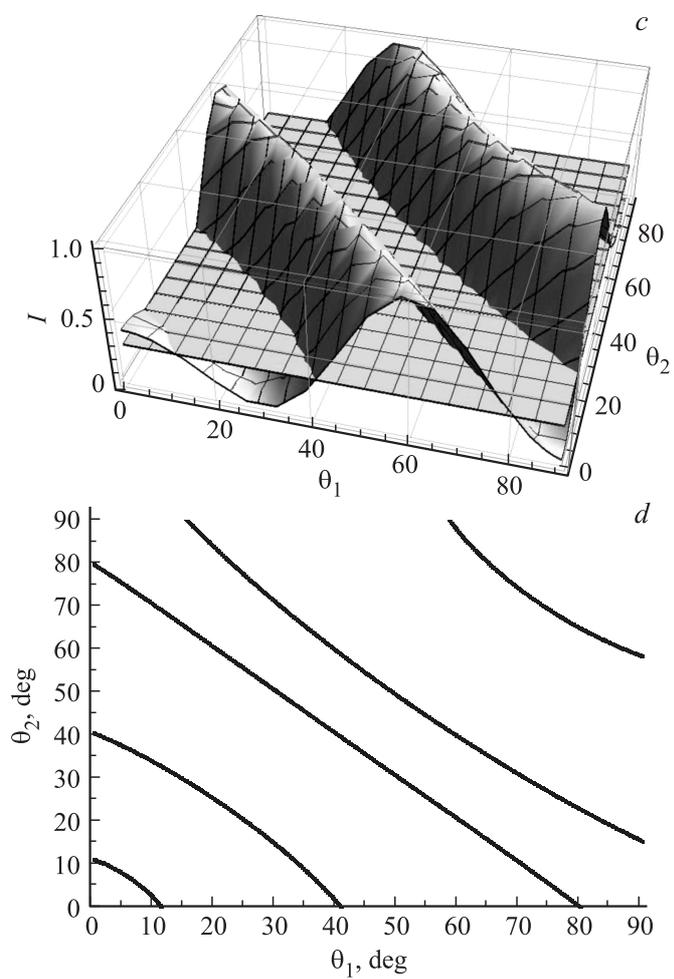


Рис. 1 (продолжение).

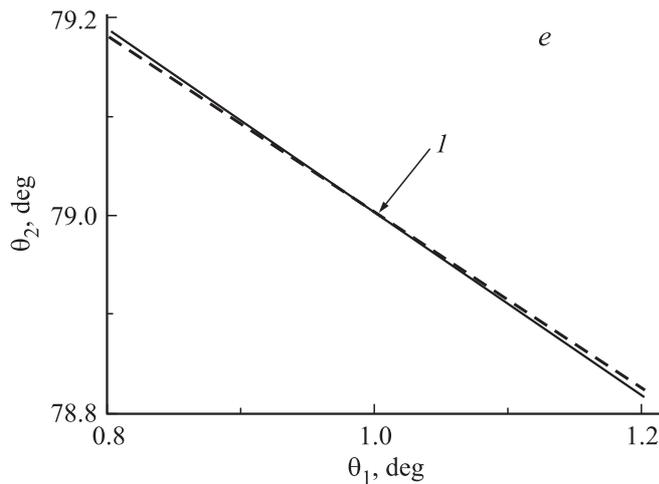


Рис. 1 (продолжение).

В ячейке с однородной ориентацией углы преднаклона $\theta_1 = \theta_2$ и соответствуют координатам точки пересечения этой линии с прямой, образующей с осью $0\theta_1$ на рис. 1, *b* (*I*) угол 45° . Для однородно ориентированной ячейки угол преднаклона может быть рассчитан с помощью аналитического выражения

$$\theta = \arccos \left[\left(\frac{\lambda n_e^2 a (2dn_o\pi + \lambda a)}{(n_e^2 - n_o^2)(dn_o\pi + \lambda a)^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right], \quad (6)$$

$$a = \arcsin [\sqrt{I_{\text{exp}}}],$$

$$0 \leq I_{\text{exp}} \leq 1.$$

Фазовая задержка в ячейки должна быть не более π , что накладывает ограничения на максимальную толщину ячейки. Для гомеотропной ячейки с ЖК-1001 с углом преднаклона более 60° толщина слоя может быть более $7 \mu\text{m}$. Искомые углы преднаклона в случае гибридной ориентации можно определить двумя способами: если известен угол преднаклона на одной из ориентирующих поверхностей (рис. 1, *b*, 2) или используются измерения интенсивности пропускания для двух длин

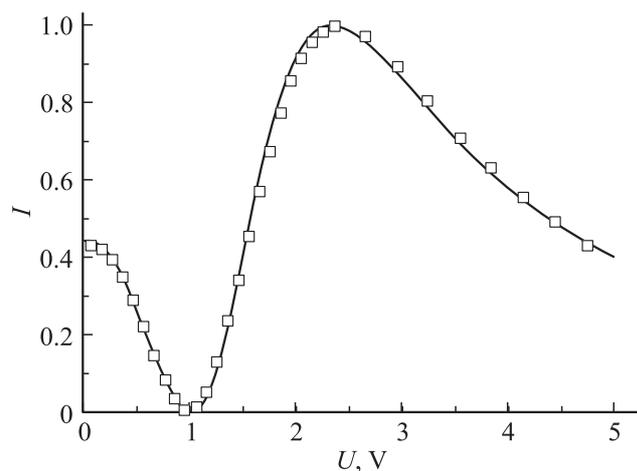


Рис. 2. Зависимость интенсивности пропускания от приложенного напряжения для гибридно ориентированной ячейки с углами преднаклона 1 и 79°: сплошная линия — теоретически рассчитанная кривая; квадраты — экспериментальные значения.

волны, что позволит определить координаты точки пересечения линии на плоскости $\theta_1\theta_2$ (рис. 1, *e*).

Для проведения эксперимента была изготовлена гибридно ориентированная ячейка, заполненная двухчастотным жидким кристаллом ЖК-1001 (НИОПИК, Москва) толщиной $6\ \mu\text{m}$. Гибридная ориентация в этой ЖК-ячейке создавалась с помощью слоев натертого полиимида и наклонно напыленного слоя SiO_x [10]. Начальные углы наклона директора на противоположных подложках гибридно ориентированной ячейки, полученные в результате расчета, были равны 1 и 79° (рис. 1, *e*).

Теоретический расчет зависимости интенсивности пропускания от приложенного напряжения показан на рис. 2. Правильность полученных значений углов, равных 1 и 79°, подтверждает совпадение теоретической и экспериментальной зависимостей интенсивности пропускания ЖК-ячейки [11,12].

Достоинством разработанного метода является возможность локального определения углов преднаклона в НЖК-ячейках для контроля однородности гомеотропной и гибридной ориентации. Метод не требует

приложения к ЖК-ячейке внешнего электрического или магнитного полей, а также вращения ячейки, что упрощает процесс измерения и сокращает время определения угла.

Автор благодарит В.В. Беляева за обсуждение результатов работы. Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проектной части государственного задания и гранта компании ОПТЭК № 8/2014/71-75-Spb.

Список литературы

- [1] *Коншина Е.А., Вакулин Д.А., Иванова Н.Л., Гавриш Е.О., Васильев В.Н.* // ЖТФ. 2012. Т. 82. В. 5. С. 66–70.
- [2] *Иванов А.В., Вакулин Д.А., Коншина Е.А.* // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 3. С. 23–29.
- [3] *Wang S.-Y., Wu H.-M., Yang K.-H.* // Appl. Opt. 2013. V. 52. N 21. P. 5106–5111.
- [4] *Каретников Н.А., Каретников А.А., Ковшик А.П., Рюмцев Е.И.* // Опт. и спектр. 2007. Т. 103. № 4. С. 663–667.
- [5] *Яблонский С.В., Михайлов А.С., Палто С.П., Юдин С.Г., Яковлев С.В., Дюран Г.* // Письма в ЖЭТФ. 1998. Т. 67. № 6. С. 387–392.
- [6] *Hwang S.J., Lin S.-T., Lai C.-H.* // Opt. Communications. 2006. V. 260. N 2. P. 614–620.
- [7] *Коншина Е.А., Федоров М.А., Амосова Л.П.* // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 12. С. 9–13.
- [8] *Barbero G., Evangelista L.R.* // Adsorption Phenomena and Anchoring Energy in Nematic Liquid Crystals. Taylor & Francis, 2006.
- [9] *Блинов Л.М.* // Жидкие кристаллы. Структура и свойства. М.: Либроком, 2013. С. 484.
- [10] *Амосова Л.П., Парфенов П.С., Исаев М.В.* // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 11. С. 88–95.
- [11] *Беляев В.В., Соломатин А.С., Чаусов Д.Н.* // Вестник МГОУ. Сер. Физика–Математика. 2013. № 1. С. 32–40.
- [12] *Iwaya K., Naito H., Ichinose H., Klasen-Memmer M., Tarumi K.* // Proc. 17th International Display Workshops. 2010.