

07

Влияние граничных условий на фазовую модуляцию света в случае S -эффекта нематика

© Е.А. Коншина, М.А. Федоров

Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики
E-mail: eakonshina@mail.ru

Поступило в Редакцию 8 апреля 2006 г.

Сообщаются результаты исследований фазовой модуляции света для случая S -эффекта нематического жидкого кристалла (НЖК), планарно-ориентированного с помощью слоя аморфного гидрогенизированного углерода (α -C:H). Впервые экспериментально показано, что формирование анизотропии рельефа поверхности электродного слоя способствует более однородной ориентации ЖК-молекул с помощью α -C:H и позволяет получить максимальную величину фазовой задержки для определенной толщины слоя НЖК.

PACS: 77.84.Nh, 78.20.Fm, 78.20.Jg

Исследование фазовой модуляции света в жидких кристаллах (ЖК) имеет немаловажное значение при разработке пространственных модуляторов света для адаптивной оптики. Повышение величины фазовой задержки ($\Delta\Phi$) является актуальной задачей при создании таких ЖК-устройств. Одним из путей повышения $\Delta\Phi$, безусловно, является увеличение оптической анизотропии (Δn) ЖК-смесей [1], однако это часто сопровождается увеличением вязкости ЖК и повышением времени релаксации. Как показывает наш экспериментальный опыт, на величину $\Delta\Phi$ существенно влияют физико-химические свойства ориентирующей поверхности. Увеличение фазовой задержки путем контролируемого изменения условий на границе раздела фаз является перспективным направлением в области физики ориентационных оптических эффектов в НЖК. Эта работа посвящена исследованию влияния анизотропии текстуры ориентирующей поверхности на фазовую модуляцию света в случае S -эффекта НЖК с положительными диэлектрической и диамагнитной анизотропиями. Гомогенную (параллельную плоскости

подложки) ориентацию осуществляли с помощью слоя a -С:Н. Для исследований использовали НЖК фирмы Merck VL-037 с высокой оптической анизотропией ($\Delta n = 0.282$ на длине волны $\lambda = 589.3$ nm).

Электроуправляемые ЖК-ячейки типа сэндвич собирали из двух полированных стеклянных подложек с прозрачными электродами на основе окислов индия и олова (ITO). Слои ITO получали методом лазерного напыления с последующим отжигом на воздухе, который существенно увеличивает их прозрачность [2]. Вместе с тем в результате отжига на поверхности ITO образуется рыхлый пористый слой, который удаляют полировкой поверхности мягкой тканью. Для создания планарной ориентации НЖК использовали полимероподобные слои a -С:Н, которые осаждали на подложки со слоем ITO с помощью устройства, описанного в [3]. Метод основан на химическом осаждении паров углеводородов (Chemical Vapor Deposition технология) в плазме тлеющего разряда на постоянном токе [4]. Впервые в качестве исходного углеводорода для осаждения ориентирующих слоев был использован этиловый спирт. Все собранные ячейки имели зазор между стеклянными подложками одинаковой толщины, который формировали с помощью тефлоновых прокладок. В соответствии с оптическими интерференционными спектрами, полученными для исследуемых ячеек, величина зазора была равна $14.5 \pm 0.5 \mu\text{m}$. Ячейки заполняли жидким кристаллом капиллярным способом на воздухе при температуре около 60°C .

Измерения фазовой задержки и динамических характеристик НЖК-ячеек проводили с помощью электрооптической системы, схема которой показана на рис. 1. НЖК-ячейку размещали между скрещенными поляризаторами. В качестве источника света использовали He–Ne-лазер с длиной волны $\lambda = 632.8$ nm. Угол между вектором поляризации падающего луча и исходным направлением директора ЖК соответствовал 45° . Измерения проводили при комнатной температуре. На слои ITO НЖК-ячейки подавали прямоугольный импульс напряжения длительностью 0.5 s. Рабочее напряжение обеспечивало максимально возможное для данной ячейки число осцилляций. Интенсивность света при этом оставалась неизменной. Изменение пропускания света НЖК-ячейкой регистрировали с помощью осциллографа. Наблюдаемое количество экстремумов на стадиях включения и выключения совпадали и соответствовали $\Delta\Phi$. Экспериментально полученные значения $\Delta\Phi$ для ряда исследованных ячеек были в интервале от 7 до 12 π .

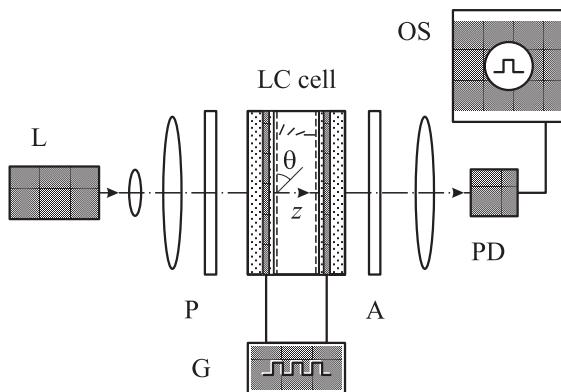


Рис. 1. Схема измерения фазовой задержки и динамических характеристик НЖК-ячеек: L — He–Ne-лазер, P — поляризатор, LC cell — ЖК-ячейка, A — анализатор, G — генератор напряжения, PD — фотодиод, OS — осциллограф. Электрическое поле приложено перпендикулярно поверхности подложки и параллельно оси z .

С ростом напряжения в результате изменения угла наклона директора (θ) молекул НЖК относительно оси z происходит уменьшение двулучепреломления, наблюдаемого по изменению фазы светового потока, распространяющегося перпендикулярно слою ЖК с толщиной d_{LC} (рис. 1). При этом коэффициент преломления для обыкновенного луча (n_o) остается неизменным, а для необыкновенного луча (n_e) уменьшается, стремясь к n_o . Изменение показателя преломления $n(z)$ и Δn описывается следующими формулами:

$$n(z) = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta(z) + n_e^2 \sin^2 \theta(z)}}, \quad (1)$$

$$\Delta n = (1/d_{LC}) \int_0^{d_{LC}} (n(z) - n_o) dz. \quad (2)$$

Разность фаз $\Delta\Phi$ связана с неоднородным изменением показателя преломления $n(z)$ по толщине ячейки для монохроматического света

с длиной волны λ соотношением (3) [5]:

$$\Delta\Phi = 2\pi d_{LC}\Delta n/\lambda. \quad (3)$$

При углах наклона директора, близких к нулю, величина $\Delta\Phi \cong 12 \div 13\pi$ для толщины НЖК $d_{LC} = 14.5 \pm 0.5 \mu\text{m}$ и $\Delta n = 0.282$ в соответствии с формулой (1). Разброс экспериментальных значений $\Delta\Phi$ может быть вызван вариацией необыкновенного показателя преломления НЖК n_e , возникающей в результате локального увеличения начального угла θ на рельефных дефектах поликристаллической поверхности электрода.

Для исследования влияния текстуры поверхности ИТО-слоя на фазовые и динамические характеристики мы сравнили две НЖК-ячейки, в которых по-разному были подготовлены поверхности электродных слоев ИТО перед осаждением на них ориентирующего слоя a -С:Н. В ячейке „а“ электроды полировали круговыми движениями с помощью мягкой ткани для получения гладкой поверхности. В ячейке „b“ слои ИТО полировали в одном направлении, чтобы сформировать анизотропную текстуру поверхности. Ячейку „b“ собирали таким образом, чтобы направления натирания на обеих подложках были параллельны.

Осциллограммы оптического отклика НЖК ячеек „а“ и „b“, полученные при напряжении 22 В, приведены на рис. 2, а и b соответственно. Характеристики сравниваемых НЖК ячеек даны в таблице. Времена подъема (τ_{on}) и спада (τ_{off}) для угла отклонения директора определялись по уровню пропускания 0.1–0.9. Формирование анизотропной текстуры поверхности ИТО в ячейке „b“ приводит к увеличению величины фазовой задержки и одновременно к уменьшению τ_{on} и τ_{off} , как можно видеть из таблицы. Величина фазовой задержки у ячейки „b“ равна 12π , в отличие от ячейки „а“, для которой $\Delta\Phi = 9\pi$ при одинаковой толщине слоя НЖК. Экспериментальное определение начального угла наклона директора по методу вращения ЖК-ячейки показало, что он был равен 12° и 2° в ячейках „а“ и „b“ соответственно. Таким образом, формирование анизотропии текстуры поверхности электрода влияет на начальный угол наклона директора. Уменьшением этого угла можно объяснить увеличение величины фазовой задержки в случае ячейки „b“.

Как видно из осциллограмм на рис. 2, а и b, при приложении электрического поля к ячейке с анизотропной структурой поверхности электрода наблюдался более крутой и быстрый рост угла наклона директора для S-эффекта по сравнению с ячейкой, имеющей гладкую

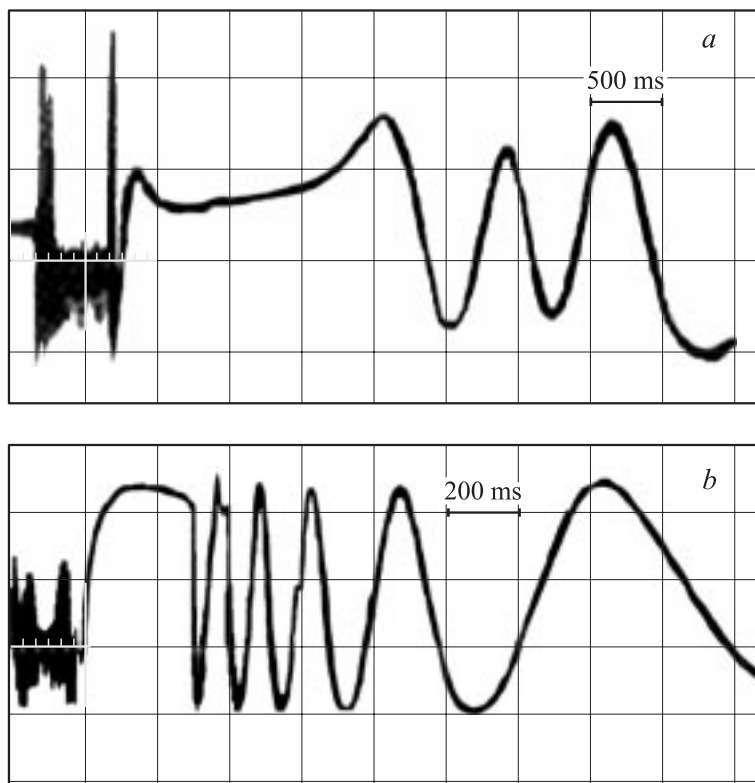


Рис. 2. Осциллограммы пропускания света с длиной волны 632.8 nm через НЖК-ячейки при подаче прямоугольного импульса напряжения длительностью 0.5 s. Нематик VL-037 с $\Delta n = 0.282$ ориентирован гомогенно с помощью слоя *a*-C:H. Рисунки *a* и *b* соответствуют электрооптическому отклику ячеек „*a*“ и „*b*“, характеристики которых приведены в таблице.

поверхность электрода, при одинаковом управляющем напряжении. Это можно объяснить согласованным поворотом директора по всей толщине слоя, включая граничные области, и, следовательно, меньшим противодействием упругих сил в этих областях в случае ячейки „*b*“. Формирование анизотропии рельефа поверхности электрода приводит к изменению силы анизотропно-упругого взаимодействия на границе

Фазовая задержка света с $\lambda = 0.632.8$ nm и динамические характеристики ячеек при толщине слоя VL-037, равной $14.5 \mu\text{m}$, и напряжении 22 V

НЖК-ячейка	$\Delta\Phi$	τ_{on}, s	τ_{off}, s
<i>a</i>	9π	0.78	2.06
<i>b</i>	12π	0.25	1.52

раздела НЖК–*a*-С:Н. Объяснение механизма увеличения фазовой задержки и ускорения динамики *S*-эффекта в результате формирования анизотропии рельефа ориентирующей ЖК-поверхности требует дополнительных исследований. В этой работе мы ограничимся феноменологическими объяснениями полученных результатов эксперимента.

Исследование ЖК-ячеек с помощью поляризационного микроскопа показало, что в ЖК-слое образца „*b*“ на темном фоне отчетливо были видны светлые штриховые линии, параллельные направлению натирания, которые визуализируют распределение рельефных дефектов электродного слоя вдоль этого направления, так как слой *a*-С:Н не изменяет топологии поверхности электрода [6]. Появление светлых линий в отсутствие приложенного электрического поля связано с аномальным пропусканием света через слой ЖК, что свидетельствует о деформации директора на рельефных дефектах поверхности ИТО/*a*-С:Н в направлении, перпендикулярном направлению натирания. Эти наблюдения дают основания представить структуру поверхности ИТО/*a*-С:Н как чередование гладких полос шириной в несколько микрон, разделенных тонкими линиями рельефных дефектов. Ранее проведенные исследования показали, что энергия сцепления (anchoring energy) НЖК на основе цианобифенильных молекул с поверхностью электрода до и после полировки была равна 6.6 и 1.1 mJ/m^2 соответственно, а после осаждения слоя *a*-С:Н повышалась до 16.7 mJ/m^2 [7]. Поэтому очевидно, что энергия сцепления на рельефных дефектах больше, чем на гладкой поверхности, а ее изменение в направлении, перпендикулярном направлению натирания электрода, может иметь периодический характер подобно натертым полиимидным ориентирующим слоям [8]. Когда к такой ячейке прикладывается напряжение, директор на границе областей с разной энергией сцепления должен вращаться с различным углом наклона к оси *z* на рис. 1 благодаря различию сил поверхностного

сцепления. Угол вращения директора при более сильном сцеплении в области рельефных дефектов меньше, чем при слабом сцеплении с гладкой поверхностью. Различие в углах вращения директора вызывает отклонение директора от направления, параллельного натирацию, и устанавливает его перпендикулярно. Эта деформация директора уменьшает упругую энергию взаимодействия, что объясняет ускорение динамики S -эффекта.

Результаты работы дают основание полагать, что увеличение фазовой задержки и ускорение динамики S -эффекта связано с формированием периодической анизотропной структуры поверхности электрода, которая влияет на характер анизотропно-упругого взаимодействия на границе раздела фаз ПГО/ a -C:H–НЖК. Разработка методов контроля анизотропии структуры ориентирующей поверхности и локального изменения энергии сцепления на границе раздела фаз позволит дать более точное объяснение наблюдаемым электрооптическим эффектам.

Список литературы

- [1] Gauza S., Wen C.-H., Wu S.-T., Janarthanan N., Hsu C.-S. // *Jap. J. Appl. Phys. Part 1*. 2004. V. 43. N 11 A. P. 7634–7638.
- [2] Толмачев В.А., Онохов А.П., Васильев П.Я. // *Оптический журнал*. 1998. Т. 65. № 2. С. 28–30.
- [3] Коншина Е.А. // *ЖТФ*. 2002. Т. 72. В. 6. С. 35–40.
- [4] Коншина Е.А., Толмачев В.А., Вангонен А.И., Фаткулина Л.А. // *Оптический журнал*. 1997. Т. 64. № 5. С. 88–95.
- [5] Blinov L.M., Chigrinov V.G. *Electrooptic effects in liquid crystal materials*. New York: Springer, 1994.
- [6] Исаев М.В., Коншина Е.А., Онохов А.П., Туровская Т.С. // *ЖТФ*. 1995. Т. 65. № 10. С. 175–179.
- [7] Толмачев В.А., Коншина Е.А. // *Оптический журнал*. 1998. Т. 65. № 7. С. 39–42.
- [8] Sugimura A., Ishino D. // *Thin Solid Films*. 2003. V. 438–439. P. 433–439.