Письма в ЖЭТФ, том 106, вып. 5, с. 293 – 296 © 2017 г. 10 сентября

Быстрый электрооптический отклик ячейки с гомеопланарным слоем нематического жидкого кристалла

Н. А. Каретников[1], *А. П. Ковшик, А. А. Каретников, Е. И. Рюмцев, Е. В. Аксенова, А. В. Сванидзе*

Санкт-Петербургский государственный университет, 199034 Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 7 июля 2017 г.

После переработки 31 июля 2017 г.

В ячейке с гомеопланарной ориентацией директора исследована рефракция света – поворот необыкновенного луча внутри слоя жидкого кристалла, подобный полному внутреннему отражению на границе двух сред. При воздействии электрического поля на слой получены времена нарастания $\tau_{\rm on}$ и спада $\tau_{\rm off}$ оптических откликов для различных углов падения света на слой жидкого кристалла. Для углов падения, значительно превышающих угол полного внутреннего отражения обыкновенного луча, времена $\tau_{\rm on}$ и $\tau_{\rm off}$ оптических откликов составляют 1–2 мс, что на три порядка меньше времени релаксации оптического отклика в случае падения луча по нормали.

DOI: 10.7868/S0370274X17170064

Исследование воздействия внешних полей на жидкокристаллические структуры с непрерывно меняющейся ориентацией директора представляет значительный интерес для физики конденсированного состояния вещества. Также актуально изучение электрооптических свойств таких структур в связи с широким использованием в дисплейной технике. Ключевое значение при этом имеют задачи установления связи между особенностями жидкокристаллической структуры и временами нарастания и спада оптического отклика под воздействием электрического поля.

В работах [1, 2] приведены результаты исследования влияния электрического поля на рефракцию необыкновенного луча в жидкокристаллических супертвист- и твист-структурах (директор на второй границе слоя повернут на 180° и 90° относительно первой). Были получены зависимости времен нарастания и спада оптического отклика от глубины проникновения луча в слой жидкого кристалла. Воздействие электрического поля на траекторию необыкновенного луча при нормальном и наклонном падении на гомеопланарный слой жидкого кристалла (ЖК) теоретически исследованы в работах [3, 4]. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование электрооптических характеристик жидкокристаллической ячейки на основе гомеопланарного слоя ЖК.

Жидкокристаллическая ячейка состояла из двух трапецеидальных стеклянных призм с показателем преломления $n_g = 1.7125$ для $\lambda = 632.8$ нм (рис. 1).

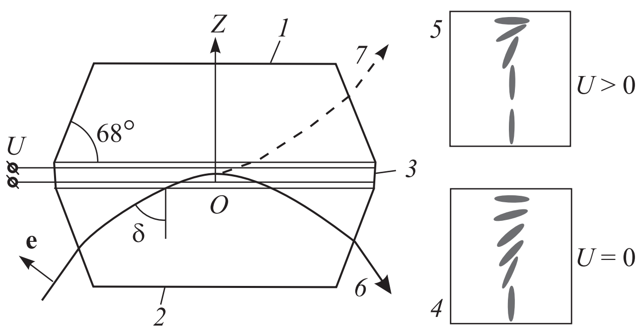

Рис. 1. Жидкокристаллическая ячейка и траектории необыкновенного луча. *1*, *2* – стеклянные призмы, *3* – слой ЖК, *4*, *5* – профиль директора при $U = 0$ и $U > 0$ соответственно, *6* – необыкновенный луч, отраженный внутри слоя ЖК, *7* – необыкновенный луч, прошедший через слой

Призмы имели основания размером 52 × 24 мм и высоту 18 мм. Наклон входных граней к основаниям составлял 68.0°. Все поверхности призм были отполированы, что позволяло направлять свет и по нормали к слою ЖК (вдоль оси OZ). На поверхности оснований нанесены прозрачные токопроводящие электроды. Один из электродов покрыт гомеотропно ориентирующим слоем, полученным из раствора стеарилхлорида хрома в изопропиловом спирте методом центрифугирования при скорости вращения призмы в 3000 об/мин. На поверхности другого электрода тем же методом наносили полиимидное покрытие. Планарная ориентация директора нематического ЖК на слое полиимида создавалась с помощью натирания покрытия хлопковой тканью в одном направлении вдоль длинной оси основания призмы.

[1] e-mail: akaret@mail.ru

Полиимидное покрытие обеспечивало жесткое сцепление директора с поверхностью. Угол между директором и поверхностью слоя ЖК, определенный поляриметрическим методом [5, 6], составлял не более 1°. Слой ЖК толщиной $d = 13.8$ мкм размещался между основаниями призм. В эксперименте использовали нематический жидкий кристалл ЖК-1466 (НИОПИК), который при температуре $t = 20\,°\mathrm{C}$ обладает следующими свойствами: анизотропия диэлектрической проницаемости $\Delta\varepsilon = +11.7$ в интервале частот 1–10 кГц, главные значения показателей преломления для необыкновенного луча $n_\mathrm{e} = 1.691$ и обыкновенного $n_\mathrm{o} = 1.511$ ($\lambda = 632.8$ нм), модули упругости $K_{11} = 1.2 \cdot 10^{-6}$ дин и $K_{33} = 0.99 \cdot K_{11}$.

В экспериментальной установке источником поляризованного излучения являлся гелий-неоновый лазер с длиной волны 632.8 нм и диаметром пучка 1 мм. Требуемое направление вектора поляризации лазерного луча устанавливали с помощью полуволновой пластинки. После полуволновой пластинки луч направлялся на ЖК-ячейку, расположенную на вращающемся столике с угловым отсчетным устройством, что позволяло изменять угол падения света на слой ЖК. Свет, прошедший через ЖК-ячейку, попадал на фотоприемник. В качестве источника управляющих электрических сигналов использовали генератор сигналов произвольной формы Agilent 33522A. Широкополосный усилитель 9100 (Tabor Electronics) служил для усиления сигнала. С помощью цифрового двухканального осциллографа АСК-3106 регистрировали управляющий электрический сигнал и оптический отклик с фотоприемника. Схема установки, использованная в нашем исследовании, приведена в работах [1, 2]. Для изучения электрооптических характеристик ячейки при нормальном падении луча на слой ЖК мы размещали ячейку между скрещенными поляризаторами. Направление вектора поляризации падающего света составляло 45° с направлением директора на планарно ориентированной поверхности слоя ЖК.

При исследовании рефракции луч лазера, проходя через боковую грань стеклянной призмы (см. рис. 1), направлялся наклонно на гомеотропно ориентированную поверхность слоя ЖК под углами $\delta > \delta_\mathrm{o} = \arcsin(n_\mathrm{o}/n_\mathrm{g}) = 61.9°$ (δ_o – угол полного внутреннего отражения обыкновенного луча на границе раздела стекло–ЖК). С помощью полуволновой пластинки вектор поляризации света устанавливался в плоскости падения луча. В этой же плоскости был расположен директор ЖК. Поэтому падающий на слой кристалла луч являлся необыкновенным, входил в слой ЖК и испытывал полное внутреннее отражение в объеме кристалла [1, 3]. Глубина проникновения луча в слой (расстояние от первой границы слоя до точки полного внутреннего отражения) зависит от угла падения и связана с параметрами жидкого кристалла.

Угол полного внутреннего отражения необыкновенного луча определяется соотношением

$$\sin\delta = \tilde{n}_\mathrm{e}/n_\mathrm{g}, \tag{1}$$

где

$$\tilde{n}_e = \frac{n_\mathrm{o} n_\mathrm{e}}{\sqrt{n_\mathrm{o}^2 + (n_\mathrm{e}^2 - n_\mathrm{o}^2)\cos^2\psi}} \tag{2}$$

– показатель преломления необыкновенной волны, ψ – угол между директором и волновым вектором необыкновенной волны в каждой точке траектории луча.

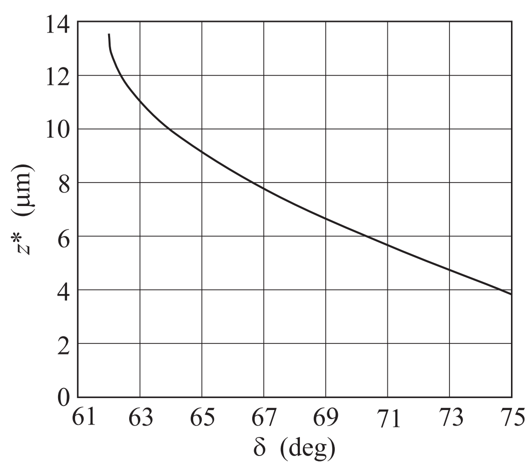

Рис. 2. Зависимость глубины проникновения необыкновенного луча в гомеопланарный слой ЖК от угла падения на слой

В точке полного внутреннего отражения волновой вектор необыкновенной волны направлен так же, как и директор на планарно ориентированной границе ЖК-ячейки. Конфигурация директора в слое ЖК может быть получена из уравнений Эйлера–Лагранжа. В случае равенства модулей упругости K_{11} и K_{33} угол между директором и осью OZ представляет собой линейную функцию переменной z [7]. Тогда из уравнений (1), (2) можно получить выражение для глубины проникновения z^* необыкновенного луча в слой ЖК:

$$z^* = d - \frac{2d}{\pi}\arccos\sqrt{\frac{n_\mathrm{o}^2(n_\mathrm{e}^2 - n_\mathrm{g}^2\sin^2\delta)}{(n_\mathrm{e}^2 - n_\mathrm{o}^2)n_\mathrm{g}^2\sin^2\delta}}. \tag{3}$$

Полученная зависимость z^* от δ представлена на рис. 2.

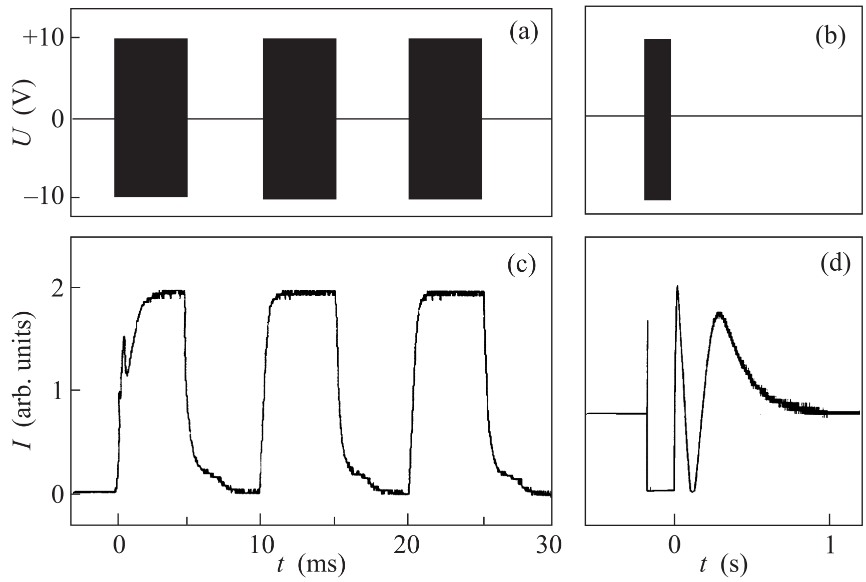

Рис. 3. (a) – импульсы управляющего напряжения (схематично), и (c) – оптический отклик для угла падения луча 68.0° ($z^* = 7.0$ мкм), (b)– управляющий импульс и (d) – оптический отклик для падения луча на слой ЖК по нормали

Для $\delta = 61.9°$ луч проходит через слой и поворачивает на границе раздела планарно ориентированный ЖК – стекло ($z^* = 13.8$ мкм). Увеличение угла падения необыкновенного луча на слой ЖК приводит к уменьшению глубины проникновения этого луча в слой.

Для углов падения света на слой в интервале 62.7–73.8° было изучено воздействие электрического поля на рефракцию. Когда на слой ЖК воздействовали импульсами переменного электрического поля, профиль директора изменялся, что приводило к нарушению условий, необходимых для поворота необыкновенного луча в слое и прохождению света через ячейку (см. рис. 1).

На рис. 3a показана осциллограмма управляющих двуполярных электрических импульсов (меандр) длительностью 5 мс с частотой заполнения $f = 10$ кГц и частотой следования 100 Гц при амплитуде $U_{\rm rms} = 10$ В. Оптические отклики исследуемой ячейки для угла падения луча на слой $\delta = 68.0°$ ($z^* = 7.0$ мкм) приведены на рис. 3b.

Из рис. 3c следует, что оптические отклики имеют достаточно крутые передний и задний фронты. На переднем фронте первого оптического отклика имеются осцилляции интенсивности, которые могут быть вызваны обратными потоками [8]. Такие осцилляции отсутствуют на всех последующих оптических откликах. Для сопоставления динамических характеристик эффекта электроуправляемой рефракции и эффекта электрически управляемого двулучепреломления на рис. 3b, d представлены осциллограммы управляющего импульса ($U_{\rm rms} = 10$ В) и оптического отклика при падении луча по нормали на слой ЖК в той же ячейке. Полученные результаты показывают, что для наклонного падения луча время спада оптического отклика ячейки на три порядка меньше времени релаксации оптического отклика в случае падения луча по нормали. Из рис. 3d следует, что полное время восстановления исходной конфигурации директора в ЖК-ячейке после прекращения действия электрического поля составляет около 1 с. Отсутствие осцилляций на втором и последующих откликах на рис. 3c можно объяснить тем, что при частоте следования управляющих импульсов, равной 100 Гц, каждый последующий управляющий электрический импульс накладывается на уже сильно деформированную предыдущим импульсом (почти полностью гомеотропную) конфигурацию директора, в которой обратные потоки не возникают.

Время включения оптического отклика $\tau_{\rm on}$ определяли как интервал между моментом включения электрического импульса и выходом светопропускания на уровень 0.9 от максимального значения. Время выключения $\tau_{\rm off}$ определяли как интервал между моментом выключения электрического импульса и снижением светопропускания до уровня 0.1 от максимального пропускания. Величины $\tau_{\rm on}$ и $\tau_{\rm off}$ для оптического отклика были получены для глубин проникновения луча в слой ЖК от 4.3 до 11.5 мкм (рис. 4).

Из рис. 4 следует, что при увеличении глубины проникновения от 4.3 до 11.5 мкм значения

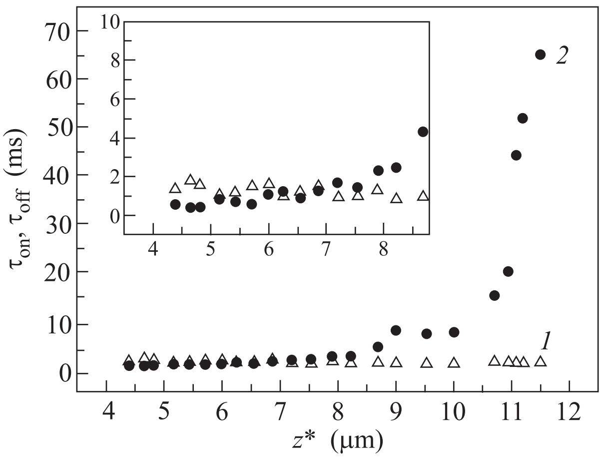

Рис. 4. Зависимость времен включения $\tau_{\rm on}$ (*1*) и выключения $\tau_{\rm off}$ (*2*) электрооптического отклика от глубины проникновения луча в слой. На вставке показана та же зависимость в интервале $z^* = 4.3{-}8.8$ мкм

$\tau_{\rm on}$ находятся в пределах 1–2 мс. В интервале $z^* = 4.3{-}8.0$ мкм значения $\tau_{\rm off}$ изменяются от 1 мс до 2 мс. Столь короткие времена $\tau_{\rm on}$ и $\tau_{\rm off}$ оптического пропускания характерны для ячеек с VAN-конфигурацией директора и толщиной слоя кристалла $d = 1$ мкм на эффекте электроуправляемого полного внутреннего отражения при напряженности электрического поля $E_{\rm rms} = 4$ В/мкм [9], а также для π-ячеек толщиной не более нескольких микрометров [8–12].

Необходимо обратить внимание на то, что при длительности управляющих импульсов 5 мс и частоте их следования 100 Гц наблюдается стабильная модуляция проходящего света с глубиной 100 %. Также важным результатом для электрооптики ЖК является достаточно низкая напряженность электрического поля $E_{\rm rms} = 0.72$ В/мкм. Очевидно, что использование ЖК с меньшей вязкостью и оптимизация формы управляющего импульса даст возможность повысить быстродействие исследованной ячейки в 2–3 раза.

Обнаруженные нами электрооптические свойства гомеопланарной ячейки, работающей на эффекте рефракции, могут найти применение, например, в перспективных технологиях жидкокристаллических дисплеев [9] и оптических переключателях для планарных волноводов [13]. В дальнейшем предполагается провести подробное экспериментальное и теоретическое исследования электроуправляемой рефракции при вариации толщины слоя ЖК для различных параметров управляющего электрического поля.

Е.В. Аксенова благодарит СПбГУ за поддержку (НИР 11.41.412.2017). А.В. Сванидзе благодарит СПбГУ за поддержку (НИР 11.41.458.2017).

1. A. A. Karetnikov, N. A. Karetnikov, A. P. Kovshik, E. I. Rjumtsev, E. V. Aksenova, E. V. Krjukov, and V. P. Romanov, MCLC **561**, 97 (2012).
2. E. S. Kraynyukov, A. A. Karetnikov, A. P. Kovshik, E. I. Ryumtsev, E. V. Aksyonova, and V. P. Romanov, Nanosystems: Phys. Chem. Mathem. **6**, 470 (2015).
3. C. I. Mendoza, J. A. Olivares, and J. A. Rayes, Phys. Rev. E **70**, 062701 (2004).
4. C. I. Mendoza and J. A. Rayes, Appl. Phys. Lett. **89**, 091912 (2006).
5. А. А. Каретников, Н. А. Каретников, А. П. Ковшик, Е. И. Рюмцев, Опт. Спектр. **103**, 659 (2007).
6. А. А. Каретников, Л. П. Амосова, Д. А. Вакулин, Н. А. Каретников, А. П. Ковшик, И. П. Коломиец, Е. И. Рюмцев, Опт. Спектр. **119**, 1053 (2007).
7. Е. В. Аксенова, А. А. Каретников, Н. А. Каретников, А. П. Ковшик, Е. И. Рюмцев, А. С. Сахацкий, А. В. Сванидзе, ЖЭТФ **149**, 1087 (2016).
8. P. J. Boss and K. R. Koehler-Beran, Mol. Cryst. Liq. Cryst. **113**, 329 (1984).
9. P. Xu, J. Ho, V. Chigrinov, and H. S. Kwok, SID'08 Digest. **34**, 1891 (2008).
10. S.-H. Chen and C. L. Yang, Appl. Phys. Lett. **80**, 3721 (2002).
11. F. S. Yeung, Y. W. Li, and H.-S. Kwok, Appl. Phys. Lett. **88**, 041108 (2006).
12. Y. Sun, H. Ma, Z. Li, and Z. Zhang, Appl. Phys. Lett. **90**, 091103 (2007).
13. A. Zhang, K. T. Chan, M. S. Demokan, V. W. C. Chan, P. C. H. Chan, H. S. Kwok, and A. H. P. Chan, Appl. Phys. Lett. **86**, 211108 (2005).