

03

Электрооптический отклик ячеек с разной толщиной гомеопланарных слоев нематического жидкого кристалла при наклонном падении света на слой

© А.А. Каретников, А.П. Ковшик, Н.А. Каретников, Е.И. Рюмцев, Е.В. Аксенова, А.В. Сванидзе

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

e-mail: akaret@mail.ru

Поступила в редакцию 17.09.2020 г.

В окончательной редакции 17.09.2020 г.

Принята к публикации 28.10.2020 г.

Исследована электроуправляемая рефракция света в ячейках с различной толщиной слоя гомеопланарно ориентированного нематического жидкого кристалла (ЖК) для углов падения света на слой, превышающих угол полного внутреннего отражения обыкновенного луча δ_0 . Для ячеек с толщиной слоев жидкого кристалла $d = 7, 14$ и $22 \mu\text{m}$ получены зависимости времени нарастания и спада оптического отклика $\tau_{\text{он}}$ и $\tau_{\text{оф}}$ от напряженности электрического поля и углов падения света δ на слой ЖК.

Ключевые слова: нематический жидкий кристалл, электрическое поле, рефракция.

DOI: 10.21883/OS.2021.02.50557.234-20

Введение

В недавно опубликованной работе [1] приведены результаты экспериментального исследования электрооптических свойств жидкокристаллической ячейки с гомеопланарной ориентацией директора и толщиной слоя $d = 13.8 \mu\text{m}$. При углах падения света на слой жидкого кристалла (ЖК) $\delta > \delta_0$ необыкновенный луч вследствие уменьшения его показателя преломления в направлении распространения испытывал поворот внутри слоя ЖК, подобный полному внутреннему отражению на границе двух сред. Воздействие управляющего электрического напряжения U на слой ЖК искажало конфигурацию директора (нарушалось условие поворота), и свет проходил через ячейку. Были получены зависимости времен нарастания и спада оптического отклика $\tau_{\text{он}}$ и $\tau_{\text{оф}}$ от угла падения δ луча на слой ЖК. Это давало возможность изучать динамику электрооптического отклика для различной глубины проникновения $z^* = z^*(\delta)$ луча в слой. Для углов падения света δ , значительно превышающих угол полного внутреннего отражения обыкновенного луча δ_0 , времена $\tau_{\text{оф}}$ составляли 1–2 ms и были на три порядка меньше времени релаксации оптического отклика в случае падения луча по нормали ($\tau_{\text{оф}} \approx 1$ s). Обнаруженные в указанной работе электрооптические свойства гомеопланарной ячейки могут найти применение в технологиях ЖК-дисплеев [2] и оптических переключателях для планарных волноводов [3]. В связи с этим целью настоящей работы является экспериментальное исследование электроуправляемой рефракции в ЖК-ячейках с гомеопланарной ориентацией при вариации толщины слоя ЖК, угла падения света и напряженности электрического поля $E = U/d$.

Методика эксперимента

Ячейки состояли из двух трапециевидальных стеклянных призм с показателем преломления $n_g = 1.7125$ для $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ (рис. 1).

Призмы имели основания размером $52 \times 24 \text{ mm}$ и высоту 18 mm . Для вариации в широких пределах угла падения луча на слой ЖК наклон боковых граней к основаниям составлял 68.0° . На поверхности оснований были нанесены прозрачные токопроводящие электроды. Один из электродов был покрыт гомеотропно ориентирующим слоем, полученным из раствора стearилхлорида хрома в изопропиловом спирте методом центрифугирования при скорости вращения призмы в 3000 rpm . На поверхности другого электрода тем же методом наносилось полимерное покрытие. Планарная ориентация директора нематического ЖК на слое полимера создавалась с помощью натирания покрытия

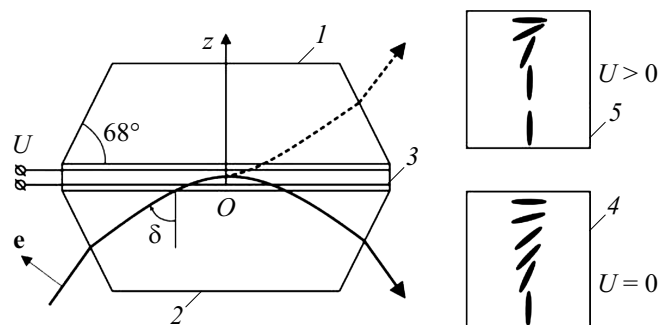


Рис. 1. ЖК-ячейка. 1, 2 — стеклянные призмы, 3 — слой ЖК, 4, 5 — профиль директора при $U = 0$ и $U > 0$ соответственно, e — вектор поляризации лазерного луча, z — нормаль к плоскости слоя ЖК.

хлопковой тканью в одном направлении вдоль длинной оси основания призмы. Полимерное покрытие обеспечивало жесткое сцепление директора с поверхностью. Угол между директором и поверхностью слоя ЖК, определенный поляриметрическим методом [4], составлял не более 1°. Слои ЖК толщиной $d = 7, 14$ и $22 \mu\text{m}$ размещались между основаниями призм (рис. 1). В работе использовалась нематическая смесь ЖК-1466 (НИОПИК) с показателями преломления $n_o = 1.511$ для обыкновенного и $n_e = 1.691$ для необыкновенного лучей ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) при температуре $t = 20^\circ\text{C}$. Смесь имела положительную анизотропию диэлектрической проницаемости $\Delta\epsilon = +11.7$ в интервале частот 1–100 kHz, и модули упругости $K_{11} = 12 \text{ pN}$ и $K_{33} = 0.99K_{11}$.

В экспериментальной установке источником поляризованного излучения являлся гелий-неоновый лазер с длиной волны 632.8 nm и диаметром пучка 1 mm . Требуемое направление вектора поляризации лазерного луча устанавливалось с помощью четвертьволновой пластинки и поляризатора, размещенного после нее. Далее луч направлялся на входную наклонную грань ЖК ячейки, расположенной на вращающемся столике с угловым отсчетным устройством.

На ячейки подавался управляющий одиночный импульс длительностью 200 ms с заполнением прямоугольным двуполярным напряжением с частотой $f = 10 \text{ kHz}$ или последовательность управляющих импульсов с различной частотой следования от генератора Agilent 33522A через широкополосный усилитель Tabor Electronics 9100. Для регистрации интенсивности света, прошедшего через ячейку при воздействии электрического импульса, использовался фотоприемник с быстродействием 10^{-5} s . Управляющий импульс и электрооптический отклик ячейки регистрировались с помощью цифрового двухканального осциллографа АСК-3106. Время включения электрооптического отклика $\tau_{\text{он}}$ определялось как интервал между моментом включения электрического импульса и выходом светопропускания на уровень 0.9 от установившегося уровня пропускания. Время выключения $\tau_{\text{оф}}$ определялось как интервал между моментом выключения электрического импульса и снижением светопропускания от установившегося уровня до 0.1 от его значения.

Распространение света в ЖК

При исследовании рефракции луч лазера (рис. 1) направлялся на гомеотропно ориентированную поверхность слоя ЖК под углами $\delta > \delta_o = \arcsin(n_o/n_g) = 61.9^\circ$ (δ_o — угол полного внутреннего отражения обыкновенного луча на границе раздела стекло–ЖК). Вектор поляризации света \mathbf{e} и директор ЖК были расположены в плоскости падения, так что падающий на слой ЖК луч являлся необыкновенным (рис. 1). Луч входил в слой и испытывал полное внутреннее отражение внутри слоя на глубине

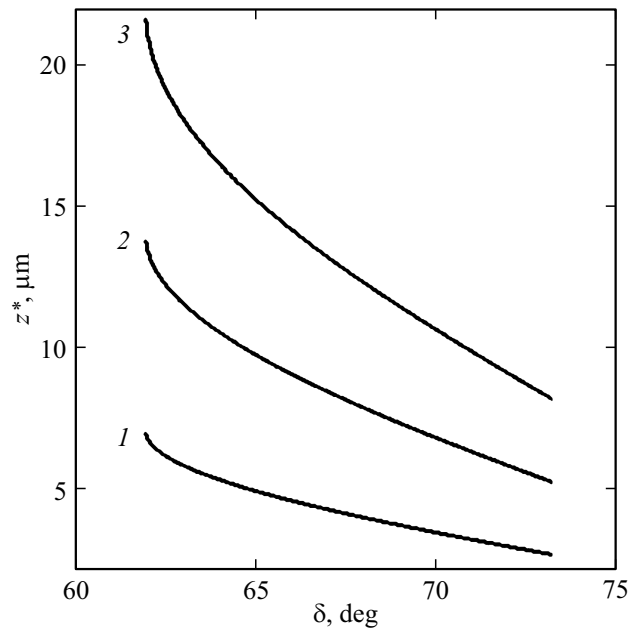


Рис. 2. Зависимости глубины проникновения необыкновенного луча z^* от угла падения этого луча δ на гомеопланарный слой ЖК для $d = 7$ (1), 14 (2), $22 \mu\text{m}$ (3).

проникновения z^* , которую можно рассчитать, зная конфигурацию директора. Для определения конфигурации директора достаточно решить уравнения Эйлера-Лагранжа в одноконстантном приближении, так как используемый ЖК обладает близкими значениями упругих модулей Франка, характеризующих деформации поперечного и продольного изгибов $K_{33} = 0.99K_{11}$. В отсутствие внешнего электрического поля и с учетом жестких граничных условий угол θ , который определяет отклонение директора от оси OZ , является линейной функцией $\theta = \pi z/2d$. Тогда величина z^* для гомеопланарной ячейки связана с углом падения δ и показателями преломления ЖК n_e и n_o следующим соотношением:

$$z^* = \frac{2d}{\pi} \arccos \sqrt{\frac{n_g^2 \sin^2 \delta - n_o^2}{n_g^2 - n_o^2}}. \quad (1)$$

В отличие от выражения для глубины проникновения, использованного в работе [1], здесь дополнительно учтено, что направления волнового и лучевого векторов не совпадают в точке полного внутреннего отражения. Однако параметры исследуемого ЖК таковы, что учет этого факта дает отличие в расчетах не более чем на 9%.

С использованием формулы (1) были рассчитаны зависимости z^* от δ в интервале углов падения $62.7-73.2^\circ$ для ячеек с толщиной слоев ЖК $d = 7, 14$ и $22 \mu\text{m}$. Полученные зависимости представлены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что увеличение угла падения δ необыкновенного луча на слой ЖК приводит к уменьшению глубины проникновения z^* этого луча в слой. При этом относительная глубина проникновения $z_R = z^*/d$

не зависит от толщины слоя для одинаковых значений δ в соответствии с формулой (1).

Результаты эксперимента

В работе при подаче одиночного управляющего импульса на ЖК ячейки были получены зависимости времен нарастания τ_{on} и спада τ_{off} от напряженности электрического поля E при угле падения $\delta = 68.0^\circ$, соответствующем середине использованного интервала углов (рис. 3).

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что для всех ячеек времена τ_{off} не зависят от напряженности поля E и находятся в интервале 1–2 ms. При напряженностях поля $E > 2.5 V_{pp}/\mu m$ времена включения τ_{on} снижаются от десятков миллисекунд до значений 1–2 ms, близких к значениям τ_{off} .

Исследование зависимости τ_{on} и τ_{off} от глубины проникновения z^* луча в слой ЖК проводилось при максимальной напряженности электрического поля $E = 2.9 V_{pp}/\mu m$, соответствующей минимальным значениям времен τ_{on} и τ_{off} . Угол падения луча света на слой ЖК в ячейках варьировался в интервале от 62.7 до 73.2° . При этом величина z^* изменялась от 5.8 до $2.4 \mu m$ для ячейки с толщиной $d = 7 \mu m$, от 11.4 до $4.6 \mu m$ для $d = 14 \mu m$ и от 18.3 до $7.4 \mu m$ для $d = 22 \mu m$. Для исследованных ячеек зависимости τ_{on} и τ_{off} от глубины проникновения луча в слой z^* при напряженности поля $E = 2.9 V_{pp}/\mu m$ представлены на рис. 4.

Из рисунка видно, что для всех ячеек значения τ_{on} слабо зависят от глубины проникновения луча в слой ЖК, а времена τ_{off} при увеличении z^* возрастают от значений, близких к τ_{on} , до нескольких десятков миллисекунд. Для детального анализа полученных результатов величины

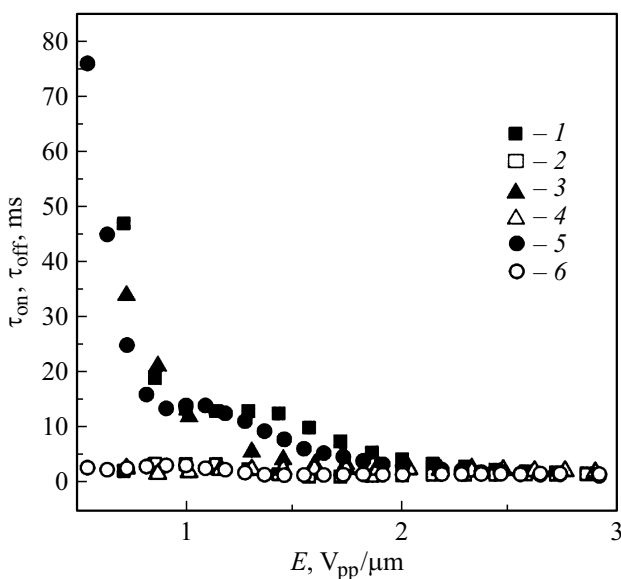


Рис. 3. Зависимости τ_{on} (1, 3, 5) и τ_{off} (2, 4, 6) оптических откликов ЖК ячеек от напряженности электрического поля E для $\delta = 68.0^\circ$. $d = 7$ (1, 2), 14 (3, 4), $22 \mu m$ (5, 6).

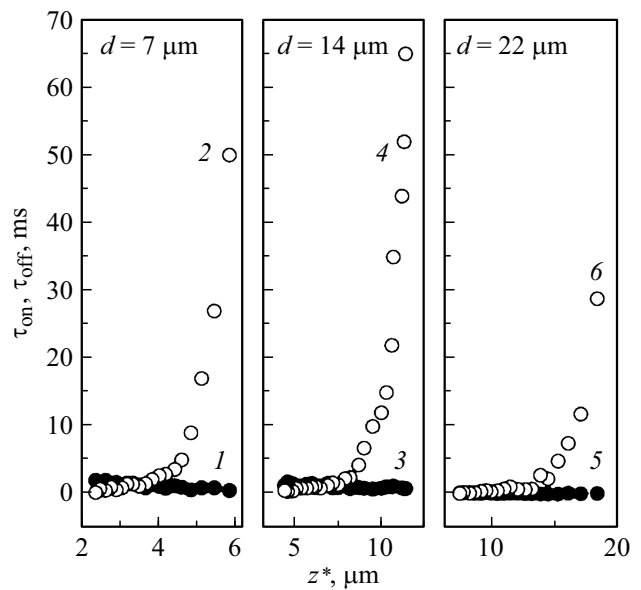


Рис. 4. Зависимость времен включения τ_{on} (1, 3, 5) и выключения τ_{off} (2, 4, 6) электрооптического отклика от глубины проникновения луча z^* в слой ЖК толщиной $d = 7, 14$ и $22 \mu m$.

Угловые зависимости времен τ_{on} и τ_{off} ЖК-ячеек

δ , deg	z_R	$d = 7 \mu m$		$d = 14 \mu m$		$d = 22 \mu m$	
		τ_{on}	τ_{off}	τ_{on}	τ_{off}	τ_{on}	τ_{off}
62.7	0.83	0.5	50	0.8	65	0.3	29
63.9	0.73	0.9	17	0.9	12	0.4	7.7
65.1	0.66	1.0	5.0	0.9	6.8	0.3	2.5
66.3	0.59	0.8	2.9	0.8	2.5	0.3	1.0
67.4	0.55	1.4	2.1	1.0	1.4	0.4	0.9
68.6	0.50	1.3	1.1	1.6	1.3	0.3	1.0
69.8	0.45	1.6	1.4	1.0	1.2	0.4	0.6
70.9	0.41	1.7	0.6	1.5	0.9	0.4	0.7
72.1	0.37	2.0	0.5	1.0	0.8	0.5	0.4
73.2	0.34	2.0	0.2	1.8	0.4	0.4	0.3

τ_{on} и τ_{off} приведены в таблице при различных значениях угла δ и относительной глубины проникновения z_R .

Приведенные в таблице результаты показывают, что для ячеек с толщиной $d = 7$ и $14 \mu m$ при всех значениях z_R величины τ_{on} не превышают 2 ms. В то же время τ_{off} для указанных ячеек уменьшаются и становятся меньше времен τ_{on} при уменьшении z_R . Для ячейки с наибольшей толщиной слоя ЖК ($d = 22 \mu m$) времена τ_{on} и τ_{off} оказались меньшими, чем τ_{on} и τ_{off} у двух других ячеек. В частности, время τ_{on} находится в интервале 0.3–0.5 ms для всех относительных глубин проникновения луча z_R . Времена τ_{off} для этой ячейки в интервале z_R от 0.83 до 0.59 уменьшаются от 29 до 1 ms, а в интервале от 0.59 до 0.34 времена τ_{off} снижаются от 1.0 до 0.3 ms. То обстоятельство, что значения τ_{on} и τ_{off} для ячейки с $d = 22 \mu m$ оказались ниже значений τ_{on} и τ_{off} для ячеек с $d = 7$ и $14 \mu m$, может быть связано

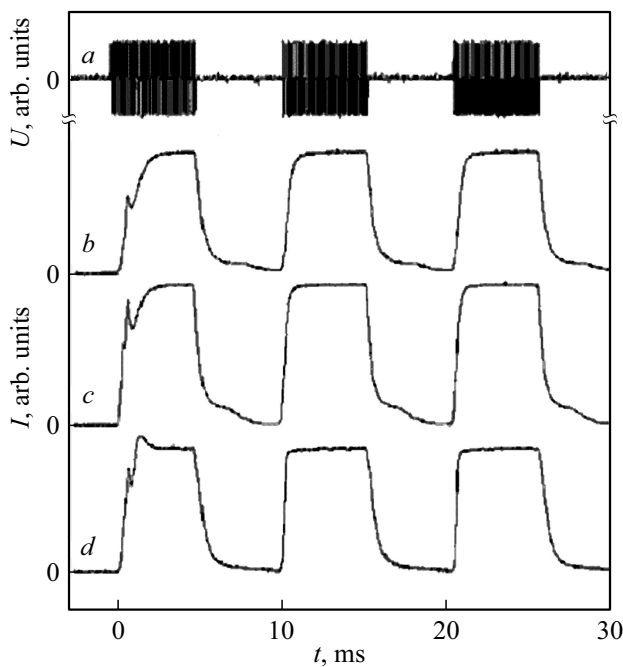


Рис. 5. (a) Управляющие электрические импульсы для $F = 100 \text{ Hz}$, $f = 10 \text{ kHz}$, $E = 2.9 \text{ V}_{pp}/\mu\text{m}$. Оптические отклики ЖК ячеек: $d = 7$ (b), 14 (c), $22 \mu\text{m}$ (d) при угле падения луча на слой $\delta = 68.0^\circ$.

с ослаблением влияния обратных потоков в ЖК на оптический отклик в ячейке с большей толщиной слоя.

Приведенные результаты получены при воздействии на ЖК ячейку одиночного управляющего импульса. В то же время для технических применений ЖК может быть важна такая характеристика, как максимальная частота следования управляющих импульсов $F = F_{max}$, до которой глубина амплитудной модуляции оптического отклика m сохраняет значение 100%. Глубина модуляции m определяется соотношением

$$m = (1 - I_{min}/I_{max})100\%, \quad (2)$$

где I_{max} и I_{min} — максимальная и минимальная интенсивности прошедшего через ячейку света. Для определения F_{max} в нашем случае были исследованы осциллограммы оптических откликов ЖК ячеек при подаче управляющих импульсов с различной частотой следования (при частоте заполнения $f = 10 \text{ kHz}$ и напряженности поля $E = 2.9 \text{ V}_{pp}/\mu\text{m}$). Осциллограммы были получены для угла падения света $\delta = 68.0^\circ$ (середина углового диапазона) и максимального значения угла падения $\delta = 73.2^\circ$. Было установлено, что для $\delta = 68.0^\circ$ величина $F_{max} \approx 100 \text{ Hz}$ (рис. 5) и $F_{max} \approx 300 \text{ Hz}$ для $\delta = 73.2^\circ$ (рис. 6). Большее значение F_{max} для угла падения света $\delta = 73.2^\circ$ связано с тем, что для этого угла времена τ_{off} в 2–3 раза меньше, чем τ_{off} для $\delta = 68.0^\circ$.

Наблюдающиеся искажения формы оптических откликов на рис. 5, 6, по-видимому, вызваны обратными потоками в ЖК. Искажения минимальны на откликах,

начиная со второго (рис. 5) и третьего (рис. 6). Это объясняется тем, что каждый последующий электрический импульс накладывается на сформированную предыдущими импульсами (почти полностью гомеотропную) конфигурацию директора ЖК, которая не успевает вернуться к исходной гомеопланарной при прекращении воздействия электрического импульса.

Для сравнения динамических характеристик исследованной электроуправляемой рефракции и электроуправляемого двулучепреломления в тех же ячейках были измерены времена τ_{off} для нормального падения луча света на слой ЖК ($\delta = 0^\circ$) при той же напряженности электрического поля $E = 2.9 \text{ V}_{pp}/\mu\text{m}$. Ячейки размещались между скрещенными поляризаторами. Направление вектора поляризации падающего света составляло 45° с направлением директора на планарно ориентированной поверхности слоя ЖК. Для ячеек с толщиной слоев $7, 14$ и $22 \mu\text{m}$ были получены значения $\tau_{off} \approx 0.2, 1.0$ и 2.7 s соответственно. Эти значения τ_{off} на несколько порядков превосходят τ_{off} электроуправляемой рефракции для углов падения δ в диапазоне $62.7\text{--}73.2^\circ$. Большие значения времен τ_{off} для электроуправляемого двулучепреломления обусловлены полной свободной переориентацией директора в исходное состояние во всем слое ЖК после выключения поля. Малые значения τ_{off} электроуправляемой рефракции, по-видимому, связаны с быстрым восстановлением ориентации директора в тонких пристеночных слоях у границы с планарной ориентацией ЖК. В работе [5] рекордная динамика электрооптического отклика в ячейке со скрещенными встречно-

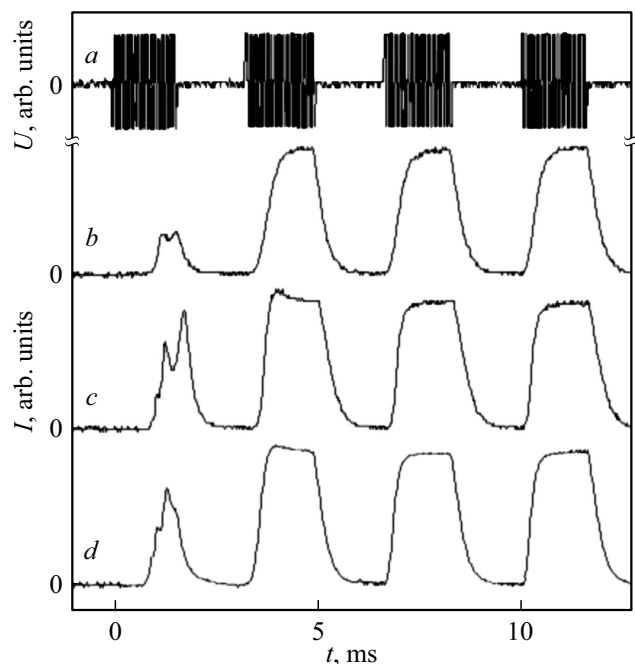


Рис. 6. (a) Управляющие электрические импульсы для $F = 300 \text{ Hz}$, $f = 10 \text{ kHz}$, $E = 2.9 \text{ V}_{pp}/\mu\text{m}$. Оптические отклики ЖК ячеек: $d = 7$ (b), 14 (c), $22 \mu\text{m}$ (d) при угле падения луча на слой $\delta = 73.2^\circ$.

штывревыми электродами также объясняется быстрым изменением ориентации директора в приповерхностном слое ЖК при переключении электрического поля.

Заключение

Проведенное исследование электроуправляемой рефракции в гомеопланарных слоях ЖК различной толщины ($d = 7, 14, 22 \mu\text{m}$) показало, что наименьшими временами нарастания и спада электрооптического отклика $\tau_{\text{он}}$ и $\tau_{\text{офф}}$ обладает ячейка с максимальной толщиной слоя ЖК $d = 22 \mu\text{m}$. Это может быть связано с ослаблением влияния обратных потоков ЖК на оптический отклик в ячейке с большей толщиной слоя. Также было показано, что максимальная частота следования управляющих импульсов F_{max} , до которой глубина амплитудной модуляции оптического отклика m сохраняет значение 100%, увеличивается от 100 до 300 Hz при увеличении угла падения δ от 62.7 до 73.2° для исследованных ЖК ячеек.

Использование ЖК материалов с лучшими вязкоупругими характеристиками, очевидно, позволит повысить быстродействие устройств на эффекте электроуправляемой рефракции в гомеопланарных слоях ЖК.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Каретников Н.А., Ковшик А.П., Каретников А.А., Рюмцев Е.И., Аксенова Е.В., Сванидзе А.В. // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 106. В. 5. С. 293; Karetnikov N.A., Kovshik A.P., Karetnikov A.A., Ryumtsev E.I., Aksenova E.V., Svanidze A.V. // JETP Lett. 2017. V. 106. N 5. P. 313.
- [2] Xu P., Ho J., Chigrinov V., Kwok H.S. // SID'08 Digest. 2008. V. 34. P. 1891.
- [3] Zhang A., Chan K.T., Demokan M.S., Chan V.W.C., Chan P.C.H., Kwok H.S., Chan A.H.P. // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 86. P. 211108.
- [4] Karetnikov A.A., Karetnikov N.A., Kovshik A.P., Ryumtsev Y.I. New Method of Determination of the Tilt Angle at a Liquid Crystal-Glass Interface. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/0910.2162v1>
- [5] Гейвандов А.Р., Симдянкин И.В., Барник М.И., Палто В.С., Палто С.П. // Крист. 2019. Т. 64. № 3. С. 407; Geivandov A.R., Simdyankin I.V., Barnik M.I., Palto V.S., Palto S.P. // Cryst. Report. 2019. V. 64. N 3. P. 433.