

ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 535.012.21; 535.016; 535.557

ДИНАМИКА ПЕРЕОРИЕНТАЦИИ ДВУХЧАСТОТНОГО НЕМАТИЧЕСКОГО ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА С КВАЗИГОМЕОТРОПНОЙ СТРУКТУРОЙ

© 2010 г. Е. А. Коншина, доктор физ.-мат. наук; Н. Л. Иванова;
П. С. Парфенов, канд. техн. наук; М. А. Федоров

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: eakonshina@mail.ru

Исследованы особенности динамики переключения фазовой задержки света на 2π и 4π в ячейках с двухчастотным нематическим жидким кристаллом в результате *bend*- и *splay*-деформации слоев с наклонно-гомеотропной ориентацией с помощью электрического поля с частотой 30 кГц и релаксации приложении поля низкой частоты 1 кГц. Угол наклона директора от 36° до 84° варьировали с помощью слоев двуокиси церия, наклонно напыленных в вакууме. Исследования текстуры поверхности ориентирующих слоев с помощью атомно-силовой микроскопии показали, что это достигается в результате изменения нанотекстуры поверхности.

Ключевые слова: двухчастотный жидкий кристалл, поверхность, ориентация, начальный угол наклона директора, фазовая задержка, электрооптический отклик.

Коды OCIS: 120.6780, 130.6780, 160.3710, 230.3720, 260.1560.

Поступила в редакцию 18.05.2010.

Введение

Уникальной особенностью двухчастотного (ДЧ) нематического жидкого кристалла (ЖК) является возможность осуществления управляемой *splay*- и *bend*-деформации с помощью электрического поля разной частоты благодаря присутствию в смеси молекул с положительной и отрицательной диэлектрической анизотропией. Это позволяет значительно ускорить процесс переключения за счет управления процессом релаксации, что делает перспективным использование ДЧЖК в различных устройствах, в том числе и в активных компонентах телекоммуникационных систем [1–6]. Оптические и динамические характеристики таких устройств зависят от начального угла наклона директора ЖК, который определяется граничными условиями межфазного взаимодействия с ориентирующей поверхностью [6, 7]. Как показало исследование ориентирующих слоев, наклонно напыленных в вакууме, модификация текстуры

поверхности позволяет варьировать начальный угол наклона директора ЖК. Осаждение на поверхность моноокиси германия (GeO) тонкого слоя а-C:H в плазме тлеющего разряда привело к уменьшению начального угла наклона директора ЖК θ_p (pretilt) до 0 – 6° [7]. Обработка поверхности пленок а-SiO_x с помощью ионного пучка позволила получить вертикальную ориентацию ЖК [8]. Вместе с тем представляет интерес получение промежуточного начального угла наклона $30^\circ < \theta_p < 90^\circ$ и исследование его влияния на динамические характеристики ЖК-ячеек для расширения возможностей разрабатываемых устройств. В твист-ячейке с углом $\theta_p = 60^\circ$ и толщиной слоя ДЧЖК, равной 6,4 мкм, при управлении включением и выключением с помощью высокочастотного (ВЧ) и низкочастотного (НЧ) электрических полей были достигнуты времена отклика и релаксации, равные 1 и 0,5 мс [9].

Основной задачей этой работы было исследование динамики переключения фазовой за-

держки в слое ДЧЖК с наклонно-гомеотропной ориентацией в результате *bend*-деформации при управлении с помощью ВЧ электрического поля и релаксации в результате *splay*-деформации с помощью НЧ поля. Для получения наклонно-гомеотропной или квазигомеотропной структуры ДЧЖК были использованы ориентирующие слои двуокиси церия, напыленные в вакууме, и исследовано влияние текстуры их поверхности на начальный угол наклона директора ЖКК.

1. Влияние текстуры поверхности ориентирующих слоев двуокиси церия на начальный угол наклона директора двухчастотного нематического жидкого кристалла

Выбор в качестве ориентирующих слоев двуокиси церия связан с необходимостью вариации углов наклона в широком интервале и получения начальных углов наклона более 60° для формирования квазигомеотропной структуры, т. е. гомеотропной структуры с некоторым углом наклона директора ДЧЖК. Известный способ получения ориентирующих слоев при напылении материала в вакууме на подложки, расположенные наклонно относительно вертикали, позволяет варьировать углы наклона директора ЖК в интервале от 30° до 90° . Используемые в работе слои CeO_2 получали испарением в вакууме с помощью CO_2 -лазера. Для создания текстурированной поверхности подложки располагали вертикально или под углом к вертикальной оси вакуумной камеры.

Изучение поверхности наклонно напыленных слоев CeO_2 с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) на основе сканирующей головки "SMENA" фирмы NT-MDT показало, что изменение расположения подложек в вакуумной камере приводит к модификации рельефа поверхности. На рис. 1 приведены изображения текстуры поверхности исследуемых слоев, полученные при расположении подложек под углами φ по отношению к вертикальной оси вакуумной камеры, равными 0 и 35° . Микроскоп работал в резонансном режиме "shear-force". В качестве зонда использовали наноразмерные W-острия, закрепленные на одном из плеч часового камертонного кварцевого резонатора, с собственной частотой $32,8$ кГц. В табл. 1 приведены результаты статистической обработки изображений, полученных путем сканирования 256 строк по 256 точек.

Изображения поверхности образцов слоев CeO_2 , полученных на подложках, расположенных под углами $\varphi = 35^\circ$ (рис. 1а) и 0° (рис. 1б), имеют отличия. Направление оси y соответствует проекции вертикали на плоскость подложек в процессе напыления слоев. Характер распределения выступов и впадин (рис. 1в, 1г), а также профиль текстуры поверхности образцов вдоль оси y (рис. 1д, 1е), совпадающей с направлением ориентации, существенно различаются.

У образца "а" (рис. 1а) не наблюдается анизотропии рельефа поверхности в отличие от образца "б" (рис. 1б), на поверхности которого можно выделить направление чередования выступов и впадин рельефа. Это подтверждает вид кривой профиля рельефа поверхности (рис. 1е) вдоль линии, соответствующей проекции вертикали на плоскость подложки. О более однородной текстуре поверхности образца "б" свидетельствует сравнение кривых распределения неровностей рельефа по высоте (рис. 1в и 1г). Кроме того, максимальный размах неровностей, средняя шероховатость, среднеквадратическое отклонение профиля и среднее расстояние между максимумами у образца "а" были в три раза меньше, чем у образца "б" (табл. 1). Эти особенности текстуры поверхности сравниваемых образцов слоев CeO_2 привели к существенному отличию начального угла наклона директора ЖК в собранных на их основе ячейках.

Исследования начального угла наклона директора ДЧЖК и электрооптического отклика проводились на плоскопараллельных ячейках с фиксированным зазором, состоящих из двух стеклянных подложек, на которые нанесены слой прозрачного проводящего электрода и ориентирующий слой CeO_2 . Ячейки собирали таким образом, чтобы проекции вертикали при напылении CeO_2 на поверхность подложек были

Таблица 1. Результаты статистической обработки изображений поверхности CeO_2 размером 2×2 мкм, полученных с помощью АСМ

Характеристики поверхности	Образец "а"	Образец "б"
Максимальный размах неровностей, нм	31	108
Средняя шероховатость, нм	3,4	8,4
Среднеквадратическое отклонение профиля, нм	4,2	11,4
Среднее расстояние между максимумами, нм	31	107

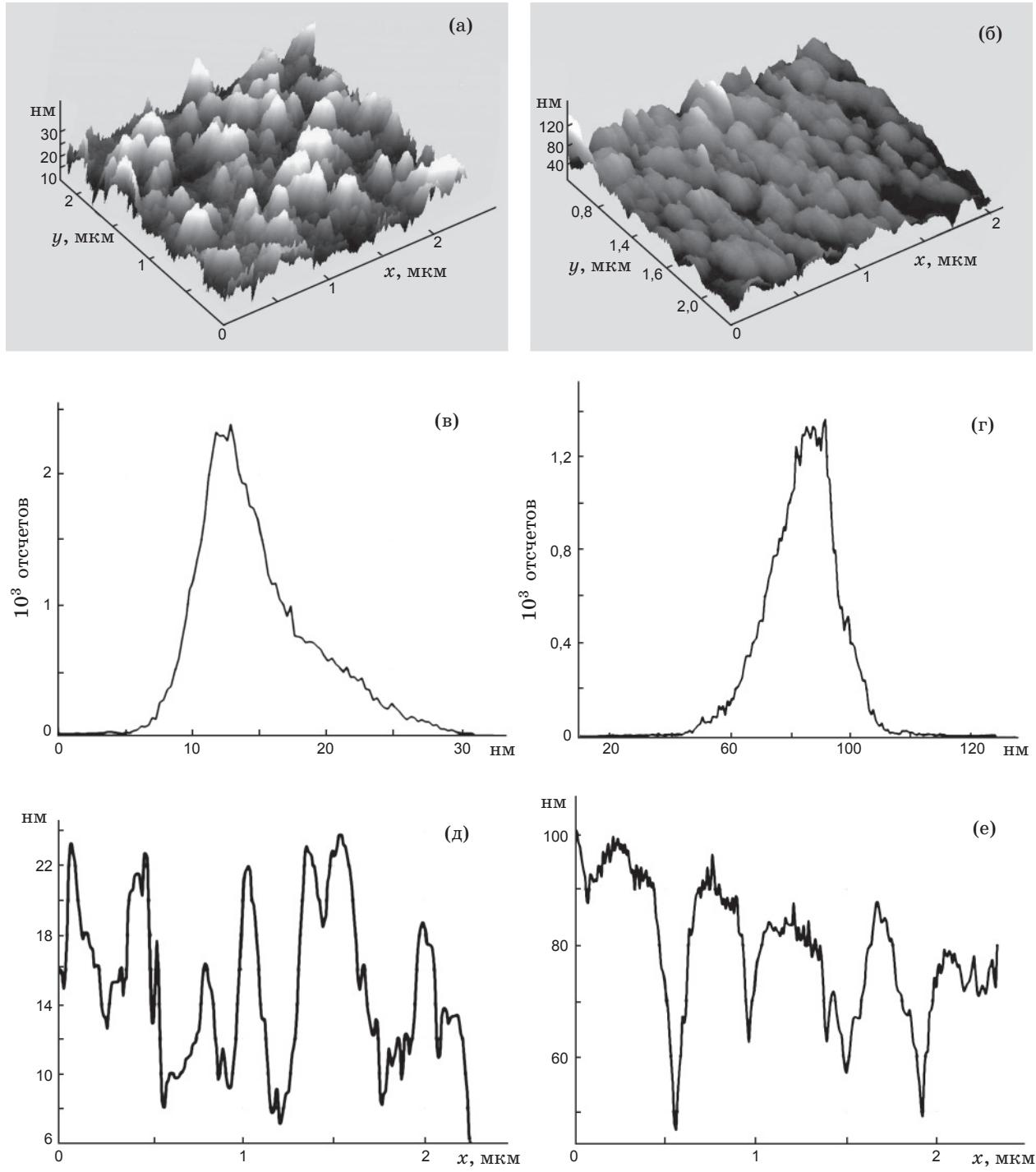


Рис. 1. Изображения текстуры поверхности слоев CeO_2 у образцов “*a*” и “*b*”, площадью $2 \times 2 \text{ мкм}^2$, полученные с помощью АСМ – (а) и (б); (в) и (г) – кривые распределения высоты неровностей рельефа, полученные в результате статистической обработки параметров профилограмм; (д) и (е) – профили рельефа поверхности вдоль оси *y*.

антипараллельными. Толщину зазора ячеек контролировали путем измерения емкости ячейки перед ее заполнением ЖК. В работе использовали ЖК-1001 (производства НИОПИК) с оптической анизотропией $\Delta n = 0,26$ на длине волны 632,8 нм и $\Delta\varepsilon = 4,43$ ($\varepsilon_{\parallel} = 9,53$ и $\varepsilon_{\perp} = 5,1$) на частоте 1 кГц [10].

Оптические и динамические характеристики исследуемых ячеек измеряли на длине волны 0,65 мкм, используя оптическую схему, описанную в [5]. Источником излучения служил полупроводниковый лазерный модуль. Ячейки располагали между поляризатором и скрещенным с ним анализатором при измере-

Таблица 2. Условия напыления ориентирующих слоев CeO_2 и характеристики ЖК-ячеек, собранных на их основе

№ образца	φ , град	d , мкм	θ_p , град
1	0	8,4	36
2	0	7,3	40
3	19	8,1	60
4	35	7,9	66
5	35	7,9	84

ний пропускания света в зависимости от напряжения. Для осуществления *bend*-деформации слоя ДЧЖК на ячейки подавалось переменное напряжение с частотой 30 кГц, а для *splay*-деформации слоя – напряжение с частотой 1 кГц. Максимальное значение фазовой задержки $\Delta\Phi_{\max}$ находили экстраполяцией линейного участка зависимости $\Delta\Phi$ ($1/U$) при $1/U \rightarrow 0$. По значению $\Delta\Phi_{\max}$, полученному с помощью расчетной зависимости $\Delta\Phi$ от угла наклона директора для данной толщины слоя ЖК в ячейке, определяли начальный угол θ_p [11]. В сумме значения начальных углов наклона директора θ_p , полученные при *bend*- и *splay*-деформации слоя ДЧЖК в ячейках, составляли $90^\circ \pm 2^\circ$.

Экспериментальные углы наклона подложек φ относительно вертикали при напылении слоев CeO_2 , толщины зазора в ЖК-ячейках d и расчетные углы θ_p в исследованных ячейках приведены в табл. 2. Углы наклона θ_p в ячейках с ДЧЖК изменялись в интервале от 36° до 84° (табл. 2) при вариации угла наклона подложек φ при осаждении CeO_2 от 0 до 35° . В ЖК-ячейках с ориентирующими слоями CeO_2 , текстура поверхности которых обладала анизотропией рельефа (образец “*b*” на рис. 1б), формировалась наклонная структура ДЧЖК. В то время как на слоях CeO_2 , напыленных под углом $\varphi = 35^\circ$, текстура поверхности которых соответствовала образцу “*a*” на рис. 1а, формировалась квазигомеотропная структура слоя ДЧЖК с углом $\theta_p \geq 60^\circ$.

2. Особенности электрооптического отклика ячеек с квазигомеотропной структурой двухчастотного нематического жидкого кристалла

Для управления процессом переориентации молекул ДЧЖК с углом $\theta_p \geq 60^\circ$ к ячейкам № 3–5 (табл. 2) прикладывали напряжение с частотой 30 кГц в форме пакета синусоидальных импульсов амплитудой $U_{\text{вч}}$ и длительностью $t_{\text{вч}}$. Воз-

действие ВЧ поля на молекулы с отрицательной диэлектрической анизотропией вызывало *bend*-деформацию слоя ДЧЖК и переключение ячейки из состояния “off” в состояние “on” за время τ_{on} . Переключение ячейки в исходное состояние “off” осуществлялось в результате приложения к ней пакета синусоидальных импульсов с частотой 1 кГц, амплитудой напряжения $U_{\text{нч}}$ и длительностью $t_{\text{нч}}$. В результате воздействия НЧ поля на молекулы с положительной диэлектрической анизотропией происходила *splay*-деформация слоя ДЧЖК за время τ_{off} , которая вызывала процесс релаксации. Время отклика τ_{on} и релаксации τ_{off} определяли из осцилограмм по уровню 0,1–0,9 максимальной интенсивности прошедшего света [6].

Осцилограмма электрооптического отклика ЖК-ячейки № 5 с углом $\theta_p = 84^\circ$ (табл. 2) показана на рис. 2. Было замечено, что процесс переориентации молекул в состояние “on” с помощью ВЧ поля происходил медленнее, чем процесс релаксации в исходное состояние в НЧ поле. Время τ_{on} переключения фазовой задержки на 4π было больше, чем время τ_{off} при одинаковых амплитудах приложенных напряжений. Экспериментальное значение порогового напряжения для *B*-эффекта при управлении процессом переориентации молекул с помощью ВЧ поля у ячеек № 4 и № 5 с квазигомеотропной структурой ДЧЖК было значительно больше, чем при *splay*-деформации слоя и составило примерно

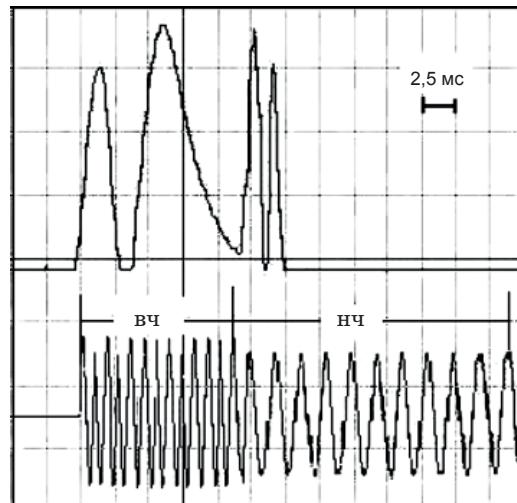


Рис. 2. Электрооптический отклик ЖК-ячейки № 5 с ДЧЖК при переключении ее с помощью ВЧ и НЧ электрических полей с параметрами: $U_{\text{вч}} = 65$ В, $t_{\text{вч}} = 15$ мс, $U_{\text{нч}} = 60$ В, $t_{\text{нч}} = 20$ мс и режим двухчастотного управления.

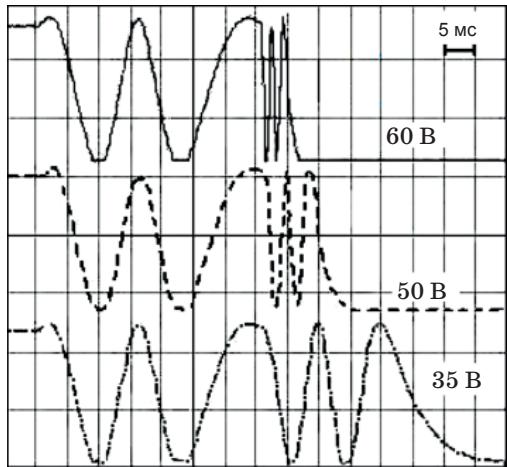


Рис. 3. Влияние амплитуды НЧ напряжения (35, 50 и 60 В) с $t_{\text{нч}} = 50$ мс на электрооптический отклик ячейки № 3 с углом наклона ДЧЖК $\theta_p = 60^\circ$ при постоянных значениях $U_{\text{вч}} = 40$ В, $t_{\text{вч}} = 35$ мс.

5 В. Переключение ячеек в НЧ поле начиналось при напряжениях менее 0,4 В, что можно объяснить существенной разницей между коэффициентами упругости $K_{33} \gg K_{11}$.

Изменение фазовой задержки света вызвано изменением оптической анизотропии вследствие вариации показателя преломления необыкновенного луча в результате поворота директора ЖК в электрическом поле. Осциллограммы электрооптического отклика ЖК-ячейки № 3 с углом $\theta_p = 60^\circ$ имели сложный характер, на который влияли как амплитуда прикладываемого напряжения, так и длительность действия НЧ и ВЧ полей (рис. 3 и 4). Увеличение $U_{\text{нч}}$ от 35 до 60 В позволило сократить время релаксации в 7 раз до 5 мс. Однако при переключении из состояния “off” в состояние “on” фазовая задержка изменялась на 4π , а при возвращении в исходное состояние фазовая задержка возрастила до 5π , как видно из рис. 3. Это может быть вызвано изменением начального угла наклона директора в слое ЖК с квазигомеотропной структурой при переключении фазовой задержки в зависимости от амплитуды ВЧ напряжения, приложенного к ячейке.

Ускорению переключения ячейки № 3 из состояния “on” в состояние “off” способствует повышение амплитуды напряжения от 40 В до 60 В при постоянной длительности воздействия ВЧ поля (рис. 4). Одновременно с повышением напряжения наблюдается и увеличение фазовой задержки от 4π до 5π при включении ячейки. Изменяется как количество осцилля-

ций, так и глубина модуляции света, прошедшего через ячейку при выключении. Следует отметить, что изменение глубины модуляции и исчезновение осцилляций наблюдались только при высоких значениях ВЧ и НЧ напряжения – более 40 В (рис. 4 и 5). Это может быть связано с необычным поведением состояний поляризации света у ДЧЖК [12].

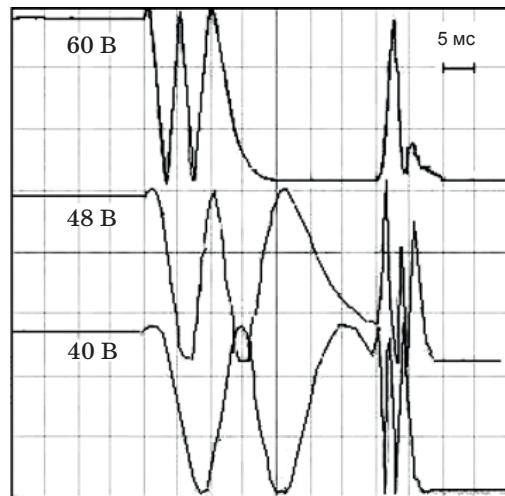


Рис. 4. Осциллограммы электрооптического отклика ЖК-ячейки № 3 при вариации $U_{\text{вч}}$ (40, 48 и 60 В), когда $t_{\text{вч}} = 35$ мс, и постоянных значениях $U_{\text{нч}} = 60$ В и $t_{\text{нч}} = 50$ мс.

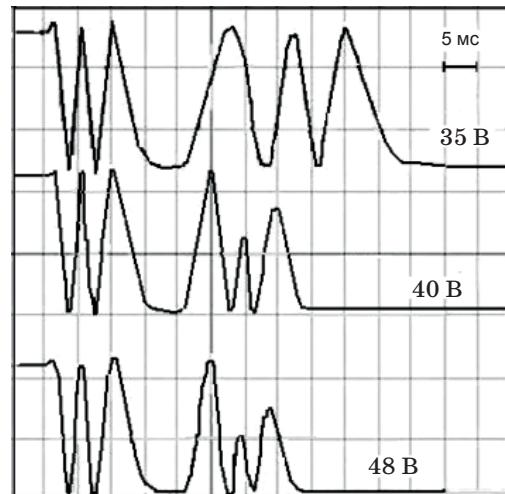


Рис. 5. Осциллограммы электрооптического отклика ЖК-ячейки № 3 при постоянных значениях $U_{\text{вч}} = 60$ В, $t_{\text{вч}} = 20$ мс и $\tau_{\text{on}} = 20$ мс и варьировании $U_{\text{нч}}$ ($t_{\text{нч}} = 50$ мс). При одинаковой фазовой задержке, равной 5π , при включении и выключении ячейки, $U_{\text{нч}}$, равном 35 В, 40 В, 48 В, τ_{off} составило соответственно 40, 20 и 15 мс.

Причиной изменения характеристик осцилляций по интенсивности света, прошедшего через ячейку, являются гидродинамические процессы, сопровождающие переориентацию молекул в электрических полях при двухчастотном управлении. Распределение директора в слое ДЧЖК в результате переориентации в ВЧ и НЧ электрических полях нестабильно, что связано с разной величиной компонентов скорости обратного потока. Скорость гидродинамического потока изменяется не только в направлении вектора электрического поля в плоскости xz , но и по координате y , т. е. в перпендикулярном ей направлении. При этом компонент скорости по координате y меняется по толщине слоя и имеет минимальное значение вблизи ориентирующей поверхности [12].

Неравномерному распределению директора в слое ЖК способствует также накопление остаточного потенциала на межфазной границе за время действия ВЧ поля у ячейки № 3 (рис. 4). При $U_{вч} = 60$ В накопленный потенциал после снятия ВЧ напряжения приводит к увеличению угла наклона директора ЖК и уменьшению количества осцилляций в процессе релаксации с помощью НЧ поля (рис. 4). Полученные осциллограммы электрооптического отклика ячеек ДЧЖК свидетельствуют о сложных электрооптических и электрогидродинамических процессах, сопровождающих деформацию слоя в переменных электрических полях.

В табл. 3 приводятся режимы управления переключением фазовой задержки света с длиной волны 0,65 мкм на 2π и 4π в ячейках с ДЧЖК и соответствующие им времена τ_{on} и τ_{off} . Уменьшение $t_{вч}$ и $t_{нч}$ у ячейки № 5 способствовало снижению времени τ_{on} более чем в два раза, а времени τ_{off} – в пять раз для фазовой задержки на 4π по сравнению с ячейкой № 4 при одинаковой толщине слоя (табл. 3). При переключении фазовой задержки на 2π у ячеек № 3 и № 5 разница углов θ_p (табл. 2) не влияла на время τ_{on} . Незначительно увеличивалось время τ_{off} у ячейки № 3 с меньшим углом θ_p (табл. 3).

Длительность действия ВЧ и НЧ полей оказывает большее влияние на времена τ_{on} и τ_{off} при фазовой задержке, соответствующей 4π . Замедление процесса переключения при фазовой задержке на 4π по сравнению с отсечкой 2π может быть вызвано гидродинамическими процессами, сопровождающими деформацию слоя ДЧЖК в электрических полях. Переключение на 2π затрагивает слои ЖК вблизи границы раздела фаз с текстуированной поверхностью CeO_2 , что способствует более однородному распределению директора ЖК благодаря влиянию анизотропно-упругого межфазного взаимодействия. В переключении фазовой задержки на 4π участвуют слои, удаленные от ориентирующей поверхности, что повышает вероятность нестабильного распределения директора ЖК из-за возрастания влияния на него гидродинамического потока в направлении координаты y , что замедляет переключение фазовой задержки.

В ячейке № 5 с квазигомеотропной структурой время отклика и время релаксации составили 4 и 1 мс соответственно при переключении фазовой задержки на длине волны 0,65 мкм на 2π . За те же времена эта ячейка переключалась на длине волны 1,55 мкм с фазовой задержкой на π при $U_{вч} = 63$ В, $t_{вч} = 15$ мс и $U_{нч} = 63$ В, $t_{нч} = 20$ мс. Достигнутые времена переключения с фазовой задержкой на 2π в ячейке с квазигомеотропной структурой ДЧЖК значительно меньше, чем времена, полученные в ячейке с углом наклона $\theta_p < 42^\circ$ при управлении последовательным приложением НЧ и ВЧ полей с частотой 1 и 30 кГц [6]. Таким образом, увеличение угла наклона $\theta_p > 60^\circ$ в ячейках с ДЧЖК позволяет значительно ускорить процесс переключения фазовой задержки при оптимизации параметров электрических полей.

Заключение

Впервые исследованы особенности динамики переключения фазовой задержки света на 2π и

Таблица 3. Режимы управления переключением фазовой задержки света в ячейках с ДЧЖК и соответствующие им времена τ_{on} и τ_{off} на длине волны 0,65 мкм

№ образца	$\Delta\Phi/\pi$	θ_p , град	$U_{вч}$, В	$t_{вч}$, мс	$U_{нч}$, В	$t_{нч}$, мс	τ_{on} , мс	τ_{off} , мс
4	4	66	60	30	40	50	25	20
5	4	84	65	15	60	20	11	4
3	2	60	63	5	63	1,7	4	1,5
5	2	84	65	15	60	20	4	1

4π в результате *bend*- и *splay*-деформации слоев двухчастотного нематического жидкого кристалла с квазигомеотропной структурой с помощью электрического поля с высокой частотой, а релаксации – при приложении поля с низкой частотой. Исследования ориентирующих слоев двуокиси церия, наклонно напыленных в вакууме, с помощью атомно-силовой микроскопии показали, что вариация угла наклона директора в ячейках от 36° до 84° достигается в результате изменения нанотекстуры их поверхности.

Для ячейки с начальным углом наклона директора ЖК, равным 84° , при переключении фазовой задержки на 2π на длине волны $0,65$ мкм получено время отклика 4 мс и время релаксации 1 мс (при управлении включением с помощью поля частотой 30 кГц, а выключением – поля частотой 1 кГц). Такие же времена были получены при переключении ячейки в том же режиме на π на длине волны $1,55$ мкм.

Изменение фазовой задержки и интенсивности света, прошедшего через ячейку, при переключении в переменных электрических полях разной частоты, которые наблюдались в эксперименте, вероятнее всего, обусловлены гидродинамическими процессами в слое ДЧЖК. Для объяснения наблюдавшихся особенностей необходимо проведение дополнительных исследований. Полученные в работе результаты имеют практическое значение для улучшения оптических и динамических характеристик ЖК-устройств, разрабатываемых для телекоммуникационных систем, а также совершенствования режимов управления переключением оптических сигналов, для снижения прикладываемых напряжений при сохранении их быстродействия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральным агентством по науке и инновациям в рамках ФЦП по ГК № 02.740.11.0390.

ЛИТЕРАТУРА

1. Xianyu H., Wu S.-T., Lin C.-L. Dual frequency liquid crystals: a review // *Liquid Crystals*. 2009. V. 36. № 6–7. P. 717–726.
2. Lu Y.-Q., Liang X., Wu Y.-H., Du F., Wu S.-T. Dual-frequency addressed hybrid-aligned nematic liquid crystal // *Appl. Phys. Lett.* 2004. V. 85. № 16. P. 3354–3356.
3. Wu Y.-H., Liang X., Lu Y.-Q., Du F., Lin Y.-H., Wu S.-T. Variable optical attenuator with a polymer-stabilized dual-frequency liquid crystal // *Appl. Opt.* 2005. V. 44. № 20. P. 4394–97.
4. Liang X., Lu Y.-Q., Wu Y.-H., Du F., Wang H.-Y., Wu S.-T. Dual-frequency addressed variable optical attenuator with submillisecond response time // *Jap. J. of Appl. Phys.* 2005. V. 44. № 3. P. 1292–1295.
5. Амосова Л.П., Васильев В.Н., Иванова Н.Л., Коншина Е.А. Пути повышения быстродействия электроуправляемых оптических устройств на основе нематических жидких кристаллов // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 2. С. 3–14.
6. Коншина Е.А., Федоров М.А., Амосова Л.П., Исаев М.В., Костомаров Д.С. Оптические модуляторы на основе двухчастотного нематического жидкого кристалла // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 10. С. 73–80.
7. Коншина Е.А., Федоров М.А., Амосова Л.П., Боронин Ю.М. Влияние поверхности на фазовую модуляцию света в слое нематического жидкого кристалла // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 2. С. 71–76.
8. Phil Kook Son, Jeung Hun Park, Sung Su Cha, Jae Chang Kim, Tae-Hoon Yoon, Soon Joon Rho, Back Kyun, Jang Sub Kim, Soon Kwon Zim, Kyeong Hyeon Kim. Vertical alignment of liquid crystal on $a\text{-SiO}_x$ thin film using the ion beam exposure // *Appl. Phys. Lett.* 2006. V. 88. P. 263512-1-3.
9. Коншина Е.А., Федоров М.А., Амосова Л.П. Исследование динамических характеристик двухчастотного нематического жидкого кристалла с квазигомеотропной твист-структурой // Письма ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 14. С. 1–6.
10. Kirby A.K., Love G.D. Fast, large and controllable phase modulation using dual frequency liquid crystals // *Optics express*. 2004. V. 12. № 7. P. 1470–75.
11. Коншина Е.А., Федоров М.А., Амосова Л.П. Определение характеристик жидкокристаллических ячеек оптическими методами // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 12. С. 9–13.
12. Barnik M.I., Palto S.P. Fast phase modulation using dual-frequency nematic liquid crystals // *J. of the SID*. 2007. V. 15. № 8. P. 601–609.