

# 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  $2\pi$  и  $4\pi$  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 при приложении поля низкой частоты 1 кГц. Угол наклона директора от  $36^\circ$  до  $84^\circ$  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 монооксида германия (GeO) тонкого слоя а-С:H в плазме тлеющего разряда привело к уменьшению начального угла наклона директора ЖК  $\theta_p$  (pretilt) до  $0$ – $6^\circ$  [7]. Обработка поверхности пленок а-SiO<sub>x</sub> 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 ЖК.

# **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  $\text{CeO}_2$  получали испарением в вакууме с помощью  $\text{CO}_2$ -лазера. Для создания текстурированной поверхности подложки располагали вертикально или под углом к вертикальной оси вакуумной камеры.

Изучение поверхности наклонно напыленных слоев  $\text{CeO}_2$  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  $\varphi$  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.

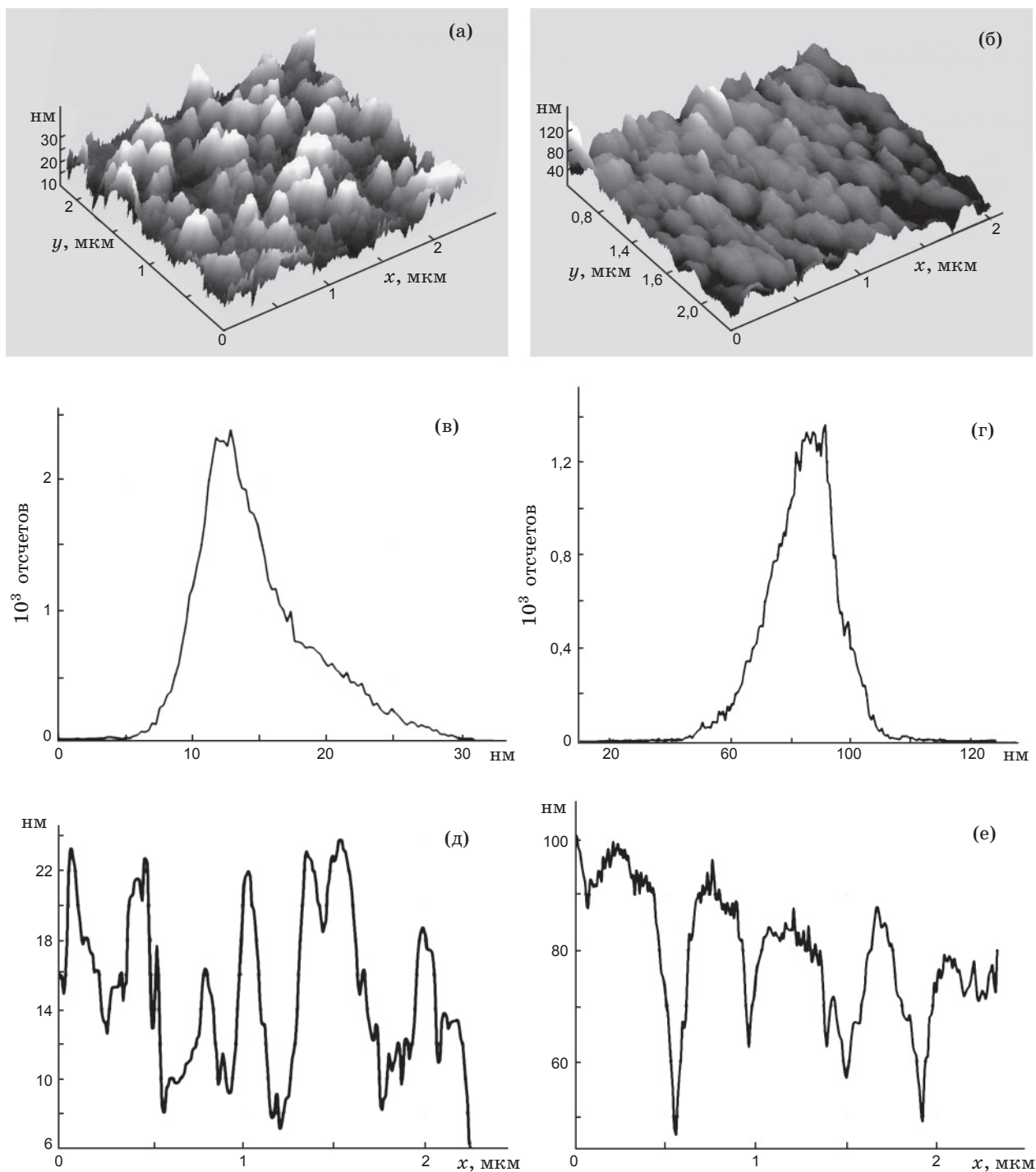
Изображения поверхности образцов слоев  $\text{CeO}_2$ , полученных на подложках, расположенных под углами  $\varphi = 35^\circ$  (рис. 1а) и  $0^\circ$  (рис. 1б), имеют отличия. Направление оси  $y$  соответствует проекции вертикали на плоскость подложек в процессе напыления слоев. Характер распределения 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 “b” 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 “b” (табл. 1). Эти особенности текстуры поверхности сравниваемых образцов слоев  $\text{CeO}_2$  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 слои прозрачного проводящего электрода и ориентирующий слой  $\text{CeO}_2$ . Ячейки собирали таким образом, чтобы проекции вертикали при напылении  $\text{CeO}_2$  на поверхность подложек были

**Таблица 1.** Результаты статистической обработки изображений поверхности  $\text{CeO}_2$  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  $\text{SeO}_2$  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 поверхностей 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  $632,8 \text{ нм}$  и  $\Delta \varepsilon = 4,43$  ( $\varepsilon_{\parallel} = 9,53$  и  $\varepsilon_{\perp} = 5,1$ ) на частоте  $1 \text{ кГц}$  [10].

Оптические и динамические характеристики исследуемых ячеек измеряли на длине волны  $0,65 \text{ мкм}$ , 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  $\text{CeO}_2$  и характеристики ЖК-ячеек, собранных на их основе

| № образца | $\varphi$ , град | $d$ , мкм | $\theta_p$ , 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                |

нии 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  $\theta_p$  [11]. В сумме значения начальных углов наклона директора  $\theta_p$ , полученные при *bend*- и *splay*-деформации слоя ДЧЖК в ячейках, составляли  $90^\circ \pm 2^\circ$ .

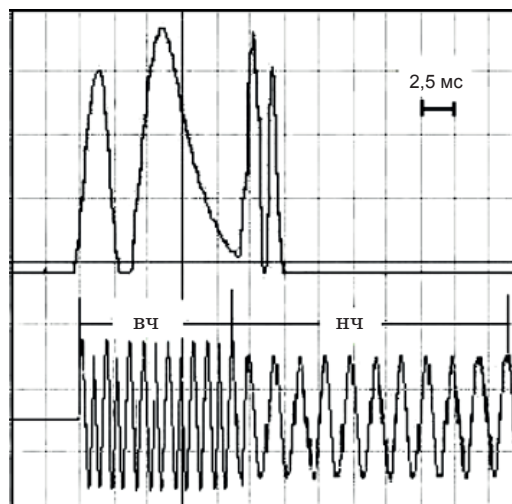
Экспериментальные углы наклона подложек  $\varphi$  относительно вертикали при напылении слоев  $\text{CeO}_2$ , толщины зазора в ЖК-ячейках  $d$  и расчетные углы  $\theta_p$  в исследованных ячейках приведены в табл. 2. Углы наклона  $\theta_p$  в ячейках с ДЧЖК изменялись в интервале от  $36^\circ$  до  $84^\circ$  (табл. 2) при вариации угла наклона подложек  $\varphi$  при осаждении  $\text{CeO}_2$  от 0 до  $35^\circ$ . В ЖК-ячейках с ориентирующими слоями  $\text{CeO}_2$ , текстура поверхности которых обладала анизотропией рельефа (образец “b” на рис. 1б), формировалась наклонная структура ДЧЖК. В то время как на слоях  $\text{CeO}_2$ , 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-

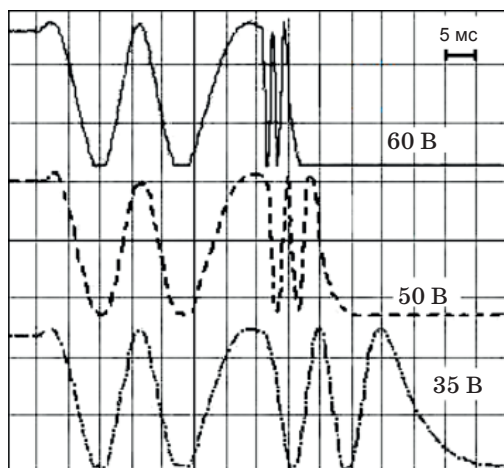
действие ВЧ поля на молекулы с отрицательной диэлектрической анизотропией вызывало *bend*-деформацию слоя ДЧЖК и переключение ячейки из состояния “off” в состояние “on” за время  $\tau_{\text{он}}$ . Переключение ячейки в исходное состояние “off” осуществлялось в результате приложения к ней пакета синусоидальных 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  $\tau_{\text{off}}$ , которая вызывала процесс релаксации. Время отклика  $\tau_{\text{он}}$  и релаксации  $\tau_{\text{off}}$  определяли из осциллограмм по уровню 0,1–0,9 максимальной интенсивности прошедшего света [6].

Осциллограмма 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  $\tau_{\text{он}}$  переключения фазовой задержки на  $4\pi$  было больше, чем время  $\tau_{\text{off}}$  при одинаковых амплитудах приложенных напряжений. Экспериментальное значение порогового напряжения для В-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.





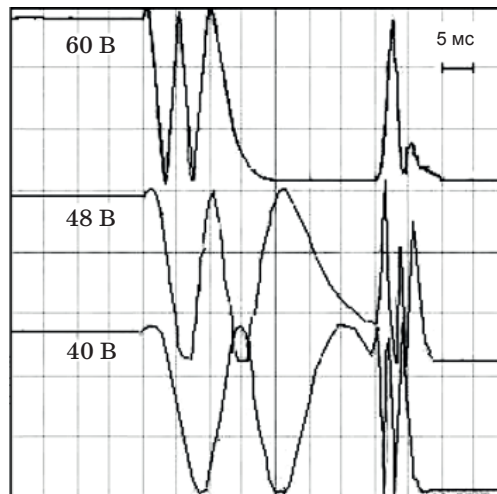
**Рис. 3.** Влияние амплитуды НЧ напряжения (35, 50 и 60 В) с  $t_{\text{нч}} = 50$  мс на электрооптический отклик ячейки № 3 с углом наклона ДЧЖК  $\theta_p = 60^\circ$  при постоянных значениях  $U_{\text{вч}} = 40$  В,  $t_{\text{вч}} = 35$  мс.

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

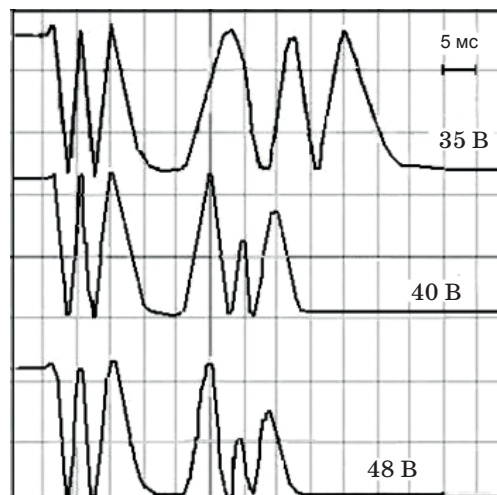
Изменение фазовой задержки света вызвано изменением оптической анизотропии вследствие вариации показателя преломления необыкновенного луча в результате поворота директора ЖК в электрическом поле. Осциллограммы электрооптического отклика ЖК-ячейки № 3 с углом  $\theta_p = 60^\circ$  имели сложный характер, 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  $4\pi$ , а при возвращении в исходное состояние фазовая задержка возрастала до  $5\pi$ , 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  $4\pi$  до  $5\pi$  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  $\tau_{\text{он}} = 20$  мс и варьировании  $U_{\text{нч}}$  ( $t_{\text{нч}} = 50$  мс). При одинаковой фазовой задержке, равной  $5\pi$ , при включении и выключении ячейки,  $U_{\text{нч}}$ , равном 35 В, 40 В, 48 В,  $\tau_{\text{off}}$  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  $\tau_{он}$  и  $\tau_{off}$ . Уменьшение  $t_{вч}$  и  $t_{нч}$  у ячейки № 5 способствовало снижению времени  $\tau_{он}$  более чем в два раза, а времени  $\tau_{off}$  – 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  $\theta_p$  (табл. 2) не влияла на время  $\tau_{он}$ . Незначительно увеличивалось время  $\tau_{off}$  у ячейки № 3 с меньшим углом  $\theta_p$  (табл. 3).

Длительность действия ВЧ и НЧ полей оказывает большее влияние на времена  $\tau_{он}$  и  $\tau_{off}$  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 текстурированной поверхностью  $\text{SeO}_2$ , 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.

## Закключение

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  $\tau_{он}$  и  $\tau_{off}$  на длине волны 0,65 мкм

| № образца | $\Delta\Phi/\pi$ | $\theta_p$ , град | $U_{вч}$ , В | $t_{вч}$ , мс | $U_{нч}$ , В | $t_{нч}$ , мс | $\tau_{он}$ , мс | $\tau_{off}$ , 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                 |

$4\pi$  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  $36^\circ$  до  $84^\circ$  достигается в результате изменения нанотекстуры их поверхности.

Для ячейки с начальным углом наклона директора ЖК, равным  $84^\circ$ , при переключении фазовой задержки на  $2\pi$  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  $\pi$  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 наблюдаемых 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., Воронин 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  $\alpha$ -SiO<sub>x</sub> 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.