

Влияние поверхности на фазовую модуляцию света в слое нематического жидкого кристалла

© Е.А. Коншина, М.А. Федоров, Л.П. Амосова, Ю.М. Воронин

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики,
197101 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: eakonshina@mail.ru

(Поступило в Редакцию 10 января 2007 г.)

Представлены экспериментальные результаты исследования нанорельефа ориентирующих поверхностей, определения начального угла наклона директора, фазовой задержки света в слое нематического жидкого кристалла и динамики процесса переориентации директора при SB -деформации в электрическом поле. Показано, что при осаждении на поверхность слоя монооксида GeO с заданной анизотропией нанорельефа, полученного наклонным осаждением материала, тонкого слоя аморфного гидрогенизированного углерода (a -C:H) происходит сглаживание нанорельефа без изменения топологии поверхности. Модификация структуры и физико-химических свойств поверхности GeO приводит к изменению условий анизотропно-упругого взаимодействия на границе раздела с жидким кристаллом, о чем свидетельствует повышение порога S -эффекта и уменьшение начального угла наклона директора от 22° (на поверхности GeO) до 0 – 6° . Экспериментально продемонстрировано существенное влияние наноструктуры поверхности на динамику переориентации директора в электрическом поле и на фазовую модуляцию света. В результате осаждения слоя a -C:H на поверхность GeO наблюдалось увеличение фазовой задержки света в слое жидкого кристалла одинаковой толщины в два раза по сравнению с немодифицированной поверхностью.

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

Введение

Влияние наноструктурированной поверхности на межфазное взаимодействие и электрооптику жидких кристаллов (ЖК) представляет интерес не только для фундаментальной науки, но и для развития технологии ЖК-устройств различного назначения, включая ЖК-дисплеи [1–3]. Актуальность работы связана с новым направлением в производстве ЖК-дисплеев в последние годы, основанным на использовании для ориентации ЖК слоев на основе аморфного гидрогенизированного углерода (a -C:H) и алмазоподобного углерода (diamond-like carbon — DLC), получаемых с помощью плазмы. Для формирования анизотропии свойств поверхности слоев a -C:H и DLC используют бесконтактные методы ее обработки: ионное травление (или иначе ионное строгание под углом к поверхности подложки) и воздействие поляризованного или неполяризованного ультрафиолетового излучения [4–7]. Таким образом, механизм формирования анизотропной структуры поверхности основан на частичном удалении материала.

Ранее наши исследования показали, что на однородность планарной ориентации ЖК с помощью слоев a -C:H существенное влияние оказывает топология поверхности электрода [8]. Формирование на поверхности электрода периодической анизотропной структуры способствует увеличению фазовой задержки света в слое нематика и ускорению динамики S -эффекта [9]. Однако процессы, происходящие на границе раздела фаз нематического жидкого кристалл–поверхность с анизотропным рельефом, весьма сложны, и для их объяснения необходимы дополнительные исследования.

Целью настоящей работы является выяснение влияния нанорельефа поверхности на динамику переориентации директора и фазовую модуляцию света в слое ЖК. Для этого использовались слои монооксида германия (GeO), имеющие двумерную анизотропную структуру поверхности, которую модифицировали путем осаждения тонкого слоя a -C:H.

Экспериментальная часть

Исследования проводились на электроуправляемых ЖК-ячейках типа сандвич, собранных из двух полированных стеклянных подложек диаметром 35 mm, покрытых прозрачным электродным слоем на основе оксидов индия и олова (ITO) и ориентирующим слоем. Слои ITO, полученные методом катодного распыления, имели поверхностное сопротивление 500 – $600 \Omega \cdot \text{cm}$ и оптическое пропускание в видимой области спектра в интервале 85 – 90% . Слой GeO осаждался на поверхность ITO методом резистивного напыления материала под скользящим углом около 5° к поверхности подложки. Слои a -C:H получались химическим осаждением паров ацетона в плазме тлеющего разряда на постоянном токе при давлении в вакуумной камере около 0.05 Pa и мощности разряда 0.4 W с помощью устройства, описанного в [10].

В работе использовался нематический ЖК BL-037 Merck с положительной диэлектрической анизотропией $\Delta\epsilon = 16.9$ и оптической анизотропией $\Delta n = 0.282$ на длине волны $\lambda = 589.3 \text{ nm}$. Толщину слоя ЖК варьировали, используя при сборке ячеек тефлоновые прокладки различной толщины, с помощью которых фиксировали

Таблица 1. Параметры ЖК ячеек

ЖК-ячейка	Поверхность	d , μm	U_{th} , V	$\Delta\Phi_{\text{max}}/\pi$	θ_p , deg	τ_{on} , ms	τ_{off} , s	$\Delta\Phi/\pi$
A	GeO	13.5	0.8	10	35	8	10	6
B	GeO/a-C:H	12.5	1	11.9	7	8	10	10
C	GeO	13.5	0.7	9.3	22	7	2.8	6
D	GeO/a-C:H	13.5	1.1	12	6	8	4	12
F	GeO/a-C:H	15.3	1.1	14	0	11	5.5	14

Примечание. d — толщина слоя ЖК; U_{th} — пороговое напряжение; $\Delta\Phi_{\text{max}}$ — максимальная фазовая задержка света; θ_p — начальный угол наклона директора; τ_{on} — время полного нарастания; τ_{off} — время полного спада S -эффекта при напряжении 20 V и длительности импульса 0.5 s; $\Delta\Phi$ — величина фазовой задержки света, полученная из осциллограмм.

ззор между подложками. Ячейки заполнялись ЖК в нематической фазе капиллярным способом при температуре около 60° .

Измерения фазовой задержки и динамических характеристик нематических ЖК-ячеек проводились с помощью электрооптической системы, схема которой показана на рис. 1. ЖК-ячейка размещалась между скрещенными поляризаторами. В качестве источника света использовался He-Ne-лазер с длиной волны $\lambda = 632.8 \text{ nm}$. Угол между вектором поляризации падающего луча и исходным направлением директора ЖК составлял 45° . Динамика процесса фазовой модуляции света измерялась при подаче на ЖК-ячейку импульса напряжения U прямоугольной формы. Времена полного нарастания (τ_{on}) и спада (τ_{off}) S -эффекта получались в результате обработки осциллограмм оптического отклика по уровням 0.1 и 0.9 максимальной величины пропускания. Измерения проводились при постоянной интенсивности падающего излучения при комнатной температуре. Времена τ_{on} и τ_{off} электрооптического отклика ЖК-ячеек, экспериментально полученные при подаче импульса напряжения 20 V с длительностью 0.5 s, приведены в табл. 1.

Для получения экспериментальных данных о фазовой модуляции света в слое ЖК измерялось пропускание света через ЖК-ячейку в зависимости от напряже-

ния U при подаче синусоидального напряжения с частотой 1 kHz. Эти данные использовались для определения фазовой задержки света $\Delta\Phi$, порогового напряжения S -эффекта и начального угла наклона директора ЖК-ячеек. Величина порогового напряжения U_{th} определялась линейной экстраполяцией зависимости $\Delta\Phi(U)$ в области напряжений менее 2 V. При высоких напряжениях величина фазовой задержки становится линейной функцией обратного напряжения, поэтому максимальную величину фазовой задержки $\Delta\Phi_{\text{max}}$ можно определить линейной экстраполяцией зависимости $\Delta\Phi$ от $1/U$ при $1/U = 0$ [11]. Начальный угол наклона директора θ_p в ЖК-ячейках определялся из расчетной зависимости фазовой задержки от угла наклона директора для определенной толщины слоя ЖК по экспериментально полученному значению $\Delta\Phi_{\text{max}}$. Величина угла θ_p , полученная этим методом, хорошо совпадает с результатами определения угла наклона директора известным методом вращения ЖК-ячейки [12]. Толщина ЖК-слоя уточнялась с помощью метода вращения ЖК-ячейки. Результаты определения $\Delta\Phi_{\text{max}}$, угла θ_p , порога U_{th} и толщины ЖК-слоя d для исследованных ячеек приведены в табл. 1.

Исследования топологии структуры ориентирующих поверхностей проводились с помощью атомно-силового микроскопа на основе сканирующей головки „SMENA“ фирмы NT-MDT. Микроскоп работал в резонансном режиме „tapping mode“. В качестве зонда использовались наноразмерные W -острия, закрепленные на одном из плеч часового камертонного кварцевого резонатора с собственной частотой 32.8 kHz.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости фазовой задержки $\Delta\Phi$ от приложенного напряжения U в интервале от 0 до 8 V, подаваемого с частотой 1 kHz на ячейки A и B (табл. 1), в которых для ориентации ЖК использовались чистая и покрытая a-C:H поверхности GeO. Более крутой подъем кривой 2, наблюдаемый для ячейки B (рис. 2), по сравнению с кривой 1 для ячейки A можно объяснить тем, что осаждение на поверхность GeO слоя a-C:H приводит к более согласованному повороту директора по всей толщине

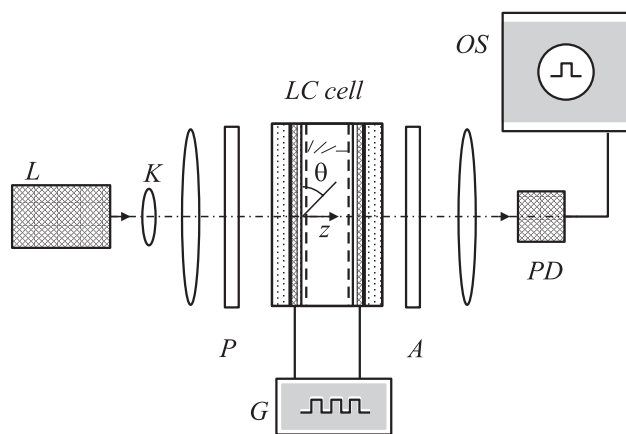


Рис. 1. Схема измерения электрооптического отклика ЖК-ячеек: L — He-Ne-лазер, K — коллиimator, LC-cell — ЖК-ячейка; A — анализатор, P — поляризатор, G — генератор напряжения, PD — фотодиод, OS — осциллограф.

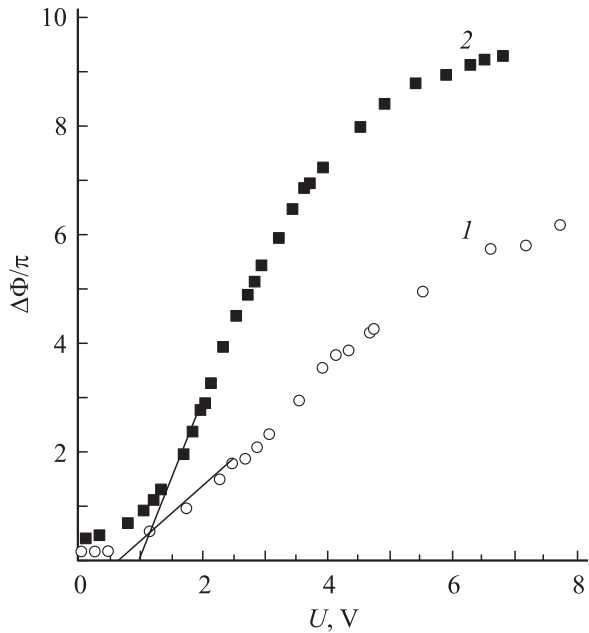


Рис. 2. Зависимости фазовой задержки $\Delta\Phi$ от напряжения U , подаваемого с частотой 1 kHz для ячеек A и B (см. табл. 1) с ориентирующими поверхностями GeO (1) и GeO/ a -C:H (2).

слоя ЖК, включая граничные области. Это может быть вызвано уменьшением противодействия упругим силам на межфазной границе.

О модификации граничных условий в результате осаждения на поверхность с заданной анизотропией рельефа GeO слоя a -C:H косвенно свидетельствует изменение порога S -эффекта. В ячейках A и C с наклонной ориентацией ЖК-директор в исходном положении образует угол с направлением электрического поля, перпендикулярным плоскости подложек. SB -деформация директора в этом случае наблюдается при низких напряжениях, равных 0.7–0.8 V (табл. 1). Осаждение на поверхность GeO слоя a -C:H приводит к повышению порогового напряжения U_{th} в ячейках B , D и F до 1 V. Следует заметить, что при осаждении a -C:H непосредственно на гладкую поверхность электрода $U_{th} = 2.3$ V [12], что более чем в два раза превышает пороговое напряжение того же ЖК при контакте со структурированной поверхностью GeO/ a -C:H.

Как известно, порог электрооптического эффекта соответствует напряжению электрического поля, при приложении которого в ЖК-ячейке начинает изменяться угол наклона директора. Величина U_{th} прямо пропорциональна константе упругости Франка и обратно пропорциональна анизотропии диэлектрической проницаемости ЖК [11]. Так как исследованные ячейки были заполнены одним и тем же ЖК, то повышение порога эффекта Фредерикса в рассматриваемом случае не связано с изменением объемной упругой энергии ЖК. Поэтому наблюдаемые различия в величине U_{th} для исследуемых поверхностей могут быть связаны с изменением условий межфазного взаимодействия на границе раздела. В ре-

зультате осаждения слоя a -C:H на поверхность GeO с анизотропией рельефа, наряду с анизотропно-упругим взаимодействием, начинает действовать механизм межмолекулярного взаимодействия, обусловленный физико-химическими свойствами a -C:H.

В ячейках A и C начальные углы наклона директора составляют $\theta_p = 35^\circ$ и 22° соответственно (табл. 1). Существенное уменьшение угла θ_p до 6° – 7° (табл. 1) в ячейках B и D в результате осаждения на поверхность GeO тонкого слоя a -C:H указывает на изменение условий межфазного взаимодействия ЖК с ориентирующей поверхностью в указанных ячейках. При увеличении толщины ориентирующего слоя a -C:H в ЖК-ячейке F в два раза величина угла θ_p снижается до 0 (табл. 1).

Изменение граничных условий, обусловленное модификацией наноструктурированной поверхности, оказывает влияние на фазовую модуляцию света в слое ЖК. Уменьшение начального угла наклона директора приводит к увеличению величины фазовой задержки. При одинаковой толщине слоя ЖК, равной $13.5\mu\text{m}$ в ячейке D , величина $\Delta\Phi_{\text{max}}$ была выше и равна 12π , в то время как для ячейки C $\Delta\Phi_{\text{max}} = 9.3\pi$. На рис. 3 приведены зависимости $\Delta\Phi$ от толщины d слоя ЖК для ячеек с ориентирующей поверхностью GeO (прямая 1) и для ячеек с поверхностью GeO, покрытой слоем a -C:H (прямая 2). Величина фазовой задержки прямо пропорциональна толщине слоя ЖК, и зависимости 1 и 2 имеют линейный характер в соответствии с известной формулой

$$\Delta\Phi = 2\pi d\Delta n/\lambda. \quad (1)$$

Фазовая задержка в слое ЖК одинаковой толщины d выше для ЖК-ячеек с комбинированной ориентирующей

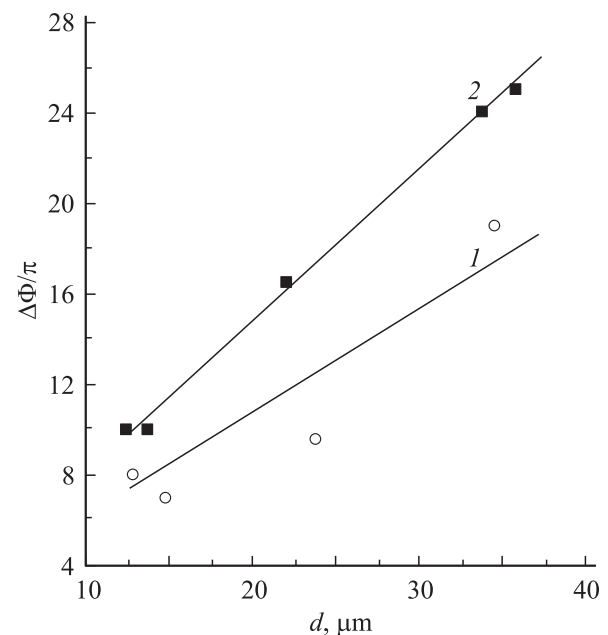


Рис. 3. Зависимости фазовой задержки от толщины слоя ЖК (BL-037 Merck) для ячеек с ориентирующим слоем GeO (1) и для ячеек с комбинированной поверхностью GeO/ a -C:H (2).

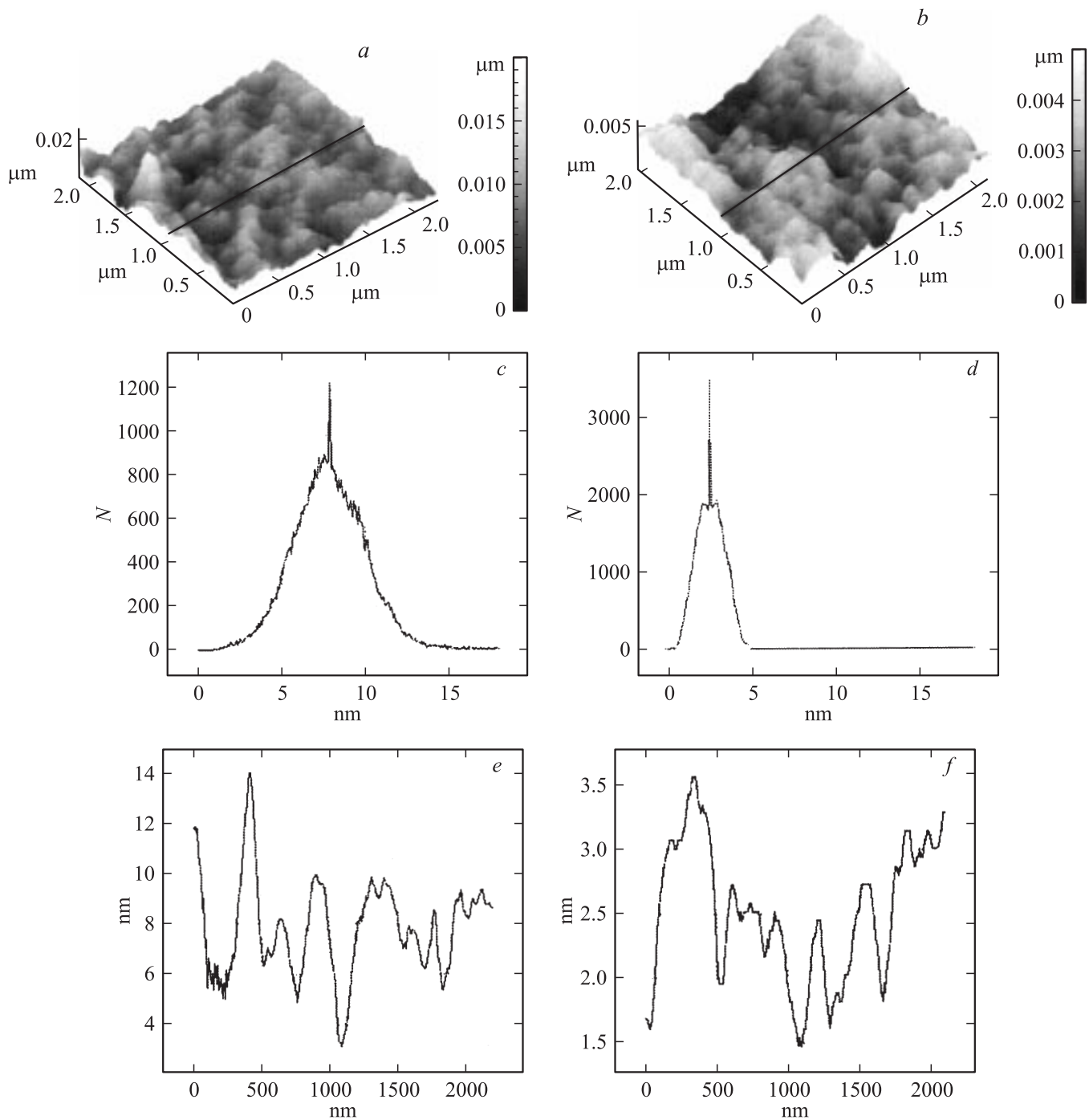


Рис. 4. Изображения поверхности GeO (*a*) и комбинированной поверхности GeO/*a*-C:H (*b*), полученные в атомно-силовом микроскопе на основе сканирующей головки „SMENA“ фирмы NT-MDT. Площадь сканирования $2 \times 2 \mu\text{m}$. Профиль рельефа сканирован вдоль линии, показанной на изображениях поверхностей (*e, f*). Кривые распределения высоты неровностей рельефа получены в результате статистической обработки параметров профилограмм нанорельефа исследуемых поверхностей путем сканирования 256 строк по 256 точек в каждой (*c, d*)

поверхностью GeO/*a*-C:H, нежели с ориентирующей поверхностью GeO, как видно из рис. 3. Наблюдаемый эффект увеличения фазовой задержки света в слое ЖК свидетельствует о существенном влиянии свойств ориентирующей поверхности на фазовую модуляцию света.

На рис. 4 приведены изображения исходной поверхности GeO (рис. 4, *a*) и покрытой слоем *a*-C:H (рис. 4, *b*), полученные с помощью атомно-силового микроскопа. Поверхность слоя GeO (рис. 4, *a*) имеет характерный нанорельеф, образующийся в результате осаждения слоя под скользким углом к поверхности подложки. По-

Таблица 2. Статистическая обработка изображения поверхности GeO и GeO/*a*-C:H размером $2 \times 2 \mu\text{m}$, полученных с помощью атомно-силового микроскопа

Характеристики поверхности	GeO	GeO/ <i>a</i> -C:H
Наибольшая высота неровностей профиля R_{max} , nm	20.33	4.94
Среднее отклонение профиля R_{mean} , nm	7.85	2.52
Среднеарифметическое отклонение профиля R_a , nm	1.72	0.66
Среднеквадратичное отклонение профиля R_q , nm	2.21	0.82

сле нанесения на структурированную поверхность GeO аморфной пленки *a*-C:H наблюдается значительное уменьшение высоты неровностей R_{max} и среднего отклонения профиля R_a нанорельефа. Результаты статистической обработки параметров профилограмм нанорельефа исследуемых поверхностей путем сканирования 256 строчек по 256 точек в каждой приведены в табл. 2. Сглаживание нанорельефа поверхности является одной из причин уменьшения угла θ_p для ЖК-ячеек *C*, *D* и *F* (табл. 1). Другой причиной может быть совместное действие наряду с анизотропно-упругим механизмом, характерным для структурированных поверхностей, и межмолекулярного механизма взаимодействия, обусловленного физико-химической структурой поверхности *a*-C:H [5].

Фазовая модуляция света в слое ЖК происходит в результате переориентации директора в направлении вектора электрического поля. Изменение угла наклона директора ЖК относительно оси *z* (рис. 1) с ростом напряжения приводит к уменьшению показателя преломления для необыкновенного луча, в то время как для обыкновенного луча показатель остается неизменным. В результате этого наблюдается изменение разности фаз (двулучепреломление) светового потока, распространяющегося перпендикулярно слою ЖК. В соответствии с динамической моделью *SB*-деформации при постоянной диэлектрической анизотропии и одинаковой толщине слоя ЖК время $\tau_{\text{он}}$, соответствующее изменению угла наклона директора от θ_p до 90° , будет обратно пропорционально квадрату амплитуды приложенного напряжения [13].

Экспериментально установлено, что время нарастания *S*-эффекта при подаче на ЖК-ячейки *A*, *B*, *C* и *D* импульса напряжения одинаковой амплитуды 20 V с длительностью 0.5 s составляло около 8 ms (табл. 1). Это свидетельствует о том, что при толщине слоя ЖК более $10 \mu\text{m}$ влияние граничных условий на время $\tau_{\text{он}}$ несущественно. Увеличение $\tau_{\text{он}}$ для ячейки *F* до 11 ms может быть обусловлено как увеличением толщины слоя ЖК (табл. 1), так и изменением емкости ЖК-ячейки, связанным с увеличением толщины диэлектрического слоя *a*-C:H в два раза по сравнению с ячейкой *D*.

На рис. 5 даны осциллограммы фазовой модуляции света в ЖК ячейках *C* и *D*: кривые (*a*) и (*b*) соот-

ветственно. Изменение условий межфазного взаимодействия на границе раздела в ЖК-ячейке *D*, связанное с осаждением на поверхность GeO тонкого диэлектрического слоя *a*-C:H, приводит к удвоению величины фазовой задержки света при одинаковой толщине слоя ЖК (табл. 1). Наблюдаемое увеличение фазовой задержки света при *SB*-деформации директора в электрическом поле эквивалентно увеличению в два раза толщины слоя ЖК в соответствии с формулой (1). Этот эффект можно объяснить тем, что при подаче на ячейки *C* и *D* импульса напряжения директор начинает поворачиваться относительно оси *z* на рис. 1 с разными начальными углами наклона директора в случае планарной и наклонной ориентации.

После прекращения действия импульса напряжения происходит процесс релаксации, связанный с возвращением директора ЖК в исходное положение. Время релаксации пропорционально квадрату толщины слоя ЖК и его вязкости и обратно пропорционально константе упругости [13]. В данном эксперименте при средней толщине слоя ЖК около $13.5 \mu\text{m}$ время спада эффекта изменялось в интервале от 2.7 до 10 s (табл. 1). Каких-либо корреляций со свойствами и структурой поверхности в этой работе не установлено. Можно отметить, что осаждение тонкого диэлектрического слоя *a*-C:H с удельным сопротивлением порядка $10^{-12} \Omega \cdot \text{cm}$ [14] замедляет процесс релаксации после прекращения действия импульса напряжения в ЖК-ячейке *D* по сравнению с ячейкой *C* (табл. 1) несмотря на одинаковую толщину слоя ЖК.

Для решения практической задачи получения фазовой задержки, равной 2π , за минимально возможное время, на ЖК-ячейки *C* и *D* был подан импульс напряжения

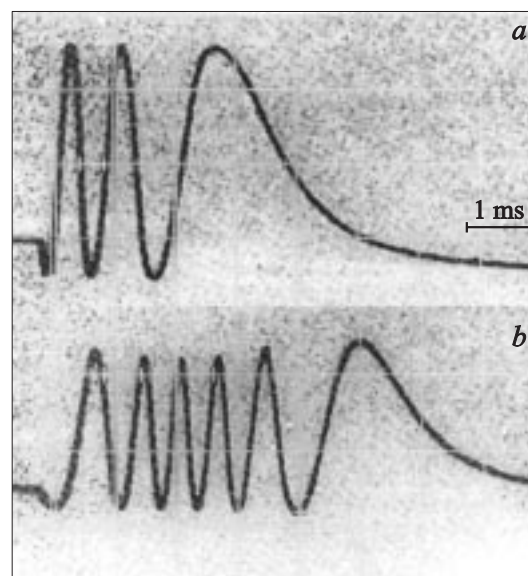


Рис. 5. Осциллограммы фазовой модуляции света в слое ЖК толщиной $13.5 \mu\text{m}$, при подаче импульса напряжения амплитудой 20 V с длительностью 0.5 s на ячейки *C* (кривая *a*) и *D* (кривая *b*).

амплитудой 20 V с длительностью 1 ms. Это позволило получить $1 \text{ ms} > \tau_{\text{оп}} > 0.5 \text{ ms}$ для $\Delta\Phi = 2\pi$. Время $\tau_{\text{офф}}$ при этом было около 2 s.

Заключение

Механизм взаимодействия ЖК с ориентирующей поверхностью, имеющей явно выраженный нанорельеф, как в случае наклонно осажденных слоев GeO, обусловлен действием только анизотропно-упругих сил. Поверхность GeO обеспечивает слабое взаимодействие на межфазной границе и наклонную ориентацию ЖК с большим начальным углом наклона директора $\theta_p \geq 22^\circ$. Модификация поверхности GeO в результате осаждения тонкого слоя a-C:H приводит к значительному уменьшению высоты неровностей нанорельефа с их среднего отклонения без существенного изменения топологии структуры. Наблюдаемое при этом увеличение порога S-эффекта в ячейках с комбинированной поверхностью GeO/a-C:H указывает на усиление взаимодействия на границе раздела фаз. Изменение граничных условий влияет на SB-деформацию директора под действием электрического поля и фазовую модуляцию света в слое ЖК.

Экспериментально показано, что уменьшение начального угла наклона директора способствует увеличению фазовой задержки света в слое ЖК при той же толщине слоя ЖК. Полученные результаты могут быть использованы при разработке фазовых модуляторов света и других устройств на ЖК.

Список литературы

- [1] Yeung F.S., Kwoka H.-S. // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 88. P. 063 505–3.
- [2] Yeung F.S., Ho J.Y., Li Y.W. et al. // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 88. P. 051 910–3.
- [3] Chae B., Kim S.B., Lee S.W. et al. // Macromolecules. 2002. Vol. 35. P. 10 119–10 130.
- [4] Doyle J.P., Chaudhari P., Galligan E.A. et al. // Nucl. Instr. and Meth. B. 2003. Vol. 206. P. 467–471.
- [5] Jo Y.-M., Hwang J.-Y., Seo D.-S. et al. // Mol. Cryst. & Liq. Cryst. 2004. Vol. 410. P. 319–327.
- [6] Hwang J.-Y., Jo Y.-M., Seo D.-S., Jang J. // Jpn. J. of Appl. Phys. Part 2: Lett. 2003. Vol. 42. N 2A. P. L114–L116.
- [7] Rho S.J., Lee D.-K., Baik H.K. et al. // Thin Solid Films. 2002. Vol. 420–421. P. 259–262.
- [8] Коншина Е.А., Толмачев В.А., Вангонен А.И., Фаткуллина Л.А. // Оптич. журн. 1997. Т. 64. № 5. С. 88–95.
- [9] Коншина Е.А., Федоров М.А. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 22. С. 15–21.
- [10] Коншина Е.А. // ЖФТ. 2002. Т. 72. Вып. 6. С. 35–40.
- [11] Hwang S.J., Lin S.-T., Lai C.-H. // Opt. Comm. 2006. Vol. 260. P. 614–620.
- [12] Коншина Е.А., Федоров М.А., Амосова Л.П. // Оптич. журн. 2006. Т. 73. № 12. С. 9–13.
- [13] Чигринов В.Г. // Кристаллография. 1982. Т. 27. Вып. 2. С. 404–430.
- [14] Коншина Е.А. // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 3. С. 87–89.