

07

Влияние ориентирующей поверхности и толщины слоя жидкого кристалла на характеристики электроуправляемых оптических модуляторов

© В.Н. Васильев, Е.А. Коншина, Д.С. Костомаров,
М.А. Федоров, Л.П. Амосова, Е.О. Гавриш

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

Поступило в Редакцию 10 декабря 2008 г.

Исследован экранирующий эффект ориентирующего слоя a -С:Н и влияние на него толщины слоя двухчастотного жидкого кристалла. Показано, что оптимизация толщины ориентирующего слоя позволяет не только снизить порог оптического S -эффекта, но и получить время отклика и время релаксации, соответствующие 0.5 и 2.5 ns при фазовой задержке 2π на длине волны $0.86 \mu\text{m}$.

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

Использование двухчастотного (dual-frequency DF) нематического жидкого кристалла (ЖК) с инверсией знака диэлектрической анизотропии является одним из реальных путей повышения быстродействия электроуправляемых оптических модуляторов. Это обусловлено возможностью ускорения процесса релаксации ЖК путем приложения к модулятору высокочастотного (ВЧ) электрического поля [1,2]. В модуляторе с толщиной слоя DF ЖК, равной $13 \mu\text{m}$, время отклика было 2 ns при фазовой задержке 2π на длине волны $1.55 \mu\text{m}$, а время релаксации было больше и составило 17 ns [2]. Это связано со сложными физическими процессами, протекающими как в слое DF ЖК, так и на межфазной границе с поверхностью во время релаксации под действием электрического поля. Повышению быстродействия оптических DF ЖК модуляторов должно способствовать уменьшение толщины слоя ЖК, так как времена отклика и релаксации пропорциональны квадрату этой величины.

Характеристики оптических электроуправляемых модуляторов с двухчастотным ЖК

№ образ-ца	Ориенти-рующая поверх-ность	$d, \mu\text{m}$	Длина волны, μm						
			0.65			0.86		1.55	
			$\Delta\Phi_{\text{max}}/\pi$	U_{th}, V	θ_p, deg	$\Delta\Phi_{\text{max}}/\pi$	U_{th}, V	$\Delta\Phi_{\text{max}}/\pi$	U_{th}, V
S-1	<i>a</i> -C:H	18	8.5	4	36.5	6.8	4	3.2	4
S-2	<i>a</i> -C:H	8	5.3	6	17.5	3.7	4	1.7	6
S-3	<i>a</i> -C:H	8	3.1	1	44	2.4	1	1.4	1
S-4	GeO/ <i>a</i> -C:H	7	3.6	1	37	2.6	1	1.8	1

Эта работа посвящена экспериментальным исследованиям электроуправляемых оптических модуляторов на основе DF ЖК и влиянию на их оптические и динамические характеристики как толщины слоя ЖК, так и толщины ориентирующего слоя.

В качестве модулирующей среды использовали двухчастотный жидкий кристалл марки ЖК-1001 (НИОПиК). Экспериментально было установлено, что при переходе в ближнюю ИК-область спектра оптическая анизотропия этого DF ЖК уменьшается от 0.26 до 0.22. С учетом дисперсии оптической анизотропии для получения фазовой задержки 2π на длине волны $1.55 \mu\text{m}$ толщина d слоя ЖК в модуляторах должна быть не менее $7 \mu\text{m}$ [2]. Для ориентации DF ЖК использовали слои *a*-C:H, полученные CVD (chemical vapor deposition) технологией в плазме.

Характеристики ЖК-модуляторов исследовали на длинах волн 0.65, 0.86 и $1.55 \mu\text{m}$ с помощью оптической схемы, описанной в работе [2]. Значения максимальной фазовой задержки $\Delta\Phi_{\text{max}}$, начального угла наклона директора ЖК θ_p и порогового напряжения U_{th} определяли из экспериментальных зависимостей пропускания ЖК-модулятора от синусоидального напряжения, подаваемого с частотой 1 kHz по методикам, описанным в работе [3]. Характеристики исследуемых модуляторов приведены в таблице.

Сравнение двух модуляторов с ориентирующим слоем *a*-C:H толщиной около 130 nm показало, что уменьшение толщины слоя ЖК от 18 до $8 \mu\text{m}$ привело к увеличению в 2 раза порогового напряжения от 3 до 6 V (образцы S-1 и S-2 в таблице). Наблюдаемое повышение

порогового напряжения связано с уменьшением расстояния между двумя поверхностями, ограничивающими ЖК. Известно, что в тонких ЖК-ячейках усиливается экранирование приложенного напряжения ориентирующим слоем. Это приводит к понижению напряжения на слое ЖК [4]. Увеличение порогового напряжения в модуляторе *S-2* свидетельствует о том, что процесс деформации директора ЖК начинается при более высоком приложенном напряжении, соответствующем экспериментальному значению U_{th} . Причиной повышения порога *S*-эффекта является экранирование приложенного к модулятору напряжения ориентирующим слоем.

Влияние экранирующего эффекта можно снизить, уменьшив толщину ориентирующего слоя. Так, например, в модуляторе *S-3* уменьшение толщины слоя *a-C:H* в 4 раза по сравнению с модулятором *S-1* привело к снижению U_{th} до 1 В (см. таблицу) при той же толщине слоя ЖК. Однако это сопровождалось увеличением начального угла наклона директора θ_p до 44°, который определяется балансом между упругой энергией ЖК и поверхностной энергией ориентирующего слоя. Причиной увеличения угла наклона директора ЖК в модуляторе *S-3* может быть понижение энергии сцепления на межфазной границе из-за снижения поверхностной энергии слоя *a-C:H*, так как упругая энергия ЖК не изменилась. Уменьшение поверхностной энергии в данном случае может быть вызвано изменением структуры поверхности прозрачного электродного слоя в результате обработки его аргоновой плазмой. Последующее осаждение аморфного слоя *a-C:H* приводит к сглаживанию рельефа, образовавшегося в результате ионного травления. Эффективность сглаживания неоднородностей рельефа возрастает с увеличением толщины слоя *a-C:H*. Однако при этом изменяется и поверхностная энергия. Поэтому увеличение угла θ_p в модуляторе *S-3* можно объяснить уменьшением поверхностной энергии и, как следствие этого, энергии сцепления на межфазной границе ЖК с ориентирующим слоем.

Высокий начальный угол наклона директора ЖК, равный 37° (см. таблицу), был получен в модуляторе *S-4* с низким значением $U_{th} = 1$ В. В этом случае тонкий слой *a-C:H* осаждали на поверхность монооксида германия GeO. Эта поверхность имела анизотропную двумерную структуру, полученную в результате наклонного напыления в вакууме. Как было показано ранее, осаждение на поверхность GeO слоя *a-C:H* вызывает сглаживание нанорельефа и в результате этого снижение угла

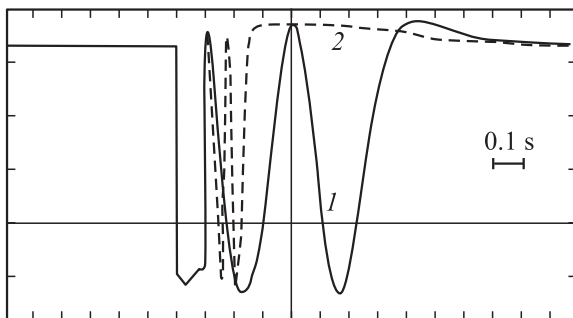


Рис. 1. Осциллограммы электрооптического отклика ЖК-модулятора *S-2* на длине волны $0.65 \mu\text{m}$ на одиночный прямоугольный импульс напряжения амплитудой 30 V длительностью 10 ms : *1* — естественная упругая релаксация; *2* — релаксация под действием ВЧ-напряжения с амплитудой 20 V при длительности 200 ms .

наклона θ_p [5]. По величине пороговых напряжений можно считать, что в модуляторах *S-3* и *S-4* (см. таблицу) действие экранирующего эффекта незначительно.

Исследование осциллограмм, полученных для модулятора *S-2* на длине волны $0.65 \mu\text{m}$, показало, что количество осцилляций, наблюдаемых при отклике на одиночный прямоугольный импульс напряжения постоянного тока с амплитудой 30 V и длительностью 10 ms , было меньше, чем при естественной упругой релаксации (рис. 1). Время отклика τ_{on} составило 3 ms . При управлении процессом релаксации DF ЖК путем подачи пакета синусоидальных колебаний с частотой 30 kHz время релаксации τ_{off} уменьшилось до 200 ms (рис. 1). Количество осцилляций, наблюдаемых при отклике на подаче пакета НЧ синусоидальных колебаний с частотой 1 kHz , совпадало с количеством осцилляций при релаксации ВЧ-полем, как видно на рис. 2, а время $\tau_{on} = \tau_{off} = 100 \text{ ms}$. Уменьшение времени τ_{off} в этом случае свидетельствует о том, что приложение к модулятору постоянного электрического поля замедляет процесс релаксации ЖК.

Уменьшение количества осцилляций на осциллограмме электрооптического отклика при приложении постоянного электрического поля к модулятору *S-2* можно объяснить генерацией остаточного напряжения

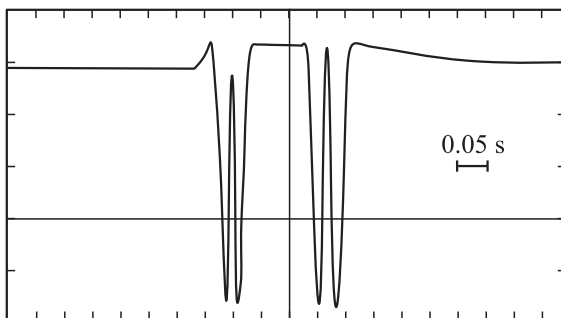


Рис. 2. Осциллограмма электрооптического отклика ЖК-модулятора *S-2* на длине волны $0,65 \mu\text{m}$ при работе в двухчастотном режиме с амплитудами НЧ- и ВЧ-напряжений 20 и 23 В при длительностях 0,05 с и 100 мс соответственно.

на межфазной границе. Этот процесс может происходить в результате адсорбции и десорбции ионных зарядов на границе раздела фаз ЖК — ориентирующая поверхность [6]. При возникновении постоянного потенциала на межфазной границе должны изменяться угол наклона директора ЖК вблизи границы раздела фаз, а также диэлектрическая проницаемость ЖК, параллельная приложенному электрическому полю. Таким образом, к моменту начала процесса *SB*-деформации полярный угол $\theta > \theta_p$, что при постоянной толщине слоя ЖК приводит к уменьшению числа осцилляций. По нашим оценкам, если фазовая задержка в модуляторе *S-2* с толщиной слоя ЖК $8 \mu\text{m}$ соответствует 3π , то полярный угол $\theta = 42^\circ$, что в 2 раза больше начального угла $\theta_p = 17,5^\circ$ (см. таблицу). Увеличение полярного угла в результате генерации остаточного напряжения способствует ускорению электрооптического отклика ЖК, но вместе с тем оно снижает амплитуду сигнала и фазовую задержку.

В модуляторе *S-4* при отсечке 2π на осциллограмме электрооптического отклика, полученной на длине волны $0,86 \mu\text{m}$ при подаче прямоугольного импульса напряжения постоянного тока и последующей релаксации при приложении ВЧ-напряжения с амплитудой 60 В, времена $\tau_{on} = 1 \text{ ms}$ и $\tau_{off} = 5 \text{ ms}$. При увеличении амплитуды прямоугольного импульса до 40 В и уменьшении его длительности до 1 мс эти времена уменьшились в 2 раза до 0,5 и 2,5 мс. В модуляторе *S-3* в таком режиме

управления времена были выше и составили $\tau_{on} = 2.5$ ms и $\tau_{off} = 9$ ms, что свидетельствует о существенном влиянии граничных условий на быстродействие ЖК-модуляторов.

Результаты проведенных исследований показали, что экранирующий эффект ориентирующего слоя и процесс генерации остаточного потенциала на межфазной границе зависят от толщины как слоя жидкого кристалла, так и ориентирующего слоя. Если экранирующий эффект приводит к уменьшению падения напряжения на слое ЖК и повышению порогового и управляющих напряжений, то генерация остаточного потенциала уменьшает амплитуду и фазовую задержку модулятора. Для повышения быстродействия оптических модуляторов до микросекундного диапазона необходимо оптимизировать наряду с режимами управления электрооптическим откликом и релаксацией двухчастотного ЖК не только толщину слоя ЖК, но и толщину ориентирующего слоя.

Работа выполнена при финансовой поддержке ведущей научной школы РФ НШ-308.2008.9 Федеральным агентством по науке и инновациям в рамках ФЦП по ГК № 02.514.12.0004.

Список литературы

- [1] Коншина Е.А., Федоров М.А., Амосова Л.П., Исаев М.В., Костомаров Д.С. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 9. С. 87–94.
- [2] Коншина Е.А., Федоров М.А., Амосова Л.П., Исаев М.В., Костомаров Д.С. // Опт. журн. 2008. Т. 75. В. 10. С. 73–80.
- [3] Коншина Е.А., Федоров М.А., Амосова Л.П. // Опт. журн. 2006. Т. 73. № 12. С. 9–13.
- [4] Meizi Jiao, Zhibing Ge, Qiong Song, Shin-Tson Wu // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92. P. 061102 1–3.
- [5] Коншина Е.А., Федоров М.А., Амосова Л.П., Воронин Ю.М. // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 2. С. 71–76.
- [6] Mizusaki M., Miyashita T., Uchida T., Yamada Y., Ishii Y., Mizushima S.J. // Appl. Phys. 2007. V. 102. P. 014904 1–6.