

ОПТИЧЕСКИЕ МОДУЛЯТОРЫ НА ОСНОВЕ ДВУХЧАСТОТНОГО НЕМАТИЧЕСКОГО ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА

© 2008 г. **Е. А. Коншина**, канд. техн. наук; **М. А. Федоров**; **Л. П. Амосова**, канд. физ.-мат. наук; **М. В. Исаев**; **Д. С. Костомаров**

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

E-mail: eakonshina@mail.ru

Экспериментально исследованы динамические характеристики электроуправляемых модуляторов на жидких кристаллах (ЖК) в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра и влияние на них параметров электрических полей, а также изменения условий межфазного взаимодействия ЖК с ориентирующей поверхностью. Показана эффективность использования двухчастотного ЖК для фазовой и амплитудной модуляции излучения с длиной волны 1,55 мкм. В ЖК-модуляторе, работающем на S-эффекте, фазовая задержка 2π получена за время 2 мс. Времена переключения могут быть снижены до микросекундного диапазона при использовании твист-эффекта и толщине слоя ЖК около 7 мкм путем повышения напряжения от 30 до 50 В.

Коды OCIS: 230.3720, 160.3710.

Поступила в редакцию 13.05.2008.

Для создания компонентов телекоммуникационных систем в мировой практике используются термооптические, электрооптические, акустооптические, магнитооптические, жидкокристаллические и другие технологии. Оптические характеристики компонентов на основе жидких кристаллов (ЖК) сравнимы с параметрами оптико-механических устройств, получивших наиболее широкое распространение, но при этом ЖК-устройства обладают достаточно высокими скоростями, большей надежностью и работают при более низких напряжениях, что снижает потребляемую ими мощность. Благодаря хорошей прозрачности в диапазоне работы оптических сетей (от 0,86 до 1,55 мкм) ЖК-материалы имеют более низкие потери при прохождении через них оптического сигнала [1]. Основными направлениями исследований ЖК-устройств для телекоммуникационных систем являются повышение быстродействия, расширение динамического диапазона их работы, снижение потерь оптического сигнала и энергопотребления.

Динамика переориентации молекул ЖК во внешних полях зависит от многих факторов: анизотропно-упругого межфазного взаимодействия с поверхностью твердого тела, параметров приложенного электрического поля, свойств ЖК и особенностей электрооптического эффекта. Процесс изменения структуры нематического ЖК в электрическом поле, обусловленный переориентацией длинных осей молекул, может быть ускорен за счет уменьшения толщины слоя ЖК, увеличения приложенного эффективного напряжения, понижения порога электрооптичес-

кого эффекта и вязкости ЖК. Быстродействие обычных нематиков при приложении к слою ЖК электрического поля ограничивается процессом естественной релаксации молекул, который может занимать несколько секунд [2].

Использование двухчастотного электрооптического эффекта в нематическом ЖК является одним из перспективных направлений повышения быстродействия ЖК-устройств. Двухчастотный эффект в ЖК основан на инверсии знака диэлектрической анизотропии в зависимости от частоты переменного электрического поля. Этот эффект позволяет ускорить релаксацию молекул путем приложения электрического поля, которое принудительно переориентирует молекулы в исходное состояние. Оптимизируя режим управления оптическим пропусканием ЖК-модулятора при фазовой и амплитудной модуляции, можно добиться ускорения динамики электрооптического отклика и снижения его до микросекундного диапазона работы ЖК-устройств [3, 4].

Работа посвящена исследованию динамических характеристик фазовых и амплитудных оптических модуляторов с двухчастотным нематическим ЖК в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра и влиянию на них параметров приложенных электрических полей, а также условий межфазного взаимодействия ЖК с поверхностью. Основной целью работы является совершенствование методик и оптимизация параметров управления S- и твист-эффектами в оптических модуляторах и повышение их быстродействия.

Особенности нематического ЖК с инверсией знака диэлектрической анизотропии

Двухчастотный нематический жидкий кристалл (ДЧНЖК) представляет собой смесь молекул ЖК с положительной и отрицательной диэлектрической анизотропией $\Delta\epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$, где ϵ_{\parallel} и ϵ_{\perp} – диэлектрические проницаемости, параллельная и перпендикулярная длинной оси молекул. В ДЧНЖК $\Delta\epsilon$ изменяется от положительных при низких частотах (НЧ) до отрицательных значений при высоких частотах (ВЧ). С увеличением частоты колебаний f приложенного электрического поля ϵ_{\parallel} уменьшается, в то время как ϵ_{\perp} остается постоянной. Характерной особенностью ДЧНЖК является существование переходной (crossover) частоты f_c , при которой изменяется знак $\Delta\epsilon$. Директор ЖК (единичный вектор, соответствующий ориентации длинной оси молекул ЖК) ориентируется параллельно приложенному электрическому полю при $f < f_c$ в области $\Delta\epsilon > 0$ и перпендикулярно ему, когда $f > f_c$ в области $\Delta\epsilon < 0$.

В работе использовали ЖК-1001 (НИОПИК) с оптической анизотропией $\Delta n = 0,26$ на длине волны 632,8 нм и $\Delta\epsilon = 4,43$ ($\epsilon_{\parallel} = 9,53$ и $\epsilon_{\perp} = 5,1$) на частоте 1 кГц [5]. Переходную частоту этого ДЧНЖК определили из зависимостей порога электрооптического S-эффекта Фредерикса от частоты прикладываемого синусоидального напряжения с частотой 1 кГц. Пороговому (threshold) напряжению U_{th} S-эффекта соответствует напряжение, при котором начинает изменяться полярный угол наклона директора ЖК относительно плоскости. Экспериментально пороговое напряжение определяли экстраполяцией линейного участка зависимости фазовой задержки от напряжения [6]. Было показано, что в интервале от 100 Гц до 5000 Гц U_{th} слабо зависит от частоты приложенного напряжения. Вблизи переходной частоты ДЧНЖК при $\Delta\epsilon \rightarrow 0$ наблюдалось резкое увеличение порога. Максимум зависимости U_{th} от f соответствовал $f_c = 10$ кГц ДЧНЖК [7].

Исследуемые электроуправляемые оптические модуляторы представляли собой плоские ячейки, состоящие из двух параллельных стеклянных подложек, зазор между которыми заполнен ЖК. На поверхность стеклянных подложек были нанесены прозрачные проводящие электродные слои на основе окислов индия и олова и ориентирующий слой. Были исследованы два модулятора, работающие на S-эффекте. В одном из них был использован ориентирующий слой, полученный напылением монооксида германия GeO в вакууме, а в другом поверхность GeO была дополнительно покрыта тонким слоем а-С:Н, осажденным из паров ацетона в

Таблица 1. Характеристики фазовых модуляторов с ДЧНЖК на длине волны 633 нм

Модулятор	Ориентирующая поверхность	d , мкм	$\Delta\Phi_{\max}/2\pi$	U_{th} , В	θ_p , град
S-1	GeO	13	2,75	1,6	42
S-2	GeO/a-C:H	13,3	4,2	2,9	26

плазме тлеющего разряда. Осаждение слоя а-С:Н приводит к сглаживанию нанорельефа поверхности GeO и изменению условий межфазного взаимодействия на границе с ЖК [2]. Направления ориентации директора ЖК на обеих подложках были антипараллельны для реализации S-эффекта. Толщину зазора ячеек d задавали с помощью фторопластовых прокладок. Ячейки заполняли ЖК в нематической фазе в условиях вакуума. В табл. 1 приведены характеристики ЖК ячеек. Максимальное значение фазовой задержки $\Delta\Phi_{\max}$ определяли экстраполяцией линейного участка зависимости $\Delta\Phi(1/U)$ при $1/U \rightarrow 0$. Угол наклона директора θ_p находили по значению $\Delta\Phi_{\max}$ с помощью расчетной зависимости $\Delta\Phi$ от угла наклона директора для заданной толщины слоя ЖК [6].

Как видно из табл. 1, осаждение на поверхность GeO слоя а-С:Н приводит не только к повышению порога S-эффекта U_{th} , но и к уменьшению начального угла θ_p наклона директора ЖК от 42° до 26° в модуляторе S-2, которое приводит к увеличению в 1,5 раза $\Delta\Phi_{\max}/2\pi$ по сравнению с ячейкой S-1.

Методы управления фазовой модуляцией и динамические характеристики оптических модуляторов на основе ДЧНЖК

В оптических фазовых модуляторах света с исходной параллельной ориентацией молекул ДЧНЖК процесс подъема пропускания происходит в результате SB-деформации, приводящей к увеличению угла наклона директора относительно подложки в результате переориентации диполей молекул ЖК вдоль направления электрического поля. Он может быть осуществлен при приложении к модулятору постоянного или переменного НЧ-напряжения. Процесс спада оптического пропускания, связанный с релаксацией молекул, происходит в результате BS-деформации при приложении переменного ВЧ-напряжения. В работе [8] были проведены экспериментальные исследования динамики S-эффекта ДЧНЖК на длине волны 633 нм. Применение разных схем управления переориентацией директора молекул в постоянном и переменном электрическом поле показало существенное влияние метода управ-

ления двухчастотным эффектом на время подъема и спада оптического пропускания.

Время электрооптического отклика ЖК является одной из основных характеристик всех ЖК-устройств. Суммарное время отклика ЖК зависит в большей мере от времени спада пропускания τ_{off} , обусловленного процессом релаксации молекул после прекращения действия электрического поля, которое пропорционально вязкости γ_1 и квадрату толщины d слоя и обратно пропорционально константе упругости ЖК. Время подъема пропускания τ_{on} при переориентации молекулярных диполей под действием электрического поля выражается формулой

$$\tau_{\text{on}} = \frac{4\pi\gamma_1}{\Delta\epsilon(f_1)} \frac{d^2}{(U^2 - U_{\text{th}}^2)}, \quad (1)$$

где U – приложенное эффективное напряжение. В случае ДЧНЖК частота приложенного напряже-

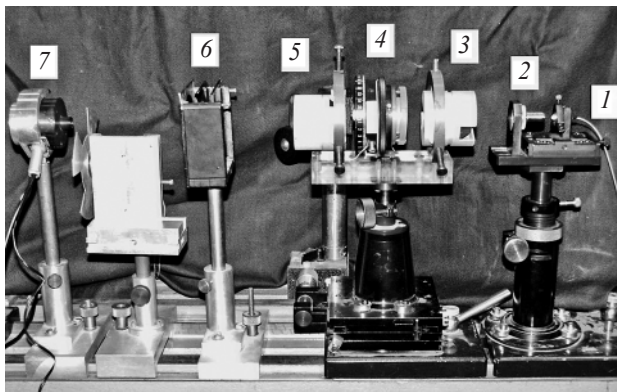


Рис. 1. Стенд для измерения характеристик ЖК-модуляторов в интервале длин волн 0,65–1,55 мкм. 1 – полупроводниковый лазерный светодиод, 2 – коллиматор, 3 и 5 – призматические ЖК-поляризаторы, 4 – ЖК-модулятор, 6 – фильтры, 7 – фотодиод.

ния должна быть $f_1 < f_c$. Для переключения полярного угла наклона директора в ДЧНЖК в исходное состояние путем приложения напряжения с $f_2 > f_c$ время τ_{off} может быть описано формулой (1) с соответствующим модулем значения $\Delta\epsilon(f_2) < 0$. Время спада пропускания электрооптического отклика ДЧНЖК, управляемого приложенным напряжением, будет всегда меньше, чем время естественной релаксации.

Для измерения оптических и динамических характеристик исследуемых ЖК-модуляторов в работе применяли две оптические схемы: с использованием He–Ne-лазера с длиной волны 633 нм [6] и с полупроводниковыми лазерными модулями LFO фирмы ФТИ-Оптроник с длиной волны 0,65 и 1,55 мкм. Стенд для измерения по последней схеме показан на рис. 1. Здесь в качестве анализатора и поляризатора были использованы призматические ЖК-поляризаторы 3 и 5, работающие в широком интервале спектра. Поляризаторы находились в скрещенном положении относительно друг друга. Сигнал после анализатора 5 попадал на фотодиод 7 и регистрировался с помощью цифрового осциллографа GDS-820s, соединенного с компьютером. В табл. 2 приведены результаты измерения динамических характеристик исследуемых фазовых ДЧНЖК-модуляторов, полученные на длине волны 633 нм при применении разных схем управления переориентацией диполей ЖК-молекул в электрическом поле. В работе использовали следующие схемы управления:

1) – для подъема пропускания к модулятору прикладывали пакет синусоидальных НЧ-колебаний с частотой 1 кГц, напряжением U_{lf} (lf – low frequency) и длительностью τ_{lf} , а спад происходил в результате естественной релаксации;

2) – для подъема пропускания к модулятору прикладывали пакет синусоидальных НЧ-колебаний с частотой 1 кГц, амплитудой напряжения U_{lf} и длительностью τ_{lf} , а для ускорения спада подавали пакет ВЧ-синусоидальных колебаний с частотой

Таблица 2. Динамические характеристики фазовых модуляторов с ДЧНЖК на длине волны 633 нм, полученные в разных схемах электроуправления

№ опыта	Модулятор	Схемы управления	U_{lf}, U_0 , В	τ_{on} , мс	U_{hf} , В	τ_{off} , с
1	S-1	1)	32	150	0	2,5
2	S-1	2)	32	150	36	1
3	S-1	3)	30	15	15	0,6
4	S-2	1)	32	90	0	2,5
5	S-2	2)	32	90	36	0,25
6	S-2	2)	27	250	45	0,1
7	S-2	3)	45	6	33	0,6

30 кГц, амплитудой напряжения U_{hf} (hf – high frequency) и длительностью τ_{hf} :

3) – для подъема пропускания подавали прямоугольный импульс постоянного тока с напряжением U_0 и длительностью τ_0 , а для спада пропускания к модулятору прикладывали пакет ВЧ-синусоидальных колебаний, как в схеме 2).

Времена подъема τ_{on} и спада τ_{off} пропускания определяли из осциллограмм по уровням 0,1–0,9 максимальной интенсивности света, пошедшего через модулятор. Амплитуды управляющих напряжений и их длительность были подобраны таким образом, чтобы время возвращения молекул в исходное состояние τ_{off} совпадало с длительностью действия ВЧ-поля, т. е. в схемах управления 2) и 3) $\tau_{hf} = \tau_{off}$. Как видно из табл. 2, использование схемы (2) позволило снизить τ_{off} в 4 и 10 раз (опыты № 2 и № 5) по сравнению с временем естественной упругой релаксации (№ 1 и № 4). Приложение прямоугольного импульса напряжения для подъема пропускания приводит к уменьшению времени τ_{on} в 10 раз (опыты № 2 и № 3). Следует отметить, что при этом в модуляторе S-1 понижается и время τ_{off} , в то время как для модулятора S-2 оно увеличивается. Это может быть связано с разными условиями на межфазной границе с ЖК. Повышение напряжения U_0 до 45 В позволило снизить время τ_{on} до 6 мс (№ 7, табл. 2).

На рис. 2 приведены зависимости времени спада оптического пропускания для модуляторов S-1 и S-2 на длине волны 632 нм от квадрата эффективного напряжения приложенного ВЧ-поля с частотой

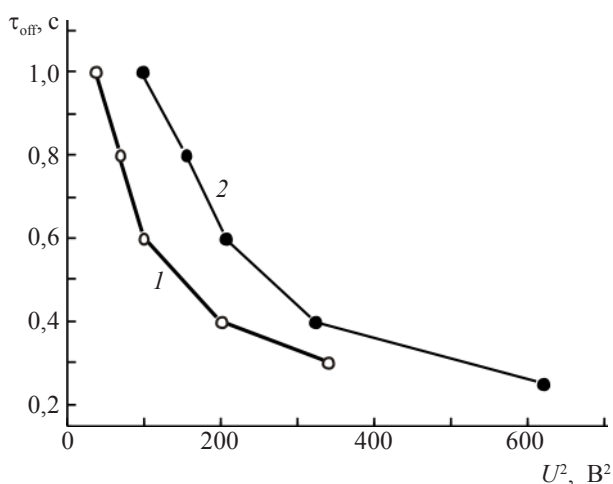


Рис. 2. Зависимости времени спада оптического пропускания на длине волны 632 нм от квадрата эффективного напряжения, приложенного к модуляторам S-1 (1) и S-2 (2) с частотой 30 кГц, при $U_{lf} = 32$ В и условии $\tau_{off} = \tau_{hf}$

30 кГц, при $U_{lf} = 32$ В и условии $\tau_{off} = \tau_{hf}$, т. е. поле действует до момента восстановления начального пропускания. Полученные зависимости свидетельствуют о возможности управления релаксационным процессом в ДЧНЖК путем увеличения амплитуды напряжения ВЧ-поля, в соответствии с формулой (1). Для управления спадом пропускания в модуляторе S-1 (кривая 1) требуются более низкие напряжения по сравнению с модулятором S-2 (кривая 2). Причиной этого при одинаковой толщине слоя ЖК (табл. 1) может быть более слабое сцепление в результате анизотропно-упругого взаимодействия ЖК на межфазной границе с ориентирующим слоем GeO, о чем свидетельствует более низкий порог U_{th} для модулятора S-1 (табл. 1).

Наблюдаемые различия динамики спада пропускания в модуляторах S-1 и S-2 могут быть вызваны генерацией остаточного напряжения при приложении постоянного электрического поля к слою НЖК в результате процессов адсорбции и десорбции ионных зарядов на межфазной границе [9]. Электрический потенциал адсорбированных ионных зарядов зависит не только от свойств НЖК, но и от электрических свойств ориентирующей поверхности. Можно ожидать, что в модуляторе S-2 индуцируемый потенциал будет выше из-за более высокого удельного сопротивления слоя а-С:Н на границе раздела с ДЧНЖК.

На рис. 3 приведена осциллограмма электрооптического отклика ДЧНЖК на длине волны 1,55 мкм, полученная для модулятора S-2 с толщиной слоя ЖК 13 мкм, при использовании схемы уп-

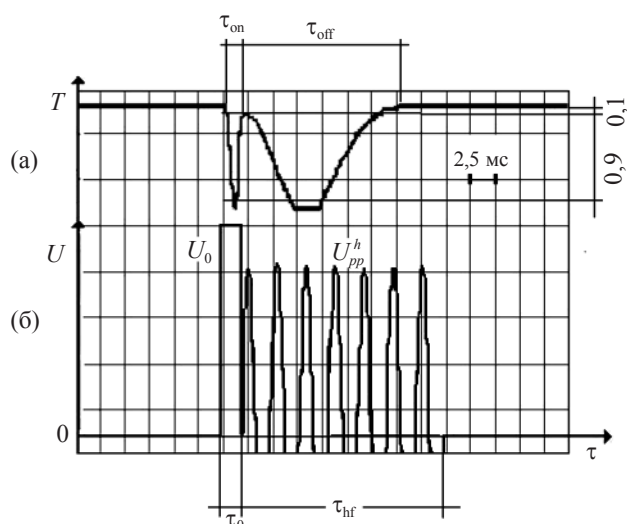


Рис. 3. Осциллограмма электрооптического отклика T модулятора S-2 при фазовой задержке 2π на длине волны 1,55 мкм (а), полученная при изменении управляющих напряжений (б). $U_0 = 45$ В и $U_{hf} = 70$ В. Толщина слоя ДЧНЖК 13,3 мкм.

равления 3). При приложении прямоугольного импульса напряжения постоянного тока с амплитудой 45 В время подъема пропускания с фазовой задержкой 2π составляло 2 мс. Время спада пропускания в результате релаксации ЖК при подаче ВЧ-напряжения с амплитудой 70 В составило 17 мс. Максимально возможная фазовая задержка в таком модуляторе может достигать 8π (табл. 1). Время $\tau_{\text{off}} = 18$ мс было получено в гибридно-ориентированной ячейке с толщиной ДЧНЖК слоя в два раза меньше (8,5 мкм) с фазовой задержкой, равной π на длине волны 1,55 мкм [10].

Результаты исследований свидетельствуют о том, что динамика процесса релаксации при двухчастотном эффекте представляет собой сложный процесс, на который влияют как внешние факторы (граничные условия, параметры управляющих электрических полей), так и сложные электрофизические процессы, происходящие в слое ЖК. Сравнение разных методов управления двухчастотным эффектом в фазовых модуляторах на длине волны 633 нм показало эффективность управления подъемом пропускания при *SB*-деформации ДЧНЖК путем приложения прямоугольного импульса напряжения постоянного тока.

Динамические характеристики амплитудных ДЧНЖК-модуляторов, работающих на твист-эффекте

Использование электрооптического твист-эффекта в устройствах с ДЧНЖК позволяет существенно повысить их быстродействие [4]. Одним из факторов, оказывающих влияние на динамику электрооптического отклика ЖК, является начальный угол наклона директора, который зависит от условий взаимодействия ЖК с ориентирующей поверхностью. Увеличение угла наклона и уменьшение энергии сцепления ЖК с поверхностью способствуют ускорению процесса переориентации диполей молекул при твист-деформации нематика.

Чтобы сравнить динамические характеристики модуляторов с разными начальными углами наклона директора, были использованы ориентирующие слои GeO, обеспечивающие большой угол наклона, и комбинация GeO со слоем а-С:Н, понижающая его. Направления ориентации директора молекул на противоположных поверхностях, ограничивающих слой ЖК в модуляторах, работающих на твист-эффекте, были ортогональными. Для получения максимального контраста на длине волны 1,55 мкм минимальная толщина слоя ДЧНЖК, используемого в этой работе, должна быть более 6,3 мкм [11].

Управление твист-эффектом в ДЧНЖК осуществлялось с помощью методики, основанной на

приложении к ЖК-ячейкам постоянного и переменных НЧ- и ВЧ-электрических полей в определенной последовательности [11]. На рис. 4а показана осциллограмма электрооптического отклика ДЧНЖК модулятора, работающего на твист-эффекте, полученная в оптимальном режиме управления. Изменение амплитуды и длительности управляющих напряжений, приложенных к модулятору, показаны на рис. 4б. Для переключения из исходного состояния “off”, когда $U = 0$, в состояние “on” на модулятор подавали прямоугольный импульс напряжения U_0 постоянного тока длительностью τ_0 . Пропускание ЖК-ячейки при этом падало, как видно на рис. 4а. Затем для поддержания пропускания ЖК-ячейки в состоянии “on” подавался пакет синусоидальных НЧ-колебаний с частотой 1 кГц, амплитудой U_{lf} и длительностью τ_{lf} . Переключение ЖК-ячейки из состояния “on” в исходное состояние “off” осуществляли путем подачи пакета синусоидальных ВЧ-колебаний с частотой 30 кГц, амплитудой U_{hf} и длительностью τ_{hf} . В результате этого пропускание ЖК-ячейки T возвращалось к первоначальному значению (рис. 4а). Определение времен τ_{on} и τ_{off} переключения пропускания при твист-эффекте показано на рис. 4а. Амплитуды и длительности управляющих напряжений для каждой из исследованных ЖК-ячеек подбирали экспериментально с целью получения минимальных времен переключения.

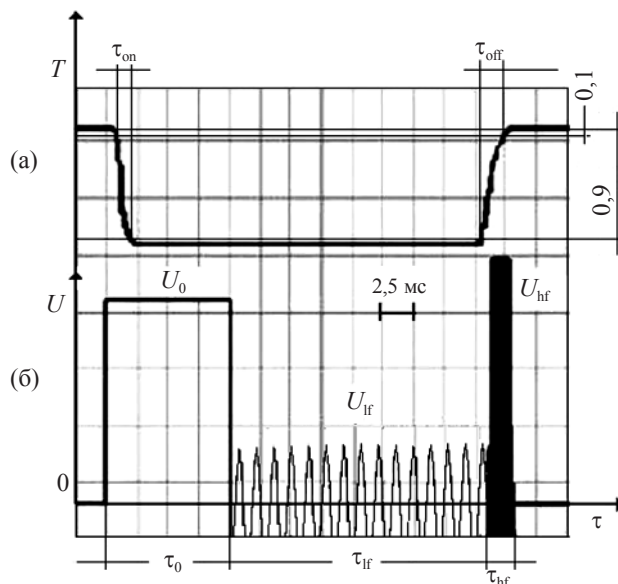


Рис. 4. Осциллограмма электрооптического отклика ЖК-модулятора Т-2, работающего на твист-эффекте на длине волны 1,55 мкм (а), и изменение при этом управляющих напряжений (б). $U_0 = 30$ В, $\tau_0 = 10$ мс, $U_{\text{lf}} = 10$ В, $\tau_{\text{lf}} = 20$ мс, $U_{\text{hf}} = 60$ В, $\tau_{\text{hf}} = 2,5$ мс.

Таблица 3. Динамические характеристики ДЧНЖК-модуляторов, работающих на твист-эффекте на длине волны 1,55 мкм, и параметры управляющих напряжений при постоянных значениях $U_0 = 30$ В, $\tau_0 = 10$ мс

№ модулятора	Ориентирующие поверхности		d , мкм	$U_{\text{лф}}$, В	$\tau_{\text{он}}$, мс	$U_{\text{лф}}$, В	$\tau_{\text{оф}}$, мс
	1-я подложка	1-я подложка					
T-1	GeO	GeO	6,2	15	2,5	15	25
T-1	GeO	GeO	6,2	15	2,5	20	20
T-2	GeO/a-C:H	GeO/a-C:H	6,93	10	3	20	10
T-3	GeO/a-C:H	GeO	7	20	1,5	24	20
T-3	GeO/a-C:H	GeO	7	20	1,5	45	5

Времена включения модуляторов были в интервале 1,5–3 мс на длине волны 1,55 мкм при $U_0 = 30$ В, $\tau_0 = 10$ мс (см. табл. 3). Влияние граничных условий, обусловленных свойствами ориентирующей поверхности, требует приложения к модуляторам НЧ- и ВЧ-полей с разной амплитудой, что иллюстрируют данные табл. 3. В модуляторе Т-3 с асимметричными граничными условиями были получены наименьшие времена $\tau_{\text{он}}$ и $\tau_{\text{оф}}$.

На рис. 5 приведены экспериментальные зависимости времени $\tau_{\text{он}}$ от амплитуды приложенного прямоугольного импульса напряжения постоянно-

го тока U_0 при постоянной длительности $\tau_0 = 10$ мс, полученные для модулятора Т-3. Кривая 1 соответствует значениям $\tau_{\text{он}}$ для $\lambda = 0,65$ мкм, а кривая 2 – $\lambda = 1,55$ мкм. Переориентация диполей молекул ЖК при твист-эффекте из исходного состояния “off” с углом наклона директора θ_p в вертикальное положение “on” происходит в пять раз быстрее. При увеличении амплитуды U_0 в интервале от 10 до 50 В время $\tau_{\text{он}}$ изменяется от 1,5 до 0,3 мс. Микросекундный диапазон работы ЖК-модулятора может быть осуществлен при фазовой задержке на длине волны 1,55 мкм около π [11].

Пути оптимизации работы оптических модуляторов на основе двухчастотного нематического ЖК

Фазовая задержка в оптических ЖК-модуляторах для телекоммуникационных систем должна быть, по крайней мере, равна π . При разработке модуляторов следует помнить, что два параметра – максимальная фазовая задержка $\Delta\Phi_{\text{max}}$ и скорости переключения $1/\tau_{\text{он}}$ и $1/\tau_{\text{оф}}$, зависят от толщины ЖК-слоя. В соответствии с формулой (1), чем меньше толщина слоя ДЧНЖК, тем выше скорость переключения, так как $\tau_{\text{он}}$ и $\tau_{\text{оф}}$ прямо пропорциональны квадрату толщины ЖК-слоя, в то время как максимальная фазовая задержка пропорциональна толщине согласно соотношению

$$\Delta\Phi_{\text{max}} = 2\pi d \Delta n / \lambda. \quad (2)$$

Минимальная толщина слоя ЖК определяется условием Могена и должна соответствовать $d_{\text{min}} = \lambda / \Delta n$. Двулучепреломление НЖК зависит от длины волны и при переходе в ближнюю ИК-область оптическая анизотропия может снижаться на 15–20% по сравнению с Δn для видимой области спектра [12]. По нашим оценкам, для ДЧНЖК, используемого в этой работе, в интервале длин волн 0,86–1,55 мкм $\Delta n = 0,22$. Тогда толщина слоя

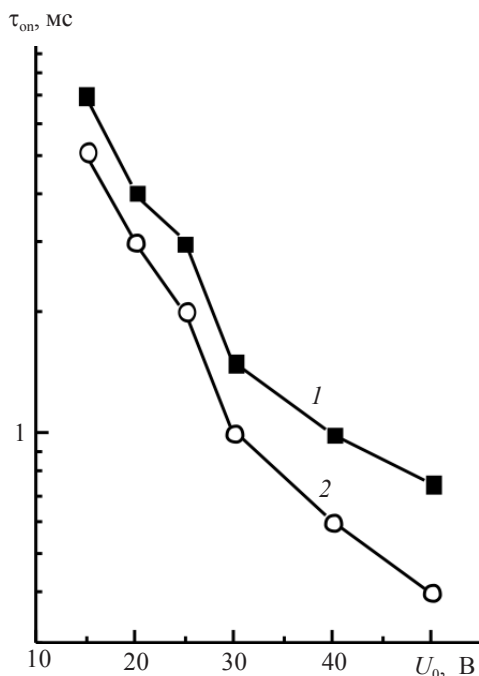


Рис. 5. Экспериментальные зависимости $\tau_{\text{он}}$ от U_0 , полученные для ЖК-модулятора Т-3, работающего на твист-эффекте на длинах волн 0,65 (а) и 1,55 мкм (б). Толщина слоя ДЧНЖК 7 мкм.

ДЧНЖК в фазовом модуляторе должна быть не менее 7 мкм. Если пренебречь межфазным взаимодействием и не учитывать пороговое напряжение, для ДЧНЖК с $\gamma_1 = 0,377 \text{ Н с/м}^2$ и $\Delta\epsilon = 4,43$, по оценочным расчетам в соответствии с формулой (1) при подаче на ячейку толщиной 7 мкм напряжения 30 В $\tau_{\text{он}} \approx 7 \text{ мс}$. Так как время $\tau_{\text{он}}$ обратно пропорционально квадрату напряжения, то уменьшить время до 1 мс можно, если увеличить U более, чем в два раза. Для ДЧНЖК время $\tau_{\text{офф}}$ можно уменьшать так же, как $\tau_{\text{он}}$ – путем повышения амплитуды ВЧ-напряжения, приложенного к модулятору. Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что $\tau_{\text{офф}}$ как правило, выше $\tau_{\text{он}}$. Это может быть вызвано электрогидродинамикой процесса переориентации компонентов смеси с разной диэлектрической анизотропией, характерной для ДЧНЖК.

Оптимизация схемы управления двухчастотным эффектом путем включения специальных коротких импульсов высокой амплитуды обеих управляющих частот для быстрой переориентации директора позволила авторам работы [13] экспериментально получить время переключения до 0,5 мс при амплитуде 100 В. Подача коротких импульсов напряжения с высокой амплитудой инициирует быструю переориентацию директора в НЧ- и ВЧ-полях, но может приводить к электрическому пробоему ЖК-модулятора. В то же время высокие амплитуды приложенного напряжения могут вызывать избыточное вращение молекул при увеличении угла наклона директора ЖК. Путем введения промежуточного периода между действием НЧ- и ВЧ-полей порядка 10 мкс, во время которого никакого напряжения к ЖК не прикладывается, избыточное вращение может быть аннулировано [14]. Повышение амплитуды управляющих напряжений для улучшения быстродействия оптических ЖК-модуляторов нежелательно при использовании их в телекоммуникационных системах, так как это может приводить к повышению температуры ЖК и изменению его параметров, а также повышению энергопотребления.

Амплитуды напряжений, управляющих ДЧНЖК, могут быть снижены при использовании гибридной ориентации, когда на одной подложке ЖК ориентируют параллельно, а на другой – вертикально относительно плоскости. В модуляторах с такой ориентацией ЖК практически отсутствует порог электрооптического эффекта. К недостаткам, ограничивающим применение гибридной ориентации, относится снижение фазовой задержки, которая соответствует только половине величины $\Delta\Phi$ при гомогенной или гомеотропной ориентации ЖК. Сужение интервала изменения фазы у модуляторов с

гибридной ориентацией ограничивает их применение, особенно в ИК области.

Заключение

В результате исследований оптических модуляторов на основе двухчастотного нематического ЖК с инверсией знака анизотропии диэлектрической проницаемости были оптимизированы методики электроуправления фазовой и амплитудной модуляцией оптического сигнала. Показано, что использование для подъема пропускания прямоугольного импульса напряжения постоянного тока способствует повышению быстродействия модуляторов по сравнению с питанием НЧ-напряжением с частотой 1 кГц. Экспериментально исследованы динамические характеристики оптических ЖК-модуляторов и влияние на них внешних факторов: параметров электрического поля и граничных условий межфазного взаимодействия между ЖК и ориентирующей поверхностью. Оптимизация амплитуд и длительностей действия управляющих напряжений и начального угла наклона директора молекул являются дополнительным резервом для улучшения динамических характеристик оптических модуляторов на основе ДЧНЖК. Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о возможности снижения времени релаксации до единиц миллисекунд при использовании двухчастотного ЖК. Для повышения быстродействия устройств на основе ДЧНЖК для телекоммуникационных систем необходимо проведение дальнейших исследований как особенностей работы оптических модуляторов в ближней ИК области спектра, так и электрофизических процессов, сопровождающих переориентацию диполей молекул.

Работа была выполнена при финансовой поддержке ведущей научной школы РФ НШ-5549.2006.9.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mao C., Xu M., Feng W., Hyang T., Wu K., Lia J. Liquid crystal applications in optical telecommunication // Proc. SPIE. 2003. V. 5003. P. 121–129.
2. Кошкина 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.
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. 4394–497.
4. Hyang Y., Wen C.-H., Wu S.-T. Polarization-independent and submillisecond response phase modulators using a 90°

- twisted dual-frequency liquid crystal // *Appl. Phys. Lett.* 2006. V. 89 (2). P. 021103–3.
5. 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.
6. Коншина Е.А., Федоров М.А., Амосова Л.П. Определение угла наклона и фазовой задержки жидкокристаллических ячеек оптическими методами // *Оптический журнал*. 2006. Т. 73. № 12. С. 9–13.
7. Коншина Е.А., Костомаров Д.С. Фазовая модуляция света в двухчастотном нематическом жидком кристалле // *Оптический журнал*. 2007. № 10. С. 88–90.
8. Коншина Е.А., Федоров М.А., Амосова Л.П., Исаев М.В., Костомаров Д.С. Динамика спада оптического пропускания в ячейках с двухчастотным нематическим жидким кристаллом // *Письма ЖТФ*. 2008. Т. 34. В. 9. С. 87–94.
9. Mizusaki M., Miyashita T., Uchida T., Yamada Y., Ishii Y., Mizushima S. Generation mechanism of residual direct current voltage in a liquid crystal display and its evaluation parameters related to liquid crystal and alignment layer materials // *J. Appl. Phys.* 2007. V. 102. P. 014904-1-6.
10. 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.
11. Коншина Е.А., Федоров М.А., Рыбникова А.Е. Амосова Л.П., Иванова Н.Л., Исаев М.В., Костомаров Д.С. Динамика твист-эффекта в двухчастотном нематическом жидком кристалле // *ЖТФ*. 2008. (в печати).
12. Riza N.A., Khan S.A. Liquid-crystal-deflector based variable fiber-optic attenuator // *Appl. Opt.* 2004. V. 43. № 17. P. 3449–3455.
13. Golovin A.B., Shiyanovskii S.V., Lavrentovich O.D. Fast switching dual-frequency liquid crystal optical retarder, driven by an amplitude and frequency modulated voltage // *Appl. Phys. Lett.* 2003. V. 83. No 19. P. 3864-6.
14. Brimicombe P.D., Parry-Jones L.A., Elston S.J., Raynes E.P. Modeling of dual frequency liquid crystal materials and devices // *J. Appl. Phys.* 2005. V. 98. P. 104104 1-6.
-