

05;07;12

## Особенности процесса электроуправляемой релаксации при твист-деформации двухчастотного нематического жидкого кристалла

© В.Н. Васильев, Е.А. Коншина, М.А. Федоров, Л.П. Амосова

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

(Поступило в Редакцию 11 декабря 2008 г.)

Исследован процесс релаксации двухчастотного жидкого кристалла (ЖК) при твист-эффекте и влияние на него параметров внешних электрических полей в случае большого начального угла наклона директора  $44^\circ$ . Обнаружено, что время релаксации под действием высокочастотного электрического поля существенно увеличивает осцилляция, возникающая на заднем фронте электрооптического отклика модулятора. Установлено, что с уменьшением толщины слоя ЖК усиливается влияние электрического поля на время релаксации. Экспериментально показано влияние длительности промежуточного периода между моментами снятия низкочастотного напряжения и приложения к модулятору высокочастотного напряжения на время релаксации.

### Введение

Сочетание двухчастотной адресации с твист-деформацией нематического жидкого кристалла (ЖК) позволяет существенно улучшить время отклика и достичь микросекундного диапазона работы устройства [1]. При изменении амплитуды прямоугольного импульса напряжения постоянного тока от 15 до 50 В длительностью 10 ms и толщине слоя жидкого кристалла около  $7\ \mu\text{m}$  было получено время отклика в интервале от 1.5 до 0.3 ms [2]. Однако сложные процессы, происходящие в деформированном двухчастотном (dual frequency — DF) ЖК при возвращении молекул в исходное состояние, не позволили получить время релаксации менее 3 ms [3]. Ускорению процесса переориентации молекул нематика способствует как увеличение начального угла наклона директора, так и уменьшение энергии сцепления ЖК с поверхностью [4–6].

Основной задачей настоящей работы является исследование процесса релаксации двухчастотного ЖК при твист-эффекте и влияния на него параметров внешних электрических полей, прикладываемых к оптическому модулятору для управления пропусканием ИК-излучения, в случае слабого межфазного взаимодействия на границе раздела фаз ЖК с ориентирующей поверхностью и большого начального угла наклона директора.

### 1. Экспериментальная часть

Для исследований были изготовлены два электроуправляемых оптических модулятора, заполненные DF ЖК марки ЖК-1001 (НИОПик), с толщиной слоев 6.2 (Т-1) и  $12.2\ \mu\text{m}$  (Т-2). Для ориентации ЖК использовали слои на основе монооксида германия, полученные напылением в вакууме. Благодаря слабому

межфазному взаимодействию и особенностям структуры поверхности эти слои обеспечивали высокий начальный угол наклона директора около  $44^\circ$ . Для реализации твист-эффекта направления ориентации директора молекул на ограничивающих ЖК поверхностях были ортогональными.

Особенности релаксации при твист-эффекте исследовались с помощью осциллограмм электрооптического отклика DF ЖК, полученных на длинах волн 0.86 и  $1.55\ \mu\text{m}$  с помощью оптической схемы, описанной в [2,3]. Модулятор устанавливали между поляризатором и скрещенным с ним анализатором в положении, соответствующем максимуму пропускания в исходном состоянии „off“ при  $U = 0$ .

Методика управления оптическим пропусканием при твист-эффекте в DF ЖК состояла в приложении к электродам короткого прямоугольного импульса напряжения  $U_0 = 30\ \text{V}$  постоянного тока длительностью  $\tau_0 = 10\ \text{ms}$  для перевода оптического модулятора из состояния „off“ в состояние „on“. Для поддержания оптического пропускания в состоянии „on“ на модулятор подавали пакет синусоидальных низкочастотных (НЧ) колебаний с частотой 1 kHz, амплитудой  $U_{lf}$  и длительностью  $\tau_{lf}$ . Затем для возвращения молекул ЖК в исходное состояние „off“ на модулятор подавали пакет синусоидальных высокочастотных (ВЧ) колебаний с частотой 30 kHz, амплитудой  $U_{hf}$  и длительностью  $\tau_{hf}$ .

Были исследованы осциллограммы ЖК-модуляторов, полученные при вариации параметров ВЧ электрического поля, управляющего процессом релаксации ЖК, и НЧ-поля, поддерживающего оптическое пропускание модулятора в состоянии „on“, а также влияние введения дополнительного периода в режиме управления оптическим пропусканием, когда к модулятору не прикладывается напряжение, для преодоления свёртывания молекул, возникающего в результате деформации ЖК.

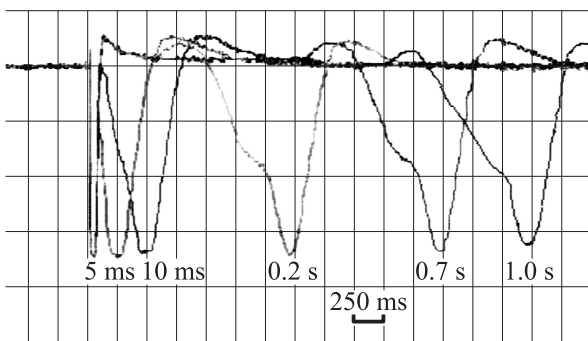
## 2. Результаты и их обсуждение

### 2.1. Влияние параметров ВЧ электрического поля на релаксацию ЖК

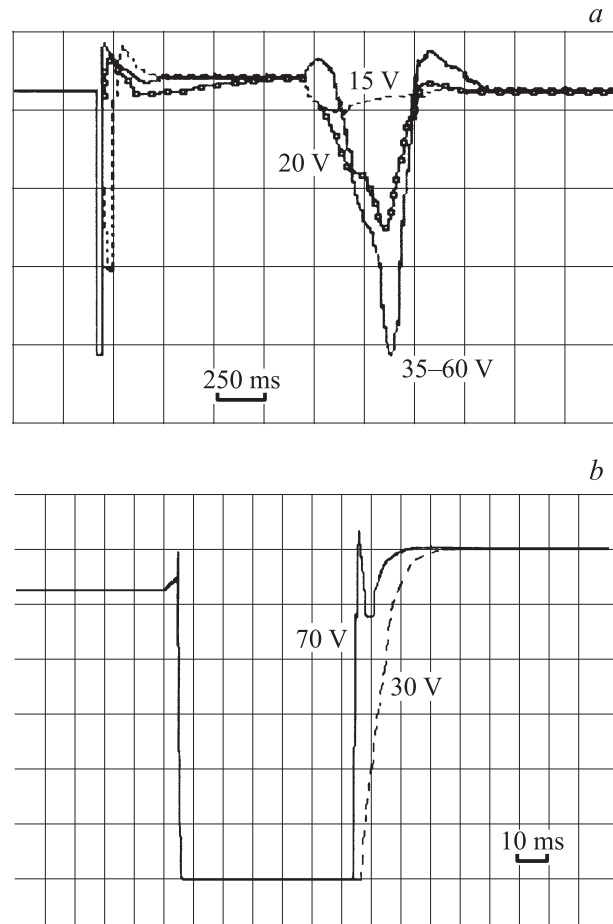
Изучение осциллограмм, полученных для модулятора Т-1 на длине волны  $0.86 \mu\text{m}$ , показали, что по окончании действия пакета синусоидальных ВЧ-колебаний на заднем фронте электрооптического отклика, характерного для твист-эффекта, сразу же возникала осцилляция, амплитуда которой соответствовала 100% от максимального пропускания излучения.

Как видно из рис. 1, с увеличением длительности действия ВЧ-поля  $\tau_{hf}$  от 5 ms до 1 s при постоянной амплитуде  $U_{hf} = 35 \text{ V}$  наблюдалось смещение максимума осцилляции вправо с одновременным увеличением ее полуширины. Подобный эффект наблюдался при постоянной длительности действия ВЧ-поля ( $\tau_{hf} = 20 \text{ ms}$ ) и увеличении амплитуды напряжения от 15 до 75 V. С увеличением длительности  $\tau_{hf}$  в 50 раз до 1 s, положение максимума не изменялось в интервале напряжений 20–75 V, а амплитуда модуляции достигала наибольшей величины при 35 V и далее не изменялась, как видно из рис. 2, а.

Эти результаты свидетельствуют о том, что амплитуда напряжения и длительность действия ВЧ-поля, прикладываемого к модулятору для принудительного возвращения молекул ЖК из состояния „on“ в исходное состояние „off“, влияют на появление осцилляции на заднем фронте осциллограммы. DF ЖК отличается от других нематических ЖК тем, что представляет собой смесь молекул ЖК с положительной и отрицательной диэлектрической анизотропией. Изменение диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{\parallel}$ , параллельной длинной оси молекул, в DF ЖК происходит при более низких частотах, чем изменение диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{\perp}$ , перпендикулярной длинной оси молекул. Изменение знака диэлектрической анизотропии  $\Delta\epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$  с положительного на отрицательный наблюдается при переходе через критическую частоту, характерную для данной



**Рис. 1.** Смещение дополнительной осцилляции на заднем фронте электрооптического отклика ЖК-модулятора Т-1 на длине волны  $0.86 \mu\text{m}$  в зависимости от длительности действия ВЧ-поля  $\tau_{hf}$  при постоянном  $U_{hf} = 35 \text{ V}$  ( $U_{lf} = 10 \text{ V}$ ,  $\tau_{lf} = 50 \text{ ms}$ ).

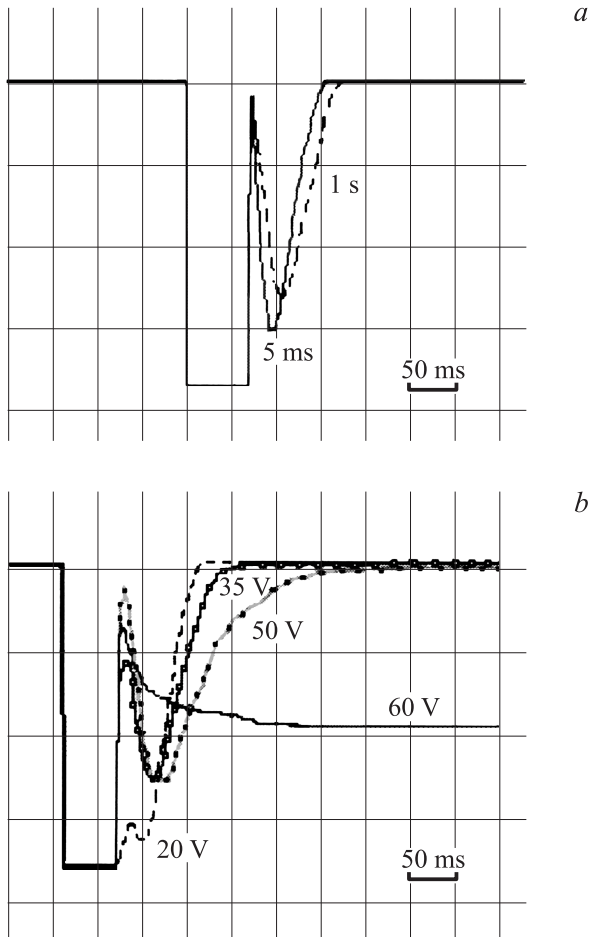


**Рис. 2.** Осциллограммы электрооптического отклика на длине волны  $0.86 \mu\text{m}$  при  $\tau_{hf} = 1 \text{ s}$  и вариации  $U_{hf}$  для модуляторов с разной толщиной слоя ЖК: а — модулятор Т-1 с  $d = 6.2 \mu\text{m}$ , б — модулятор Т-2 с  $d = 12.2 \mu\text{m}$  ( $U_{lf} = 10 \text{ V}$  и  $\tau_{lf} = 50 \text{ ms}$ ).

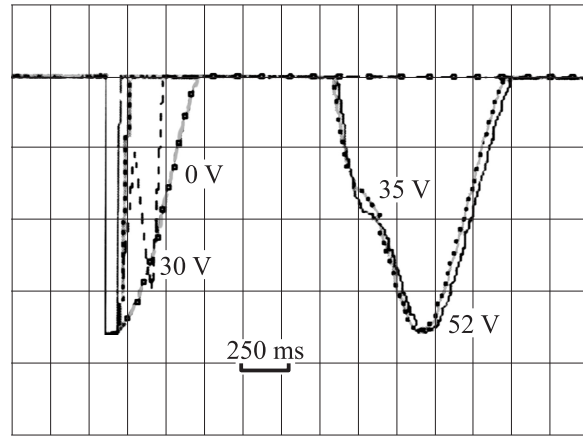
смеси DF ЖК. При подаче на модулятор напряжения с частотой колебаний ниже критической частоты, когда  $\Delta\epsilon > 0$ , молекулы DF ЖК ориентируются вдоль вектора электрического поля. При подаче напряжения с частотой колебаний выше этой частоты, когда  $\Delta\epsilon < 0$ , молекулы DF ЖК ориентируются перпендикулярно направлению поля. Диполи молекул с  $\Delta\epsilon < 0$ , содержащиеся в смеси ЖК, должны быстро реагировать на приложенное ВЧ напряжение, в то время диполи молекул с  $\Delta\epsilon > 0$  не реагируют на него. Из состояния „on“ с большим начальным углом наклона они возвращаются в состояние „off“ под действием сил межмолекулярного взаимодействия, действующих в объеме ЖК. Скорость переориентации молекул с  $\Delta\epsilon > 0$  из состояния „on“ в „off“ зависит также от электрогидродинамических процессов в ЖК. Поэтому можно предположить, что возникновение дополнительной осцилляции на заднем фронте осциллограммы связано с процессом естественной упругой релаксации молекул ЖК с  $\Delta\epsilon > 0$ , который должен проходить медленнее, чем релаксация молекул с  $\Delta\epsilon < 0$  под действием ВЧ электрического поля.

В модуляторе Т-2 с такими же граничными условиями и толщиной слоя ЖК в два раза больше, чем в модуляторе Т-1, слабая осцилляция на заднем фронте осциллограммы наблюдалась только при напряжении 70 В, как видно на рис. 2, *b*. Из этого можно заключить, что с уменьшением толщины слоя ЖК влияние процессов, происходящих в электрическом поле на межфазной границе, на релаксацию молекул ЖК в объеме усиливается.

Было обнаружено, что на осциллограммах модулятора Т-1, полученных на длине волны  $1.55 \mu\text{m}$ , дополнительная осцилляция на заднем фронте отклика наблюдалась во время действия ВЧ электрического поля (рис. 3, *a*), а не после снятия напряжения (рис. 1). Причем амплитуда осцилляции была меньше, чем на осциллограммах на длине волны  $0.86 \mu\text{m}$ , и составляла около 80% от максимального пропускания. Длительность действия ВЧ-поля слабо влияла на положение максимума осцилляции (рис. 3, *a*) и вызывала лишь незначительное уменьшение его интенсивности. Более существенное влияние на интенсивность осцилляции оказывала амплитуда ВЧ-напряжения. Слабая осцилляция на заднем фронте ос-



**Рис. 3.** Осциллограммы электрооптического отклика ЖК-модулятора Т-1 на длине волны  $1.55 \mu\text{m}$  в зависимости от параметров ВЧ-поля: *a* — длительность действия при  $U_{hf} = 60 \text{ V}$  ( $\tau_{lf} = 60 \text{ ms}$ ,  $U_{lf} = 10 \text{ V}$ ); *b* — амплитуда напряжения при  $\tau_{lf} = 50 \text{ ms}$  при  $U_{hf} = 60 \text{ V}$  и  $\tau_{lf} = 50 \text{ ms}$ ,  $\tau_{hf} = 1 \text{ s}$ .



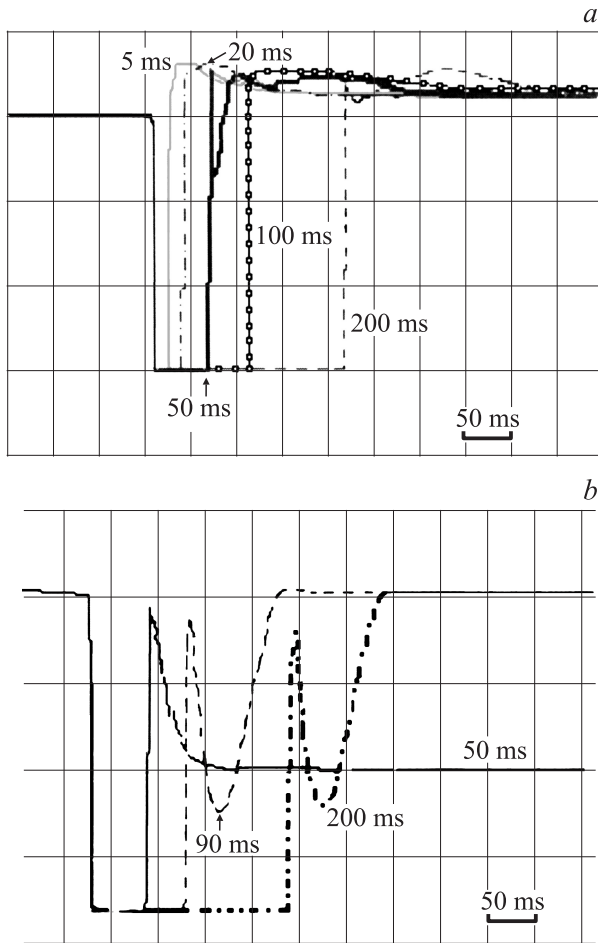
**Рис. 4.** Осциллограммы электрооптического отклика модулятора Т-2 с толщиной слоя ЖК  $12.2 \mu\text{m}$  в зависимости от амплитуды напряжения ВЧ-поля при  $\tau_{hf} = 1 \text{ s}$  ( $U_{lf} = 10 \text{ V}$ ,  $\tau_{lf} = 50 \text{ ms}$ ).

циллограммы возникала при  $U_{hf} = 20 \text{ V}$  (рис. 3, *b*), при напряжениях более 30 В увеличивалось время релаксации. Если повышение  $U_{hf}$  до 60 В позволило избавиться от осцилляции на заднем фронте осциллограммы на длине волны  $0.86 \mu\text{m}$ , то на длине волны  $1.55 \mu\text{m}$  это не дало положительного эффекта. Особенности, наблюдаемые на осциллограммах, могут быть связаны с тем, что для модулятора Т-1 фазовая задержка на  $\lambda = 0.86 \mu\text{m}$  составляла  $2\pi$ , а для  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  только  $\pi$ .

В модуляторе Т-2 с более толстым слоем ЖК при действии пакета ВЧ-колебаний с  $U_{hf} = 30 \text{ V}$  в течение 1 с возникает осцилляция на заднем фронте. При дальнейшем увеличении напряжения  $U_{hf}$  процесс перехода из состояния „on“ в состояние „off“, ускоряется, однако затем по окончании действия пакета ВЧ возникает дополнительная осцилляция, по амплитуде и длительности (более 1 с) превосходящая первоначальный отклик (рис. 4). Повышение амплитуды напряжений ВЧ-поля приводит к увеличению времени релаксации в результате появления на заднем фронте осциллограммы дополнительной осцилляции.

## 2.2. Влияние на релаксацию действия НЧ электрического поля, поддерживающего оптическое пропускание в модуляторе

Большой начальный угол наклона директора ЖК может приводить к неоднородному повороту директора ЖК при твист-эффекте. На рис. 5, *a* приведены осциллограммы, полученные для модулятора Т-1 при  $U_{hf} = 60 \text{ V}$ ,  $\tau_{hf} = 1 \text{ s}$  и разных длительностях действия НЧ-поля, поддерживающего оптическое пропускание в состоянии „on“. Если  $\tau_{lf} < 100 \text{ ms}$ , НЧ-поле вызывает повышение пропускания модулятора при возвращении в состояние „off“ по сравнению с первоначальной величиной, как видно на рис. 5, *a*. Причиной этого может быть поворот директора молекул ЖК на углы более  $\pi/2$ . При



**Рис. 5.** Осциллограммы электрооптического отклика ЖК-модулятора T-1 при вариации длительности действия НЧ-поля, поддерживающего максимальный уровень пропускания при твист-эффекте. *a* — для  $\lambda = 0.86 \mu\text{m}$ ; *b* — для  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  при  $U_0 = 30 \text{ V}$  и  $\tau_0 = 10 \text{ ms}$  и  $U_f = 10 \text{ V}$ ,  $U_{hf} = 60 \text{ V}$ ,  $\tau_{hf} = 1 \text{ s}$ .

$\tau_{if} = 100 \text{ ms}$  пропускание приближается к первоначальному уровню, а далее с увеличением  $\tau_{if}$  возникают дополнительные слабовыраженные осцилляции при переключении в состояние „off“. Аналогичные изменения пропускания наблюдались при вариации длительности действия пакета НЧ-колебаний в модуляторе T-2 на длине волны  $0.86 \mu\text{m}$ .

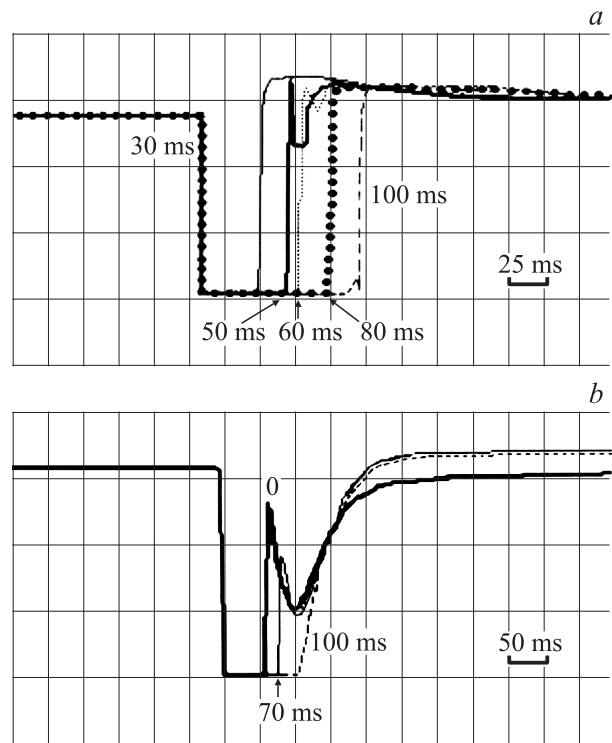
Осциллограммы на рис. 5, *b* иллюстрируют влияние длительности действия НЧ-поля для поддержки пропускания в модуляторе T-1 на длине волны  $1.55 \mu\text{m}$ . При  $\tau_{if} = 50 \text{ ms}$  интенсивность пропускания падает, и процесс релаксации происходит очень медленно. При  $\tau_{if} \geq 50 \text{ ms}$  пропускание соответствует исходному уровню, однако на заднем фронте осциллограммы наблюдается появление дополнительной осцилляции, амплитуда которой остается без изменения. С увеличением толщины слоя ЖК в модуляторе T-2 длительность действия НЧ-поля не влияет на характер осциллограмм. Полученные результаты свидетельствуют о том, что уменьшение толщины слоя ЖК приводит к усилению влияния НЧ

электрического поля, так же как и в случае действия ВЧ-поля.

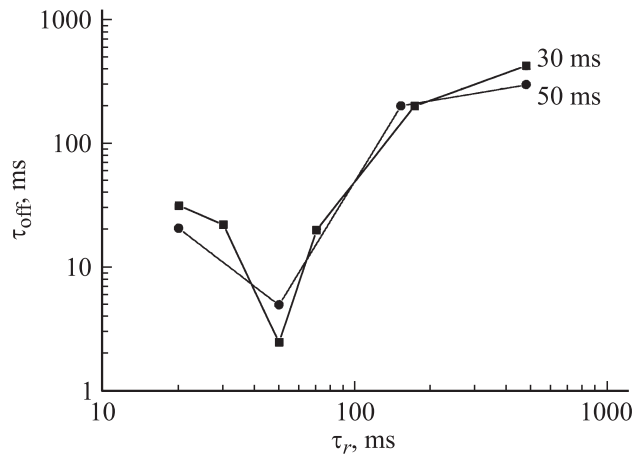
### 2.3. Введение дополнительного периода в режим управления оптическим пропусканием модулятора

Приложение к слою DF ЖК напряжения для переключения устройства из состояния „off“ в „on“ может вызывать сверхвращение молекул, т.е. поворот директора в электрических полях на углы более  $\pi/2$ . Введение промежуточного периода между состояниями „on“ в „off“, во время которого внешнее электрическое поле не прикладывается к слою ЖК, позволяет аннулировать сверхвращение молекулярных диполей [7].

Осциллограммы электрооптического отклика при твист-эффекте в DF ЖК, полученные при введении дополнительного периода длительностью  $\tau_r$  (rest) между моментами выключения поддерживающего напряжение  $U_{if}$  и подачи ВЧ напряжения  $U_{hf}$ , приведены на рис. 6. Увеличение времени  $\tau_r$  для модулятора T-1 приводит к исчезновению осцилляции на заднем фронте осциллограммы для  $\lambda = 0.86 \mu\text{m}$  (рис. 6, *a*) и влияет на время  $\tau_{off}$ . На длине волны  $1.55 \mu\text{m}$  осцилляция на заднем фронте осциллограммы исчезает при  $\tau_r = 100 \text{ ms}$  (рис. 6, *b*), однако при этом значение  $\tau_{off}$  возрастает.



**Рис. 6.** Осциллограммы отклика при вариации времени между моментом выключения НЧ-напряжения поддержки и подачи ВЧ-напряжения на ЖК-модулятор T-1: *a* — для  $\lambda = 0.86 \mu\text{m}$  при  $\tau_{if} = 30 \text{ ms}$ ,  $U_{if} = 60 \text{ V}$ ; *b* — для  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  при  $\tau_{if} = 50 \text{ ms}$ ,  $U_{if} = 50 \text{ V}$ , ( $\tau_{hf} = 1 \text{ s}$ ).



**Рис. 7.** Зависимость времени релаксации  $\tau_{off}$  на длине волны  $0.86 \mu\text{m}$  от длительности паузы  $\tau_r$  между моментами приложения НЧ- и ВЧ-напряжений к ЖК-модулятору Т-1.

Зависимости времени  $\tau_{off}$  от  $\tau_r$  для модулятора Т-1 на длине волны  $0.86 \mu\text{m}$ , полученные при длительности действия поддерживающего напряжения 30 и 50 ms, приведены на рис. 7. Минимумы на кривых (рис. 7) свидетельствуют о существовании для данного модулятора оптимального времени  $\tau_r$ , при котором можно получить минимальное время  $\tau_{off}$ . Избавиться от осцилляции, возникающей на заднем фронте осциллограммы электрооптического отклика ЖК модулятора Т-1, и получить минимальное время  $\tau_{off} = 2.5 \text{ ms}$  удалось при  $\tau_r = 50 \text{ ms}$ . Дальнейшее увеличение времени  $\tau_r$  между состояниями „on“ и „off“ при твист-эффекте приводит к росту времени  $\tau_{off}$  в DF ЖК. Если  $\tau_r$  мало, то процесс вращения молекул мешает выключению. В такой схеме устройству разрешена упругая релаксация до тех пор, пока обратный поток завершается, и затем переключение обратно к состоянию с низким углом наклона происходит путем приложения пакета ВЧ синусоидальных колебаний. Когда значение  $\tau_r$  велико, устройство переключается подачей ВЧ-напряжения после установления равновесия профиля угла наклона, что приводит к замедлению процесса релаксации в состояние „off“ и увеличению времени релаксации  $\tau_{off}$ .

## Заключение

Исследования осциллограмм электрооптического отклика модуляторов с DF ЖК показали, что процессы, принудительной релаксации под действием ВЧ электрического поля, являются более сложными по сравнению с процессом естественной упругой релаксации. Экспериментально было установлено, что при управлении оптическим пропусканием модулятора с помощью внешних НЧ и ВЧ электрических полей на заднем фронте осциллограмм электрооптического отклика возможно появление дополнительной осцилляции во время приложения или после снятия напряжения, увеличиваю-

щей время релаксации. Причиной появления осцилляции могут быть как особенности DF ЖК, связанные с инверсией знака диэлектрической анизотропии, так и процессы, возникающие в слое ЖК и на межфазной границе под действием электрических полей, приложенных к модулятору. Уменьшение толщины слоя ЖК способствует усилению влияния на НЧ, так и ВЧ-полей на процесс релаксации.

Экспериментально было показано, что введение дополнительного периода в режим управления между моментами снятия НЧ-напряжения, поддерживающего пропускание, и подачей ВЧ-напряжения, возвращающего оптическое пропускание модулятора в исходное состояние, позволяет уменьшить время релаксации при твист-эффекте в DF ЖК.

Анализ влияния параметров НЧ и ВЧ электрических полей на процесс релаксации DF ЖК свидетельствует о том, что минимизировать время релаксации можно оптимизацией режимов управления оптическим пропусканием модуляторов. Проведенные исследования могут быть использованы при разработке активных быстродействующих компонентов на основе ЖК для телекоммуникационных систем.

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] Hyang Y., Wen C.-H., Wu S.-T. // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 89 (2). P. 021 103 (1–3).
- [2] Коншина Е.А., Федоров М.А., Амосова Л.П., Исаев М.В., Костомаров Д.С. // Оптич. журн. 2008. Т. 75. Вып. 10. С. 73–80.
- [3] Коншина Е.А., Рыбникова А.Е., Федоров М.А., Амосова Л.П., Иванова Н.Л., Исаев М.В., Костомаров Д.С. // ЖТФ. 2009. Т. 79. С. 111–116.
- [4] Wang H., Wu T.X., Xinyu Zhu X., Wu S.-T. // J. of Appl. Phys. 2004. Vol. 95. N 10. P. 5502–5507.
- [5] Kubono A., Kyukane Y., Akiyama R., Tanaka K. // J. of Appl. Phys. 2001. Vol. 90. N 12. P. 5859.
- [6] Golovin A.B., Shiyonovskii S.V., Lavrentovich O.D. // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 83. P. 3864–3866.
- [7] Brimicombe P.D., Parry-Jones L.A., Elston S.J., Raynes E.P. // J. of Appl. Phys. 2005. Vol. 98. P. 104 104 (1–6).