ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

УДК 532.783: 681.7.064.425

ФАЗОВАЯ МОДУЛЯЦИЯ СВЕТА В ДВУХЧАСТОТНОМ НЕМАТИЧЕСКОМ ЖИДКОМ КРИСТАЛЛЕ

© 2007 г. **Е. А. Коншина**, канд. техн. наук; **Д. С. Костомаров**

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

E-mail: eakonshina@mail.ru

Проведены оригинальные исследования фазовой модуляции света в смеси нематических жидких кристаллов (НЖК) с инверсией знака диэлектрической анизотропии ($\Delta\varepsilon$) в зависимости от частоты подаваемого синусоидального напряжения. Получены зависимости фазовой задержки от напряжения для ряда частот. Экспериментально определено пороговое напряжение *S*-эффекта и получены зависимости его от частоты, имеющие характерный максимум, соответствующий критической частоте, при которой меняется знак $\Delta\varepsilon$ НЖК-смеси. Показано, что в интервале частот 100–5000 Гц при $\Delta\varepsilon > 0$ фазовая задержка и пороговое напряжение не зависят от частоты подаваемого напряжения, но на них влияют условия анизотропно-упругого межфазного взаимодействия, связанные с ориентирующей поверхностью.

Коды OCIS: 160.3710, 230.3720.

Поступила в редакцию 08.06.2007.

Одним из реальных путей повышения быстродействия жидкокристаллических модуляторов света является уменьшение времени спада оптического пропускания за счет управления процессом релаксации электрическим полем. Для этих целей используют двухчастотный нематический жидкий кристалл (НЖК) с инверсией знака диэлектрической анизотропии. Применение двухчастотного НЖК в электрооптических устройствах позволяет контролировать динамику электрооптического отклика путем оптимизации режимов управления амплитудой и частотой напряжения электрического поля [1]. Актуальность изучения фазовых характеристик двухчастотного НЖК связана с прикладными исследованиями фазовых электроуправляемых модуляторов света для адаптивной оптики [2–4] и информационно-телекоммуникационных систем [5–6].

Отличительной особенностью двухчастотного НЖК является частотная зависимость диэлектрической анизотропии $\Delta\varepsilon(f) = \varepsilon_{\|}(f) - \varepsilon_{\perp}(f)$, где $\varepsilon_{\|}$ и $\varepsilon_{\perp}$ – диэлектрические проницаемости, соответствующие положению директора относительно вектора электрического поля. Диэлектрическая анизотропия двухчастотного НЖК простирается от положительных значений при низких частотах до отрицательных при высоких частотах. Существует критическая частота f_c, ниже которой область значений $\Delta\varepsilon > 0$, а при $f > f_c$ значения $\Delta\varepsilon < 0$. Управляющее напряжение, подаваемое на ЖК-модулятор, ориентирует директор параллельно вектору поля, когда $f < f_c$, и перпендикулярно ему, когда $f > f_c$.

Целью работы является изучение фазовой модуляции света в двухчастотном НЖК и влияния на фазовую задержку и порог *S*-эффекта Фредерикса частоты синусоидального напряжения, подаваемого на электроды электроуправляемого модулятора.

Экспериментальные исследования проводили на двух плоских ЖК-ячейках с симметричными граничными условиями, заполненных двухчастотным НЖК-1001 (НИОПИК). Известно, что у этой НЖК-смеси оптическая анизотропия $\Delta n = 0{,}26$, показатели преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей $n_o = 1{,}53$ и $n_e = 1{,}79$ на длине волны 633 нм, $\Delta\varepsilon = 4{,}43$, а $\varepsilon_{\|} = 9{,}53$ и $\varepsilon_{\perp} = 5{,}1$ при $f = 1$ кГц и переходная (crossover) частота $f_c = 7$ кГц [2]. Стеклянные подложки, образующие НЖК-ячейку, были покрыты тонким проводящим слоем на основе окислов индия и олова. В ячейке *A* в качестве ориентирующей поверхности был использован слой монооокиси германия GeO, полученный наклонным напылением в вакууме, а в ячейке *B* поверхность GeO была дополнительно покрыта тонким слоем a-C:H, осажденным из паров ацетона в плазме тлеющего разряда. Для реализации *S*-эффекта Фредерикса ячейки собирали таким образом, чтобы направления ориентации ЖК на обеих подложках были антипараллельны. Толщина зазора ячейки *d* задавалась фторопластовыми прокладками. Ячейки заполняли жидким кристаллом в нематической фазе в условиях вакуума.

Измерение оптического пропускания на длине волны 633 нм в зависимости от амплитуды и часто-

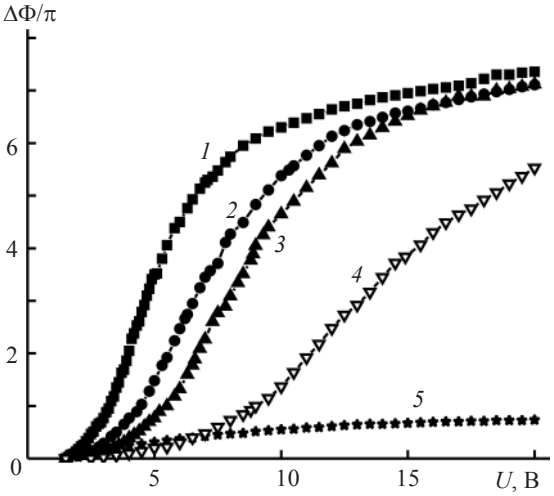


Рис. 1. Зависимости фазовой задержки от приложенного синусоидального напряжения с разной частотой (*1* – 0,1, *2* – 5, *3* – 7, *4* – 10, *5* – 20 кГц) для ячейки *B*, заполненной двухчастотным НЖК-1001 (НИОПИК).

ты синусоидального напряжения, подаваемого на НЖК-ячейку, выполняли с помощью электрооптической схемы, описанной в работе [7]. Были получены кривые зависимости оптического пропускания от приложенного напряжения U с частотой в интервале от 100 Гц до 30 кГц, и рассчитаны соответствующие им значения фазовой задержки. Экспериментальные зависимости фазовой задержки $\Delta\Phi(U)$ для ячейки *B*, полученные для ряда частот, приведены на рис. 1. Видно, что в интервале частот от 100 Гц до 7 кГц фазовая задержка на длине волны 633 нм при $U = 20$ В доходила до 7π при толщине слоя НЖК около 13 мкм. На частоте 20 кГц фазовая задержка резко падала до $0{,}5\pi$, что свидетельствует о переходе в область $\Delta\varepsilon < 0$.

При *S*-деформации НЖК с положительной оптической анизотропией порог электрооптического эффекта Фредерикса соответствует напряжению U_{th} электрического поля, при котором начинает изменяться угол наклона директора ЖК относительно плоскости подложки. Значение порогового напряжения U_{th} связано с $\Delta\varepsilon$ формулой

$$U_{th} = \pi\sqrt{K_{11}}\Big/\sqrt{\Delta\varepsilon}, \qquad (1)$$

где K_{11} – константа упругости Франка [8].

С увеличением частоты прикладываемого напряжения (см. рис. 1) наблюдается смещение зависимостей $\Delta\Phi(U)$ относительно оси напряжений, что свидетельствует об увеличении порога *S*-эффекта с повышением частоты от 100 Гц до 10 000 Гц, обусловленном частотной зависимостью диэлектрической анизотропии для исследуемого НЖК. Вблизи переходной частоты при $\Delta\varepsilon \to 0$ должно наблюдаться резкое увеличение U_{th} в соответствии с формулой (1). Экспериментально пороговое напряжение определяли экстраполяцией линейного участка зависимости $\Delta\Phi(U)$ при $U \to 0$ в области напряжений ниже 5 В [7, 8]. На рис. 2 приведены зависимости $U_{th}(f)$ для исследуемых НЖК-ячеек *A* и *B* с разными граничными условиями межфазного взаимодействия. В интервале от 100 до 5000 Гц порог слабо зависит от частоты приложенного напряжения. Максимум зависимостей *1* и *2* на рис. 2 наблюдается на частоте 10 кГц. Эту частоту можно считать переходной частотой данного НЖК. В случае ячейки *B* с изменением знака анизотропии диэлектрической проницаемости на отрицательный наблюдается более резкое падение U_{th}, а значение порога почти в два раза больше, чем у ячейки *A*. Так как исследуемые ячейки *A* и *B* отличаются только ориентирующими поверхностями, то можно заключить, что наблюдаемые отличия (зависимости *1* и *2* на рис. 2) связаны с влиянием граничных условий на силу межфазного взаимодействия и порог *S*-эффекта.

Характеристики НЖК-ячеек, полученные по результатам измерения пропускания от напряжения на частоте 1 кГц и расчетов, проведенных по этим данным, приведены в таблице. Начальный угол наклона директора ЖК θ_p в таблице оценивали методом, основанным на расчете теоретической зависимости фазовой задержки от угла наклона директора для конкретной толщины слоя ЖК [7]. Максимальное значение фазовой задержки $\Delta\Phi_{max}$ определяли экстраполяцией линейного участка зависимости $\Delta\Phi(1/U)$ при $1/U \to 0$. С помощью расчетной кривой $\Delta\Phi(\theta_p)$ для $d = 13$ мкм и значения $\Delta\Phi_{max}$ определяли угол наклона директора в отсутствие элект-

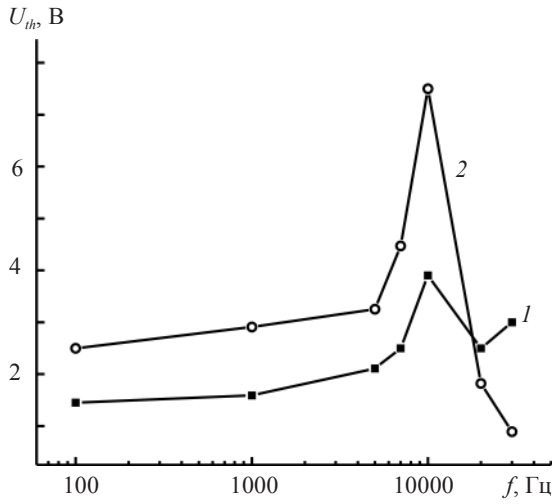


Рис. 2. Зависимости порогового напряжения *S*-эффекта от частоты синусоидального напряжения, подаваемого на НЖК-ячейки *A* и *B* (кривые *1* и *2* соответственно).

Характеристики НЖК-модуляторов света, исследуемых в работе, для частоты 1кГц приложенного напряжения

Ячейка	Ориентирующая поверхность	d, мкм	$\Delta\Phi_{max}/\pi$	U_{th}, В	θ_p, град
A	GeO	13	5,5	1,6	42
B	GeO/a-C:H	13,3	8,4	2,9	26

рического поля, который составил 42° и 26° у ЖК-ячеек *A* и *B*, соответственно.

Как показало исследование ориентирующих поверхностей с помощью атомно-силовой микроскопии [9], осаждение на поверхность GeO с анизотропной структурой тонкой пленки a-C:H приводит к сглаживанию нанорельефа без существенного изменения топологии поверхности. Подобная модификация поверхности GeO способствовала увеличению фазовой задержки света для обычного НЖК BL-037 (Merck) при той же толщине слоя в результате уменьшения начального угла наклона, а также сопровождалась повышением порогового напряжения *S*-деформации директора в электрическом поле [7, 9]. В этой работе тенденции изменения характеристик НЖК-ячеек для двухчастотной смеси в результате комбинации ориентирующих слоев GeO и a-C:H сохранились. Из таблицы видно, что уменьшение начального угла наклона директора у ячейки *B* приводит к повышению $\Delta\Phi_{max}/\pi$ от 5,5 до 8,4 и увеличению U_{th} от 1,6 до 2,9 В на частоте приложенного напряжения 1 кГц.

В результате проведенных исследований фазовой модуляции света в двухчастотном НЖК показано, что при инверсии знака диэлектрической анизотропии наблюдается скачок порога *S*-эффекта на его экспериментальной зависимости от частоты синусоидального напряжения, подаваемого на ячейку. С помощью такой зависимости можно уточнить переходную частоту НЖК-смеси, используя описанный оптический метод. Полученные результаты подтверждают существенное влияние анизотропно-упругого межфазного взаимодействия НЖК с ориентирующей поверхностью на фазовую задержку света и порог *S*-эффекта и могут быть использованы при разработке электро- и светоуправляемых фазовых модуляторов света с двухчастотной адресацией для практических применений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Jewell S.A., Sambles J.R.* Optical characterization of a dual-frequency hybrid aligned nematic liquid crystal cell // Optics express. 2005. V. 13. № 7. P .2627–2633.
2. *Kirby A.K., Love G.D.* Fast, large and controllable phase modulation using dual frequency liquid crystals // Optics express. 2004. V. 12. № 7 P. 1470–1475.
3. *Restainoa S.R., Daytonb D., Brownec S., Gonglewskia J., Bakerd J., Rogerse S., McDermottf S., Gallegosd J., Shilkog M.* On the use of dual frequency nematic material for adaptive optics systems: first results of a closed – loop experiment // Optics express. 2000. V. 6. № 1. P. 2–6.
4. *Kotova S.P., Kvashnin M.Yu., Rakhmatulin M.A., Zayakin O.A., Guralnik I.R., Klimov N.A., Clark P., Love G.D., Naumov A.F., Saunter C.D., Loktev M.Yu., Vdovin G.V., Toporkova L.V.* Modal liquid crystal wavefront corrector // Optics express. 2002. V. 10. № 22. P. 1258–1272.
5. *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. 4394–4398.
6. *Wang Q., He S.* Analysis and design of variable optical attenuators based on nematic liquid-crystal cells // J. of Modern Optics. 2006. V. 53. № 4. P. 481–493.
7. *Hwang S.J., Lin S.-T., Lai C.-H.* A novel method to measure the cell gap and pretilt angle of a reflective liquid crystal display // Opt. Comm. 2006. V. 260. P. 614–620.
8. *Коншина Е.А., Федоров М.А., Амосова Л.П.* Определение угла наклона директора и фазовой задержки жидкокристаллических ячеек оптическими методами // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 12. С. 9–13.
9. *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.