

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 53.097; 532.016; 535.15; 535.557; 537.9

ДВУХКООРДИНАТНЫЙ ЭЛЕКТРОУПРАВЛЯЕМЫЙ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ ОПТИЧЕСКИЙ ФАЗОВЫЙ КЛИН

© 2010 г. Н. Л. Иванова*; М. В. Исаев*; М. А. Федоров*; В. П. Покровский**;
Л. Н. Сомс**, канд. физ.-мат. наук

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

** НПК “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

E-mail: Nataliaiv@aport2000.ru, lcdevices@soi.spb.ru

На основе свойства параллельно ориентированного слоя нематического жидкого кристалла менять свое двулучепреломление под действием приложенного электрического поля разработан двухкоординатный электроуправляемый оптический фазовый клин.

Ключевые слова: нематический жидкий кристалл, градиент показателя преломления, жидкокристаллический дефлектор пучка света, оптический фазовый клин.

Коды OCIS: 230.3720, 160.3710.

Поступила в редакцию 17.12.2009.

Введение

Задача отклонения лазерного луча немеханическими системами является актуальной в современных электрооптических технологиях. Немеханические отклоняющие устройства – это в основном акустооптические, микро-электро-механические или жидкокристаллические (ЖК) устройства. Преимущество ЖК систем в их дешевизне, отсутствии движущихся узлов, малых значениях управляющих напряжений. В ЖК устройствах в случае S-эффекта при подаче напряжения на ЖК ячейку меняется показатель преломления необыкновенно луча для проходящего света и, как следствие, меняется фазовая задержка. Так, например, линейное увеличение напряжения вдоль устройства приводит к распределению фазовой задержки, аналогичному тому, что возникает в клине. В настоящее время предложено несколько отклоняющих устройств, различающихся способом создания оптического ЖК клина. Чаще всего для этих целей используют ЖК дифракционные решетки. В таких устройствах тонкий слой жидкого кристалла помещается между двумя

подложками с нанесенными на них электродами. Один из электродов с помощью фотолитографии выполнен в виде линейки из прозрачных электродов. Меняя напряжение на каждом из этих электродов, можно формировать необходимый электроуправляемый фазовый клин или электрически программируемую фазовую решетку из системы клиньев – так называемый метод оптической фазовой решетки [1–3].

В работе [4] предложено с помощью электронно-лучевой литографии сформировать на одной из подложек решетку из микропризм. Такое устройство действует как фазовая решетка с блеском и работает как электрически управляемый ЖК бинарный переключатель. Для того чтобы получить многоугловое отклоняющее устройство, авторы предлагают сформировать стопку таких решеток с разными периодами штриха. Тогда можно получить 2^N отклоняющих углов, где N – число решеток (в работе получены 16 углов отклонения).

Авторы работы [5] предлагают для отклонения лазерного луча (пробного) использовать мощное излучение ИК лазера (свет накачки). Под действием мощного излучения ИК лазера

(до 20 Вт), падающего на ячейку с гомеотропно ориентированным слоем нематического жидкого кристалла (НЖК) толщиной 200 мкм, меняется показатель преломления кристалла. Формируемый в нем фазовый профиль зависит от распределения интенсивности света по сечению луча накачки. При этом угол отклонения пробного луча достигает максимального значения, когда расстояние между лучами равно радиусу пучка света накачки.

В данной работе предложено использовать для отклонения лазерного луча на небольшие углы простую ЖК ячейку с планарно ориентированным слоем НЖК.

Описание ЖК модулятора света и результаты эксперимента

Простейший вариант модулятора света на основе жидкого кристалла (ЖК МС), в котором реализована возможность создания управляемого оптического фазового клина, представляет собой сэндвич-структуру, состоящую из слоя НЖК, расположенного между двумя сплошными прозрачными проводящими слоями, нанесенными на стеклянные подложки. Проводящий слой ИТО (Indium tin dioxide), осажденный на стеклянные подложки методом лазерного напыления, имел поверхностное сопротивление 350–400 Ом см. Для параллельной ориентации молекул жидкого кристалла использовали пленку поливинилового спирта, нанесенную на слой ИТО центрифугированием, которую затем подвергали термообработке и натирали в одном направлении батистом. Подложки склеивались таким образом, чтобы направления натирки ориентирующих слоев на них были антипараллельны. Зазор между подложками, в который вводили НЖК, создавался с помощью тефлоновых прокладок.

НЖК с положительной диэлектрической анизотропией $\Delta\epsilon > 0$ ведет себя по отношению к проходящему свету как одноосный кристалл и при отсутствии напряжения обладает максимальной оптической анизотропией $\Delta n = n_e - n_o$, где n_e и n_o – показатели преломления необыкновенного и обыкновенного лучей. Максимальное значение двулучепреломления или разности фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами можно оценить по формуле

$$\Phi_{\max} = 2\pi\Delta n d/\lambda, \quad (1)$$

где d – толщина слоя НЖК, λ – длина волны используемого света [6]. Под действием напря-

жения, приложенного к слою НЖК, молекулы переориентируются, стремясь выстроиться вдоль направления электрического поля. При этом коэффициент преломления для обыкновенного луча остается неизменным, а для необыкновенного – уменьшается, стремясь к n_o , и величина Δn (а следовательно, и двулучепреломление) уменьшается, стремясь к нулю при полной переориентации молекул НЖК. На рис. 1 приведены зависимости фазового набегу $\Delta\Phi = (\Phi_{\max} - \Phi)/\pi$ от напряжения U для света с длиной волны $\lambda = 0,633$ мкм для двух ячеек с толщиной слоя ЖК 14 и 30 мкм. Из имеющегося ряда НЖК был выбран BL037 (Merck) с большим значением оптической анизотропии $\Delta n = 0,282$. Если к разным областям ячейки прикладывать разное напряжение, то в этих областях свет с длиной волны λ будет испытывать разное двулучепреломление $\Phi(U)$. Это свойство слоя НЖК было использовано нами при создании электроуправляемого оптического клина для отклонения лазерного луча от исходного направления.

Поверх слоя ИТО на расстоянии 1 см друг от друга напылялись металлические (Al) электроды. Подложки склеивались таким образом, чтобы металлические электроды на верхней и нижней подложках были взаимно перпендикулярны.

При приложении напряжения к металлическим электродам, находящимся на одной подложке, напряжение линейно изменяется вдоль ИТО электрода вследствие конечного сопротивления электрода. При этом, если один из метал-

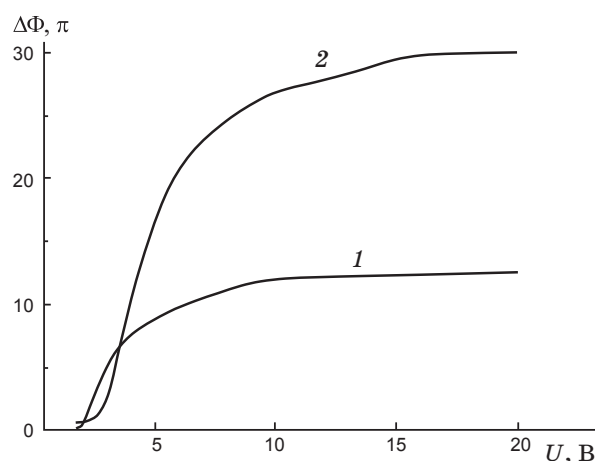


Рис. 1. Зависимость фазового набегу $\Delta\Phi$ от напряжения питания U для света с $\lambda = 0,63$ мкм при прохождении им слоя НЖК (BL037, Merck) толщиной 14 (1) и 30 мкм (2).

лических электродов на верхней подложке соединить с металлическим электродом на нижней подложке, находящимся при нулевом потенциале, а второй металлический электрод нижней подложки соединить с источником питания, то из-за линейного распределения продольного электрического поля вдоль слоя ИТО на нижней подложке в ячейке возникает суммарное клинообразное поперечное распределение электрического поля. Клинообразное распределение поперечного электрического поля приводит к аналогичному изменению n_e и двулучепреломления в НЖК и возникновению электроуправляемого оптического фазового клина. При этом ребро возникающего двулучепреломляющего клина ориентировано параллельно металлическим электродам на нижней подложке.

Схема установки для исследования свойств электроуправляемого клина приведена на рис. 2.

Свет He-Ne-лазера 1 после расширителя 2 падал на ЖК ячейку 4, помещенную между скрещенными поляризатором 3 и анализатором 5. ЖК ячейка располагалась так, что угол между осью поляризатора и направлением начальной ориентации молекул НЖК (направлением натирания) составлял 45° . Картина интерференционных полос, возникавшая при прохождении светом оптического клина, наблюдалась на экране 6.

На рис. 3 представлены экспериментальные данные, демонстрирующие возникновение электроуправляемого фазового клина в плоскопараллельной НЖК ячейке при подаче на нее напряжения. Максимальный угол отклонения проходящего через ячейку луча света можно оценить по формуле [9]

$$\theta_{\max} = \Delta\Phi_{\max}/D, \quad (2)$$

где $\Delta\Phi_{\max}$ – максимальный фазовый сдвиг, D – апертура устройства (1×1 см). Тогда для ячейки со слоем НЖК $d = 14$ мкм получим $\theta_{\max} = 0,3$ мрад и $\theta_{\max} = 0,85$ мрад для ячейки с $d = 30$ мкм.

Если подключить электроды на обеих подложках таким образом, чтобы один из концов металлических электродов на каждой из подложек был соединен с землей, а второй – с собственным генератором синусоидального напряжения (при этом фаза сигналов на выходе обоих генераторов должна отличаться на π), то под действием суммарного поля появляется возможность поворота оптического фазового клина. При этом система возникающих в клине интерференционных полос будет повернута относи-

тельно металлических электродов на некоторый угол (от 0 до $\pm 45^\circ$), зависящий от соотношения амплитуд напряжений, прикладываемых к верхней и нижней подложкам (рис. 4). Следует отметить, что картина интерференционных полос может быть последовательно повернута на 360° , в зависимости от того, какой

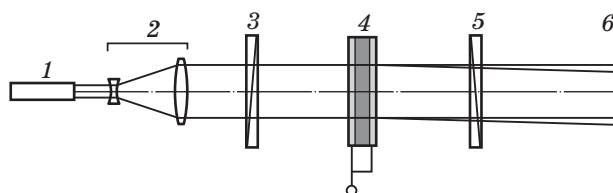


Рис. 2. Оптическая схема для исследования оптического электроуправляемого клина в ЖК МС. 1 – He-Ne-лазер, 2 – расширитель пучка, 3 – поляризатор, 4 – ЖК ячейка, 5 – анализатор, 6 – экран.

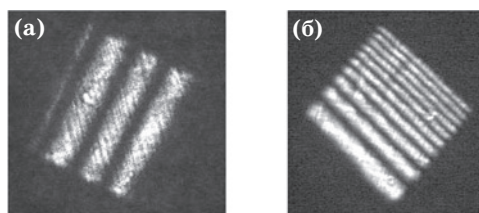


Рис. 3. Интерференционная картина полос, характеризующая распределение фазы по сечению пучка, в зависимости от линейного распределения напряжения вдоль прозрачного электрода ($\lambda = 0,63$ мкм) при напряжении на нижнем электроде $U = 18$ В, $f = 10$ кГц. Толщина слоя ЖК 10 мкм (а), 30 мкм (б).

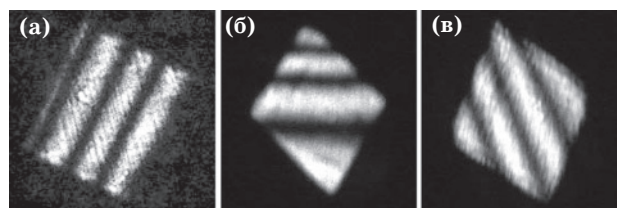


Рис. 4. Интерференционная картина полос, демонстрирующая поворот клина для ЖК ячейки с толщиной слоя 14 мкм. а – поворот отсутствует ($U_H = 18$ В, $f = 10$ кГц, $U_B = 0$ В); б – поворот на $+45^\circ$ ($U_H = 18$ В, $U_B = 18$ В, $f = 10$ кГц); в – поворот на -45° ($U_H = 18$ В, $U_B = 18$ В, $f = 10$ кГц, но на одной из подложек изменена полярность подключения металлических электродов). U_H и U_B – синусоидальные напряжения, подаваемые на металлический электрод нижней и верхней подложек, f – частота синусоидального напряжения.

из двух электродов на подложках заземлен, а какой соединен с генератором.

Быстродействие такого устройства определяется временем естественной релаксации молекул НЖК в исходное состояние при выключении управляющего напряжения [7]. Так, для ячейки толщиной $d = 14$ мкм время $\tau = 420$ мс, а для ячейки $d = 30$ мкм – $\tau = 450$ мс. Измерения проводились при комнатной температуре (+20 °С).

Поскольку зависимость фазового набега от напряжения при $U > 10$ В имеет нелинейный характер (рис. 1), то при прохождении света через ЖК ячейку возникают фазовые искажения, приводящие к абберациям волнового фронта.

На рис. 5 приведены данные об отклонении волнового фронта от плоского для ЖК ячейки с толщиной слоя ЖК $d = 30$ мкм при величине управляющего напряжения 12 В, полученные путем обработки фотографий, подобных показанным на рис. 3.

Фазовых искажений можно избежать, если работать на линейном участке зависимости $\Delta\Phi(U)$ (рис. 1), но с потерей нескольких λ , что приведет к уменьшению электроуправляемого диапазона угловых изменений клина. Характеристики описанного в статье устройства даны в таблице.

Основные характеристики электроуправляемого оптического ЖК клина

Характеристика ячейки	Значения	
	10	30
Толщина слоя НЖК d , мкм	10	30
Рабочая апертура D , мм	10×10	10×10
Тип НЖК	NLC BL037	NLC BL037
Время отклика (для фазового сдвига 2λ), мс	20 (вкл) 400 (выкл)	50 (вкл) 400 (выкл)
Максимальный угол отклонения пучка света, мрад	0,3	0,85
Управляющее синусоидальное напряжение с частотой (10–15) кГц U , В	<15	<15
Оптическое качество (при $U = 0$)	не хуже $\lambda/15$	не хуже $\lambda/15$
Степень деполяризации излучения	<1%	<1%
Максимальное значение волновой абберации отклоненного пучка на выходе (для наибольшего угла отклонения)	$\lambda/20$	$\lambda/7$

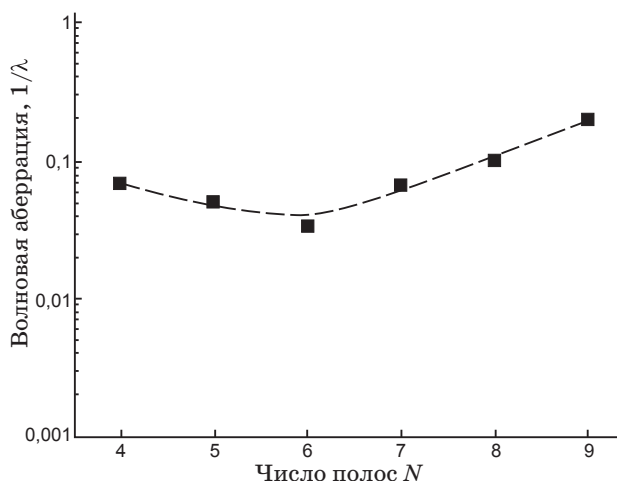


Рис. 5. Зависимость волновой абберации $1/\lambda$ от распределения фазового набега (числа полос N) по сечению пучка для ячейки 30 мкм при напряжении питания 12 В для $\lambda = 0,63$ мкм.

Описанное устройство может быть усовершенствовано, а его рабочий диапазон расширен за счет

- увеличения толщины ЖК ячейки,
- использования НЖК с $\Delta n > 0,3$ [8],
- использования НЖК с инверсией знака диэлектрической анизотропии $\Delta\epsilon$ [9].

Выводы

Показана возможность создания простого двухкоординатного ЖК устройства для отклонения лазерного луча на небольшой угол, величиной которого можно плавно управлять, меняя напряжение, прикладываемое к устройству. Данное устройство создавалось для использования в схемах введения упреждения в многоканальных лазерных системах с ОВФ-компенсацией искажений оптического тракта и фазировкой каналов. В работе [10] аналогичное устройство было предложено использовать в телекоммуникационных системах в схеме управляемого волноконного оптического аттенюатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. McManamon P.E., Dorschner T.A., Corkum D.J., Friedman L.J., Hobbs D.S., Holz M., Liberman S., Nguyen H.Q., Resler D.P., Sharp R.C., Watson E.A. Optical phased array technology // Proc. of the IEEE. 1996. V. 84. № 2. P. 268–297.
2. Wang X., Wang B., Bos P.J., McManamon P.F., Pouch J.P., Mirande F.A., Anderson J.E. Mode-

- lling and design of an optimized LC optical phase array // *J. Appl. Phys.* 2005. V. 98. P. 073101.
3. *Sato S., Hashimoto N.* Development of variable beam deflector with simple structure using liquid crystal devices // *Proc. SPIE.* 2003. V. 5003. P. 138–141.
 4. *Wang X., Wilson D., Muller R., Maker P., Psaltis D.* LC blazed-grating beam deflector // *Appl. Opt.* 2000. V. 39. № 35. P. 6545–6555.
 5. *Tabiryan N.V., Nersisyan J.R.* Large-angle beam steering using all-optical LC spatial light modulators // *Appl. Phys. Lett.* 2004. V. 84. № 25. P. 145–147.
 6. *Блинов Л.М.* Электро-и магнитооптика жидких кристаллов. М.: Наука, 1978. 171 с.
 7. *Чигринов В.Г., Беляев В.В.* Временные характеристики ориентационных электрооптических эффектов в нематических жидких кристаллах // *Кристаллография.* 1977. Т. 22. С. 603–607.
 8. *Spadlo A., Dabrowski R., Dziaduszek J., Urban S., Scibior E., Gauza S., Wu S.-T.* Liquid crystalline materials with high birefringence // *Оптический журнал.* 2005. Т. 72. № 9. С. 10–13.
 9. *Golovin A.B., Shiyaniivskii S.V., Lavrentovic O.D.* Gradient beam steering device based on nematic cell with continuous ramp of the phase retardation // *Proc. SPIE.* 2005. V. 5741. P. 146–153.
 10. *Riza N.A., Khan S.A.* Liquid-crystal-deflector based variable fiber-optic attenuator // *Appl. Opt.* 2004. V. 43. № 17. P. 3449–3455.
-