

Е.А. Мельникова, О.С. Кабанова, И.И. Рушнова

ЭЛЕКТРИЧЕСКИ КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

ELECTRICALLY CONTROLLED LIQUID CRYSTAL ELEMENTS FOR SPATIAL-POLARIZATION CONTROL OF LASER RADIATION

Разработан и изготовлен жидкокристаллический элемент с электрически управляемой рефрактивной границей, позволяющий осуществлять оптическое пространственное переключение ортогональных поляризационных мод. На основе разработанной технологии предложена топология жидкокристаллической структуры для реализации режима волноводного распространения линейно поляризованного лазерного излучения.

Ключевые слова: нематический жидкий кристалл; полное внутреннее отражение; электрически управляемая топология ориентации директора.

Topology of the liquid-crystal structure with the electrically-controlled refractive interface has been proposed to realize the regime of spatial switching for the orthogonally polarized modes and the waveguide propagation of linearly polarized laser radiation.

Keywords: nematic liquid crystal; total internal reflection; electrically controllable topology of director orientation.

БГУ, Минск, Беларусь.

Сегодня во всем мире активно ведется развитие технологий изготовления новых функциональных элементов интегральной оптики, причем, большое внимание уделяется разработке и созданию устройств, осуществляющих оптическое переключение, которые не требуют оптоэлектронного преобразования сигнала, что обеспечивает их работу непосредственно в оптической области спектра [1]. Перспективными материалами для создания на их основе функциональных устройств со сложной топологией оптической анизотропии (дифракционные, волноводные ЖК устройства) являются нематические жидкие кристаллы (НЖК), так как они обладают большой величиной анизотропии показателей преломления ($\Delta n \sim 0,1-0,4$), которой возможно управлять малыми внешними напряжениями (порядка нескольких вольт) [2–5]. Коммерческая доступность, улучшенные механические свойства, высокая восприимчивость к внешним полям, восстановление исходной ориентации директора при выключении внешнего поля, проявление выраженной ориентационной оптической нелинейности – это основные преимущества нематических жидких кристаллов в сравнении с другими мягкими органическими материалами [6].

Настоящая работа посвящена разработке и созданию ЖК устройств, осуществляющих пространственно-поляризационное управление лазерным излучением. Принцип действия основывается на эффекте полного внутреннего отражения линейно поляризованного излучения от электрически контролируемой границы раздела областей нематического жидкого кристалла с различной ориентацией директора ЖК молекул.

Типичная схема электрически управляемого ЖК элемента представляет собой ячейку типа сэндвич и приведена на рис 1.

Особенностью изготовленных в работе ЖК ячеек является наличие непрозрачного электропроводящего слоя из хрома, который методом фотолитографии наносился на стеклянную подложку, а затем с половины

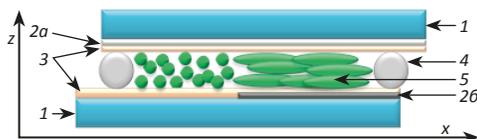


Рис. 1

Структурная схема ЖК-ячейки:

1 – стеклянные подложки; 2а – прозрачный электрод (ITO);
2б – непрозрачный электрод (хром); 3 – ориентирующий
слой; 4 – спейсеры; 5 – ЖК-молекулы

нижней подложки стравливался (рис. 1 2б). Начальная планарная взаимно ортогональная ориентация директора НЖК молекул в двух смежных областях ЖК ячейки задавалась при помощи бесконтактного метода фотоориентации молекул азокрасителя, синтезированного в Институте химии новых материалов НАН Беларуси [7]. Толщина ЖК слоя задавалась спейсерами (рис. 1 4) и составляла 20 мкм. В работе использовался НЖК с анизотропией показателей преломления $\Delta n = 0,156$ на длине волны $\lambda = 633$ нм и $\Delta n = 0,167$ на длине волны $\lambda = 532$ нм.

При подаче внешнего электрического поля на такую структуру с напряженностью, превышающей пороговую величину, в области ЖК ячейки, где на нижней подложке нанесен непрозрачный электрод, молекулы начинают отклоняться из первоначального положения в направлении вертикали и происходит переориентация директора из планарного состояния в гомеотропное вследствие перехода Фредерика [8]. В области ЖК ячейки, где на нижней стеклянной подложке отсутствует непрозрачный электрод, ориентация директора остается исходной, планарной (рис. 2 б).

На рис. 2 представлена схема (рис. 2 а, б) и экспериментальные фотографии (рис. 2 в, г) по распространению линейно поляризованного излучения в слое НЖК электрически управляемой ЖК ячейки с рефрактивной границей.

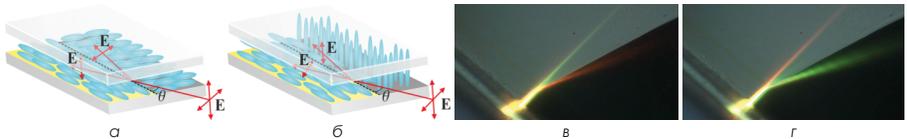


Рис. 2

Схема распространения электромагнитного излучения в ЖК ячейке:

а – при отсутствии внешнего поля, $U = 0$ В; б – внешнее поле превышает пороговое, $U > U_{\text{пг}}$;
в – экспериментальная фотография, $U = 0$ В; г – экспериментальная фотография, $U > U_{\text{пг}}$

Для реализации пространственно-поляризационного переключения световой пучок вводится в ЖК элемент со стороны торца ячейки под углом θ к границе раздела двух доменных ЖК областей. При отсутствии внешнего возмущения (рис. 2 а) в ЖК слое существует граница раздела двух областей со взаимно ортогональными ориентациями директора в плоскости ячейки для горизонтальной поляризационной моды, так как в области ЖК-элемента, где направления директора и горизонтальной компоненты лазерного излучения совпадают, возбуждается необыкновенная волна с показателем преломления $n_e = 1,68$. В смежной области возбуждается обыкновенная волна с показателем преломления $n_o = 1,52$. Следовательно, горизонтальная компонента поляризации лазерного луча, проходя из области с большим показателем преломления в область его меньшего значения, претерпевает преломление и отражение на границе двух областей, в отличие от вертикальной поляризационной моды, для которой граница отсутствует. Для углов падения, превышающих критическое значение, можно ожидать выполнение условия полного внутреннего отражения, и свет перестанет проникать в среду с меньшим показателем преломления. При подаче напряжения к ЖК ячейке граница раздела двух ее областей, индуцированная электрическим полем, возникает уже для вертикально поляризованной компоненты лазерного излучения, введенного со стороны гомеотропной ориентации директора жидкого кристалла [9].

На основе разработанной технологии предложена схема создания нематических ЖК элементов со сложной модуляцией анизотропии показателей преломления, где периодически чередующиеся области размером 10 мкм отличаются взаимно ортогональным направлением ориентации директора. Модуляция ориентации директора ЖК молекул задавалась в двух геометриях: планарная взаимно перпендикулярная, которая имеет место при фотоиндуцированной ориентации фоточувствительного полимера, и индуцированная электрическим полем чередующаяся планарная и гомеотропная ориентация директора, реализуемая за счет нанесения периодических электродов на одну из подложек ячейки.

Предложенные топологии ориентации директора позволяют возбудить волноводный режим распространения линейно поляризованного электромагнитного излучения, принцип формирования которого также основан на реализации эффекта полного внутреннего отражения от электрически контролируемой границы раздела двух направлений директора (рис. 3) [10].

Для ЖК ячейки с планарной перпендикулярной ориентацией директора ЖК в смежных областях при нулевом напряжении (рис. 3 а; $U = 0$ В) реализуется волноводный режим распространения горизонтально поляризованного лазерного излучения [11]. При увеличении внешнего поля происходит

разрушение волноводных каналов (переориентация директора в геометропное положение [8]), и входящий луч рассеивается (рис. 3 а; $U = 3$ В и 5 В). Для второй геометрии ЖК ячейки при выключенном внешнем поле (рис. 3 б; $U = 0$ В) свет, введенный в ячейку, рассеивается на неоднородностях ЖК. При включении электрического поля в объеме ЖК возбуждаются волноводные каналы, по которым распространяется излучение лазера (рис. 3 б; $U = 3$ В и 5 В).

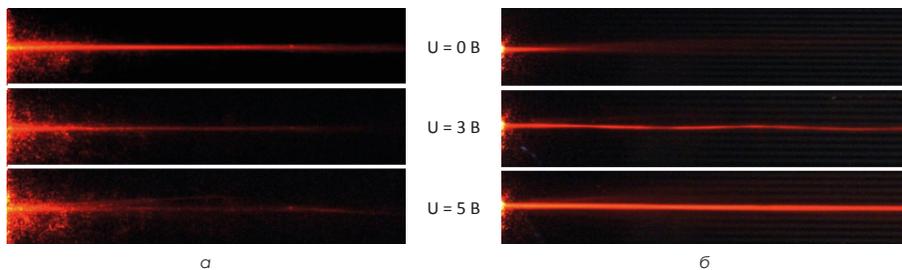


Рис. 3

Распространение лазерного излучения:

- а – в ЖК ячейке с планарной перпендикулярной ориентацией директора ЖК в смежных областях;
 б – в ЖК ячейке с чередующейся геометропной и планарной ориентацией директора ЖК в смежных областях

Подбирая топологию электродов, нанесенных на подложку ЖК ячейки, можно реализовать пространственное управление линейно поляризованным лазерным излучением в соответствии с выбранной геометрией электропроводящего слоя. Периодический электрод на подложке в форме разветвителя позволяет осуществить разделение входного светового сигнала на два оптических канала при величинах внешнего напряжений, превышающих пороговое значение, как показано на рис. 4 а. В ЖК ячейке с электрически наведенными волноводными сумматорами (рис. 4 б) при одновременном распространении световых пучков с длиной волны 532 нм и 633 нм имеет место разделение световых сигналов в соответствии с геометрией электропроводящего слоя, т.е. два крайних пучка на выходе несут информацию о входных сигналах, в то время как центральный пучок отвечает суммарному оптическому сигналу. Выключение внешнего напряжения приводит к исчезновению волноводных свойств ЖК слоев и ячейки работают в режиме ослабителя световых пучков, выполняя функцию интегрально-оптического поляризатора.

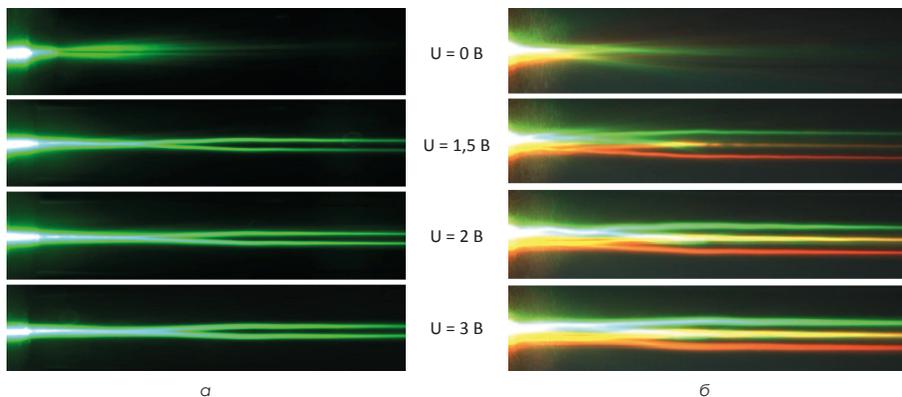


Рис. 4

Распространение лазерного излучения:

- а – в ЖК ячейке с волноводным разветвителем; б – в ЖК ячейке с волноводным сумматором

Таким образом, в данной работе были изготовлены и исследованы ЖК ячейки с ортогональной ориентацией директора ЖК молекул в смежных областях. Экспериментально изучен эффект

полного внутреннего отражения линейно-поляризованного лазерного излучения от электрически управляемой границы двух ориентаций директора НЖК. Разработанный метод создания управляемых поляризационно-чувствительных ЖК-волноводов на основе электрического перехода Фредерикса позволяет реализовать миниатюризированные устройства для решения задач интегральной оптики. Поскольку апертура наведенных ЖК волноводов сильно зависит от величины приложенного напряжения, то можно реализовать два режима работы волноводных ЖК ячеек – режим ослабителя, при приложении напряжения ниже порогового значения, или режим полного пропускания, позволяющий передавать оптические сигналы по канальным волноводам, разветвителям и сумматорам. Проведенные исследования демонстрируют возможность пространственно-поляризационного разделения и переключения ортогональных мод лазерного излучения, а также волноводное распространение поляризованного света в функциональных ЖК элементах.

Литература

1. Складов О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи. СПб., 2010.
2. Operation with laser radiation by using of liquid crystal elements / A. A. Kazak [et al.] // *Nonlinear Phenom. Complex Syst.* 2013. Vol. 16, № 3. P. 302–308.
3. Kazak A. A., Tolstik A. L., Mel'nikova E. A. Controlling light fields by means of liquid-crystal diffraction elements // *J. Opt. Technol.* 2010. № 77. P. 461–462.
4. Piccardi A., Alberucci A., Assanto G. Nematicons and their electro-optic control: light localization and signal readdressing via reorientation in liquid crystals // *Int. J. Mol. Sci.* № 14. P. 19932–19950.
5. Optical switch based on the electrically controlled liquid crystal interface» / A. Komar [et al.] // *Appl. Opt.* 2015. № 54. P. 5130–5135.
6. Bougrenet J.L. De, Tognaye De La. Engineering liquid crystals for optimal uses in optical communication systems // *Liquid Crystals.* 2004. Vol. 31, № 2. P. 241–269.
7. Waterproof material for liquid crystals photoalignment based on azo dyes / V. Mikulich [et al.] // *J. of the SID.* 2014. 22/4. P. 199–203.
8. Blinov L. M. Electrooptical and magnetooptical properties of liquid crystals. Wiley, 1983.
9. Мельникова Е. А., Рушнова И. И. Полное внутреннее отражение на границе раздела двух ориентаций директора жидкого кристалла // *Вестн. БГУ.* 2016. Сер. 1. № 2. С. 3–7.
10. [10] Electrically controlled waveguide liquid-crystal elements / Kabanova O. S. [et al.] // *Tech. Phys. Lett.* 40. 2014. P. 598–600.
11. Оленская И. И., Кабанова О. С., Мельникова Е. А. Жидкокристаллические волноводные элементы с различной топологией модуляции границы раздела рефрактивных областей // *Изв. Самарского науч. центра РАН.* 2015. № 4.