

Управляемые дифракционные решетки на основе периодической бинарной ориентации нематического жидкого кристалла

К.Г. Комяк, О.С. Кабанова, И.И. Рушнова, Е.А. Мельникова, А.Л. Толстик
 Белорусский государственный университет
fiz.komyak@bsu.by

Жидкие кристаллы (ЖК) представляют собой уникальный класс мягких органических материалов, сочетающих свойства жидкостей с определенной степенью ориентационной упорядоченности молекул. Способность самоорганизовываться в сложные структуры, высокая чувствительность к воздействию внешних полей (электрических, тепловых, оптических) обуславливают высокую востребованность ЖК-материалов в области создания фотонных компонент, таких как оптические фильтры, переключатели, дифракционные решетки, массивы линз, вортекс ретардеры, пространственные модуляторы света и др. [1–4] Для создания сложной (локально-неоднородной) ориентации ЖК применяются различные способы, включая использование электродов специальной конфигурации на подложках, микронатирание ориентирующих пленок, а также технологию текстурированной фотоориентации светочувствительных азокрасителей. Бесконтактный метод фотоориентации ЖК-материалов [5–7] продемонстрировал большие успехи в последние десятилетия и оказался оптимальным для создания периодически упорядоченных одно-, дву- и трехмерных оптических структур, реализующих управление пространственными, фазовыми и поляризационными характеристиками световых полей.

Настоящая работа посвящена изучению дифракционных свойств электрически управляемых одномерных решеток с периодической бинарной ориентацией нематического ЖК, изготовленных методом текстурированной фотоориентации пленок азокрасителя.

На рисунке 1 приведены схемы бинарных дифракционных структур, характеризующихся периодической твист-планарной ориентацией ЖК (рис. 1, *а*), и периодической твист-твист ориентацией с противоположным направлением закрутки ЖК в смежных доменах (рис. 1, *в*).

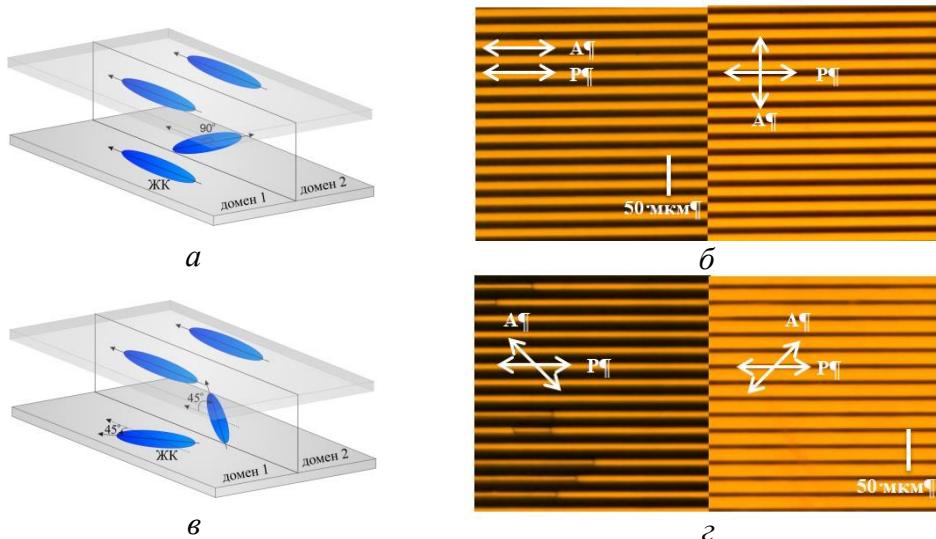


Рис. 1 – Схема (*а*, *в*) и соответствующие поляризационные микрофотографии (*б*, *г*) бинарных дифракционных структур с периодической твист-планарной ориентацией ЖК и с периодической твист-твист ориентацией, характеризующейся противоположным направлением закрутки ЖК в смежных доменах, при напряжении $U=0$

Функциональную основу бинарных дифракционных структур составляют тонкопленочные слои нематического ЖК-материала (ЖК 1282, НИОПИК, Россия: $n_o=1,678$ $n_e=1,509$) с многодоменной ориентацией. Для изготовления ЖК-ячеек типа сэндвича использовались стеклянные подложки, равномерно покрытые токопроводящим слоем оксида индия-олова (ITO) с сопротивлением порядка 50 Ом/□. В качестве фотоориентируемого материала был выбран светочувствительный азокраситель AtA-2 [8,9], синтезированный в ЛМТЖКУ ИНХМ НАН Беларусь. Формирование ориентирующих свойств пленок азокрасителя AtA-2 происходит при облучении их линейно поляризованным светом ($\lambda=465$ нм), причем направление наведенной ориентации перпендикулярно направлению поляризации активирующего излучения. Тонкие пленки азокрасителя AtA-2 наносились на тщательно очищенную внутреннюю поверхность подложек методом род коутинга. Облучение подложки A, содержащей периодически чередующиеся ЖК-домены, реализовывалось с помощью одномасочного процесса, включающего двухэтапную экспозицию пленки линейно поляризованным излучением светодиодной матрицы ($\lambda=465$ нм, $P=60$ мВт/см²). После первого этапа равномерного облучения поверхности пленки производилось повторное облучение через амплитудную фотомаску, что позволило изменить направление ориентирующих структур в немаскированных областях путем поворота плоскости поляризации активирующего излучения на угол 90°. Подложка B экспонировалась линейно-поляризованным излучением равномерно. Применение указанного алгоритма экспонирования подложек позволило изготовить два типа бинарных дифракционных ЖК-структур (период 20 мкм): с чередующимися твист ($\beta=90^\circ$)/планарными доменами и с чередующимися противоположно закрученными твист доменами ($\beta_1=45^\circ$ и $\beta_2=-45^\circ$), где β – угол закрутки ЖК. Толщина нематического ЖК-слоя контролировалась при помощи волоконных спайсеров и составляла $d=20$ мкм.

Для изучения дифракционных свойств изготовленных бинарных ЖК-решеток использовался *He-Ne*-лазер, генерирующий узконаправленный луч линейно поляризованного света с длиной волны 632,8 нм и фотодетектор. Для исследования состояния поляризации дифрагированных световых пучков использовался анализатор. На рисунке 2 приведены зависимости дифракционной эффективности от напряжения 0-го и 1-го порядков для двух типов ЖК-решеток.

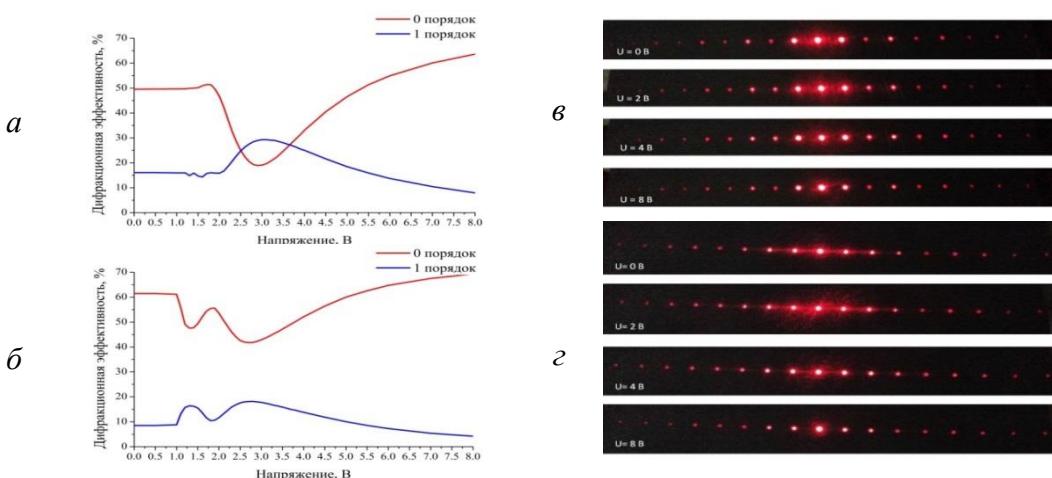


Рис. 2 – Зависимости картин дифракции (c, d) и дифракционных эффективностей 0-го и 1-го порядков от напряжения U для бинарных решеток с твист-планарной ориентацией ЖК-доменов (a, c) и с противоположно закрученной твист-твист ориентацией ЖК-доменов (b, d)

Характерной особенностью решетки с твист-планарной ориентацией ЖК доменов является значительное уменьшение интенсивности четных дифракционных максимумов при $U=0$ (рис. 2, в), что указывает на прямоугольный профиль штриха. При напряжении на ячейке $U=3,0$ В для данной решетки наблюдается значительный рост дифракционной эффективности 1-го порядка с 16 % до 29 %, при этом дифракционная эффективность 0-го порядка уменьшается с 49 % до 19 % (рис. 2, а). Дальнейшее увеличение напряжения сопровождается переориентацией ЖК под действием электрического поля, что приводит к постепенному исчезновению дифракционных свойств ячейки. Решетка с противоположно закрученной твист-твист ориентацией ЖК-доменов характеризуется относительно меньшими значениями дифракционных эффективностей: 61% для 0-го и 8 % для 1-го порядков дифракции при $U=0$ (рис. 2, б). При напряжениях на ячейке $U_1=1,35$ В и $U_2=2,70$ В наблюдается уменьшение дифракционной эффективности 0-го порядков, сопровождающееся увеличением дифракционной эффективности 1-го порядка. Дальнейшее увеличение напряжения в силу переориентации ЖК приводит к постепенному исчезновению дифракционных свойств ячейки.

На рисунке 3 приведены результаты экспериментального исследования состояния поляризации световых пучков, дифрагированных в 0-ой и 1-ый порядки.

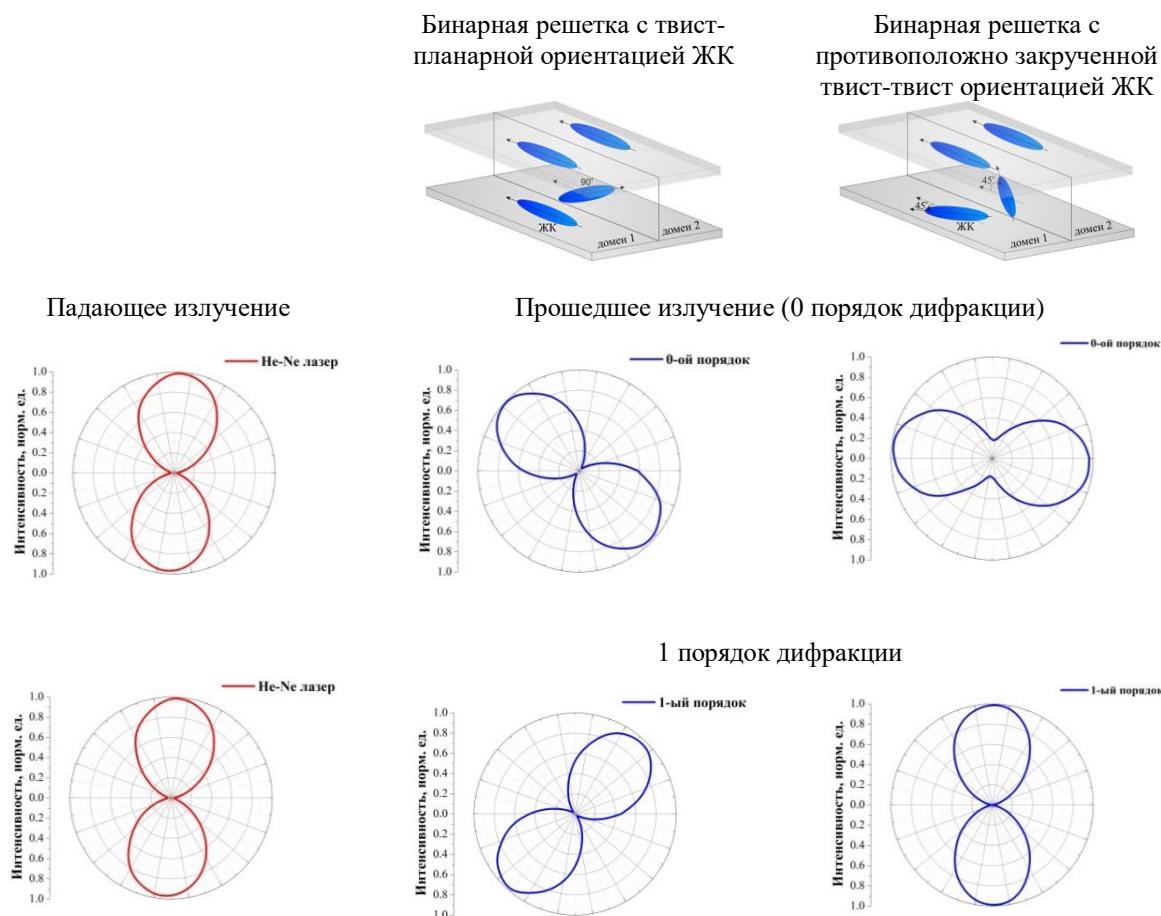


Рис. 3 – Состояния поляризации прошедшего и дифрагированных в 1-ый порядок световых пучков для бинарных решеток с твист-планарной ориентацией ЖК-доменов и с противоположно закрученной твист-твист ориентацией ЖК-доменов. Направление поляризации падающего излучения является вертикальным

Согласно полученным экспериментальным данным (рис. 3), имеет место поворот направления поляризации прошедшего излучения на угол $\alpha_{01}=45^\circ$ для бинарной решетки с твист-планарной ориентацией ЖК-доменов и на угол $\alpha_{02}=90^\circ$ для бинарной твист-твист решетки с противоположно закрученными ЖК-доменами. Вместе с этим, поляризация дифрагированного в 1-ый порядок излучения поворачивается на угол $\alpha_{11}=-45^\circ$ в случае бинарной решетки с твист-планарной ориентацией ЖК-доменов и остается неизменной для бинарной твист-твист решетки с противоположно закрученными ЖК-доменами. Следует отметить, что эллиптичность состояния поляризации световых пучков, дифрагированных в 1-ый порядок практически равна 0. Эллиптичность состояния поляризации прошедшего излучения отлична от 0 для решетки с твист-твист конфигурацией.

Таким образом, бинарные ЖК-решетки, изготовленные на основе текстурированной фотоориентации азокрасителя характеризуются электрически управляемыми дифракционными свойствами и позволяют реализовать пространственно-поляризационное управление световыми пучками. Полученные результаты могут использоваться в области разработки и создания современных фотонных устройств и систем управления оптическими полями.

ЛИТЕРАТУРА

1. D.-K. Yang, S.-T. Wu “Fundamentals of Liquid Crystal Devices” Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2014.
2. D Lee. et al. // Adv. Opt. Mater. 2020. V. 2001604. P. 2001604.
3. C. Oh, M.J. Escuti // Opt. Lett. 2008. V. 33. No 20. P. 2287.
4. O.S. Kabanova et al. // J. Belarusian State Univ. Phys. 2019. No 3. P. 4.
5. V.G.Chigrinov, V.M. Kozenkov, H.-S. Kwok “Photoalignment of liquid crystalline materials : physics and applications” Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2008.
6. V. Chigrinov, A. Kudreyko, Q. Guo // Crystals. 2021. V. 11. No 2. P. 84.
7. A. Kozanecka-Szmigiel et al. // J. Mater. Chem. C. 2020. V. 8. No 3. P. 968.
8. V. Mikulich et al. // J. Soc. Inf. Disp. 2014. V. 22. No 4. P. 199.
9. V.S. Mikulich et al. // J. Appl. Spectrosc. 2016. V. 83. No 1. P. 115.