

Поляризационно-голографический метод создания дифракционных электрически управляемых жидкокристаллических элементов для формирования оптических вихрей

Е. П. Пантелеева, Е. А. Мельникова

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь,
e-mail: pantsialevakate@gmail.com

Разработан метод создания электрически контролируемых жидкокристаллических решеток, основанный на технологии поляризационно-голографического записи поверхностной анизотропии в тонких плёнках чувствительного в синей области спектра азокрасителя AtA-2. Изготовлен анизотропный переключаемый дифракционный поляризационный элемент, формирующий сингулярные фазовые световые пучки с заданной величиной топологического заряда.

Ключевые слова: сингулярный световой пучок; поляризационная голография; топологический заряд; дифракционная решетка; анизотропия; азокраситель; фотоориентация; жидкий кристалл.

Polarization-holographic method for creating diffraction electrically controlled liquid crystal elements for the formation of optical vortices

Y. P. Pantsialeeva, E. A. Melnikova

Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: pantsialevakate@gmail.com

A method for creating electrically controlled liquid crystal gratings based on the technology of polarization-holographic recording of surface anisotropy in thin films of an azo dye AtA-2 sensitive in the blue region of the spectrum has been developed. An anisotropic switchable diffraction polarization element generating singular phase light beams with a given amount of topological charge has been created.

Keywords: singular light beam; polarization holography; topological charge; diffraction grating; anisotropy; azo dye; photoalignment; liquid crystal.

Введение

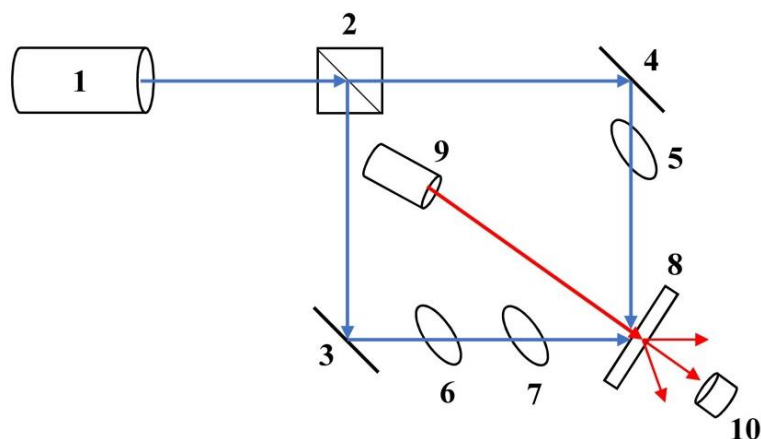
В настоящее время многие научные группы уделяют внимание разработке жидкокристаллических (ЖК) дифракционных оптических элементов, для пространственного управления и фазово-поляризационного преобразование световых полей. Элементы на основе бинарной или непрерывно изменяющейся в пространстве ориентации молекул жидкого кристалла достаточно успешно используются как дифракционные решётки, осуществляющие преобразование амплитудных и фазовых характеристик излучения [1–3]. Высокое значение оптической анизотропии мезофазы вместе со способностью молекул жидкого кристалла изменять ориентацию во внешнем электрическом поле открыли новые возможности в производстве эффективных дифракционных элементов с контролируруемыми оптическими параметрами [4–6].

Формирование пространственно-модулированного распределения директора НЖК-молекул может быть получено при помощи бесконтактной технологии фотоориентации [7] используя голографическую запись, которая позволяет точно контролировать распределение директора НЖК на подложке, что предоставляет возможность формировать локально-неоднородные дифракционные структуры.

1. Технология создания дифракционных ЖК-элементов

Дифракционный элемент представляет ЖК-ячейку типа «сэндвич» [8] с толщиной зазора 7 мкм. Внутренние поверхности стеклянных подложек ЖК-элемента содержат токопроводящее покрытие. Для задания начальной микроструктурированной ориентации ЖК токопроводящая поверхность покрывалась тонкой плёнкой (порядка 30 нм) фоточувствительного азокрасителя AtA-2 [9] с полосой поглощения в диапазоне 450–520 нм. Плёнки азокрасителя AtA-2 приобретают ориентирующие свойства при экспонировании линейно поляризованным светом. Направление навёрнутой ориентации молекул азокрасителя перпендикулярно направлению поляризации активирующего излучения. В работе использовался ЖК-1289 ($\Delta n = 0.18$, НИОПИК, Россия).

Формирование анизотропии ориентации молекул азокрасителя реализовывалось по голографической схеме Лейта-Упатниекса (рис. 1) ортогональными линейными и круговыми поляризациями в сигнальном и опорном пучках на длине волны генерации аргонового лазера 488 нм. Экспонирование ЖК-элемента проводилось в собранном виде. В данных условиях активации на поверхностях плёнок азокрасителя создавались условия микроструктурированной периодической ориентации директора и при заполнении ячеек жидким кристаллом оптические элементы приобретали свойства анизотропных дифракционных структур.



1 – аргоновый лазер (длина волны 488 нм); 2 – светоделительный кубик; 3, 4 – зеркала; 5, 6 – фазовые пластинки $\lambda/2$ (для голографической записи) и $\lambda/4$ (для поляризационной голографической записи); 7 – фазовая пластинка для записи оптического вихря; 8 – ячейка; 9 – He-Ne лазер (длина волны 632.8 нм); 10 – фотоприемник

Рис. 1. Схема экспериментальной установки для голографической записи дифракционных решеток в тонких азополимерных пленках

2. Результаты и обсуждение

Экспериментально установлена оптимальная экспозиционная доза (равная 0.24 Дж) экспонирования световыми пучками (период интерференционной картины $\Lambda = 6.5$ мкм) мощностью 3–5 мВт плёнок азокрасителя, обеспечивающая максимальное значение дифракционной эффективности для ± 1 порядков дифракции ($\eta_1 = 6.3$ %).

С помощью оптимизированного метода проведена оценка пространственного разрешения регистрирующей среды. Методом голографической записи вертикально поляризованными световыми пучками создали ячейку с дифракционной ЖК-решёткой с периодом $\Lambda = 1$ мкм (меньше толщины ЖК-слоя в 7 раз). Наблюдалось уменьшение максимального значения дифракционной эффективности первых порядков дифракции ($\eta_1 = 1.4$ %) при уменьшении пространственного периода дифракционной структуры. Таким образом, уменьшение периода голографической записи не позволило создать качественную модуляцию анизотропии ЖК-слоя.

На основе разработанной технологии при использовании ортогональных циркулярных пучков изготовлена электрически управляемая дифракционная (с периодом $\Lambda = 2.5$ мкм при отсутствии управляющего напряжения) ЖК-ячейка с вилочной дислокацией штрихов для формирования оптических вихрей с величиной топологического заряда $|l| = 1$ в первых порядках дифракции. Для формирования необходимой топологии штриха формируемой решетки поляризации в ЖК-слое в качестве предметного пучка использовался фазовый сингулярный пучок с топологическим зарядом $|l| = 1$.

На рис. 2 представлена микрофотография зарегистрированной интерференционной картины оптического вихря с топологическим зарядом $|l| = 1$ (первый порядок дифракции) с плоской когерентной волной (интерферометр Маха-Цендера). В результате когерентного сложения сингулярного светового пучка с плоской когерентной волной образовывалась характерная вилка. Количество её разветвлений определяет абсолютную величину топологического заряда $|l|$.

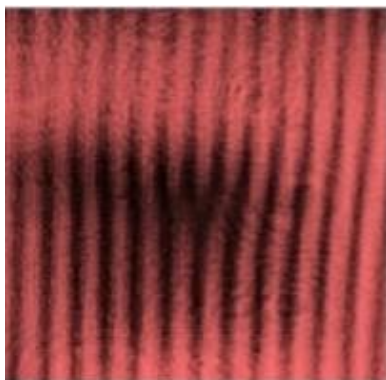


Рис. 2. Микрофотография картины интерференции плоской волны и сингулярного светового пучка с топологическим зарядом $|l| = 1$

Методом оптической интерферометрии экспериментально исследована пространственная структура формируемых сингулярных световых пучков в направлении первых порядков дифракции (рис. 3) в условиях воздействия низкочастотного

напряжения в диапазоне 0–10 В. Установлено сохранение профилей распределения интенсивности пучков (пространственная устойчивость формируемых оптических вихрей).

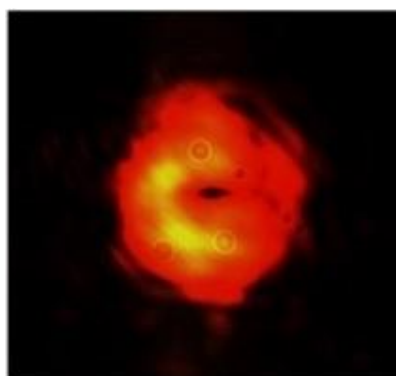


Рис. 3. Микрофотография распределения интенсивности оптического вихря в 1 порядке дифракции

Заключение

Проведённые исследования демонстрируют перспективность предложенной технологии создания пространственно-структурированной поверхностной анизотропии в ЖК-ячейках поляризационно-голографическим методом для разработки и изготовления дифракционных ЖК-элементов, осуществляющих фазово-поляризационное преобразование световых пучков.

Библиографические ссылки

1. Zuo K. A Review of Two-Dimensional Liquid Crystal Polarization Gratings / K. Zuo, Y. Shi, D. Luo // *Crystals*. 2021. Vol. 11, iss. 9. P. 1015–1030.
2. Electrically Tunable Fresnel Lens in Twisted-Nematic Liquid Crystals Fabricated by a Sagnac Interferometer / B-Y. Huang [et al.] // *Polymers*. 2019. Vol.11, iss. 9. P. 1448–1457.
3. Holographic binary grating liquid crystal cells fabricated by one-step exposure of photocrosslinkable polymer liquid crystalline alignment substrates to a polarization interference ultraviolet beam / K. Kawai [et al.] // *Appl. Opt.* 2015. Vol. 54, iss. 19. P. 6010–6018.
4. Tunable Polarization Gratings Based on Nematic Liquid Crystal Mixtures Photoaligned with Azo Polymer-Coated Substrates. / M. Nieborek [et al.] // *Crystals*. 2020. Vol. 10, iss. 9. P. 768–779.
5. Rutkowska K. A., Kozanecka-Szmigiel A. Design of Tunable Holographic Liquid Crystalline Diffraction Gratings // *Sensors*. 2020. Vol. 20, iss. 23. P. 6789–6801.
6. Widely Tunable Optical Vortex Array Generator Based on Grid Patterned Liquid Crystal Cell / D. Lee [et al.]// *Adv. Optical Mater.* 2020. 2001604.
7. Chigrinov V. G. Photoalignment of Liquid Crystalline Materials: Physics and Applications. / V. G. Chigrinov, V. M. Kozenkov, H.-S. Kwok. Chichester: John Wiley & Sons. 2008. P. 248.
8. Конишина Е. А. Оптика жидкокристаллических сред. СПб: «СПб НИУ ИТМО», 2012. С. 128.
9. Influence of Methyl Substituents on Azo-Dye Photoalignment in Thin Films / V. S. Mikulich [et al.] // *Appl. Spectr.* 2016. Vol. 83, iss.1. P. 131–137.