

УДК 544.25; 678.7

Оптические элементы с геометрической фазой на основе полимеризуемых жидких кристаллов для AR и VR

Гейвандов Артур Рубенович^(*)

ageivandov@yandex.ru

SPIN-код: 5183-9263

Касьянова Ирина Валерьевна

kasiridum@gmail.com

Симдянкин Иван Владимирович

simdyankinivan@mail.ru

Отделение «Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова», Курчатовский комплекс кристаллографии и фотоники НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Аннотация. В последние годы опубликовано множество успешных примеров использования жидкокристаллических (ЖК) полимеров для создания линз и решеток с геометрической фазой. В отличие от амплитудной модуляции волнового фронта падающего света, геометрическая фазовая модуляция в сочетании с высоким двулучепреломлением ЖК материалов позволяет создавать высокоэффективные дифракционные оптические элементы (ДОЭ) толщиной от одного до нескольких микрометров. ЖК-ДОЭ демонстрируют уникальные спектральные и поляризационные характеристики. В частности, с помощью многослойной конструкции удается реализовать переключатель поляризации между двумя каналами, что является перспективным методом перенастройки оптических схем AR-дисплеев. В докладе представлен обзор современного состояния технологии изготовления ЖК-ДОЭ с геометрической фазовой модуляцией и ее характеристик. Обсуждаются возможные применения ЖК-полимеров для создания ахроматических и узкополосных линз, высокоэффективных поляризационно-селективных дифракционных решеток. Оцениваются перспективы использования новых ЖК-ДОЭ в областях дополненной и виртуальной реальности.

Ключевые слова: дифракционная оптика, жидкие кристаллы, ДОЭ, дифракционная линза, дифракционная решетка

Optical elements with geometric phase based on polymerizable liquid crystals for AR and VR

Geivandov Artur Rubenovich

ageivandov@yandex.ru

SPIN-code: 5183-9263

Kasyanova Irina Valerievna

kasiridum@gmail.com

Simdyankin Ivan Vladimirovich

simdyankinivan@mail.ru

Shubnikov Institute of Crystallography branch, Kurchatov Complex of Crystallography and Photonics, NRC Kurchatov Institute, Moscow, Russia

Abstract. In recent years, many successful examples of using liquid crystal (LC) polymers to create lenses and gratings with a geometric phase have been published. In contrast to the amplitude modulation of the incident light wavefront, geometric phase modulation in combination with the large birefringence of LC materials allows creating highly efficient

diffractive optical elements (DOEs) with a thickness from one to a few micrometers. LC-DOEs demonstrate unique spectral and polarization characteristics. In particular, using a multilayer design, it is possible to implement a polarization switch between two channels, which is a promising method for reconfiguring the optical circuits of AR displays. The report provides an overview of the current state of the technology for manufacturing LC DOEs with geometric phase modulation and its characteristics. Possible applications of LC polymers for creating achromatic and narrow-band lenses, highly efficient polarization-selective diffraction gratings are discussed. Also, we evaluate prospects for using new LC-DOEs in augmented and virtual reality fields.

Keywords: diffraction optics, liquid crystals, DOE, diffraction lense, diffraction grating

Введение. В последние 20 лет стремительно развивается область науки и техники, связанная с компактными устройствами и дисплеями для VR/AR/MR. После взрывного успеха коммерческих трехмерных телевизоров в 2000-х, распространение 3D-устройств несколько замедлилось, и новый скачок интереса к трехмерным технологиям эксперты связывают с появлением компактных, легких, удобных в повседневной жизни и коммерчески доступных носимых очков дополненной реальности с высоким качеством изображения. При этом рынок AR и VR устройств в 2024 году оценивается в 78 млрд долл. США ежегодным ростом на 25–30 % [1, 2].

Один из вариантов дизайна AR-очков заключается в использовании волноводного способа ввода и вывода проецируемого изображения, что можно реализовать при помощи высокоэффективных дифракционных решеток и линз. Один из способов записи таких ДОЭ основан на применении голографических полимеров, например Bayfol HX200. Однако они обладают малым двулучепреломлением, и толщина активного слоя составляет около 16 мкм, что негативно сказывается на угловых характеристиках ДОЭ.

С другой стороны, в последние 15 лет жидкокристаллические (ЖК) полимерные материалы [3] были успешно применены для создания ДОЭ с геометрической фазой [4]. Поскольку двулучепреломление ЖК материалов на порядок больше, чем у классических полимеров для голографии (например, поликарбоната), то для получения функциональных ЖК-ДОЭ достаточно слоя от 1 до 3 мкм. Это обстоятельство значительно увеличивает диапазон рабочих углов ЖК-ДОЭ и делает их перспективным для применения в AR устройствах.

Материалы и методы. Были разработаны ЖК-ДОЭ (решетки и линзы) на основе геометрической фазы по описанной ранее технологии [4–8]. В качестве ориентирующего слоя использовали дихроичный краситель *Бриллиантовый желтый* (BY, Sigma-Aldrich), который наносили на стеклянную подложку методом спин-коатинга из 1 вес. % раствора в диметилформамиде. Затем данный фотоориентант экспонировали в голографической схеме с одномодовым лазером Cobolt Twist 05-01 Series (номинальная мощность 200 мВт, длина волны 457 нм). Схема записи линзы описана в работе [5], решетки, при помощи двух пучков с ортогональными круговыми поляризация-

ми, — в [6]. После записи покрытие сушили на плитке при температуре 120 °С в течение 5 минут. Далее на поверхности фотоориентанта формировали упорядоченную пленку УФ-полимеризуемого ЖК мономера RM 257 (Qingdao QY Liquid Crystal Co.), который имеет $\Delta n = 0,179$ на длине волны 589 нм, методом спин-коатинга из 10 вес. % раствора в 1-метокси-2-пропанол ацетате. Затем с целью проведения радикальной полимеризации экспонировали образец УФ светом (UV LED Nichia NVSU233B D4 с длиной волны 365 нм, 1,5 Вт · 10) в атмосфере аргона в течение 40 секунд. Послойное нанесение ЖК-мономера повторяли до получения целевой толщины.

Обсуждение полученных результатов. Были разработаны различные ЖК-ДОЭ со следующими характеристиками. Дифракционные решетки для ввода излучения в волновод на различные спектральные диапазоны, аналогично описанным в работе [6], с эффективностью дифракции поляризованного света до 95 % (круговая поляризация). Ширина спектрального диапазона составляет от 80 до 100 нм в зависимости от центральной длины волны. Апертура составляет от 20×20 до 20×30 мм.

Дифракционные линзы, аналогично описанным в работе [8], с эффективностью дифракции поляризованного света до 90 %. Ширина спектрального диапазона составляет от 80 до 100 нм в зависимости от центральной длины волны. Апертура составляет до 20 мм.

Дифракционные линзы расширенного диапазона. Цвето-селективные линзы, аналогично описанным в работе [9], способные фокусировать в узком спектральном диапазоне, не влияя на другие части спектра. Данный вид линз позволяет эффективно корректировать хроматические аберрации.

Заключение. Разработанные ЖК-ДОЭ являются универсальным гибким инструментом для высокоэффективного ввода и вывода излучения в волноводной изобразительной оптике. Дальнейшее усовершенствование технологий записи и дублирования голограмм позволит наладить коммерческое применение ЖК-ДОЭ в волноводной оптике и устройствах дополненной и виртуальной реальности.

*Работа выполнена в рамках государственного задания
НИЦ «Курчатовский институт».*

Список источников

- [1] Augmented Reality Market by Offering, Technology, Device Type, Application – Global Forecast 2025-2030. URL: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5612873/> (дата обращения 17.04.2025).
- [2] Virtual Reality Market Report by Component, Type, Application, Technology, Regions and Company Analysis 2025-2033. URL: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5923620/> (дата обращения 17.04.2025).
- [3] Liu D., Broer D.J. Liquid Crystal Polymer Networks: Preparation, Properties, and Applications of Films with Patterned Molecular Alignment. *Langmuir*, 2014, vol. 30, pp. 13499–13509. <https://doi.org/10.1021/la500454d>

- [4] Xiang X., Kim J., Escuti M. J. Bragg polarization gratings for wide angular bandwidth and high efficiency at steep deflection angles. *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, art. no. 7202. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25535-0>
- [5] Luo Z., Li Y., Semmen J., Rao Y., Wu S.-T. Achromatic diffractive liquid-crystal optics for virtual reality displays. *Light: Science & Applications*, 2023, vol. 12, art. no. 230. <https://doi.org/10.1038/s41377-023-01254-8>
- [6] Weng Y., Zhang Y., Cui J., Liu A., Shen Z. Li X., Wang B. Liquid-crystal-based polarization volume grating applied for full-color waveguide displays. *Optics Letters*, 2018, vol. 43, is. 23, pp. 5773–5776. <https://doi.org/10.1364/OL.43.005773>
- [7] Oh C., Escuti M.J. Achromatic diffraction from polarization gratings with high efficiency. *Optics Letters*, 2008, vol. 33, is. 20, pp. 2287–2289. <https://doi.org/10.1364/OL.33.002287>
- [8] Kim J., Li Y., Miskiewicz M.N., Oh C., Kudenov M.W., Escuti M.J. Fabrication of ideal geometric-phase holograms with arbitrary wavefronts. *Optica*, 2015, vol. 2, is. 11, pp. 958–964. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.2.000958>
- [9] Li L., Shi S., Kim J., Escuti M.J. Color-selective geometric-phase lenses for focusing and imaging based on liquid crystal polymer films. *Optics Express*, 2022, vol. 30, art. no. 2487. <https://doi.org/10.1364/OE.444578>