

Электрически контролируемые жидкокристаллические элементы для поляризационно-фазового преобразования световых полей

Е. А. Мельникова

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Разработаны и созданы электрически управляемые жидкокристаллические (ЖК) элементы, формирующие сингулярные световые пучки. Исследованы электрооптические и дифракционные характеристики разработанных элементов и продемонстрирована возможность контролируемого фазово-поляризационного преобразования световых полей на их основе.

Ключевые слова: управляемая дифракция, жидкий кристалл, сингулярные световые пучки, Q-пластинки.

Цитирование: Мельникова, Е. А. Электрически контролируемые жидкокристаллические элементы для поляризационно-фазового преобразования световых полей / Е. А. Мельникова // НОЛОEXPO 2021 : XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — С. 264–268.

В настоящее время большой научный интерес привлекают оптические сингулярные пучки, которые успешно применяются для решения задач, связанных с лазерным манипулированием микрообъектами, оптической передачей и обработкой информации, технологиями лазерной обработки материалов, микроскопией высокого разрешения, астрономией и т. д. В этой связи актуальным вопросом является поиск методов генерации оптических вихрей [1, 2] и возможности их применения в различных научных и технических приложениях [3, 4].

В работе на основе метода фотоориентации директора нематического ЖК [5] созданы анизотропные электрически управляемые дифракционные элементы, представляющее собой периодическое ($\Lambda = 60$ мкм) чередование в слое нематика твист и планарных ЖК доменов. Начальная ориентация ЖК слоя задавалась посредством экспонирования фоториентирующего покрытия через маску, амплитудный профиль которой соответствовал рассчитанной картине интерференции когерентной плоской волны с вихревым пучком с топологическим зарядом $l = 4$. Электропроводящий прозрачный слой, входящий в конструктив жидкокристаллического элемента, обеспечивал возможность осуществлять электрическое управление дифракционной эффективностью ЖК элемента. Толщина ЖК слоя составляла $d = 20$ мкм, величина оптической анизотропии $\Delta n = 0,18$. Микрофотографии маски-транспаранта и ЖК дифракционных элементов в скрещенных поляризаторах при различных значениях управляющего напряжения представлены на рис. 1.

Как видно данных, представленных на рис. 1, использованная технология позволяет формировать дифракционную анизотропную ЖК структуру, точно повторяющую топологию маски-транспаранта. При этом величина амплитуды внешнего управляющего позволяет менять глубину модуляции показателя преломления ЖК слоя и управлять значением дифракционной эффективности ЖК элемента.

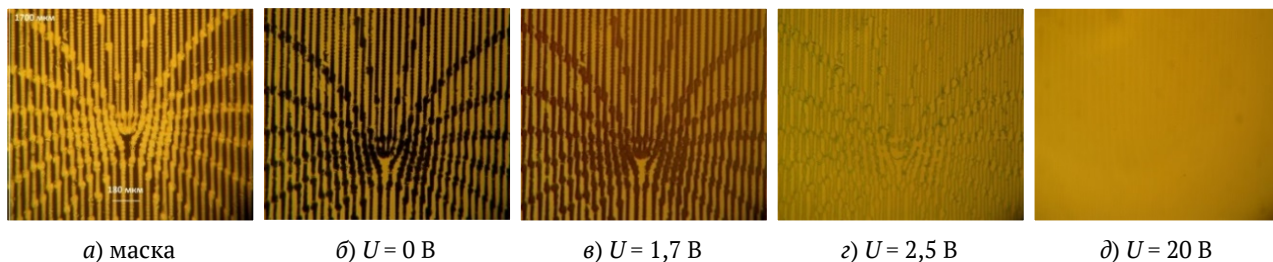


Рис. 1. Микрофотографии маски транспаранта (а) и фотографии ЖК дифракционных элементов при различных значениях управляющего напряжения (б–д) (поляризационный микроскоп)

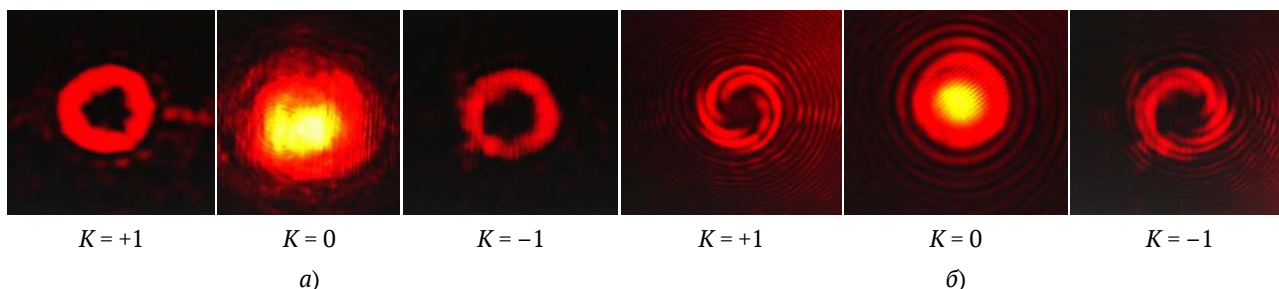


Рис. 2. Фотографии дифракционной картины излучения He-Ne лазера (а) и результатов интерференционного сложения пучков K -ого порядка дифракции с когерентной сферической волной (б, интерферометр Маха – Цандера)

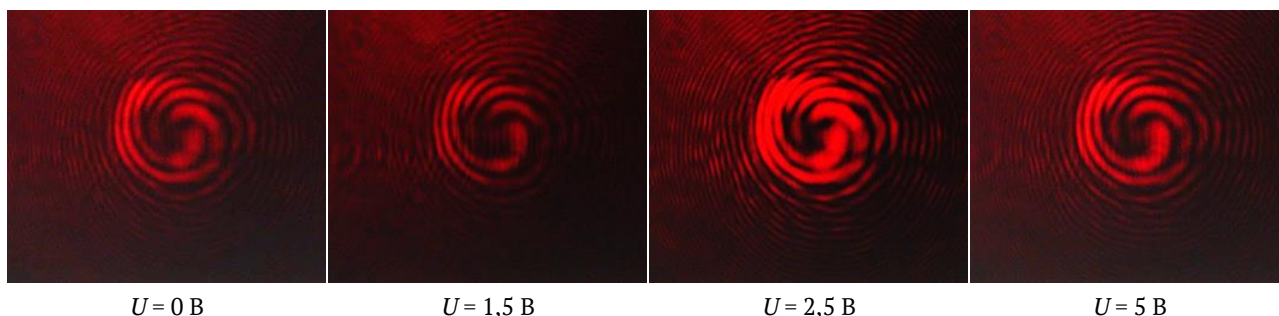


Рис. 3. Картины интерференции пучка дифракции $K = -1$ порядка дифракции со сферической когерентной волной при различных управляющих напряжениях на ЖК элементе

На рис. 2 представлены фотографии картины дифракции излучения He-Ne лазера (линейная поляризация) на созданном элементе (а) и результат интерференционного сложения пучков K -ого порядка дифракции с когерентной сферической волной (б) (интерферометр Маха – Цандера).

Как видно из результатов исследования, представленных на рис. 2, в направлении 0-ого порядка дифракции распространяется волна с плоским волновым фронтом, а в направлениях $K = \pm 1$ — оптические вихри с топологическими зарядами $l = \pm 4$.

Устойчивость возбуждаемых вихревых пучков подтверждается данными, представленными на рис. 3, где представлены картины интерференции пучка дифракции $K = -1$ порядка со сферической когерентной волной при различных управляющих напряжениях на элементе.

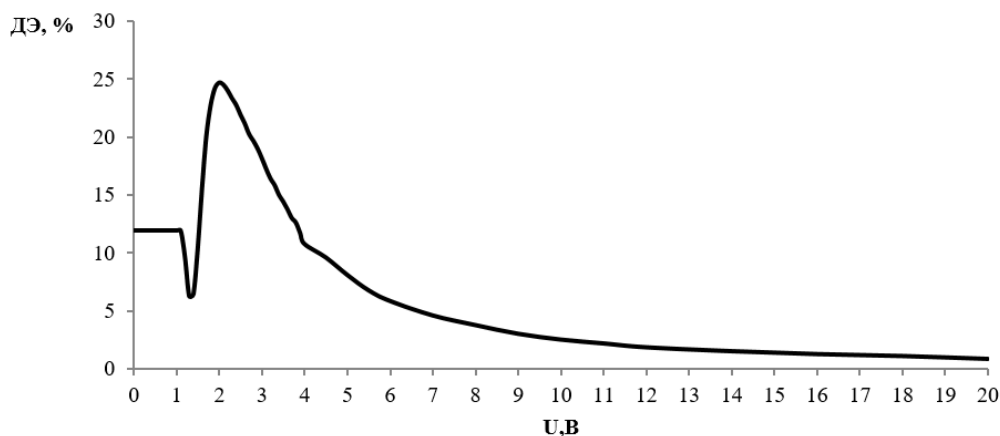


Рис. 4. Зависимость дифракционной эффективности от управляющего напряжения

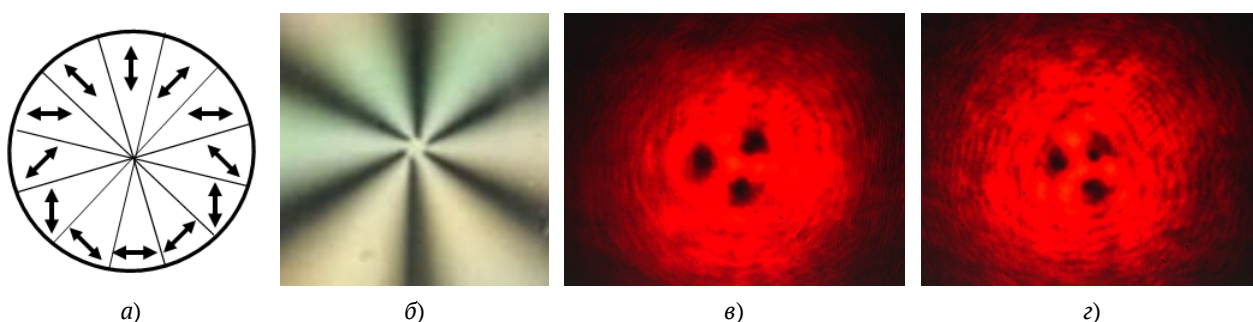


Рис. 5. Q-пластинка для генерации трех сингулярных пучков

Кроме того, как показали результаты исследований, возбуждаемые вихревые пучки остаются устойчивыми при их распространении на расстояния в пределах 3 м.

Зависимость дифракционной эффективности от внешнего управляющего напряжения представлена на рис. 4. Начальное значение дифракционной эффективности ЖК элемента соответствует величине порядка 10–12%. Действие управляющего напряжения приводит к переориентации директора ЖК и изменению величины фазового набегания при прохождении света через дифракционный анизотропный элемент. При этом дифракционная эффективность немонотонно изменяется, выходя на максимальное значение 25%. Дальнейшее увеличение внешнего напряжения приводит к переориентации всего объема ЖК слоя, и как следствие, к исчезновению дифракционной структуры ($\Delta n = 0$).

В работе методом фотоориентации созданы электрически управляемые жидкокристаллические Q-пластинки [6] с топологическим зарядом $q = 1,5$ в схеме несцентрированной записи. На примере созданного элемента продемонстрирована возможность создания Q-пластинок для генерации светового пучка с заданным количеством оптических сингулярностей с топологическим зарядом $l = 1$. На рис. 4 представлена информация, включающая топологию ориентации директора ЖК в разработанном элементе (а), фотографию ЖК элемента в скрещенных поляризаторах (б), фотографию распределения интенсивности в поляризационном сингулярном пучке (в) и фотографию сечения оптического вихря (г).

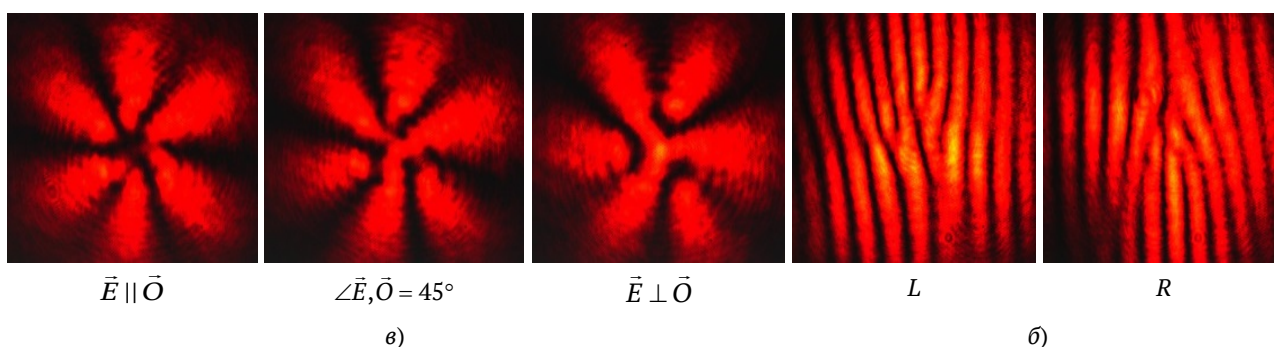


Рис. 6. Результаты экспериментального исследования возможности управления фазово-поляризационными характеристиками лазерного излучения

Поляризационное и фазовое преобразование лазерного излучения, приводящее к формированию сингулярных оптических пучков, реализуется при подаче на ЖК элемент внешнего управляющего напряжения. Формирование оптических сингулярностей происходит при амплитудах управляющего напряжения, обеспечивающих полуволновую фазовую задержку между обыкновенной и необыкновенной волнами в ЖК слое.

На рис. 6 представлены результаты экспериментального исследования возможности управления фазово-поляризационными характеристиками лазерного излучения на основе разработанных ЖК элементов. Рис. 6а иллюстрирует возможность преобразования поляризации излучения при прохождении Q -пластинки линейно поляризованного \vec{E} (S -мода) лазерного излучения при различных состояниях ориентации оси анализатора \vec{O} на выходе ЖК элемента. На рис. 6б представлены картины интерференции преобразованной циркулярно поляризованной плоской волны (левой L и правой R) с когерентной плоской волной, подтверждающие формирование трех фазовых дислокаций с зарядом $l = 1$ на волновом фронте светового пучка.

Таким образом, разработанные ЖК элементы позволяют осуществлять контролируемое преобразование поляризации и/или фазы световой волны и возбуждать сингулярные оптические пучки с заданной топологией волнового фронта. Предложенная и апробированная технология создания управляемых ЖК элементов продемонстрировала хорошую эффективность, что подтверждается устойчивостью топологии фазового фронта и поляризации сингулярных пучков.

Список источников

- [1] **Shen, Z.** [Generation of Optical Vortices with Polarization-Insensitive Metasurfaces](#) / Z. Shen, R. Li, Y. Z. Xue, Z. Y. Qiu, Z. Y. Xiang, J. Y. Zhou, B. F. Zhang // IEEE Photonics Journal. — 2020. — Vol. 12. — № 4. — P. 4601010. — 10 p.
- [2] **Lee, D.** [Widely Tunable Optical Vortex Array Generator Based on Grid Patterned Liquid Crystal Cell](#) / D. Lee, H. Lee, L. K. Migara, K. Kwak, V. P. Panov, J. Song // Advanced Optical Materials. — 2021. — Vol. 9. — P. 2001604. — 10 p.
- [3] **Takahashi, F.** [Picosecond optical vortex pulse illumination forms a monocrystalline silicon needle](#) / F. Takahashi, K. Miyamoto, H. Hidai, K. Yamane, R. Morita, T. Omatsu // Scientific Reports. — 2016. — Vol. 6. — P. 21738. — 10 p.

- [4] **Yang, L.** [Direct laser writing of complex microtubes using femtosecond vortex beams](#) / L. Yang, D. Qian, C. Xin, Z. Hu, S. Ji, D. Wu, Y. Hu, J. Li, W. Huang, J. Chu // Applied Physics Letters. — 2017. — Vol. 110. — № 22. — P. 221103. — 5 p.
- [5] **Mikulich, V. S.** [Influence of Methyl Substituents on Azo-Dye Photoalignment in Thin Films](#) / V. S. Mikulich, An. A. Murauski, Al. A. Muravsky, V. E. Agabekov // Journal of Applied Spectroscopy. — 2016. — Vol. 83. — № 1. — P. 115–120.
- [6] **Marrucci, L.** [Spin-to-orbital conversion of the angular momentum of light and its classical and quantum applications](#) / L. Marrucci, E. Karimi, S. Slussarenko, B. Piccirillo, E. Santamato, E. Nagali, F. Sciarrino // Journal of Optics. — 2011. — Vol. 13. — P. 064001. — 13 p.