

# Прямая запись микроструктур в пленках карбазолсодержащего азополимера структурированными лазерными пучками

*Н. А. Ивлиев, А. П. Порфирьев, С. Н. Хонина*

Институт систем обработки изображений РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника»  
РАН, Самара, Россия  
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва,  
Самара, Россия

Представлен подход к формированию микрорельефа на поверхности карбазолсодержащего азополимера структурированными лазерными пучками. Рассчитаны распределения сил рассеяния и «поляризационных» неградиентных сил, действующих при этом на поверхность материала. Проведен сравнительный анализ рассчитанных распределений и экспериментальных структур, полученных методом прямой записи. Анализ показал, что структура распределения интенсивности продольной компоненты электрического поля очень хорошо повторяют форму сформированного рельефа. Таким образом, распределение интенсивности продольной компоненты можно использовать в качестве аппроксимирующей функции профиля формируемых структур.

*Ключевые слова:* прямая запись, азополимеры, микроструктуры, структурированные лазерные пучки.

*Цитирование:* **Ивлиев, Н. А.** Прямая запись микроструктур в пленках карбазолсодержащего азополимера структурированными лазерными пучками / Н. А. Ивлиев, А. П. Порфирьев, С. Н. Хонина // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 84–87.

## Введение

Исследования в области формирования и обнаружения структурированных световых пучков оказали существенное влияние на множество разработок в области оптических коммуникаций [1–3], оптического зондирования [4], манипулирования [5, 6], квантовой обработки информации [7]. При этом пучки с пространственными распределениями вдоль направления прохождения занимают особое место среди структурированных пучков с трехмерным распределением. Хотя методы создания таких пучков хорошо известны, обнаружение продольной составляющей электрического поля остается сложной экспериментальной задачей [8].

Одним из решений указанной проблемы является использование анизотропных материалов, чувствительных к ориентации поляризации освещающего излучения, например, азобензолсодержащих полимеров (азополимеров). Реакция фотоизомеризации молекул азобензола вызывает массоперенос материала азополимера как на мезо-, так и на макроуровне. При освещении поляризованным светом после поглощения света молекулы азобензола перераспределяются перпендикулярно поляризации света. Массоперенос азополимера, вызванный продольной составляющей света, был продемонстрирован в работах [9, 10], однако представленные там объяснения протекающих процессов противоречивы. К тому же, применяемый материал не позволяет различать поперечную и продольную составляющие, поэтому в настоящей работе предлагается использовать тонкие пленки азополимера,

содержащие карбазол [11], для непосредственной визуализации продольного компонента цилиндрических векторных пучков (ЦВП).

## 1. Расчет характеристик

Ключевое влияние продольной компоненты поля на профили микроструктур, формирующихся на поверхности тонких пленок карбазолсодержащих азополимеров, подтверждается результатами интерференционной регистрации одномерных дифракционных решеток, представленных для интерферирующих лазерных лучей с различными комбинациями состояний поляризации [12].

Для полученных наглядного представления особенностей взаимодействия ЦВП с азополимером были рассчитаны распределения следующих характеристик рассматриваемых пучков: сила рассеяния  $F_s$  (пропорциональна вектору Пойнтинга), градиентная сила  $F_g$ , «поляризационная» неградиентная сила  $F_p$ , дивергенция поляризационной силы  $h_p$ :

$$F_s \propto \text{Re}(\mathbf{E}^* \times \mathbf{H}), \quad (1)$$

$$F_g \propto \nabla |\mathbf{E}|^2, \quad (2)$$

$$F_p \propto (\mathbf{E}^* \cdot \nabla) \mathbf{E}, \quad (3)$$

$$h_p \propto \text{Re}[\nabla F_p], \quad (4)$$

Численные расчеты распределений полной интенсивности в фокальной плоскости и распределений различных компонент электрического поля исследуемых лазерных пучков проводились с использованием уравнения Ричардса-Вольфа [13].

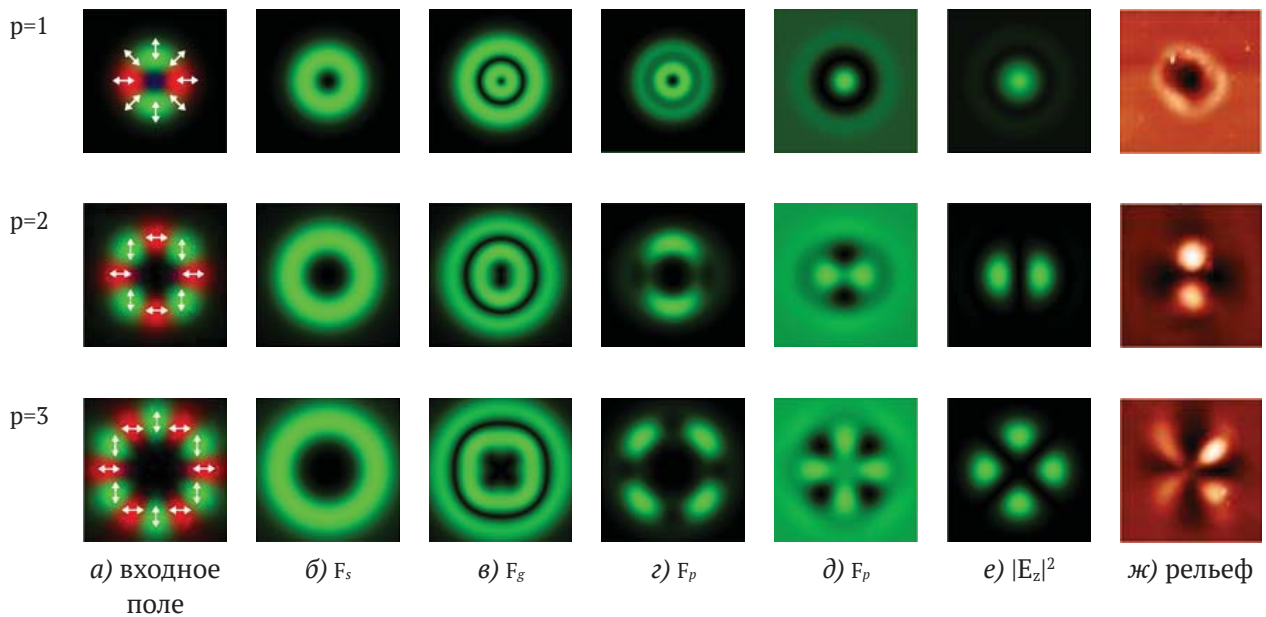
## 2. Анализ результатов

Для реализации прямой лазерной записи микроструктур на поверхности тонких пленок азополимеров, содержащих карбазол, была использована оптическая установка, использующая пространственный модулятор света и подробно описанная в работе [14].

Параметры микрорельефа измерялись с помощью сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) Solver PRO-M, NT-MDT в полуконтактном режиме.

Сравнение влияния характеристик светового поля, определяемых уравнениями. (1)-(4) на структуру формируемого рельефа в случае ЦВП  $p$ -го порядка представлено на Рис. 1.

Как видно из рис. 1, характеристика  $\text{Re}[\nabla F_p]$  очень хорошо аппроксимирует структуру формируемого рельефа, при этом структура продольной составляющей  $|E_z|^2$  также близка к структуре микрорельефа, сформированного в тонкой азополимерной пленке. Поскольку рассчитать распределение  $|E_z|^2$  гораздо проще, чем  $\text{Re}[\nabla F_p]$ , распределение интенсивности продольной компоненты можно использовать в качестве ожидаемого профиля формируемой структуры.



**Рис. 1.** Сравнение влияния характеристик светового поля, определяемых уравнениями (1)–(4) на структуру формируемого рельефа в случае ЦВП  $p$ -го порядка

### Заключение

Приведенный пример демонстрирует, что карбазолсодержащие азополимеры являются подходящим материалом для использования продольной составляющей электрического поля для создавать микроструктуры с необычной морфологией, отличной от полного распределения интенсивности падающего лазерного луча. В частности, предложен подход к записи и обнаружению продольной компоненты поля в векторных цилиндрических пучках.

### Благодарность

Данная работа была выполнена под эгидой программы «ERA.Net RUS plus» при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-52-76021.

### Список источников

- [1] **Yang, C.** Beam-holding property analysis of the perfect optical vortex beam transmitting in atmospheric turbulence / C. Yang, Y. Lan, X. Jiang, H. Long, J. Hou, S. Chen // Opt. Commun. — 2020. — Vol. 472. — 125879. — DOI: 10.1016/j.optcom.2020.125879.
- [2] **Wang, J.** Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing / J. Wang, J.Y. Yang, I. M. Fazal, N. Ahmed, Yan Y, Huang H, et al. // Nat. Photon. — 2012. — Vol. 6. — P. 488–496. — DOI: 10.1038/nphoton.2012.138.
- [3] **Zhu, L.** Free-space data-carrying bendable light communications / L. Zhu, AD. Wang, J. Wang // Sci Rep. — 2019. — Vol. 9. — 14969. — DOI:10.1038/s41598-019-51496-z.
- [4] **Fang, L.** Sharing a common origin between the rotational and linear Doppler effects / L. Fang, M.J. Padgett, J. Wang // Laser Photon Rev. — 2017. — Vol. 11. — 1700183. — DOI: 10.1002/lpor.201700183.
- [5] **Padgett, M.** Tweezers with a twist / M. Padgett, R. Bowman // Nat. Photonics. — 2011. — Vol. 5. — P. 343–348. — DOI:10.1038/nphoton.2011.81.
- [6] **Bobkova, V.** Optical grinder: sorting of trapped particles by orbital angular momentum / V. Bobkova, J. Stegemann, R. Droop, E. Otte, C. Denz // Opt. Express. — 2021. — Vol. 29. — P. 12967–12975. — DOI:10.1364/OE.419876.

- [7] **Yoshida, M.** Subtraction imaging by the combination of higher-order vector beams for enhanced spatial resolution / M. Yoshida, Y. Kozawa, S. Sato // *Opt Lett.* — 2019. — Vol. 44. — P. 883–886. — DOI:10.1364/OL.44.000883.
- [8] **Wang, J.** Generation and Detection of Structured Light: A Review / J. Wang, Y. Liang // *A Review. Front. Phys.* — 2021. — Vol. 9. — 688284. — DOI: 10.3389/fphy.2021.688284.
- [9] **Sekkat, Z.** Light-induced orientation in a high glass transition temperature polyimide with polar azo dyes in the side chain / Z. Sekkat, J. Wood, E.F. Aust // *JOSA B.* — 1996. — Vol. 13. — P. 1713–1724. — DOI:10.1364/JOSAB.13.001713.
- [10] **Sekkat, Z.** Pure photoorientation of azo dye in polyurethanes and quantification of orientation of spectrally overlapping isomers / Z. Sekkat, D. Yasumatsu, S. Kawata // *The J. Phys. Chem. B.* — 2002 — Vol. 106. — P. 12407–12417. — DOI:10.1021/jp020132+.
- [11] **Cazac, V.** Polarization holographic recording of vortex diffractive optical elements on azopolymer thin films and 3D analysis via phase-shifting digital holographic microscopy / V. Cazac, E. Achimova, V. Abashkin, A. Prisacar, C. Loshmanshii, A. Meshalkin, and K. Egiazarian // *Opt. Express.* — 2021. — Vol. 29. — P. 9217–9230. — DOI:10.1364/OE.415639.
- [12] **Meshalkin, A.** Carbazole-based azopolymers as media for polarization holographic recording / A. Meshalkin, C. Losmanshii1, A. Prisacar, E. Achimova, V. Abashkin, S. Pogrebnoi., F. Macaev // *Adv. Phys. Res.* — 2019. — Vol. 1. — P. 86–98.
- [13] **Kim, D. Y.** Laser-induced holographic surface relief gratings on nonlinear optical polymer films / D. Y. Kim, S. K. Tripathy, L. Li, J. Kumar // *Appl. Phys. Lett.* — 1995. — Vol. 66. — P. 1166–1168.
- [14] **Porfirev, A.** Writing and reading with the longitudinal component of light using carbazole-containing azopolymer thin films / A. Porfirev, S. Khonina, N. Ivliev, E. Achimova, A. Forbes // *Scientific Reports.* — 2022. — Vol. 12. — 3477 — DOI: 10.1038/s41598-022-07440-9.

## Direct recording of microstructures in carbazole-containing azopolymer films by structured laser beams

*N. A. Ivliev, A. P. Porfirev, S. N. Khonina*

Image Processing Systems Institute of the RAS — Branch of the FSRC «Crystallography and Photonics»  
of the RAS, Samara, Russia  
Samara National Research University, Samara, Russia

An approach to the formation of a microrelief on the surface of a carbazole-containing azopolymer by structured laser beams is presented. The distributions of scattering forces and "polarization" non-gradient forces acting on the surface of the material are calculated. A comparative analysis of the calculated distributions and experimental structures obtained by the direct recording method is carried out. The analysis showed that the structure of the distribution of the intensity of the longitudinal component of the electric field very well repeats the shape of the formed relief. Thus, the intensity distribution of the longitudinal component can be used as an approximating function of the profile of the formed structures.

*Keywords:* Direct recording, Azopolymers, Microstructures, Structured laser beams.