

Структурированный свет для лазерной обработки тонких азополимерных пленок

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

Институт систем обработки изображений РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника»
РАН, Самара, Россия

Мы представляем ряд примеров использования структурированных лазерных пучков для лазерной обработки тонких азополимерных пленок. Данный материал хорошо известен из-за его чувствительности к поляризации падающего излучения. Недавно были продемонстрированы уникальные возможности обработки таких материалов структурированным лазерным излучением с заданными распределениями амплитуды и поляризации. В данной работе представлены как численные, так и экспериментальные результаты, демонстрирующие возможности управления профилями формируемых микроструктур.

Ключевые слова: Структурированный свет, Азополимеры, Поляризация, Оптические вихри, Цилиндрические векторные пучки.

Цитирование: Порфирьев, А. П. Структурированный свет для лазерной обработки тонких азополимерных пленок / А. П. Порфирьев, С. Н. Хонина, Н. А. Ивлиев, Д. П. Порфирьев // NOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 115–118.

Введение

В последние годы для лазерной обработки материалов все чаще используются так называемые структурированные лазерные пучки со сложным распределением амплитуды, фазы и/или поляризации [1-5]. Эти лазерные пучки позволяют управлять морфологией структур, образующихся как на поверхности, так и в объеме различных материалов, как на нано-, так и на микроуровне. Структурированное по амплитуде и поляризации лазерное излучение активно используется при обработке поляризационно-чувствительных материалов – например, различных азополимеров [6]. Азополимеры являются перспективными оптически чувствительными материалами для динамических систем оптического преобразования и передачи сигналов, регистрации и хранения информации [7-9]. В данной работе представлены методы прямой лазерной обработки тонких пленок азополимеров на основе карбазола 9-(2,3-эпоксипропил)карбазола (ЭПК) и азокрасителя Disperse Orange 3 (DO3) и создания различных двух- и трехмерных микроструктур с использованием структурированных лазерных пучков и их суперпозиций. Продемонстрированные результаты показывают высокий потенциал использования структурированного лазерного луча для лазерной обработки поляризационно-чувствительных материалов и реализации высокопроизводительного изготовления дифракционных оптических элементов и метаповерхностей.

1. Обработка тонких пленок азоплимеров цилиндрическими векторными пучками высоких порядков

Для реализации прямой лазерной обработки тонких пленок карбазолсодержащих азополимеров с использованием структурированного лазерного излучения была использована оптическая схема на основе отражательного пространственного модулятора света (ПМС) HOLOEYE PLUTO VIS (см. рис. 1). Модулятор использовался для реализации фазовых масок дифракционных оптических элементов, формирующих заданные амплитудно-фазовые распределения. Для контроля поляризационного состояния формируемых лазерных пучков и преобразования линейной поляризации выходного лазерного излучения в круговую/эллиптическую поляризацию или цилиндрическую поляризацию высокого порядка использовались четвертьволновые пластины и q -пластинки первого и второго порядка, а также их комбинации (отмечены как элемент PE). Атомно-силовой микроскоп (АСМ) использовался для анализа профилей всех изготовленных микроструктур.

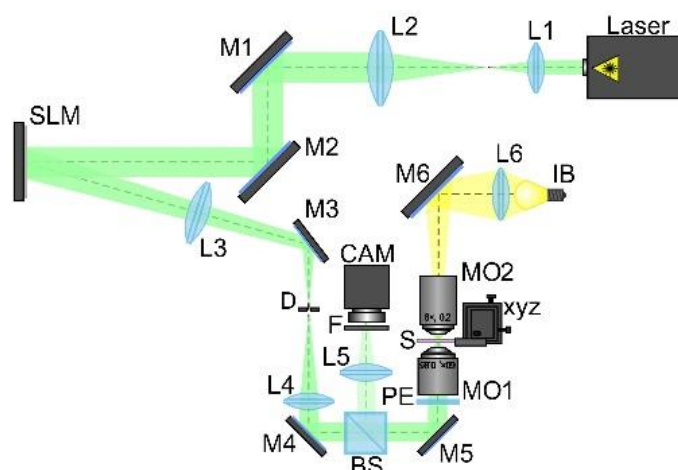


Рис. 1. Оптическая установка для лазерной обработки тонких азополимерных пленок

ЦВП представляют собой лазерные пучки с азимутальной симметрией не только в структуре поляризации, но в структуре поперечной интенсивности, сохраняющейся даже при фокусировке [10, 11]. Общая интенсивность сфокусированных ЦВП высоких порядков с учетом продольной составляющей электрического поля имеет некольцевую форму (см. рис. 2), что предсказывает формирование сложных микроструктур. В случае использования ЦВП для лазерной обработки тонких азополимерных пленок изготавливаемые микроструктуры представляют собой наборы чередующихся углублений и выступов, расположенных по окружности. Количество углублений и выступов равно количеству световых максимумов в распределении интенсивности продольной компоненты сфокусированного светового поля.

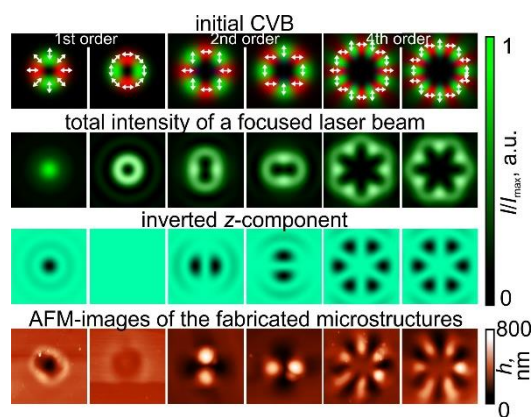


Рис. 2. Структурирование тонких азополимерных пленок с помощью ЦВП высоких порядков

2. Формирование мультиспиральных микроструктур

Хорошо известно, что соосная интерференция оптического вихревого пучка с топологическим зарядом m с Гауссовым пучком со сферическим волновым фронтом [12] приводит к формированию m -спирального распределения интенсивности. В данной работе мы использовали такие распределения интенсивности для обработки тонких азополимерных пленок и изготовления мультиспиральных микроструктур (см. рис. 3). Количество образующихся спиралей на поверхности используемых азополимерных тонких пленок и количество световых спиралей формируемых интерференционных картин, использованных для обработки, совпадают. Высота микроструктур находится в пределах от 150 нм в случае 5-спирального микрорельефа до 850 нм в случае 1-спирального микрорельефа.

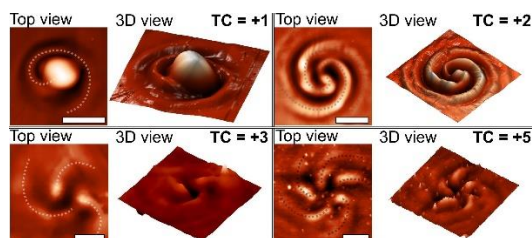


Рис. 3. Различные изготовленные мультиспиральные микроструктуры. Масштабная линейка 10 мкм

Заключение

Мы продемонстрировали несколько примеров использования структурированных лазерных пучков для лазерной обработки тонких азополимерных пленок на основе 9-(2,3-эпоксипропил)карбазол (ЭПК) и азокрасителя Disperse Orange 3 (DO3). Примеры включают двух- и трехмерные микроструктуры, которые можно использовать для формирования структурированного света (например, оптических вихревых лучей) на микроуровне.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-79-10007).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Völl, A.** Application specific intensity distributions for laser materials processing: tailoring the induced temperature profile / A. Völl, S. Vogt, R. Wester, J. Stollenwerk, P. Loosen // *Optics & Laser Technology*. – 2018. – Vol. 108. – P. 583-591.
- [2] **Porfirev, A.** Light-matter interaction empowered by orbital angular momentum: control of matter at the micro-and nanoscale / A. Porfirev, S. Khonina, A. Kuchmizhak // *Progress in Quantum Electronics*. – 2023. – Vol. 88. – P. 100459.
- [3] **Omatsu, T.** Twisted mass transport enabled by the angular momentum of light / T. Omatsu, K. Masuda, K. Miyamoto, K. Toyoda, N. Litchinitser, Y. Arita, K. Dholakia // *Journal of Nanophotonics*. – 2020. – Vol. 14. – P. 010901.
- [4] **Ni, J.** Three-dimensional chiral microstructures fabricated by structured optical vortices in isotropic material / J. Ni, C. Wang, C. Zhang, Y. Hu, L. Yang, Z. Lao, B. Xu, J. Li, D. Wu, J. Chu // *Light: Science and Applications*. – 2017. – Vol. 6. – P. e17011.
- [5] **Bonse, J.** Laser-induced periodic surface structures—a scientific evergreen / J. Bonse, S. Höhm, S. V. Kirner, A. Rosenfeld J. Krüger // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. – 2016. – Vol. 23. – P. 9000615.
- [6] **Priimagi, A.** Azopolymer-based micro-and nanopatterning for photonic applications / A. Priimagi, A. Shevchenko // *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*. – 2014. – Vol. 52. – P. 163–182.
- [7] **Sekkat, Z.** Laser nanofabrication in photoresists and azopolymers / Z. Sekkat, S. Kawata // *Laser & Photonics Reviews*. – 2014. – Vol. 8. – P. 1-26.
- [8] **Porfirev, A.** Writing and reading with the longitudinal component of light using carbazole-containing azopolymer thin films / A. Porfirev, S. Khonina, N. Ivliev, A. Meshalkin, E. Achimova, A. Forbes // *Scientific Reports*. – 2022. – Vol. 12. – P. 3477.
- [9] **Grosjean, T.** Photopolymers as vectorial sensors of the electric field / T. Grosjean, D. Courjon // *Optics Express*. – 2006. – Vol. 14. – №. 6. – P. 2203-2210.
- [10] **Zhan, Q.** Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications / Q. Zhan // *Advances in Optics and Photonics*. – 2009. – Vol. 1. – №. 1. – P. 1-57.
- [11] **Khonina, S. N.** Simple phase optical elements for narrowing of a focal spot in high numerical-aperture conditions / S. N. Khonina // *Optical Engineering*. – 2013. – Vol. 52. – №. 9. – P. 091711.
- [12] **Furhapter, S.** Spiral interferometry / S. Furhapter, A. Jesacher, S. Bernet, M. Ritsch-Marte // *Optics Letters*. – 2015. – Vol. 15. – P. 1953–1958.

Structured light for laser processing of thin azopolymer films

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

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

We present a few examples of the use of structured laser beams for laser processing of thin azopolymer films. This material is well known due to its sensitivity to the polarization of incident radiation. Recently, the unique possibilities of processing such materials with structured laser beams with specified amplitude and polarization distributions have been demonstrated. This paper presents both numerical and experimental results demonstrating the possibilities of controlling the profiles of formed microstructures.

Keywords: Structured light, Azopolymers, Polarization, Optical vortices, Cylindrical vector beams.