

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОИНДУЦИРОВАННОГО ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ КАРБАЗОЛСОДЕРЖАЩЕГО АЗОПОЛИМЕРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ ОСВЕЩАЮЩЕГО ПУЧКА

В.В. Подлипов^{1,2}, Н.А. Ивлиев^{1,2}, С.Н. Хонина^{1,2}, Д.В. Нестеренко^{1,2}, В.С. Васильев^{1,2}, Е.А. Акимова³

¹ ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151,

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34,

³ Институт прикладной физики Академии Наук Молдовы, г. Кишинев, Республика Молдова

Аннотация

В настоящей работе описан синтез и измерены оптические характеристики азополимера на основе поли-N-эпоксипропилкарбазола и хромофора 4-(4-нитрофенилазо)-анилина. Найдены закономерности в формировании поверхностных микроструктур под действием Гауссова пучка, сфокусированного на плёнке синтезированного полимера. Продемонстрировано анизотропное формирование поверхностных микроструктур при линейной поляризации лазерного излучения. Изучена зависимость образования микроструктуры от плотности мощности пучка, а также экспериментально исследованы нелинейные оптические эффекты, возникающие в структуре азополимера под действием высокоинтенсивного лазерного луча. Описаны нелинейные эффекты, возникающие при образовании микроструктур при помощи пучков с линейной и эллиптической поляризацией.

Ключевые слова: оптическая запись материалов, азополимер, фотоизомеризация, поверхностные наноструктуры, пучок Гаусса.

Цитирование: Подлипов, В.В. Исследование фотоиндуцированного формирования микроструктур на поверхности карбазолсодержащего азополимера в зависимости от плотности мощности освещающего пучка / В.В. Подлипов, Н.А. Ивлиев, С.Н. Хонина, Д.В. Нестеренко, В.С. Васильев, Е.А. Акимова // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 5. – С. 779-785. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-5-779-785.

Введение

Структурированные лазерные пучки [1], в том числе с вихревой фазовой сингулярностью, широко используются в различных областях оптики, например, в микроскопии [2–4], обработке материалов [5–8] и оптическом микроманипулировании [9–11]. Новые явления и свойства поля, наблюдаемые благодаря внедрению таких пучков, характеризуются более высокой производительностью по сравнению с классическими типами пучков. Структурированные пучки могут быть сформированы с использованием пространственных модуляторов света (ПМС) [12–14], которые обеспечивают динамическое формирование поля в эксперименте. Однако сравнительно большой размер пикселя в ПМС ограничивает пространственное разрешение формы поля. Независимость от разрешения обеспечивается при использовании анизотропных кристаллов [15–17]. Наиболее эффективное формирование пучков с заданным фазовым распределением достигается с помощью дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [18]. Однако ДОЭ, как пассивные оптические компоненты, не поддерживают динамическое изменение оптических характеристик формы пучка.

Проблема создания пространственного и временного распределения электрического поля без привязки к пиксельной сетке может быть решена путём динамического формирования рельефа поверхности в полимерных плёнках полиметакрилата, легированных азокрасителем DR-1 (Sigma-Aldrich) [19, 20].

Фотоизомеризация молекул азокрасителя по энергии поглощённого света приводит к фотоиндуцированному двулучепреломлению и дихроизму [21], которые делают азомолекулы с динамически изменяющимися свойствами. Сочетание вышеупомянутых особенностей материалов и свойств пучка может привести к созданию новых оптических устройств, таких, как перезаписываемая оптическая память [22], голографическая микроскопия с высоким разрешением [23], системы на основе полного оптического управления [24]. Это актуализирует исследования в области синтеза и изучения свойств тонких плёнок азополимера.

В работе [25] было представлено исследование голографической записи поверхности рельефа решёток в новом азополимере на основе карбазола. Указанный полимер продемонстрировал высокую эффективность в качестве регистрирующей среды.

В данной работе экспериментально изучено фотоиндуцированное формирование одиночных микроструктур в тонких плёнках карбазолсодержащего азополимера с использованием Гауссовых пучков линейной и эллиптической поляризацией.

Методы и материалы

Образцами для экспериментов являются подложки стекла типа К8 с нанесённым на их поверхность азополимером, полученным путём взаимодействия 340 мг поли-N-эпоксипропилкарбазола [26] с 34 мг 4-(4-нитрофенилазо)-анилина в кипящем толуоле (2 мл) в течение 3 часов. Для получения последнего

был использован хромофор дисперсный оранжевый DO-3 (Sigma-Aldrich) с 90% красителя. Результирующий раствор, содержащий 30% массовой доли азокрасителя, был отфильтрован и нанесён на подложку методом центрифугирования.

Толщины высушенных образцов измерялись профилометром (P16+, KLA Tencor). Спектры поглощения плёнки толщиной 1600 нм в ультрафиолетовой и видимой областях, полученные спектрометром (MS7504, Solar III), представлены на рис. 1.

Как видно из графика, высокое поглощение полученный азокполимер имеет в области спектра от фиолетового до зелёного цвета.

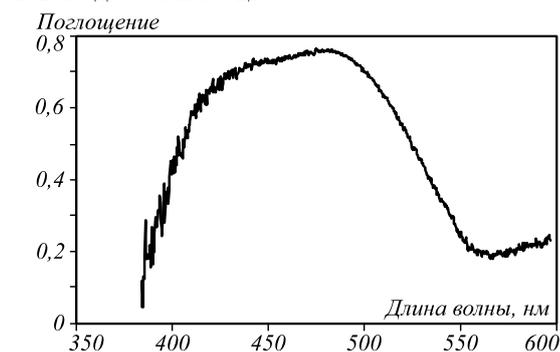


Рис. 1. Спектр поглощения тонкой плёнки азокполимера. Толщина плёнки 1600 нм

Формирование поверхностного рельефа при помощи облучения пучком Гаусса с различной поляризацией

Динамика формирования поверхностного микрорельефа в плёнках азокполимера, индуцированных остро сфокусированным Гауссовым пучком различной интенсивности, исследована в работах [19, 20]. Фотоизомеризация азомолекул лазерным излучением и релаксационные процессы индуцируют анизотропную подвижность молекул полимера вдоль направления поляризации. Оптические градиентные силы вытягивают молекулы полимера вдоль одного преимущественного направления. В данных работах была продемонстрирована асимметрия поверхностных микроструктур под влиянием лазерного излучения с линейной поляризацией при плотности мощности порядка нескольких десятков мВт/см². Сформированный микрорельеф показал преимущества смещения полимера вдоль направления от центра к краям с образованием двух возвышений к краям и полым в центре. В работе [27] также показаны поверхностные микроструктуры, сформированные под воздействием лазерного излучения с большей интенсивностью (325–865 Вт/см²). Они обладают асимметричными удлиненными вершинами, которые увеличивают свою высоту за счёт увеличения плотности мощности. Целью настоящей работы является исследование влияния поляризационных состояний и доз лазерного Гауссова пучка (интенсивность и/или время экспозиции) на топографию плёнок азокполимера. Оптическая установка для формирования рельефа поверхности схематически показана на рис. 2.

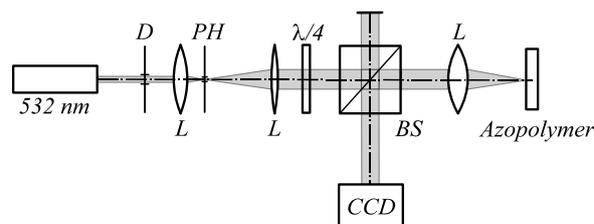


Рис. 2. Оптическая установка для формирования микроструктур в плёнках азокполимера Гауссовыми пучками

В экспериментальных исследованиях было использовано линейно-поляризованное излучение одномодового лазера с длиной волны 532 нм. Лазерное излучение, проходя через диафрагму (*D*), расширялось коллиматором, состоящим из двух линз (*L*) и пинхола (*PH*). Четвертьволновая пластина ($\lambda/4$) применялась для управления состоянием поляризации пучка. Неполяризованный делитель пучка и высокоскоростная камера использовались для управления положением сфокусированного на образце лазерного пятна. Объектив перед образцом характеризовался значением числовой апертуры, равной 0,15.

С помощью описанной установки осуществлена запись единичных микронеровностей воздействием лазерных пучков с линейной и эллиптической поляризациями. Мощность пучка варьировалась в диапазоне 500–3180 Вт/см². Время записи каждой структуры составляло 180 с.

После записи сформированный микрорельеф измерялся с помощью сканирующего зондового микроскопа Solver Pro-M, NT-MDT.

Изображения поверхностного микрорельефа, образованные в результате воздействия сфокусированных гауссовых пучков с эллиптической поляризацией, показаны на рис. 3.

На рис. 3а поверхностный микрорельеф представляет собой возвышение, имеющее более протяжённое основание вдоль одной оси симметрии. Вдоль ортогональной оси симметрии основание возвышения сильно сжато за счёт образования у основания локальных понижений рельефа.

Такое поведение можно объяснить на основе асимметрии колебаний во всех направлениях поперечных компонент электрического поля [28–30]. Увеличение плотности мощности приводит к увеличению высоты микроструктуры, расширению размера областей локальных понижений и их глубины.

Особенно интересные эффекты наблюдаются при воздействии лазерного пучка с линейной поляризацией (рис. 4). Поверхностная микроструктура, показанная на рис. 4, является асимметричной и имеет удлиненный профиль в разрезе, перпендикулярном направлению поляризации. Данная асимметрия материала азокполимера была ранее упомянута в работах [19, 20]. Структура, показанная на рис. 4, имеет более сложную форму. На возвышении (рис. 4а) наблюдается формирование двух дополнительных возвышений на начальной стадии, которые аналогичны соответствующим микроструктурам в работе [27]. По бокам от этой структуры расположены две полости асимметричной

формы, имеющие более резкий край со стороны близкой к центру. При увеличении плотности мощности до 3000 Вт/см^2 поверхностная микроструктура становится еще более сложной (рис. 4б), где на возвышении можно увидеть четыре дополнительных пика. В центре между ними мы видим яму, образованную на начальном этапе, которая становится более выраженной при увеличении плотности мощности (рис. 4в). Однозначно говорить о зависимости высоты микроструктуры от

плотности мощности невозможно из-за образования микроструктур различной формы. В области поверхностного облучения сфокусированным Гауссовым пучком наблюдается конкуренция между процессами образования выступов и канавок. Отсутствие осевой симметричной топографии и появление вершин после симметричного освещения Гауссовым пучком можно представить, как нелинейную зависимость высоты от дозы излучения.

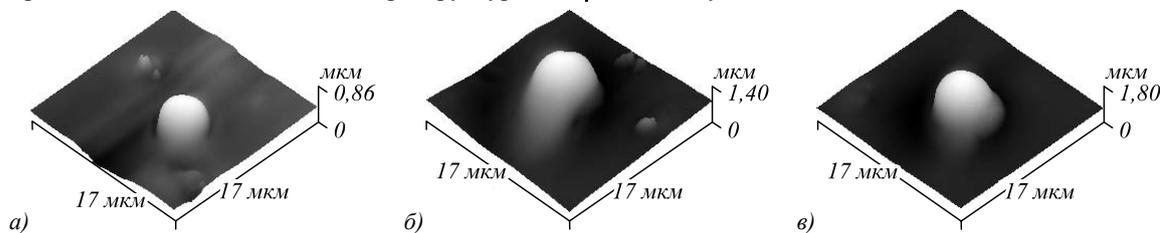


Рис. 3. Поверхностный рельеф полимерной плёнки после лазерного облучения с эллиптически поляризованным состоянием при интенсивности: 550 Вт/см^2 (а), 1100 Вт/см^2 (б), 1500 Вт/см^2 (в)

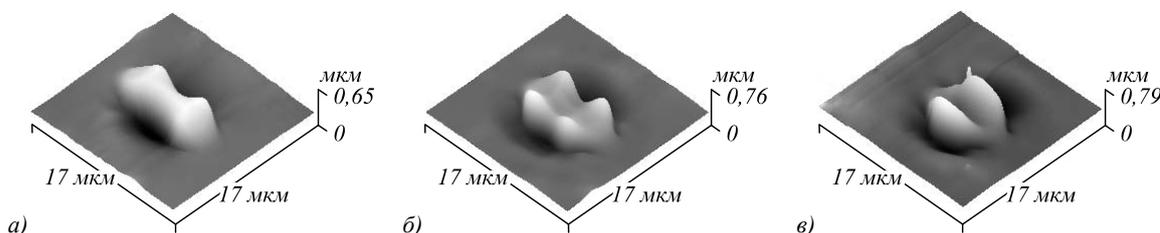


Рис. 4. Поверхностный рельеф полимерной плёнки после лазерного облучения с линейно поляризованным состоянием при интенсивности: 1100 Вт/см^2 (а), 3000 Вт/см^2 (б), 3180 Вт/см^2 (в)

Существенное различие микроструктур, сформированных при помощи пучков с линейной и эллиптической поляризациями, может быть частично объяснено поляризационными эффектами. Вероятно, как показано в работах [19, 20], при формировании микрорельефа оказывает влияние на продольную и поперечную компоненты электрического поля. Однако в данном эксперименте при числовой апертуре значительно меньшей, чем 0,7, влияние продольной компоненты незначительно. Можно сделать предположение о большем влиянии поперечных компонент [28–30].

Заключение

В статье описывается синтез и оптические характеристики азополимера на основе поли-N-эпоксипропилкарбазола и хромофора 4-(4-нитрофенилазо)-анилина. В ходе экспериментов с ним были получены поверхностные микроструктуры под влиянием сфокусированного поляризованного Гауссова лазерного пучка высокой плотности мощности. Обнаружена сильная зависимость формы поверхностного рельефа от интенсивности облучения линейной поляризации. Эффекты образования рельефа под воздействием лазерного излучения являются интересными и важными для дальнейших экспериментальных и теоретических исследований. Первоначальные попытки теоретического объяснения образования таких асимметричных структур были проведены в работе [27]. Однако, как было показано в [19, 20], фотоиндуцированное образование поверхностных микроструктур не может быть объяснено механизмом поверх-

ностной деформации, вызванной градиентом силы оптического поля. Новые результаты, полученные в ходе экспериментов, показали нелинейность процессов перемещения молекул материала азополимера под воздействием света, моделирование которого является актуальной задачей. Эксперименты с отдельным пучком имеют особое значение для описания продольного фотоиндуцированного массопереноса молекул азополимеров при интерференционной записи дифракционных решёток. Это может дать значительный импульс к развитию таких областей, как голографическая оптическая память, голографическая поляризационная микроскопия и т.д., где может быть использован эффект оптического формирования рельефа в плёнках полимерных материалов, легированных азокрасителями.

Благодарности

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований (грант № 18-07-01470) в части формирования структуры на поверхности азополимера, гранта Президента НШ-6307.2018.8 в части измерения формы поверхности и Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение № 007-ГЗ/Ч3363/26) в части оптических измерений.

Литература

1. Andrews, D.L. Structured light and its applications: An introduction to phase-structured beams and nanoscale

- optical forces / D.L. Andrews. – London: Academic Press, 2008. – 341 p. – ISBN: 978-0-12-374027-4.
2. **Hell, S.W.** Breaking the diffraction resolution limit by stimulated-emission-depletion fluorescence microscopy / S.W. Hell, J. Wichmann // *Optics Letters*. – 1994. – Vol. 19, Issue 11. – P. 780-782. – DOI: 10.1364/OL.19.000780.
 3. **Bernet, S.** Quantitative imaging of complex samples by spiral phase contrast microscopy / S. Bernet, A. Jesacher, S. Fürhapter, C. Maurer, M. Ritsch-Marte // *Optics Express*. – 2006. – Vol. 14, Issue 9. – P. 3792-3805. – DOI: 10.1364/OE.14.003792.
 4. **Aakhte, M.** SSPIM: a beam shaping toolbox for structured selective plane illumination microscopy / M. Aakhte, E.A. Ehsan, H.A.J. Muller // *Scientific Reports*. – 2018. – Vol. 8. – 10067. – DOI: 10.1038/s41598-018-28389-8.
 5. **Hnatovsky, C.** Polarization-dependent ablation of silicon using tightly focused femtosecond laser vortex pulses / C. Hnatovsky, V.G. Shvedov, N. Shostka, A.V. Rode, W. Krolikowski // *Optics Letters*. – 2012. – Vol. 37, Issue 2. – P. 226-228. – DOI: 10.1364/OL.37.000226.
 6. **Anoop, K.K.** Femtosecond laser surface structuring of silicon using optical vortex beams generated by a q-plate / K.K. Anoop, A. Rubano, R. Fittipaldi, X. Wang, D. Paparo, A. Vecchione, L. Marrucci, R. Bruzzese, S. Amoroso // *Applied Physics Letters*. – 2014. – Vol. 104, Issue 24. – 241604. – DOI: 10.1063/1.4884116.
 7. **Syubaev, S.** Direct laser printing of chiral plasmonic nanojets by vortex beams / S. Syubaev, A. Zhizhchenko, A. Kuchmizhak, A. Porfirev, E. Pustovalov, O. Vitrik, Yu. Kulchin, S. Khonina, S. Kudryashov // *Optics Express*. – 2017. – Vol. 25, Issue 9. – P. 10214-10223. – DOI: 10.1364/OE.25.010214.
 8. **Pushkarev, D.** Effect of phase front modulation on the merging of multiple regularized femtosecond filaments / D. Pushkarev, D. Shipilo, A. Lar'kin, E. Mitina, N. Panov, D. Uryupina, A. Ushakov, R. Volkov, S. Karpeev, S. Khonina, O. Kosareva, A. Savel'ev // *Laser Physics Letters*. – Vol. 15, Issue 4. – 2018. – 045402. – DOI: 10.1088/1612-202X/aaa9ad.
 9. **Arlt, J.** Atom guiding along Laguerre-Gaussian and Bessel light beams / J. Arlt, T. Hitomi, K. Dholakia // *Applied Physics*. – 2000. – Vol. 71, Issue 4. – P. 549-554. – DOI: 10.1007/s003400000376.
 10. **McGloin, D.** Interfering Bessel beams for optical micro-manipulation / D. McGloin, V. Garcés-Chávez, K. Dholakia // *Optics Letters*. – 2003. – Vol. 28, Issue 8. – P. 657-659. – DOI: 10.1364/OL.28.000657.
 11. **Сойфер, В.А.** Оптическое манипулирование микро-объектами: достижения и новые возможности, порождённые дифракционной оптикой / В.А. Сойфер, В.В. Котляр, С.Н. Хонина // *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. – 2004. – Т. 35, № 6. – С. 1368-1432.
 12. **Reicherter, M.** Optical particle trapping with computer-generated holograms written on a liquid-crystal display / M. Reicherter, T. Haist, E.U. Wagemann, H.J. Tiziani // *Optics Letters*. – 1999. – Vol. 24, Issue 8. – P. 608-610. – DOI: 10.1364/OL.24.000608.
 13. **Скиданов, П.В.** Микроманипуляция с использованием бинарного динамического модулятора света / П.В. Скиданов, С.Н. Хонина, В.В. Котляр // *Компьютерная оптика*. – 2008. – Т. 32, № 4. – P. 361-365.
 14. **Ostrovsky, A.S.** Generation of the “perfect” optical vortex using a liquid-crystal spatial light modulator / A.S. Ostrovsky, C. Rickenstorff-Parrao, V. Arrizón // *Optics Letters*. – 2013. – Vol. 38, Issue 4. – P. 534-536. – DOI: 10.1364/OL.38.000534.
 15. **Хило, Н.А.** Преобразование порядка бесселевых пучков в одноосных кристаллах / Н.А. Хило, Е.С. Петрова, А.А. Рыжевич // *Квантовая электроника*. – 2001. – Т. 31, № 1. – С. 85-89.
 16. **Fadeyeva, T.A.** Spatially engineered polarization states and optical vortices in uniaxial crystals / T.A. Fadeyeva, V.G. Shvedov, Y.V. Izdebskaya, A.V. Volyar, E. Brasselet, D.N. Neshev, A.S. Desyatnikov, W. Krolikowski, Y.S. Kivshar // *Optics Express*. – 2010. – Vol. 18, Issue 10. – P. 10848-10863. – DOI: 10.1364/OE.18.010848.
 17. **Khonina, S.N.** Polarization conversion under focusing of vortex laser beams along the axis of anisotropic crystals / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, V.D. Paraniin, A.A. Morozov // *Physics Letters A*. – 2017. – Vol. 381, Issue 30. – P. 2444-2455. – DOI: 10.1016/j.physleta.2017.05.025.
 18. *Дифракционная оптика и нанофотоника* / Е.А. Безус, Д.А. Быков, Л.Л. Досколович, А.А. Ковалев, В.В. Котляр, А.Г. Налимов, А.П. Порфирьев, Р.В. Скиданов, В.А. Сойфер, С.С. Стафеев, С.Н. Хонина, под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2014. – 608 с. – ISBN: 978-5-9221-1571-1.
 19. **Sekkat, Z.** Laser nanofabrication in photoresists and azopolymers / Z. Sekkat, S. Kawata // *Laser & Photonics Reviews*. – 2014. – Vol. 8, Issue 1. – P. 1-26. – DOI: 10.1002/lpor.201200081.
 20. **Ishitobi, H.** The anisotropic nanomovement of azo-polymers / H. Ishitobi, M. Tanabe, Z. Sekkat, S. Kawata // *Optics Express*. – 2007. – Vol. 15, Issue 2. – P. 652-659. – DOI: 10.1364/OE.15.000652.
 21. **Rochon, P.** Optically induced and erased birefringence and dichroism in azoaromatic polymers / P. Rochon, J. Gosselin, A. Natansohn, S. Xie // *Applied Physics Letters*. – 1992. – Vol. 60, Issue 1. – P. 4-5. – DOI: 10.1063/1.107369.
 22. **Lee, M.-J.** Photo-responsive polymers and their applications to optical memory / M.-J. Lee, D.-H. Jung, Y.-K. Han // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. – 2006. – Vol. 444, Issue 1. – P. 41-50. – DOI: 10.1080/15421400500377602.
 23. **Achimova, E.** Noise minimised high resolution digital holographic microscopy applied to surface topography / E. Achimova, V. Abaskin, D. Claus, G. Pedrini, I. Shevkunov, V. Katkovnik // *Computer Optics*. – 2018. – Vol. 42, Issue 2. – P. 267-272. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-2-267-272.
 24. **Chida, T.** Transient grating formation in azo-doped polymer and its application to DNA-based tunable dye laser / T. Chida, Y. Kawabe // *Optical Materials*. – 2014. – Vol. 36, Issue 4. – P. 778-781. – DOI: 10.1016/j.optmat.2013.11.027.
 25. **Meshalkin, A.** Direct photoinduced surface relief formation in carbazole-based azopolymer using polarization holographic recording / A. Meshalkin, S. Robu, E. Achimova, A. Prisacar, D. Shepel, V. Abaskin, G. Triduh // *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. – 2016. – Vol. 18, No. 9-10. – P. 763-768.
 26. **Andries, A.** Application of carbazole-containing polymer materials as recording media / A. Andries, V. Abaskin, E. Achimova, A. Meshalkin, A. Prisacar, S. Sergheev, S. Robu, L. Vlad // *Physica Status Solidi A*. – 2011. – Vol. 208, Issue 8. – P. 1837-1840. – DOI: 10.1002/pssa.201084040.
 27. **Bian, S.** Photoinduced surface deformations on azobenzene polymer films / S. Bian, J.M. Williams, D.Y. Kim, L. Li, S. Balasubramanian, J. Kumar, S. Tripathy // *Journal of*

- Applied Physics. – 1999. – Vol. 86, Issue 8. – P. 4498-4508. – DOI: 10.1063/1.371393.
28. **Khonina, S.N.** Optimization of focusing of linearly polarized light / S.N. Khonina, I. Golub // Optics Letters. – 2011. – Vol. 36, Issue 3. – P. 352-354. – DOI: 10.1364/OL.36.000352.
29. **Khonina, S.N.** Experimental demonstration of the generation of the longitudinal E-field component on the optical axis with high-numerical-aperture binary axicons illuminated by linearly and circularly polarized beams / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, S.V. Alferov, D.A. Savelyev, J. Laukkanen, J. Turunen // Journal of Optics. – 2013. – Vol. 15, Issue 8. – 085704. – DOI: 10.1088/2040-8978/15/8/085704.
30. **Khonina, S.N.** Time behavior of focused vector beams / S.N. Khonina, I. Golub // Journal of the Optical Society of America A. – 2016. – Vol. 33, Issue 10. – P. 1948-1954. – DOI: 10.1364/JOSAA.33.001948.

Сведения об авторах

Подлипов Владимир Владимирович, инженер НИЛ-35 и ассистент кафедры технической кибернетики Самарского университета, инженер лаборатории микро- и нанотехнологий Института систем обработки изображений РАН – филиала Федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук (ИСОИ РАН). Область научных интересов: математическое моделирование, электронно-лучевая литография и оптимизация технологических процессов травления в микроэлектронике, дифракционной оптике, технологии обработки и контроля поверхности. E-mail: podlipnovvv@ya.ru.

Ивлиев Николай Александрович, 1987 года рождения, в 2010 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева (СГАУ, ныне – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева) по специальности «Проектирование и технология радиоэлектронных средств». Кандидат технических наук (2015 год), работает научным сотрудником в ИСОИ РАН – филиале ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, доцентом кафедры технической кибернетики Самарского университета. Область научных интересов: физика поверхности твердого тела. E-mail: ivlievn@gmail.com.

Хонина Светлана Николаевна, доктор физико-математических наук, профессор Самарского университета; главный научный сотрудник ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования, оптическое манипулирование, оптическая и цифровая обработка изображений. E-mail: khonina@smr.ru.

Нестеренко Дмитрий Владимирович, кандидат физико-математических наук, и.о. старшего научного сотрудника лаборатории дифракционной оптики ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. E-mail: nesterenko@ssau.ru.

Васильев Вадим Сергеевич, 1993 года рождения, в 2017 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (СГАУ) по специальности «Прикладные математика и физика». Аспирант кафедры технической кибернетики Самарского университета. Область научных интересов: оптическое микроманипулирование, дифракционная оптика. E-mail: vad_vs@smr.ru.

Акимова Елена, получила степень магистра физики в Кишинёвском государственном университете в 1981 году. В 1989 году получила степень кандидат физико-математических наук. С 1989 по 2003 год работала в Институте прикладной физики АНМ, Кишинёв. С 2003 по 2009 год работала в Политехническом университете Анконы (Италия) в качестве научного сотрудника механического факультета, где в 2006 году получила степень PhD в области машиностроения. Область научных интересов: некристаллическая физика, оптоэлектроника и оптические датчики, голография, голографическая интерферометрия. E-mail: achimova@phys.asm.md.

ГРНТИ: 29.31.27.

Поступила в редакцию 1 октября 2018 г. Окончательный вариант – 4 октября 2018 г.

INVESTIGATION OF PHOTOINDUCED FORMATION OF MICROSTRUCTURES ON THE SURFACE OF A CARBASEOLE-CONTAINING AZOPOLYMER DEPENDING ON THE POWER DENSITY OF INCIDENT BEAMS

V.V. Poplipnov^{1,2}, N.A. Ivliev^{1,2}, S.N. Khonina^{1,2}, D.V. Nesterenko^{1,2}, V.S. Vasilev^{1,2}, E.A. Achimova³

¹ IPISI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Molodogvardeyskaya 151, 443001, Samara, Russia;

² Samara National Research University, Moskovskoye shosse 34, 443086, Samara, Russia;

³ Institute of Applied Physics, the Academy of Sciences of Moldova, Chisinau, Moldova

Abstract

In this paper we synthesized and measured optical characteristics of an azopolymer based on the polymer N-epoxypropylcarbazole and chromophore 4 - (4-nytrophenylazo)-aniline. Regulari-

ties in surface microstructure formation under the influence of a Gaussian beam focused on the synthesized polymer film were shown. With the linearly polarized incident laser beam, the anisotropic formation of the surface microstructures was demonstrated. The dependence of the microstructure formation on the incident beam power density was studied. Also, we experimentally investigated the nonlinear optical effects emerging in the azopolymer structure exposed to a high-intensity laser beam. Nonlinear topographic effects arising during the formation of microstructures by means of linearly and elliptically polarized beams were described.

Keywords: optical recording materials, azopolymer, photoisomerization, polarization state, surface relief, Gaussian beam.

Citation: Poplipnov VV, Ivliev NA, Khonina SN, Nesterenko DV, Vasilev VS, Achimova EA. Investigation of photoinduced formation of microstructures on the surface of carbazole-containing azopolymer depending on the power density of incident beams. *Computer Optics* 2018; 42(5): 779-785. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-5-779-785.

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research under project No. 18-07-01470 (“Formation of structures on the surface of the azopolymer”), by President's grant NSH-6307.2018.8 (“surface shape measurement”) and by Ministry of Science and Higher Education within the State assignment FSRC “Crystallography and Photonics” RAS under agreement 007-Г3/Ч3363/26 (“Optical measurements”).

References

- [1] Andrews DL. Structured light and its applications: An introduction to phase-structured beams and nanoscale optical forces. London: Academic Press; 2008. ISBN: 978-0-12-374027-4.
- [2] Hell SW, Wichmann J. Breaking the diffraction resolution limit by stimulated-emission-depletion fluorescence microscopy. *Opt Lett* 1994; 19(11): 780-782. DOI: 10.1364/OL.19.000780.
- [3] Bernet S, Jesacher A, Furhapter S, Maurer C, Ritsch-Marte M. Quantitative imaging of complex samples by spiral phase contrast microscopy. *Opt Express* 2006; 14(9): 3792-3805. DOI: 10.1364/OE.14.003792.
- [4] Aakhte M, Ehsan EA, Muller HAJ. SSPIM: a beam shaping toolbox for structured selective plane illumination microscopy. *Sci Rep* 2018; 8: 10067. DOI: 10.1038/s41598-018-28389-8.
- [5] Hnatovsky C, Hnatovsky C, Shvedov VG, Shostka N, Rode AV, Krolikowski W. Polarization-dependent ablation of silicon using tightly focused femtosecond laser vortex pulses. *Opt Lett* 2012; 37(2): 226-228. DOI: 10.1364/OL.37.000226.
- [6] Anoop KK, Rubano A, Fittipaldi R, Wang X, Paparo D, Vecchione A, Marrucci L, Bruzzese R, Amoroso S. Femtosecond laser surface structuring of silicon using optical vortex beams generated by a q-plate. *Appl Phys Lett* 2014; 104(24): 241604. DOI: 10.1063/1.4884116.
- [7] Syubaev S, Zhizhchenko A, Kuchmizhak A, Porfirev A, Pustovalov E, Vitrik O, Kulchin Yu, Khonina S, Kudryashov S. Direct laser printing of chiral plasmonic nanojets by vortex beams. *Opt Express* 2017; 25(9): 10214-10223. DOI: 10.1364/OE.25.010214.
- [8] Pushkarev D, Shipilo D, Lar'kin A, Mitina E, Panov N, Uryupina D, Ushakov A, Volkov R, Karpeev S, Khonina S, Kosareva O, Savel'ev A. Effect of phase front modulation on the merging of multiple regularized femtosecond filaments. *Laser Phys Lett* 2018; 15(4): 045402. DOI: 10.1088/1612-202X/aaa9ad.
- [9] Arlt J, Hitomi T, Dholakia K. Atom guiding along Laguerre-Gaussian and Bessel light beams. *Appl Phys* 2000; 71(4): 549-554. DOI: 10.1007/s003400000376.
- [10] McGloin D, Garcés-Chávez V, Dholakia K. Interfering Bessel beams for optical micromanipulation. *Opt Lett* 2003; 28(8): 657-659. DOI: 10.1364/OL.28.000657.
- [11] Soifer VA, Kotlyar VV, Khonina SN. Optical microparticle manipulation: Advances and new possibilities created by diffractive optics [In Russian]. *Phys Part Nucl* 2004; 35(6): 733-766.
- [12] Reicherter M, Haist T, Wagemann EU, Tiziani HJ. Optical particle trapping with computer-generated holograms written on a liquid-crystal display. *Opt Lett* 1999; 24(8): 608-610. DOI: 10.1364/OL.24.000608.
- [13] Skidanov RV, Khonina SN, Kotlyar VV. Optical micromanipulation using a binary dynamic light modulator. *Computer Optics* 2008; 32(4): 361-365.
- [14] Ostrovsky AS, Rickenstorff-Parrao C, Arrizón V. Generation of the “perfect” optical vortex using a liquid-crystal spatial light modulator. *Opt Lett* 2013; 38(4): 534-536. DOI: 10.1364/OL.38.000534.
- [15] Khilo NA, Petrova ES, Ryzhevich AA. Transformation of the order of Bessel beams in uniaxial crystals. *Quantum Electronics* 2001; 31(1): 85-89. DOI: 10.1070/QE2001v031n01ABEH001897..
- [16] Fadeyeva TA, Shvedov VG, Izdebskaya YV, Volyar AV, Brasselet E, Neshev DN, Desyatnikov AS, Krolikowski W, Kivshar YS. Spatially engineered polarization states and optical vortices in uniaxial crystals. *Opt Express* 2010; 18(10): 10848-10863. DOI: 10.1364/OE.18.010848.
- [17] Khonina SN, Karpeev SV, Parani VD, Morozov AA. Polarization conversion under focusing of vortex laser beams along the axis of anisotropic crystals. *Phys Lett A* 2017; 381(30): 2444-2455. DOI: 10.1016/j.physleta.2017.05.025.
- [18] Soifer VA, ed. *Diffractive optics and nanophotonics*. Boca Raton: CRC Press; 2017. ISBN: 978-1-4987-5447-7.
- [19] Sekkat Z, Kawata S. Laser nanofabrication in photoreists and azopolymers. *Laser & Photonics Reviews* 2014; 8(1): 1-26. DOI: 10.1002/lpor.201200081.
- [20] Ishitobi H, Tanabe M, Sekkat Z, Kawata S. The anisotropic nanomovement of azo-polymers. *Optics Express* 2007; 15(2): 652-659. DOI: 10.1364/OE.15.000652.
- [21] Rochon P, Gosselin J, Natansohn A, Xie S. Optically induced and erased birefringence and dichroism in azoaromatic polymers. *Appl Phys Lett* 1992; 60(1): 4-5. DOI: 10.1063/1.107369.
- [22] Lee M-J, Jung D-H, Han Y-K. Photo-responsive polymers and their applications to optical memory. *Molecular Crystals and Liquid Crystals* 2006; 444(1): 41-50. DOI: 10.1080/15421400500377602.

- [23] Achimova E, Abaskin V, Claus D, Pedrini G, Shevkunov I, Katkovnik V. Noise minimised high resolution digital holographic microscopy applied to surface topography. *Computer Optics* 2018; 42(2): 267-272. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-2-267-272.
- [24] Chida T, Kawabe Y. Transient grating formation in azo-doped polymer and its application to DNA-based tunable dye laser. *Optical Materials* 2014; 36(4): 778-781. DOI: 10.1016/j.optmat.2013.11.027.
- [25] Meshalkin A, Robu S, Achimova E, Prisacar A, Shepel D, Abaskin V, Triduh G. Direct photoinduced surface relief formation in carbazole-based azopolymer using polarization holographic recording. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials* 2016; 18(9-10): 763-768.
- [26] Andries A, Abaskin V, Achimova E, Meshalkin A, Prisacar A, Sergheev S, Robu S, Vlad L. Application of carbazole-containing polymer materials as recording media. *Phys Status Solidi A* 2011; 208(8): 1837-1840. DOI: 10.1002/pssa.201084040.
- [27] Bian S, Williams JM, Kim DY, Li L, Balasubramanian S, Kumar J, Tripathy S. Photoinduced surface deformations on azobenzene polymer films. *J Appl Phys* 1999; 86(8): 4498-4508. DOI: 10.1063/1.371393.
- [28] Khonina SN, Golub I. Optimization of focusing of linearly polarized light. *Opt Lett* 2011; 36(3): 352-354. DOI: 10.1364/OL.36.000352.
- [29] Khonina SN, Karpeev SV, Alferov SV, Savelyev DA, Laukkanen J, Turunen J. Experimental demonstration of the generation of the longitudinal E-field component on the optical axis with high-numerical-aperture binary axicons illuminated by linearly and circularly polarized beams. *J Opt* 2013; 15(8): 085704. DOI: 10.1088/2040-8978/15/8/085704.
- [30] Khonina SN, Golub I. Time behavior of focused vector beams. *J Opt Soc Am A* 2016; 33(10): 1948-1954. DOI: 10.1364/JOSAA.33.001948.

Authors' information

Vladimir Vladimirovich Podlipnov, an engineer at Samara National Research University's Lab-35, an engineer of the laboratory of Micro- and Nanotechnology of Image Processing Systems Institute of the RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences. His research interests: mathematical modeling, electron-beam lithography, optimization of etching procedures in microelectronics, diffractive optics and techniques for surface processing and inspection. E-mail: podlipnovvv@ya.ru.

Nikolay Alexandrovich Ivliev (b. 1987), graduated from Samara State Aerospace University in 2010 (presently, Samara National Research University, short – Samara University), majoring in Design and Technology of Radio-electronic Equipment. Candidate of Engineering Sciences (2015). Currently he works as the researcher at the Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, assistant at Technical Cybernetics sub-department of Samara University. Research interests: surface physics, micro- and nanotechnology. E-mail: ivlievn@gmail.com.

Svetlana Nikolaevna Khonina, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of Samara National Research University. Main researcher of the IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Research interests: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing. E-mail: khonina@smr.ru.

Dmitry V. Nesterenko graduated with honours (1999) from Samara State Aerospace University (SSAU), majoring in Physics. Candidate in Optics (2002). Currently he is a senior researcher in Diffractive Optics laboratory of the Image Processing Systems Institute RAS – Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS. His current research interests include nanophotonics, plasmonics and electromagnetic diffraction theory. E-mail: nesterenko@ssau.ru.

Vadim Sergeevich Vasilev was born in 1993, in 2017 year graduated from Samara State Aerospace University (SSAU) on specialty "Applied Mathematics and Physics". Postgraduate student of Technical Cybernetics department. The scientific interests: optical micromanipulation, diffraction optics. E-mail: vad_vs@smr.ru.

Elena Achimova received her Master in Physics from the State University of Chisinau in 1981 and Candidate of Sciences in Physics and Mathematical Sciences (equivalent of PhD) from the Institute of Applied Physics, ASM in 1989. From 1989 to 2003, she was employed at the Institute of Applied Physics, Chisinau, making investigations in recording media for holography. From 2003 to 2009, she was employed at the Polytechnic University of Ancona (Italy) as the scientific researcher of the Mechanical department where she received PhD degree in Mechanical Engineering in 2006. The field of the scientific interests is non-crystalline physics, optoelectronics and optical sensors, holography, holographic interferometry. E-mail: achimova@phys.asm.md.

Received October 1, 2018. The final version – October 4, 2018.