

Исследование взаимодействия вихревых пучков с микрорельефом на карбазолсодержащем азополимере

Н.А. Ивлиев^{1,2}, В.В. Подлипов^{1,2}

¹Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

²Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. Рассматривается фотоиндуцированное формирование периодического микрорельефа на поверхности карбазолсодержащего азополимера. Исследованы параксиальные лазерные Гауссовы пучки с различной поляризацией и их характеристики, такие как вектор Пойнтинга, градиентная сила, важные для оценки взаимодействия пучков с микрорельефом. Проведён анализ теоретических и экспериментальных результатов.

1. Введение

Взаимодействие лазерного излучения с веществом имеет большое прикладное значение и эффективно используется в различных областях, в том числе, для оптического захвата и манипулирования микрочастицами [1-9], в лазерной обработке и структурировании материалов [10-19]. Сила воздействия излучения на вещество является одной из важных характеристик. Хорошо известной является сила воздействия электрического монохроматического поля на малые частицы, в частности, в дипольном приближении [1,2,6,20-22].

Эксперименты А. Эшкина [1,2] с захватом прозрачной частицы в сфокусированном лазерном пучке показали наличие двух сил: одна сила толкает частицу вперед вдоль направления распространения пучка, а вторая двигает частицу в область максимальной интенсивности. Первая сила соответствует продольной компоненте вектора Пойнтинга и называется рассеивающей, а вторая пропорциональна градиенту интенсивности излучения и называется градиентной. Баланс этих двух сил (возможный, как правило, только при острой фокусировке) позволяет удерживать частицу в области фокуса лазерного излучения.

При лазерной обработке и структурировании требование острой фокусировки не является обязательным. Однако при этом, кроме распределения интенсивности пучка, важную роль играет поляризация лазерного излучения [23-26]. В различных работах были рассмотрены другие составляющие силы лазерного излучения [27-30], в том числе неградиентные [30-32]. Эти составляющие сил оказывают существенное влияние на формируемые микроструктуры при лазерном воздействии. Модели, описывающие процессы фотоиндуцированных процессов, основанные на градиентных силах применимы к аморфным соединениям, в то время как азополимерные материалы более подвержены влиянию неградиентных сил, ввиду анизотропии молекул азосодержащего полимера. Претерпевая циклическую фотоиндуцированную изомеризацию из транс- в цис- форму полимер со-поляризованный с азохромофором

приобретает подвижность и способность формирования микро-рельефа под действием оптических сил. Попытки построения динамических моделей, описывающих эти процессы, предпринимались в работах Секката [33], Дюмонда [34] и др. Однако, до сих пор не существует моделей, описывающих в полной фотоиндуцированные процессы в азополимерах ввиду необходимости учета большого числа факторов, таких как влияние переориентации молекул, изменение полимерной матрицы, влияние поверхностных сил, динамических сил, массопереноса, изменение оптических свойств и перераспределение световой энергии в формируемом рельефе. Наиболее точно существующие модели описывают линейные процессы на начальных этапах формирования микрорельефа под воздействием лазерного излучения относительно невысокой энергии.

В работе [18] исследовались процессы формирования микрорельефа под воздействием излучения с высокой плотностью мощности. Полученные микроструктуры отличаются сложной формой и характеризуются нелинейной зависимостью высоты от дозы излучения. Большинство исследователей сходятся в том, что на формирование рельефа оказывает влияние соотношение компонент внешнего ориентирующего поля [35], которые имеют влияние на оптические силы. Однако вид картин этих компонент лишь отдаленно напоминает вид формирующего микрорельефа на поверхности азополимера. Согласно [36] азополимер можно рассмотреть как смесь молекул не имеющих дипольного момента (трансизомеризованные молекулы) и молекул с дипольным моментом (находящиеся в цисформе). При этом, соотношение этих компонент может варьироваться в зависимости от длины волны воздействующего излучения (максимум поглощения Disperse Orange DO3 транс-формы 360 нм, а цис-формы – 460 нм.). Также существует влияние температуры на тепловую релаксацию цис-формы в транс-форму. В связи с этим было бы рационально рассмотреть упрощенно градиентные и неградиентные оптические силы, суммарное воздействие которых в итоге складывается и образует итоговый микрорельеф.

Целью настоящей работы является исследование формирования периодических структур в карбазолсодержащем азополимерном материале и исследование взаимодействия параксиальных гауссовых пучков с полученным микрорельефом.

2. Вихревой гауссов пучок

Рассмотрим вихревой Гауссов пучок первого порядка:

$$G_1(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w^2}\right)(x + iy). \quad (1)$$

Основные характеристики для линейно-поляризованного пучка (1) показаны на рисунке 1. В этом случае интенсивность (рисунок 1а), рассеивающая сила (рисунок 1б) и градиентная сила (рисунок 1в) также не зависят от типа однородной поляризации.

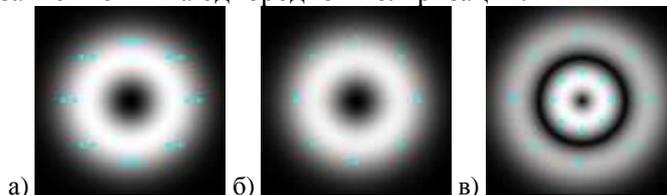


Рисунок 1. Характеристики линейно x-поляризованного вихревого Гауссова пучка (1): а) интенсивность, б) модуль рассеивающей силы $|F_s|$ и с) модуль градиентной силы $|F_g|$.

Аналогично предыдущим результатам рассеивающая сила соответствует интенсивности пучка, и перемещение энергии направлено вдоль оптической оси. Градиентная сила принимает более сложный вид: соответствует радиальной производной от кольцевого распределения интенсивности пучка. Действие этой силы направлено по радиусу в область максимальной интенсивности электрического поля.

Результаты расчета для неградиентной силы и ее производных для вихревого Гауссова пучка при различных поляризациях показаны в Таблице 1.

Таблица 1. Негradientная сила и ее производные для вихревого Гауссова пучка с однородной поляризацией.

Тип поляризации	$ \mathbf{F}_p $	$\text{Re}(\nabla\mathbf{F}_p)$ негатив	$ \nabla \times \mathbf{F}_p ^2$	$ \nabla \text{Re}(\nabla\mathbf{F}_p) ^2$
Линейная x-поляризация				
Линейная y-поляризация				
Круговая поляризация				

На рисунке 2а,б показаны результаты экспериментального формирования в азополимере структуры при фокусировке вихревого гауссова пучка с линейной поляризацией. На рисунке 2в,г приведены соответствующие результаты моделирования формы рельефа. Как видно, предложенная модель с учетом градиент дивергенции неgradientной силы (Таблица 2, пятый столбец) довольно близко аппроксимирует форму рельефа, полученную экспериментально. Видно, что образуется кольцо с неравномерной интенсивностью, внутри которого имеется центральный пик. Структура несколько вытянута перпендикулярно оси поляризации. Ожидается, что при круговой поляризации будет формироваться аналогичная структура – кольцо с центральным пиком, но имеющая осевую симметрию.

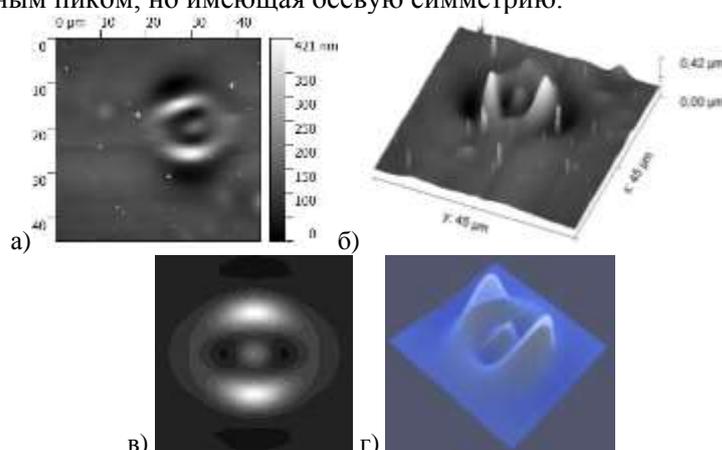


Рисунок 2. Экспериментально сформированная в азополимере структура при фокусировке вихревого гауссова пучка с линейной поляризацией а) вид сверху, б) 3D вид, а также рассчитанные с учетом $|\nabla \text{Re}(\nabla\mathbf{F}_p)|^2$ в) полутоновая картина, г) 3D вид.

3. Благодарности

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-07-01470) в части формирования структуры на поверхности азополимера 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 моделирования взаимодействия вихревых пучков с микрорельефом.

4. Литература

- [1] Ashkin, A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure // *Physical Review Letters*. – 1970. – Vol. 24(4). – P. 156-159. DOI:10.1103/PhysRevLett.24.156.
- [2] Ashkin, A. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles / A. Ashkin, J.M. Dziedzic, J.E. Bjorkholm, S. Chu // *Optics Letters*. – 1986. – Vol. 11(5). – P. 288-290. DOI: 10.1364/OL.11.000288.
- [3] Svoboda, K. Optical trapping of metallic Rayleigh particles / K. Svoboda, S.M. Block // *Optics Letters*. – 1994. – Vol. 19(13). – P. 930-932.
- [4] Nieminen, T.A. Calculation and optical measurement of laser trapping forces on non-spherical particles / T.A. Nieminen, H. Rubinsztein-Dunlop, N.R. Heckenberg // *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*. – 2001. – Vol. 70(4-6). – P. 627-637.
- [5] Khonina, S.N. Rotation of microparticles with Bessel beams generated by diffractive elements / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, R.V. Skidanov, V.A. Soifer, K. Jefimovs, J. Simonen, J. Turunen // *Journal of Modern Optics*. – 2004. – Vol. 51(14). – P. 2167-2184.
- [6] Dienerowitz, M. Optical manipulation of nanoparticles: a review / M. Dienerowitz, M. Mazilu, K. Dholakia // *Journal of Nanophotonics*. – 2008. – Vol. 2(1). – P. 021875. DOI: 10.1117/1.2992045.
- [7] Maragò, O.M. Optical trapping and manipulation of nanostructures / O.M. Maragò, H.J. Philip, G.G. Pietro, V. Giovanni, C.F. Andrea // *Nature Nanotechnology*. – 2013. – Vol. 8. – P. 807-819.
- [8] Gao, D. Optical manipulation from the microscale to the nanoscale: fundamentals, advances and prospects // *Light: Science & Applications*. – 2017. – Vol. 6. – P. e17039.
- [9] Bradac, C. Nanoscale optical trapping: A review. *Advanced* // *Optical Materials*. – 2018. – Vol. 6(12). – P. 1800005. DOI: 10.1002/adom.201800005.
- [10] Gregson, V. *Laser material processing* – Holland: Holland Publishing Company, 1984.
- [11] Steen, W.M. *Laser material processing* – London: Springer, 2003.
- [12] Sun, H.-B. Two-photon photopolymerization and 3D lithographic microfabrication / H.-B. Sun, S. Kawata // *Advances in Polymer Science*. – 2004. – Vol. 170. – P. 169-273.
- [13] Ion, J.C. *Laser processing of engineering materials: Principles, procedure and industrial applications* – Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- [14] Meier, M. Material processing with pulsed radially and azimuthally polarized laser radiation / M. Meier, V. Romano, T. Feurer // *Applied Physics A*. – 2007. – Vol. 86. – P. 329-334.
- [15] Cheng, J. A review of ultrafast laser materials micromachining / J. Cheng, C. Liu, S. Shang, D. Liu, W. Perrie, G. Dearden, K. Watkins // *Optics and Laser Technology*. – 2013. – Vol. 46. – P. 88-102.
- [16] Zayarny, D.A. Nanoscale boiling during single-shot femtosecond laser ablation of thin gold films / D.A. Zayarny, A.A. Ionin, S.I. Kudryashov, S.V. Makarov, A.A. Rudenko, S.G. Bezhanov, S.A. Uryupin, A.P. Kanavin, V.I. Emel'yanov, S.V. Alferov, S.N. Khonina, S.V. Karpeev, A.A. Kuchmizhak, O.B. Vitrik, Yu.N. Kulchin // *JETP Letters*. – 2015. – Vol. 101(6), – P. 394-397. DOI: 10.1134/S0021364015060132.
- [17] Eismann, J.S. Exciting a chiral dipole moment in an achiral nanostructure / J.S. Eismann, M. Neugebauer, P. Banzer // *Optica*. – 2018. – Vol. 5(8). – P. 954-959. DOI: 10.1364/OPTICA.5.000954.
- [18] 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.
- [19] Keller, W.J. Physics of picosecond pulse laser ablation / W.J. Keller, N. Shen, A.M. Rubenchik, S. Ly, R. Negres, R.N. Raman, J.-H. Yoo, G. Guss, J.S. Stolken, M.J. Matthews, J.D. Bude // *Journal of Applied Physics*. – 2019. – Vol. 125. – P. 085103. DOI: 10.1063/1.5080628.

- [20] Gordon, J.P. Radiation forces and momenta in dielectric media // *Physical Review A*. – 1973. – Vol. 8(1). – P. 14-21.
- [21] Ashkin, A. Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime // *Biophysical Journal*. – 1992. – Vol. 61. – P. 569-582.
- [22] Harada, Y. Radiation forces on a dielectric sphere in the Rayleigh scattering regime / Y. Harada, T. Asakura // *Optics Communications*. – 1996. – Vol. 124(5-6). – P. 529-541.
- [23] Niziev, V.G. Influence of beam polarization on laser cutting efficiency / V.G. Niziev, A.V. Nesterov // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 1999. – Vol. 32. – P. 1455-1461.
- [24] 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(8). – P. 4498-4508. DOI: 10.1063/1.371393.
- [25] 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(2). – P. 226-228.
- [26] 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(9-10). – P. 763-768.
- [27] Chaumet, P.C. Time-averaged total force on a dipolar sphere in an electromagnetic field / P.C. Chaumet, M. Nieto-Vesperinas // *Optics Letters*. – 2000. – Vol. 25. – P. 1065-1067.
- [28] Mishchenko, M.I. Radiation force caused by scattering, absorption, and emission of light by nonspherical particles // *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*. – 2001. – Vol. 70. – P. 811-816.
- [29] Moine, O. Optical force calculations in arbitrary beams by use of the vector addition theorem / O. Moine, B. Stout // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2005. – Vol. 22(8). – P. 1620-1631.
- [30] Wong, V. Explicit computation of gradient and nongradient contributions to optical forces in the discrete-dipole approximation / V. Wong, M.A. Ratner // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2006. – Vol. 23. – P. 1801-1814.
- [31] Wong, V. Gradient and nongradient contributions to plasmon enhanced optical forces on silver nanoparticles / V. Wong, M.A. Ratner // *Physical Review B*. – 2006. – Vol. 73(7). – P. 075416.
- [32] Albaladejo, S. Scattering forces from the curl of the spin angular momentum of a light field / S. Albaladejo, M.I. Marqués, M. Laroche, J.J. Sáenz // *Physical Review Letters*. – 2009. – Vol. 102(11). – P. 113602.
- [33] Sekkat, Z. Photoinduced orientation of azo dyes in polymeric films. Characterization of molecular angular mobility / Z. Sekkat, M. Dumont // *Synthetic Metals*. – 1993. – Vol. 54(1-3). – P. 373-381.
- [34] Dumont, M. Photoinduced orientational order in dyedoped amorphous polymeric films // *Molecular Crystals and Liquid Crystals Science and Technology. Section A. Molecular Crystals and Liquid Crystals*. – 1996 – Vol. 282(1). – P. 437-450. DOI: 10.1080/10587259608037597.
- [35] Ishitobi, H. The anisotropic nanomovement of azopolymers / H. Ishitobi, M. Tanabe, Z. Sekkat, S. Kawata // *Optics Express*. – 2007. – Vol. 15(2). – P. 652-659.
- [36] Симонов, А.Н. Динамика фотоиндуцированных процессов в плёнках азосодержащих жидкокристаллических полимеров / А.Н. Симонов, А.В. Ларичев // *Квантовая электроника*. – 1999. – Т. 28, № 1. – P. 87-91.

Investigation of the interaction of vortex beams with a microrelief on the carbazole-containing azopolymer

N.A. Ivliev^{1,2}, V.V. Podlipnov^{1,2}

¹Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

²Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. Photoinduced formation of a periodic microrelief on the surface of a carbazole-containing azopolymer is considered. Paraxial Gaussian laser beams with different polarizations and their characteristics, such as the Poynting vector, gradient force, which are important for evaluating the interaction of beams with a microrelief, were studied. The analysis of theoretical and experimental results.