

Оптическая запись дифракционных микроструктур на поверхности халькогенидного стеклообразного полупроводника для формирования вихревых лазерных пучков

Н. А. Ивлиев^{1,2}, А. П. Порфирьев^{1,2}, В. В. Подлипнов^{1,2}, С. Н. Хонина^{1,2}, А. Ю. Мешалкин³

¹ Институт систем обработки изображений РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, Самара, Россия

³ Институт прикладной физики, Кишинев, Молдова

Представлен метод формирования дифракционного микрорельефа на поверхности многослойной структуры на основе халькогенидных стеклообразных полупроводников As_2S_3 и $a-Se$. Показана возможность прямой голографической записи дифракционных решеток со структурой типа «вилка». Приведены исследования вихревых лазерных пучков, генерируемых сформированным микрорельефом.

Ключевые слова: халькогенидные стеклообразные полупроводники, вихревые лазерные пучки, интерферометр Маха — Цендера.

Цитирование: Ивлиев, Н. А. Оптическая запись дифракционных микроструктур на поверхности халькогенидного стеклообразного полупроводника для формирования вихревых лазерных пучков / Н. А. Ивлиев, А. П. Порфирьев, В. В. Подлипнов, С. Н. Хонина, А. Ю. Мешалкин // НОЛОЕХРО 2021 : XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — С. 178–181.

Введение

Вихревые лазерные пучки в настоящее время привлекают значительное внимание исследователей в связи с широким использованием таких пучков в задачах атмосферной связи [1–3] и оптического манипулирования [4–6]. Угловой орбитальный момент пучков в этих приложениях может быть сформирован с использованием пространственного модулятора света (ПМС) [7], анизотропными кристаллами [8], дифракционными оптическими элементами (ДОЭ) [9]. Наиболее эффективное формирование пучков с заданным фазовым распределением достигается с помощью ДОЭ, однако их изготовление является сложным, дорогостоящим технологическим процессом.

В работе [10] представлен метод поляризационной голографической записи дифракционных структур на поверхности пленок азополимера. Полученные поверхностные структуры позволяют формировать вихревые лазерные пучки, однако время записи, при котором достигается максимальная дифракционная эффективность, равно 12 минутам. В настоящей работе предлагается метод формирования дифракционных решеток в многослойной структуре на основе халькогенидных стеклообразных полупроводников As_2S_3 и $a-Se$. Данные структуры позволяют организовать одношаговую запись рельефа и получены поочередным термовакuumным испарением из двух испарителей на вращающуюся подложку стеклянную [11]. Запись

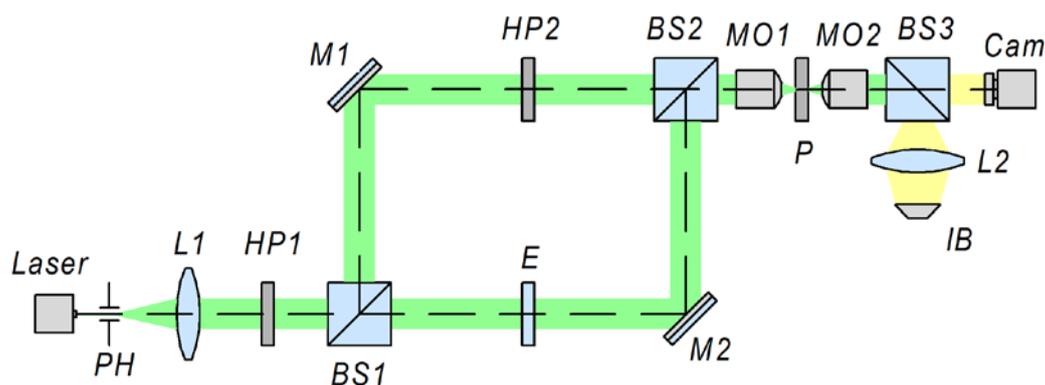


Рис. 1. Схем оптической установки, использованной в эксперименте

осуществлялась с применением фокусирующей системы для увеличения плотности мощности и, соответственно, скорости формирования микрорельефа.

1. Описание эксперимента

Прямая голографическая запись поверхностных дифракционных структур осуществлялась с помощью одномодового лазера с линейной поляризацией с длиной волны 532 нм. Схема экспериментальной установки, формирующая микрорельеф и регистрирующая изображение отраженного пучка, представлена на рис. 1.

Основой представленной схемы является интерферометр Маха — Цендера. Первоначальный линейно поляризованный гауссов лазерный луч твердотельного лазера расширялся и пространственно фильтровался с помощью системы, состоящей из пинхола *PH* (размер апертуры 40 мкм) и линзы *L1* (фокусное расстояние 150 мм). Полуволновая пластинка *HP1* использовалась для поворота направления поляризации исходного лазерного луча на 45° относительно плоскости оптического стола. При такой поляризации, согласно [11] обеспечивается максимальная дифракционная эффективность записанных дифракционных элементов.

Интерферометр Маха — Цендера состоит из двух зеркал *M1* и *M2* и двух неполяризующих светоделителей *BS1* и *BS2*. В одном из плеч интерферометра был установлена спиральная фазовая пластинка (*E*), генерирующая вихревой пучок с топологическим зарядом $m = 1$. Кроме того, полуволновая пластинка *HP2* использовалась для поворота направления поляризации лазерного луча в опорном плече на 90° относительно направления поляризации лазерного луча в другом плече. Микрообъектив *MO1* (4^\times , $NA = 0,1$) фокусировал интерферируемые лазерные лучи от плеч интерферометра на поверхности образца *P*. Длительность записи — 3 минуты. Плотность мощности составляла 10 Вт/см^2 . Микрообъектив *MO2* (8^\times , $NA = 0,2$) и видеокамера *CAM* использовались для наблюдения за процессом записи. Система, состоящая из лампочки *IB*, сферической линзы *L2* (фокусное расстояние 50 мм) и светоделителя *BS3* использовались для освещения поверхности образца.

Параметры микрорельефа измерялись с помощью сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) Solver PRO-M, NT-MDT в полуконтактном режиме. СЗМ-изображение сформированной структуры представлено на рис. 2.

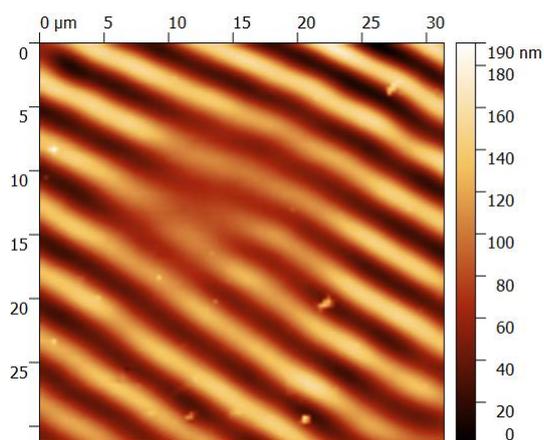


Рис. 2. СЭМ-изображение сформированной структуры

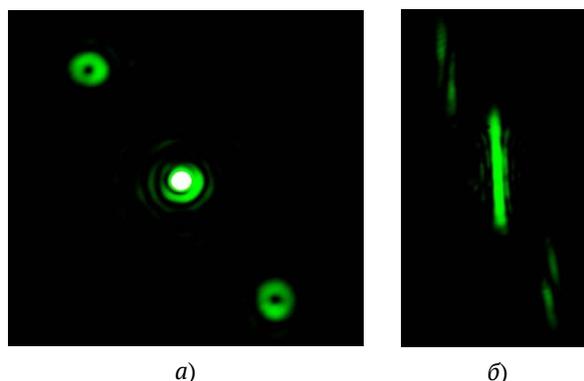


Рис. 3. Распределения интенсивности вихревых пучков: до (а) и после (б) прохождения цилиндрической линзы

Сформированный элемент, как видно на рис. 2 имеет структуру типа «вилка». Период сформированной решетки равен 5 мкм. Высота профиля 190 нм.

2. Анализ результатов

Для исследования генерации вихревых пучков использовалась оптическая установка, в которой коллимированный луч фокусировался микрообъективом на поверхность образца с изготовленной дифракционной решеткой. Используя перемещающуюся платформу с тремя осями, дифракционная решетка совмещалась с пучком. Использовалась та же длина волны, что и при записи. Интенсивность луча составляла 350 мВт/см^2 . Распределение интенсивности сформированных вихревых пучков регистрировалось матрицей видеокамеры с помощью микрообъектива. Кроме того, для контроля топологического заряда использовалась цилиндрическая линза. Распределение интенсивности вихревых пучков, генерируемых изготовленным элементом, а также прошедших через цилиндрическую линзу показаны на рис. 3.

На рис. 3 видно, что в результате прохождения луча через дифракционную решетку формируется вихревой пучок с топологическим зарядом $m = 1$.

Заключение

В настоящей работе представлен метод формирования дифракционных решеток в многослойной структуре на основе халькогенидных стеклообразных полупроводников. Для создания вихревой фазы использовалась спиральная фазовая пластина, генерирующая вихревой пучок с топологическим зарядом $m = 1$. Стоит отметить, что при замене вихревого элемента предложенный подход может быть легко адаптирован для изготовления ДОЭ, выполняющих желаемый функционал для задач оптической связи и манипулирования.

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] **Zhang, L.** [Mode-dependent crosstalk and detection probability of orbital angular momentum of optical vortex beam through atmospheric turbulence](#) / L. Zhang, F. Shen, B. Lan, A. Tang // Journal of Optics. — 2020. — Vol. 22. — № 7. — P. 075607.
- [2] **Porfirev, A. P.** [Study of propagation of vortex beams in aerosol optical medium](#) / A. P. Porfirev, M. S. Kirilenko, S. N. Khonina, R. V. Skidanov, V. A. Soifer // Applied Optics. — 2017. — Vol. 56. — № 11. — P. E8–E15.
- [3] **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 // Optics Communications. — 2020. — Vol. 472. — P. 125879.
- [4] **Padgett, M.** [Tweezers with a twist](#) / M. Padgett, R. Bowman // Nature Photonics. — 2011. — Vol. 5. — P. 343–348.
- [5] **Lamperska, W.** [Optical vortex torque measured with optically trapped microbarbells](#) / W. Lamperska, J. Masajada, S. Drobczyński, P. Wasylczyk // Applied Optics. — 2020. — Vol. 59. — № 15. — P. 4703–4707.
- [6] **Bobkova, V.** [Optical grinder: sorting of trapped particles by orbital angular momentum](#) / V. Bobkova, J. Stegemann, R. Droop, E. Otte, C. Denz // Optics Express. — 2021. — Vol. 29. — № 9. — P. 12967–12975.
- [7] **Skidanov, R. V.** Optical micromanipulation using a binary dynamic light modulator / R. V. Skidanov, S. N. Khonina, V. V. Kotlyar // Computer Optics. — 2008. — Vol. 32. — P. 361–365.
- [8] **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. — № 10. — P. 10848–10863.
- [9] **Bazhenov, V. Y.** Laser beams with screw dislocations in their wavefronts / V. Y. Bazhenov, M. Vasnetsov, M. Soskin // JETP Letters. — 1991. — Vol. 52. — P. 429–431.
- [10] **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, K. Egiazarian // Optics Express. — 2021. — Vol. 29. — № 6. — P. 9217–9230.
- [11] **Achimova, E.** [Direct surface relief formation on As₂S₃-Se nanomultilayers in dependence on polarization states of recording beams](#) / E. Achimova, A. Stronski, V. Abashkin, A. Meshalkin, A. Paiuk, A. Prisacar, P. Oleksenko, G. Triduh // Optical Materials. — 2015. — Vol. 47. — P. 566–572.