

## Формирование лазерных пучков со структурированным распределением поляризации для создания спиральных микрорельефов в тонких плёнках халькогенидных стекол

А.П. Порфирьев<sup>1,2</sup>, С.Н. Хонина<sup>1,2</sup>, Н.А. Ивлиев<sup>1,2</sup>, Д.П. Порфирьев<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Институт систем обработки изображений, «НИЦ «Курчатовский институт»,  
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151;

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

<sup>3</sup> Самарский филиал Физического института имени П.Н. Лебедева Российской академии наук,  
443011, Россия, г. Самара, ул. Ново-Садовая, д. 221

### Аннотация

В работе предложен основанный на проекционной литографии метод обработки тонких плёнок халькогенидных стёкол лазерными пучками со структурированным распределением поляризации для формирования спиралевидных микрорельефов. Для управления поляризацией исходного пучка использован пространственный модулятор света HOLOEYE LC 2012. Показано, что изменение контраста изображений масок, выводимых на дисплей модулятора, влияет на выпуклость/вогнутость формируемых профилей. Такой подход может быть эффективно использован для прямой лазерной записи более сложных нано-/микроэлементов, а также их массивов.

**Ключевые слова:** поляризация, пространственный модулятор света, спиральный микрорельеф, халькогенидные стекла, лазерная обработка.

**Цитирование:** Порфирьев, А.П. Формирование лазерных пучков со структурированным распределением поляризации для создания спиральных микрорельефов в тонких плёнках халькогенидных стекол / А.П. Порфирьев, С.Н. Хонина, Н.А. Ивлиев, Д.П. Порфирьев // Компьютерная оптика. – 2024. – Т. 48, № 5. – С. 676-680. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1501.

**Citation:** Porfirev AP, Khonina SN, Ivliev NA, Porfirev DP. Formation of laser beams with a structured polarization distribution for the fabrication of spiral microreliefs in thin films of chalcogenide glasses. Computer Optics 2024; 48(5): 676-680. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1501.

### Введение

Халькогенидные стёкла (ХС) являются одним из самых популярных материалов для создания фотонных/оптических устройств, инфракрасных датчиков и элементов [1, 2]. Известно, что такие материалы обладают высокой чувствительностью к поляризации падающего на них излучения, под действием которого в них возникает фотонаведенная анизотропия [3, 4]. Благодаря этому использование световых полей со структурированным состоянием поляризации дало возможность реализовать прямую лазерную обработку таких материалов для формирования сложных нано- и микрорельефов. Была продемонстрирована интерференционная двулучевая запись поверхностных микронных и субмикронных решёток в тонких плёнках на основе ХС с помощью световых полей с различными состояниями поляризации [5, 6]. Позже для обработки тонких плёнок ХС на основе многослойных структур  $As_2S_3$  и  $a-Se$  было предложено использовать неоднородно поляризованные световые поля, сформированные за счёт использования одного специального «деполяризатора» [7]. Такой элемент преобразовывает исходный линейно-поляризованный лазерный пучок в пучок с линейной

зависимостью ориентации вектора поляризации от одной из декартовых координат ( $x, y$ ), то есть в световое поле, формируемое в результате интерференции двух лазерных пучков с взаимно ортогональной круговой поляризацией [8, 9]. При этом возможна запись решёток с дискретным или непрерывным изменением ориентации линий [7]. Использование комбинаций нескольких «деполяризаторов», а также таких элементов, как  $q$ -волновые пластинки, позволяющие формировать цилиндрически поляризованные пучки, позволило осуществлять контроль периода записываемых решёток, а также формировать вилкообразные решётки [10]. Использование же световых полей с более сложным распределением поляризации для лазерной обработки тонких плёнок ХС позволит реализовать прямую лазерную запись более сложных оптических микроэлементов, а также нано- и микроструктур, что ранее не было продемонстрировано.

В данной работе мы предлагаем формировать световые поля с динамически перестраиваемым структурированным распределением поляризации за счёт использования пространственного модулятора света и использовать их для создания спиралевидных микрорельефов в тонких плёнках ХС на основе многослой-

ных структур  $As_2S_3$  и  $a-Se$ . В настоящее время такие спиралевидные рельефы широко используются для формирования лазерных пучков с ненулевым орбитальным угловым моментом (ОУМ) [11].

Основная идея работы заключается в формировании световых полей с зависимостью ориентации вектора поляризации не от одной из декартовых координат ( $x, y$ ), а от угла  $\varphi$  в полярных координатах ( $r, \varphi$ ). Как было отмечено выше, световые поля с зависимостью ориентации вектора поляризации от одной из декартовых координат ( $x, y$ ) вызывают движение поверхностных волн расплавленного материала ХС в направлении изменения вектора поляризации. Таким образом, можно полагать, что в случае зависимости от полярного угла будет происходить движение материала по окружности от 0 до 360 градусов и формирование спиралевидного рельефа (см. рис. 1).

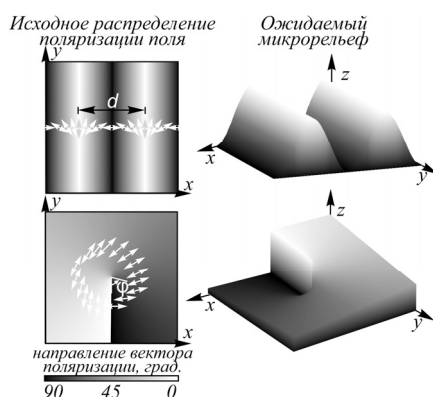


Рис. 1. Объяснение возможности формирования спиралевидного микрорельефа за счёт использования светового поля с распределением поляризации, обладающим зависимостью от полярного угла.  $d$  – период сформированной поляризационной решётки

### Экспериментальные результаты

Оптическая схема, использованная для реализации предложенного метода формирования структурированных лазерных пучков с требуемым распределением поляризации для лазерной обработки тонких плёнок ХС, показана на рис. 2. Схема основана на применении пропускающего модулятора света SLM HOLOEYE LC 2012 (разрешение –  $1024 \times 768$  пикселей, размер пикселя –  $36 \mu\text{м}$ ) и реализует метод проекционной литографии. Такой модулятор света может работать в режиме фазовой или амплитудной модуляции [12]. В случае амплитудной модуляции необходимо использовать два поляризатора-анализатора, ориентированных перпендикулярно друг другу – один из них расположен перед модулятором, а второй – после него [13]. Второй поляризатор-анализатор позволяет визуализировать изменения поляризации и таким образом реализовать нужную амплитудную модуляцию. При отсутствии второго поляризатора будет происходить только модуляция поляризации и фазы поля.

Линейно поляризованный гауссов пучок от твердотельного лазерного источника MGL-U-532-1W не-

прерывного излучения (длина волны –  $532 \text{ нм}$ , максимальная выходная мощность –  $1 \text{ Вт}$ ) коллимировался и расширялся с помощью комбинации микрообъектива MO1 ( $3,7\times$ ,  $NA=0,11$ ), круговой диафрагмы D1 (размер апертуры –  $20 \mu\text{м}$ ) и линзы L1 с фокусным расстоянием  $100 \text{ мм}$ . Для усиления контраста линейной поляризации использовался дополнительный поляризатор P. Для управления лазерным пучком и наведения его на дисплей модулятора света использовалась система двух зеркал M1 и M2. Для реализации схемы проекционной литографии были использованы линза L2 с фокусным расстоянием –  $400 \text{ мм}$  и микрообъектив MO2 ( $40\times$ ,  $NA=0,65$ ). Микрообъектив MO3 ( $8\times$ ,  $NA=0,2$ ) в комбинации с освещающей лампочкой ИВ, зеркалом M3 и линзой L4 с фокусным расстоянием  $50 \text{ мм}$  использовался для освещения поверхности образца с тонкой плёнкой ХС. Стеклоподложка с нанесенной тонкой плёнкой была установлена на трёхкоординатном передвижном столике XYZ. Были использованы тонкие плёнки общей толщиной  $1,3 \mu\text{м}$  на основе 110 пар нанослоев  $As_2S_3$  и Se с толщинами  $9$  и  $3 \text{ нм}$ . «Эффективный» показатель преломления такой плёнки – около  $2,45$  при  $650 \text{ нм}$ . Для наблюдения поверхности образца во время его обработки использовалась видеокамера CAM TourCam UCMOS08000KPB (разрешение –  $1600 \times 1200$  пикселей, размер пикселя –  $3,34 \mu\text{м}$ ). Фильтр нейтральной плотности F понижал уровень интенсивности для наблюдения, а линза L3 с фокусным расстоянием  $400 \text{ мм}$ , зеркало M4 и светоделительный кубик BS были использованы для построения изображения поверхности образца на матрице видеокамеры. Использование дополнительной круговой диафрагмы D2 позволяло контролировать размер светового поля, освещающего тонкую плёнку, который совпадал с размером обрабатываемых участков плёнки (примерно  $10 \mu\text{м}$  в диаметре).

В экспериментах исследовалась возможность формирования спиралевидных микрорельефов на поверхности тонких плёнок ХС, а также возможность управления их профилями за счёт изменения поляризационной структуры освещающего светового поля. Для этого были использованы три различные маски, реализованные с помощью модулятора света. Изображения, использованные в качестве этих масок, имеют зависимость своего профиля от полярного угла, но отличаются контрастом К. Известно, что при использовании модуляторов света контраст изображений, используемых для реализации выводимых на дисплей масок, влияет на динамический диапазон реализуемой оптической модуляции [12]. В наших экспериментах были использованы три предустановленных значения контраста в программе управления модулятором света HOLOEYE SLM Pattern Generator [14]:  $-80, 0, 80$ . Соответствующие маски показаны на рис. 2б. Изменение контраста маски приводит к изменению типа зависимости модуляции от полярного уг-

ла  $\phi$  – от линейного при  $K=0$  к различным нелинейным зависимостям при ненулевых контрастах. При отрицательных значениях контраста кривая зависимости становится более вогнутой, в то время как при положительных значениях – более выпуклой. Эти кривые для масок, использованных в данной работе, показаны на рис. 2в. Следует отметить, что заводские настройки программного обеспечения HOLOEYE SLM Pattern Generator по умолчанию оптимизированы для фазовых приложений. Из-за этого реальные зависимости несколько отличаются от представленных на рис. 2в. На рис. 3 показаны распределения интенсивности, сформированные масками непосредственно после модулятора света. Представлены как полные интенсивности, так и интенсивности, полученные при использовании еще одного поляризатора-анализатора, позволяющего визуализировать осуществлённые модуляции распределения поляризации исходного линейно поляризованного лазерного пучка. Хорошо видно, что распределения полной интенсивности во всех случаях одинаковы, а интенсивности, полученные с помощью поляризатора-анализатора, различны.

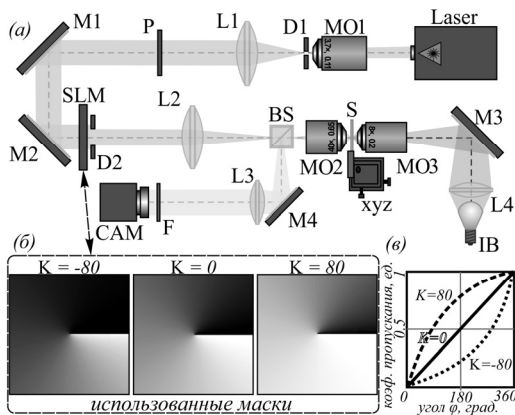


Рис. 2. Эксперимент по формированию спиралевидных микрорельефов в тонких плёнках ХС. (а) Оптическая схема эксперимента. (б) Маски с разными значениями контраста  $K$ , использованные в экспериментах. (в) Зависимости пропускания этих масок от полярного угла в режиме амплитудной модуляции

Использование проекционной литографии в данных экспериментах позволило использовать сформированные световые поля для прямой лазерной обработки образца с тонкими плёнками ХС. Трёхмерные профили микрорельефа, сформированного на поверхности тонкой пленки для каждой из трёх рассмотренных масок, показаны на рис. 4. Профили получены с помощью сканирующего зондового микроскопа NT-MDT SOLVER Pro-M в полуконтактном режиме работы (частота сканирования линии составляла 1 Гц). Эти микрорельефы формировались путем облучения лазерными пучками со структурированным распределением поляризации в течение 20 с. Расчётная мощность лазерного воздействия на обрабатываемый участок тонкой полимерной плёнки была менее 1 мВт.

Видно, что сформированные микрорельефы имеют спиральную форму. При этом в центральной части обрабатываемых областей поверхности не наблюдается формирование рельефа, что можно объяснить некоторой схожестью сформированного распределения поляризации, обладающего зависимостью от полярного угла, с поляризационными сингулярностями цилиндрически поляризованных пучков. Известно, что в случае последних наблюдается ноль амплитуды в центре пучка. Вероятно, похожая ситуация возникает и в данном случае, и поэтому в центральной области не происходит никаких изменений с расплавленным материалом во время облучения этих участков. При этом из анализа профилей сформированных микрорельефов видно, что выпуклость кривых, описывающих их профиль, меняется в зависимости от контраста исходной маски, выводимой на дисплей модулятора света. Аппроксимация профилей полиномом третьего порядка показывает, что при  $K=0$  происходит примерно линейное увеличение высоты сформированного микрорельефа, при  $K=-80$  профиль становится более выпуклым, а при  $K=80$  – более вогнутым. Таким образом, управление распределением поляризации освещающего светового поля позволяет изменять не только направление движения расплавленного материала, но и другие его параметры, как при движении расплавленного материала в линейном направлении или его движении по заданной кривой. Это и позволило осуществить в наших экспериментах контролируемый спиралевидный массоперенос. Стоит отметить, что при значении  $K=80$  в центральной области сформированного микрорельефа глубина рельефа ниже поверхности плёнки, что говорит также и о радиальном массопереносе, возникающем в данном случае в дополнение к спиралевидному.

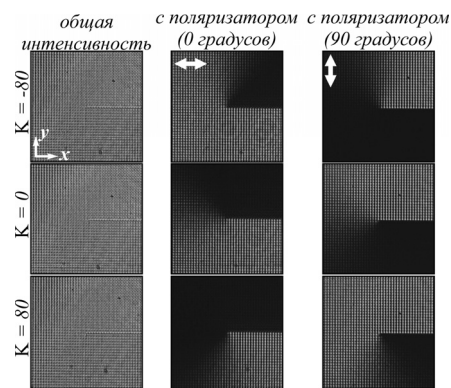


Рис. 3. Световые поля, сформированные непосредственно после модулятора света при использовании масок с различным контрастом  $K$ . Показаны распределения интенсивности, полученные без и с использованием поляризатора-анализатора при его различных ориентациях

### Заключение

Мы продемонстрировали возможность реализации спиралевидного массопереноса в тонких плёнках ХС с использованием световых полей со структурирован-

ным распределением поляризации, имеющим зависимость ориентации вектора поляризации от полярного угла. Благодаря этому расплавленный материал при его облучении непрерывным лазерным излучением перемещается в направлении вращения вектора поляризации. Для экспериментального формирования световых полей с требуемым распределением поляризации мы использовали пропускающий пространственный модулятор света, что позволило показать зависимость профилей сформированных микрорельефов от контраста изображений масок, выводимых на дисплей моду-

лятора. Продемонстрированная техника контроля вогнутости/выпуклости формируемых спиральных микрорельефов может быть использована при изготовлении различных вариантов спиральных фазовых микроэлементов, формирующих световые поля с различным распределением плотности ОУМ [15–17]. Полученные результаты также показывают высокий потенциал использования модуляторов света для управления распределением поляризации лазерных пучков в установках прямой лазерной обработки фоточувствительных материалов.

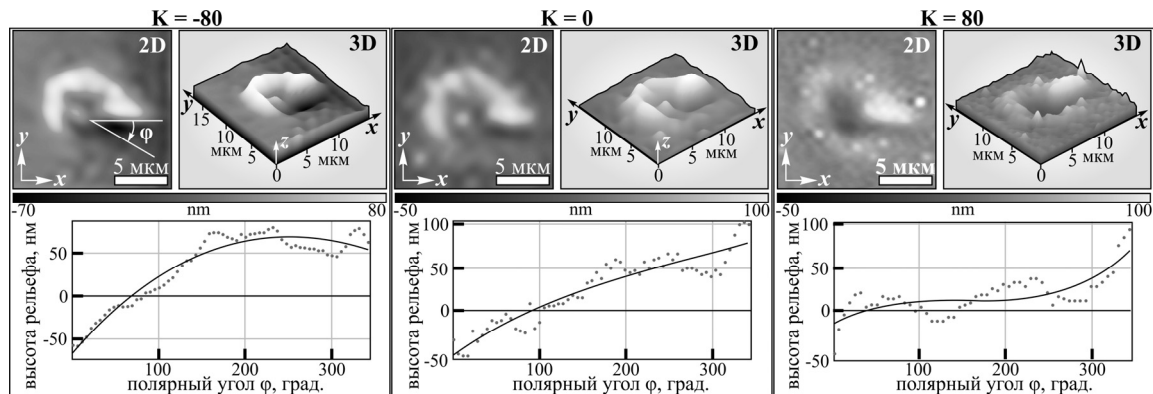


Рис. 4. Трёхмерные профили изготовленных микрорельефов, полученные с помощью сканирующего зондового микроскопа (верхний ряд), а также соответствующие им зависимости высоты рельефа от полярного угла (нижний ряд)

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-79-10007) в части экспериментов, а также в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» в части подготовки модулятора света для экспериментов.

### References

- [1] Kadono K, Kitamura N. Recent progress in chalcogenide glasses applicable to infrared optical elements manufactured by molding technology. *J Ceram Soc Japan* 2022; 130(8): 584-589. DOI: 10.2109/JCERSJ2.22079.
- [2] Kumar H, Saroj AL. Recent advances in chalcogenide glasses and their applications. *Materials science: a field of diverse industrial applications*. Sharjah: Bentnam Science Publishers; 2023: 26-45.
- [3] Tanaka K. Light-induced anisotropy in amorphous chalcogenides. *Science* 1997; 277(5333): 1786-1787. DOI: 10.1126/SCIENCE.277.5333.1786.
- [4] Meshalkin AY. Reversible polarization recording in As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>-Se multilayer nanostructures. *Surf Eng Appl Electrochem* 2018; 54: 407-414. DOI: 10.3103/S1068375518040129.
- [5] Vleck M, Schroeter S, Brueckner S, Fehling S, Fiserova A. Direct fabrication of surface relief gratings in chalcogenide glasses by excimer laser interference lithography. *J Mater Sci: Mater Electron* 2009; 20: 290-293. DOI: 10.1007/S10854-008-9584-6.
- [6] Achimova E, Stronski A, Abaskin V, Meshalkin A, Paiuk A, Prisacar A, Oleksenko P, Triduh G. Direct surface relief formation on As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>-Se nanomultilayers in dependence on polarization states of recording beams. *Opt Mater* 2015; 47: 566-572. DOI: 10.1016/J.OPTMAT.2015.06.044.
- [7] Porfirev AP, Khonina SN, Ivliev NA, Porfirev DP. Laser processing of chalcogenide glasses using laser fields with a spatially varying polarization distribution. *Opt Laser Technol* 2023; 167: 109716. DOI: 10.1016/J.OPTLASTEC.2023.109716.
- [8] Ouskova E, Aryasova N, Boichuk V, Fedorenko D, Slyusarenko K, Reznikov Y. Asymmetry peculiarities of surface-mediated liquid crystals gratings recorded due to light-induced anchoring. *Mol Cryst Liq* 2010; 527(1): 43-199. DOI: 10.1080/15421406.2010.486622.
- [9] Kovalev AA, Kotlyar VV. Spin angular momentum of Gaussian beams with several polarization singularities. *Computer Optics* 2023; 47(6): 863-874. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1312.
- [10] Porfirev AP, Khonina SN, Ivliev NA, Porfirev DP, Kazanskiy NL. Stacked polarizing elements for controlling parameters of surface relief gratings written in photosensitive materials. *Sensors* 2024; 24(4): 1166. DOI: 10.3390/s24041166.
- [11] Masuda K, Shinozaki R, Kinezuka Y, Lee J, Ohno S, Hashiyada S, Okamoto H, Sakai D, Harada K, Miyamoto K, Omatsu T. Nanoscale chiral surface relief of azopolymers with nearfield OAM light. *Opt Express* 2018; 26(17): 22197-22207. DOI: 10.1364/OE.26.022197.
- [12] LC 2012 spatial light modulator (transmissive) – HOLOEYE photonics AG. 2012. Source: <https://holoeye.com/products/spatial-light-modulators/lc-2012-spatial-light-modulator-transmissive/>.
- [13] Akbulut D, Huisman TJ, van Putten EG, Vos WL, Mosk AP. Focusing light through random photonic media by binary amplitude modulation. *Opt Express* 2011; 19(5): 4017-4029. DOI: 10.1364/OE.19.004017.
- [14] SLM pattern generator – HOLOEYE photonics AG. Source: <https://holoeye.com/products/spatial-light-modulators/slm-pattern-generator/>.
- [15] Shen D, Wang K, Zhao D. Generation and propagation of a new kind of power-exponent-phase vortex beam. *Opt Express* 2019; 27(17): 24642-24653. DOI: 10.1364/OE.27.024642.

[16] Kotlyar VV, Kovalev AA. Orbital angular momentum of an arbitrary axisymmetric light field after passing through an off-axis spiral phase plate. *Computer Optics* 2018; 42(2): 212-218. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-2-212-218.

[17] Khonina SN, Ustinov AV, Logachev VI, Porfirev AP. Properties of vortex light fields generated by generalized spiral phase plates. *Phys Rev A* 2020; 101(4): 043829. DOI: 10.1103/PhysRevA.101.043829.

---

*Сведения об авторах*

**Порфирьев Алексей Петрович**, 1987 года рождения, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отделения «Институт систем обработки изображений – Самара» Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», старший научный сотрудник Самарского университета. Область научных интересов: дифракционная оптика, структурированный свет, оптическое манипулирование, лазерная обработка материалов. E-mail: [porfirev.alexey@ipsiras.ru](mailto:porfirev.alexey@ipsiras.ru)

**Хонина Светлана Николаевна**, доктор физико-математических наук, профессор Самарского университета; главный научный сотрудник отделения «Институт систем обработки изображений – Самара» Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт». Область научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования, оптическое манипулирование, оптическая и цифровая обработка изображений. E-mail: [khonina@ipsiras.ru](mailto:khonina@ipsiras.ru)

**Ивлиев Николай Александрович**, 1987 года рождения, в 2010 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет (ныне Самарский национальный исследовательский университет, сокращенно Самарский университет) по специальности «Конструирование и технология радиоэлектронной техники». Кандидат технических наук (2015). В настоящее время работает научным сотрудником отделения «Институт систем обработки изображений – Самара» Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», доцентом кафедры технической кибернетики Самарского университета. Область научных интересов: физика поверхности, микро- и нанотехнологии. E-mail: [ivlievn@gmail.com](mailto:ivlievn@gmail.com)

**Порфирьев Денис Петрович**, 1985 года рождения, кандидат физико-математических наук, доцент Самарского университета, высококвалифицированный научный сотрудник Самарского филиала Физического института имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, старший научный сотрудник Самарского университета. Область научных интересов: квантовая химия, взаимодействие излучения с веществом. E-mail: [porfirev.dp@ssau.ru](mailto:porfirev.dp@ssau.ru)

---

ГРНТИ: 29.31.27

Поступила в редакцию 31 января 2024 г. Окончательный вариант – 6 марта 2024 г.

---

---

# Formation of laser beams with a structured polarization distribution for the fabrication of spiral microreliefs in thin films of chalcogenide glasses

A.P. Porfirev<sup>1,2</sup>, S.N. Khonina<sup>1,2</sup>, N.A. Ivliev<sup>1,2</sup>, O.P. Porfirev<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Image Processing Systems Institute, NRC "Kurchatov Institute",  
443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 151,

<sup>2</sup> Samara National Research University, 443086, Samara, Russia, Moskovskoye Shosse 34,

<sup>3</sup> Lebedev Physical Institute, 443034, Samara, Russia, Novo-Sadovaya 221

## Abstract

We propose a method of the formation of spiral-shaped microreliefs in thin films of chalcogenide glasses. The method is based on projection lithography using laser beams with a structured polarization distribution. To control the polarization of the initial laser beam, a spatial light modulator HOLOEYE LC 2012 is used. It is shown that changing the contrast of the mask images displayed on the modulator display affects the convexity/concavity of the formed profiles. This approach can be effectively used for the direct laser fabrication of more complex nano-/microelements, as well as their arrays.

**Keywords:** polarization, spatial light modulator, spiral microrelief, chalcogenide glasses, laser processing.

**Citation:** Porfirev AP, Khonina SN, Ivliev NA, Porfirev DP. Formation of laser beams with a structured polarization distribution for the fabrication of spiral microreliefs in thin films of chalcogenide glasses. *Computer Optics* 2024; 48(5): 676-680. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1501.

**Acknowledgements:** This work was financially supported by the Russian Science Foundation under project No. 22-79-10007 (experimental results) and within the state assignment of the National Research Center "Kurchatov Institute" (preparation of the spatial light modulator for the experiments).

---

## Authors' information

**Alexey Petrovich Porfirev**, born in 1987, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior researcher at the Institute of Image Processing Systems - Samara department of the Kurchatov Complex of Crystallography and Photonics of the Federal State Budgetary Institution "National Research Center "Kurchatov Institute", senior researcher at Samara University. Area of scientific interests: diffraction optics, structured light, optical manipulation, laser processing of materials. E-mail: [porfirev.alexey@ipsiras.ru](mailto:porfirev.alexey@ipsiras.ru)

**Svetlana Nikolaevna Khonina**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of Samara University; chief researcher of the department "Institute of Image Processing Systems - Samara" of the Kurchatov Complex of Crystallography and Photonics of the Federal State Budgetary Institution "National Research Center "Kurchatov Institute". Area of scientific interests: diffraction optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulation, optical and digital image processing. E-mail: [khonina@ipsiras.ru](mailto:khonina@ipsiras.ru)

**Nikolay Aleksandrovich Ivliev**, born in 1987, graduated from Samara State Aerospace University (now Samara National Research University, abbreviated as Samara University) in 2010 with a degree in "Design and Technology of Radio-electronic Equipment." Candidate of Technical Sciences (2015). He is a researcher at the department of the Institute of Image Processing Systems - Samara of the Kurchatov Complex of Crystallography and Photonics of the Federal State Budgetary Institution National Research Center Kurchatov Institute and an associate professor of Technical Cybernetics department of Samara University. Area of scientific interests: surface physics, micro and nanotechnologies. E-mail: [ivlievn@gmail.com](mailto:ivlievn@gmail.com)

**Denis Petrovich Porfirev**, born in 1985, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor at Samara University, highly qualified research fellow at the Samara Branch of the P.N. Lebedev Russian Academy of Sciences, senior researcher at Samara University. Area of scientific interests: quantum chemistry, light-matter interaction. E-mail: [porfirev.dp@ssau.ru](mailto:porfirev.dp@ssau.ru)

---

Received January 31, 2024. The final version – March 6, 2024.

---