

Исследование формирования гибридно-поляризованных лазерных пучков с использованием четырехсекторного поляризационного преобразователя

В.В. Подлипнов^{1,2}, С.В. Карпеев^{1,2}

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

²Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

Аннотация. В работе с помощью четырехсекторного преобразователя поляризации формировались пучки с различными гибридными поляризациями. В качестве преобразователя использовался кристалл кальцита, два противоположных сектора которого были вытравлены на глубину 1970 нм. Экспериментальные картины распределения полной интенсивности, х-компоненты и у-компоненты в диапазоне длин волн 500-800нм, а также численные расчеты показали, что ортогональные поляризационные состояния пучков в противоположных секторах происходит на длине волны примерно 680.

1. Введение

Пучки с различными гибридными поляризациями рассмотрены в работах [1, 2] и могут служить для формирования фокальных распределений заданного вида. Формирование пучков со сложным поляризационным состоянием эффективно осуществляется при помощи секторных пластинок, в которых сектора представляют собой либо полуволновые пластинки, либо плёночные поляризаторы. В первом варианте используется линейно поляризованный освещающий пучок, а во втором случае – пучок с круговой поляризацией. Известны также поляризационные преобразователи на основе субволновых дифракционных решеток. Сектора поляризационного преобразователя могут быть выполнены в виде субволновых отражательных дифракционных решёток, которые так же, как и полуволновые пластинки, обеспечивают поворот плоскости поляризации и используются при линейной поляризации освещающего пучка. Отличительной особенностью секторных поляризационных преобразователей является простота использования.

Вариант ДОЭ на двулучепреломляющем кристалле предложен в работах [3, 4] для формирования радиально и азимутально поляризованных пучков. Такой ДОЭ представляет собой многоуровневую спиральную фазовую пластинку, причем на полной высоте рельефа значение разности хода обыкновенного и необыкновенного лучей должно составлять 2λ . Даже для материала с высокой анизотропией высота рельефа получается значительной, что технологически сложно реализуемо.

В данной работе предложен новый подход к созданию ДОО на основе анизотропного кристалла для преобразования поляризационного состояния пучков. Этот подход заключается в создании четырёхсекторного преобразователя с двухуровневым микрорельефом, причем в соседних секторах состояния поляризации выходного пучка отличаются.

2. Экспериментальное исследование

Рассмотрим изготовление секторной пластины в форме одиночного двулучепреломляющего кристалла с секторами, образованными на поверхности микрорельефом. В этом случае вместо стыков отдельных полуволновых пластин появляется шаг, который вносит гораздо меньше искажений. Как легко понять, на анизотропном одноосном кристалле можно получить только четыре секции, что обеспечит парное ортогональное состояние поляризации лучей, проходящих через них. Для этого полуволновые пластины должны быть сформированы в двух противоположных секторах путем травления двух других секторов до определенной глубины. Глубина травления по отношению к подложке должна удовлетворять условию:

$$h = (n_o - n_e) \frac{\lambda}{2} = \Delta n \frac{\lambda}{2}, \quad (1)$$

где Δn - двойное лучепреломление, и λ - длина волны, на которой предполагается использовать преобразователь. Для правильной работы полуволновых пластин, расположенных на поверхности анизотропного кристалла толщины H , после прохождения через этот кристалл состояние поляризации пучка не должно изменяться, то есть условие

$$H = \Delta n \lambda_i \quad (2)$$

должен быть встречен. Условие (2) удовлетворяется для ряда длин волн, которые квазипериодически повторяются с локальным периодом:

$$\Delta \lambda = \lambda_i - \lambda_{i+1} = \frac{\lambda_i^2}{H \Delta n} = \frac{\lambda_i}{N}.$$

В качестве анизотропного кристалла был выбран х-срез исландского шпата CaCO_3 . Для видимого диапазона длин волн необходимая глубина травления кристалла CaCO_3 не превышает 2 мкм. Наиболее подходящим является жидкостное травление в растворе динатриевой соли этилендиаминтетрауксусной кислоты ($\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_8$, трилон Б). Данный процесс обеспечивает относительно высокую скорость травления при сохранении хорошего качества полировки протравливаемой поверхности.

Для приготовления травящего раствора в 45 мл деионизированной воды при температуре 60 °С растворялось 10 г трилона Б, что соответствует теоретическому пределу растворимости при данной температуре. Весь процесс травления производился с поддержанием данной температуры с помощью термостоллика с программным управлением.

Травление кристалла CaCO_3 по заданному фотошаблону обеспечивала фоторезистивная маска, для создания которой был выбран позитивный фоторезист ФП-2512, имеющий повышенную химическую стойкость и возможность получения относительно толстых слоев.

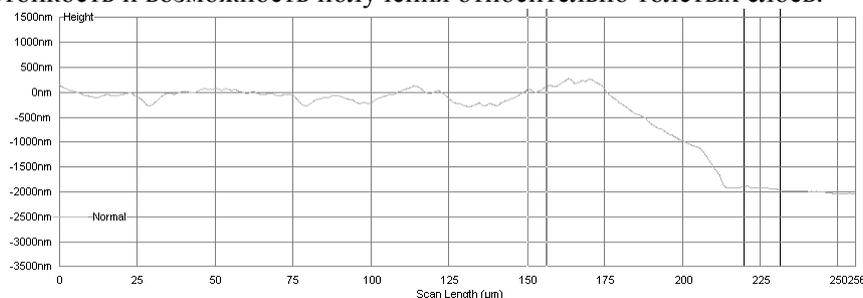


Рисунок 1. Профиллограмма ступеньки сформированной на поверхности кальцита.

При экспериментальном исследовании проводился подбор длин волн, обеспечивающих получение в секторах элемента различно ориентированных линейных и эллиптических

поляризаций. Для подбора длины волны использовался перестраиваемый лазер EKSPLA NT-200, который обеспечивает шаг изменения длины волны 0,1 нм. Результаты экспериментального исследования свойств формируемых пучков (Рисунок 2) хорошо согласуются с результатами моделирования.

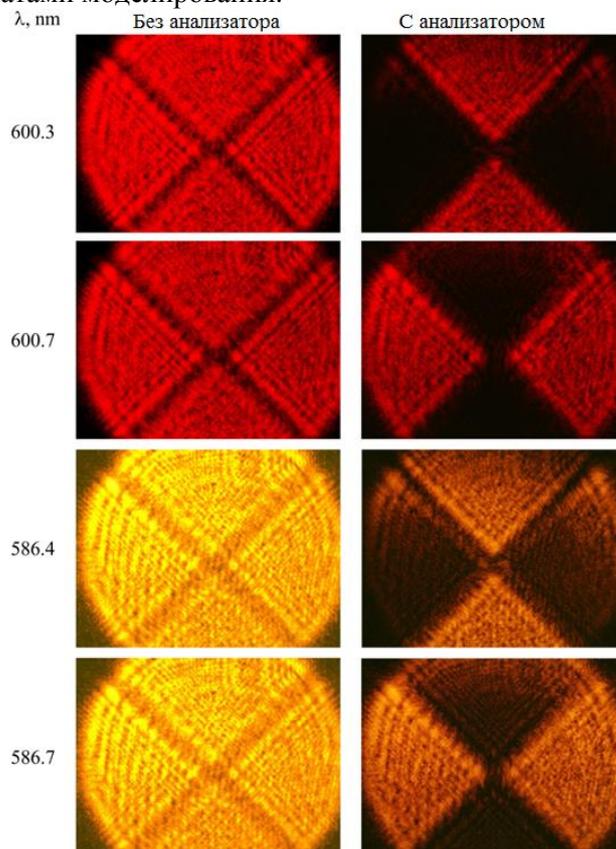


Рисунок 2 Распределение интенсивности сформированные 4-секторным преобразователем поляризации при различных длинах волн. Размер изображения 4×4 мм.

На заданных длинах волн диапазона 500 – 800 нм получены расчетные распределения интенсивности x- и y-компонент выходных пучков в ближней и дальней зонах разработанного элемента.

3. Заключение

Мы рассмотрели работу ДОЭ в виде ступеньки на поверхности анизотропного кристалла. Мы разработали метод изготовления секторных пластин для преобразования поляризационного состояния пучков. Разработан и внедрен метод, основанный на травлении кристалла кальцита. Полученная ширина ступеней на кристалле кальцита в 4 раза меньше ширины стыков в преобразователе, собранном из полуволновых пластин. Мы численно моделировали преобразования поляризации, когда свет проходит через преобразователь на разных длинах волн, а также когда проходящий луч фокусируется линзой. Результаты экспериментального исследования изготовленного четырехсекторного поляризационного преобразователя хорошо согласуются с результатами расчетов и численного моделирования.

4. Литература

- [1] Du1, L. Manipulating orbital angular momentum of light with tailored inplane polarization states / L. Du1 [et al.] // Sci. Rep. – 2017. – Vol. 7. – P. 41001. DOI: 10.1038/srep41001.
- [2] Lerman, G.M. Generation and tight focusing of hybridly polarized vector beams / G.M. Lerman, L. Stern, U. Levy // Opt. Express. – 2010. – Vol. 18(26). – P. 27650-27657.

- [3] Machavariani, G. Efficient extracavity generation of radially and azimuthally polarized beams // *Opt. Lett.* – 2007. – Vol. 32(11). – P. 1468-1470. DOI: 10.1364/OL.32.001468.
- [4] Machavariani, G. Spatially-variable retardation plate for efficient generation of radially- and azimuthally-polarized beams // *Opt. Commun.* – 2008. – Vol. 281(4). – P. 732-738. DOI: 10.1016/j.optcom.2007.10.088.
- [5] Man, Zh. Arbitrary vector beams with selective polarization states patterned by tailored polarizing films // *Laser. Phys.* – 2013. – Vol. 23(10). – P. 105001. DOI: 10.1088/1054-660X/23/10/105001.
- [6] Xu, F. Polarization-selective computer-generated holograms: design, fabrication, and applications / F. Xu, J.E. Ford, Y. Fainman // *Appl. Opt.* – 1995. – Vol. 34(2). – P. 256-266. DOI: 10.1364/AO.34.000256.
- [7] Nalimov, A.G. Reflected four-zones subwavelength microoptics element for polarization conversion from linear to radial / A.G. Nalimov, L. O'Faolain, S.S. Stafeev, M.I. Shanina, V.V. Kotlyar // *Computer Optics.* – 2014. – Vol. 38(2). – P. 229-236.
- [8] Stafeev, S.S. A four-zone reflective azimuthal micropolarizer / S.S. Stafeev, A.G. Nalimov, M.V. Kotlyar, L. O'Faolain // *Computer Optics.* – 2015. – Vol. 39(5). – P. 709-715. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-709-715.
- [9] Niu, C.-H. A new method for generating axially-symmetric and radially-polarized beams // *J. Phys. D.* – 2005. – Vol. 38(6). – P. 827-832. DOI: 10.1088/0022-3727/38/6/006.
- [10] Khonina, S.N. Generating inhomogeneously polarized higher-order laser beams by use of diffractive optical elements / S.N. Khonina, S.V. Karpeev // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 2011. – Vol. 28(10). – P. 2115-2123. DOI: 10.1364/JOSAA.28.002115.
- [11] Phua, P.B. Mimicking optical activity for generating radially polarized light // *Opt. Lett.* – 2007. – Vol. 32(4). – P. 376-378. DOI: 10.1364/OL.32.000376.
- [12] Lai, W.J. Generation of radially polarized beam with a segmented spiral varying retarder // *Opt. Express.* – 2008. – Vol. 16(20). – P. 15694-15699. DOI: 10.1364/OE.16.015694.
- [13] Khonina, S.N. Generation of cylindrical vector beams of high orders using uniaxial crystals // *J. Opt.* – 2015. – Vol. 17(6). – P. 065001. DOI: 10.1088/2040-8978/17/6/065001.
- [14] Khonina, S.N. Implementation of ordinary and extraordinary beams interference by application of diffractive optical elements // *J. Mod. Opt.* – 2016. – Vol. 63(13). – P. 1239-1247. DOI: 10.1080/09500340.2015.1137368.
- [15] Khonina, S.N. Polarization conversion under focusing of vortex laser beams. Along the axis of anisotropic crystals // *Phys. Lett. A.* – 2017. – Vol. 381. – P. 2444-2455. DOI: 10.1016/j.physleta.2017.05.025.
- [16] Alferov, S.V. Experimental study of focusing of inhomogeneously polarized beams generated using sector polarizing plates / S.V. Alferov, S.V. Karpeev, S.N. Khonina, O.Yu. Moiseev // *Computer Optics.* – 2014. – Vol. 38(1). – P. 57-66.

Благодарности

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (гранты №16-29-11744 офи_м, №18-29-20045 мк) в части теоретических исследований и моделирования и Министерства образования РФ в рамках выполнения государственного задания 3.3025.2017/4.6 в части изготовления ДОЭ.

Investigation of the formation of hybrid polarized laser beams using a four-sector polarization converter

V.V. Podlipnov^{1,2}, S.V. Karpeev^{1,2}

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

²Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

Abstract. In the work, using a four-sector polarization converter, beams with different hybrid polarizations were formed. A calcite crystal was used as a converter. Two opposite sectors of which were etched to a depth of 1970 nm. Experimental pictures of the distribution of total intensity, x-components and y-components in the wavelength range of 500-800nm, as well as numerical calculations showed that the orthogonal polarization states of the beams in opposite sectors occur at a wavelength of about 680.