

ЧЕТЫРЁХСЕКТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПОЛЯРИЗАЦИИ, ИНТЕГРИРОВАННЫЙ В КРИСТАЛЛ КАЛЬЦИТА

С.В. Карпеев^{1,2}, В.В. Подлипов^{1,2}, С.Н. Хонина^{1,2}, В.Д. Паранин², А.С. Решетников²

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

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

Аннотация

Предложен новый подход к реализации секторных пластин для преобразования поляризационного состояния пучков. Разработана и реализована технология травления кристалла кальцита для интегрирования в него четырёхсекторного преобразователя поляризации. Экспериментально реализован и исследован четырёхсекторный преобразователь поляризации, обеспечивающий попарное ортогональное поляризационное состояние секторов. Проведено сравнение стыков секторов интегрированного преобразователя со стыками секторов из отдельных фрагментов волновых пластин. Проведён анализ спектральных свойств такого преобразователя, определены длины волн, при которых происходит нужное преобразование. Экспериментально показано, что квазипериодическое повторение условий соответствия фазовой задержки замедляется при увеличении длины волны.

Ключевые слова: неоднородная поляризация, секторные поляризационные пластинки, качество стыковки секторов, спектральный метод подбора условия соответствия фазы.

Цитирование: Карпеев, С.В. Четырёхсекторный преобразователь поляризации, интегрированный в кристалл кальцита / С.В. Карпеев, В.В. Подлипов, С.Н. Хонина, В.Д. Паранин, А.С. Решетников // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 3. – С. 401-407. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-3-401-407.

Введение

Исследованию способов получения цилиндрических векторных пучков посвящено в последние годы значительное число работ. Среди способов получения цилиндрических векторных пучков можно назвать методы, основанные на применении секторных пластинок, в которых сектора представляют собой соответствующим образом ориентированные либо полуволновые пластинки [1, 2], либо плёночные поляризаторы [3]. В первом варианте используется линейно поляризованный освещающий пучок, а во втором случае – пучок с круговой поляризацией. Сектора также могут быть выполнены в виде субволновых отражательных дифракционных решёток [4, 5], которые так же, как и волновые пластинки, обеспечивают поворот плоскости поляризации и используются с линейной поляризацией освещающего пучка. Отличительной особенностью секторных поляризационных преобразователей является простота использования и высокая эффективность готовых устройств при технологической сложности их качественного изготовления.

Преобразователь линейной поляризации, состоящий из секторных полуволновых пластинок, можно использовать для формирования как радиальной, так и азимутальной поляризации. Плёночный преобразователь рассчитан на трансформацию круговой поляризации только в одну из цилиндрических поляризаций. Решёточные преобразователи также делаются отдельно для преобразования линейной поляризации в радиальную [4] либо азимутальную [5].

Эффективное преобразование (практически без энергетических потерь) обеспечивает лишь вариант с полуволновыми пластинками. Понятно, что плёночный преобразователь имеет эффективность в лучшем случае 50%. У преобразователя на основе субволновых решёток эффективность и, следовательно, поляри-

зационный контраст меняются в зависимости от угла поворота плоскости поляризации. Так, в работе [5] поляризационный контраст менялся по секторам от 185:1 до 6:1, что, конечно, не отвечает даже самым минимальным требованиям. Следует также отметить, что это свойство изменения эффективности теоретически следует из самого механизма работы субволновых решёток и не может быть устранено никаким усложнением и без того достаточно сложной технологии их изготовления. Понятно, что и размер таких решёток при современном состоянии технологической базы не может превышать десятых долей миллиметра.

Для решёток, собранных из полуволновых пластинок и из поляризационной плёнки, основным фактором, ухудшающим качество сформированных пучков и, соответственно, усложняющим технологию изготовления, является неточная стыковка секторов. Зазоры и перекосы между секторами приводят к появлению высокочастотных шумов в виде дифракционных полос (особенно в ближней зоне) и к дополнительным нарушениям аксиальной симметрии сформированных пучков. Изначальное нарушение осевой симметрии определяется ограниченностью числа секторов (обычно их не более 8).

В работах [1–3] для борьбы с указанными явлениями применяют низкочастотную пространственную фильтрацию полученного пучка при помощи телескопической системы с точечной диафрагмой в фокусе. Это приводит к значительным потерям энергии, хотя дискретность из-за ограниченности числа секторов всё равно частично сохраняется.

Кардинальным решением, устраняющим этот недостаток, является изготовление секторной пластинки в виде одного двулучепреломляющего кристалла, на поверхности которого сектора формируются путём создания микрорельефа. При этом вместо стыков секторов появляется ступенька, которая вносит гораздо

меньше искажений, чем стык двух отдельных пластин. По сути, как и в [4, 5], преобразователь реализуется по технологии ДОЭ [6], но в отличие от [4, 5] сектора работают как кристаллические пластинки, и, следовательно, полностью устраняются все недостатки субволновых решёток.

ДОЭ для преобразования поляризации, выполненный на подложке из двулучепреломляющего материала, впервые был предложен в работе [7]. Однако ДОЭ [7] реализовывал принципиально другой подход к формированию неоднородных поляризаций [8], основанный на интерференции пары лазерных мод. Такой ДОЭ производит моду ГЭ (0, 1) в обыкновенном и ГЭ (1, 0) в необыкновенном лучах, которые формируются на определённом расстоянии. Далее моды подвергаются дополнительному фазовому преобразованию при помощи второго ДОЭ, после чего получается радиально-поляризованная мода R-TEM_(0,1). В качестве недостатков метода следует, прежде всего, отметить высокую технологическую сложность изготовления многоуровневого ДОЭ с максимальной высотой рельефа в несколько длин волн на кварцевой подложке. Видимо, по указанной причине в работе [7] отсутствует натуральный эксперимент с предложенным ДОЭ.

Другой вариант ДОЭ на двулучепреломляющем кристалле предложен в работах [9, 10] для формирования радиально- и азимутально-поляризованных пучков. Такой ДОЭ представляет собой многоуровневую спиральную фазовую пластинку, причём на полной высоте рельефа значение разности хода обыкновенного и необыкновенного лучей должно составлять 2λ. Даже для материала с высокой анизотропией, применённого в работе [10], это около 11 мкм. Таким образом, подход [9, 10] страдает теми же недостатками, что и подход [7]. Кроме того, использование элемента [10] сопряжено с применением иммерсионной кюветы из плавленого кварца со специальным гелем и дополнительными двумя четвертьволновыми и двумя полуволновыми кристаллическими пластинками в оптической схеме.

Следует отметить, что существует и другой механизм формирования неоднородных поляризаций в анизотропных кристаллах [11–13], не связанный с нанесением микрорельефа на поверхность кристалла. Однако этот механизм работает лишь в условиях непараксиальных падающих пучков специального вида, которые также получают при помощи отдельных ДОЭ.

В настоящей работе рассматривается изготовление и исследование четырёхсекторного преобразователя поляризации на едином кристалле кальцита с интегрированным на его поверхности ДОЭ, реализующим пару полуволновых пластин.

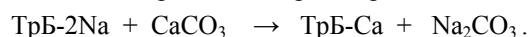
1. Основные параметры и технология изготовления поляризационного преобразователя

В данном параграфе обоснованы основные параметры и описана технология изготовления предложенного элемента. Прежде всего, надо определиться

с геометрическими параметрами и материалом для создания преобразователя.

Как легко понять, единый анизотропный одноосевой кристалл имеет одну ось и дает возможность создания только четырёхсекционного преобразователя. При этом в двух секторах должны быть созданы полуволновые пластинки. Простые расчёты показывают, что для создания необходимой разности хода в видимом диапазоне длин волн ступенька на кристаллическом кварце должна быть более 30 мкм. Такая величина является абсолютно неприемлемой с точки зрения как технологии, так и качества формируемого пучка, поэтому необходим материал с гораздо большей анизотропией, чем кварц. Таких доступных материалов всего два – это кальцит и ниобат лития. Как показали дальнейшие исследования, травление ниобата лития на необходимую глубину реализовать весьма сложно, а вот кальцит при необходимой глубине травления около 2 мкм вполне пригоден.

Для создания микрорельефа секторной пластины в кристалле CaCO₃ использовалось травление в растворе динариевой соли этилендиаминтетрауксусной кислоты (C₁₀H₁₄N₂Na₂O₈, трилон Б). Данный процесс обеспечивает относительно высокую скорость травления при сохранении высокого качества полировки обрабатываемой поверхности. Химическая реакция происходит с образованием растворимой соли:



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

Травление кристалла CaCO₃ по заданному фотошаблону обеспечивала фоторезистивная маска, для получения которой использовалась оптическая литография. В качестве основы маски был выбран позитивный фоторезист ФП-2512 вследствие его повышенной химической стойкости и возможности получения масок относительно высокой толщины. Литографический процесс состоял из следующих этапов:

- 1) очистка исходного кристалла в IPA с последующим промыванием в деионизированной воде;
- 2) нанесение фоторезиста методом центрифугирования на скорости 1500 об/мин., что обеспечило толщину слоя резиста около 1,5 мкм;
- 3) сушка фоторезиста на термостолке при температуре 130 °C в течение 2 минут;
- 4) экспонирование через контактную маску светодиодным источником с длиной волны 405 нм;
- 5) проявление в УПФ-1Б (на основе щелочи) в течение 30 секунд.

Для предотвращения травления обратной стороны кристалла после формирования фоторезистивной маски на неё была нанесена самоклеящаяся полиамидная пленка с высокой адгезией.

На начальном этапе травления через малые интервалы времени с помощью интерферометрии белого света было произведено несколько контрольных измерений глубины травления для оценки скорости и стабильности процесса травления. Для этого кристалл погружался в ранее приготовленный раствор трилона Б на одну минуту, после чего производилось измерение перепада высот между протравленным и маскированными участками с учётом толщины слоя фоторезиста. Таким образом, была определена скорость травления 0,27 мкм/мин. Дальнейшее травление кристалла осуществлялось с учётом полученной скорости. По окончании процесса растворения с кристалла механически удалялась плёнка полиамида. Фоторезистивная маска удалялась путём растворения в ацетоне с по-

следующей промывкой в изопропиловом спирте и деионизированной воде. Профилограмма полученной ступеньки приведена на рис. 1. На ней видно, что глубина травления составила около 2360 нм при толщине самой пластинки около 1,5 мм. Качество травлёной и нетравлёной поверхностей вполне сравнимо. Размер пластинки – 15×15 мм. Ширина зоны растрова составляет около 40 мкм. Такая относительно большая величина объясняется разностью скоростей травления вдоль и поперек оси кристалла. Вопрос оптимизации величины зоны растрова может быть предметом отдельного исследования. Однако зона растрова в любом случае намного меньше, чем ширина стыков полуволновых пластинок при сборке преобразователя из отдельных фрагментов [14].

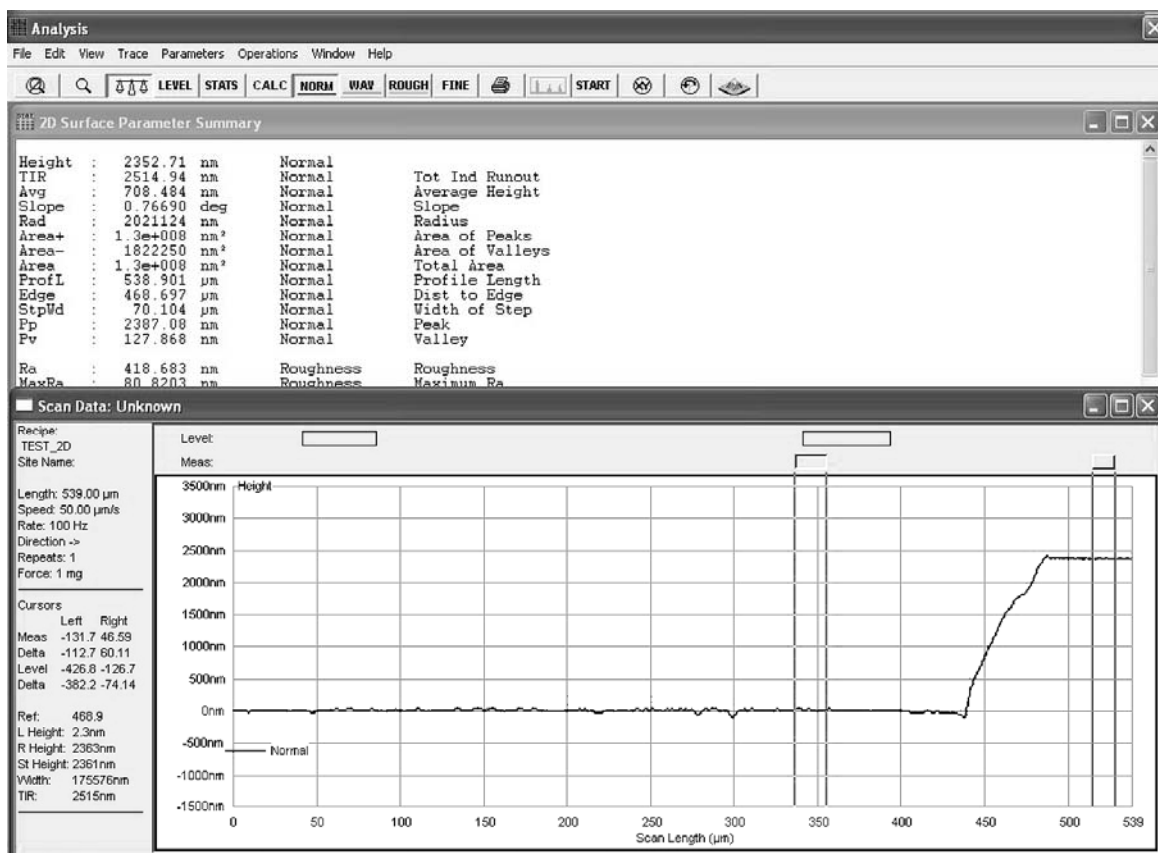


Рис. 1. Профилограмма ступеньки на кристалле кальция

Для сравнения на рис. 2 приведена фотография под микроскопом типичного стыка двух секций восьмисекторной пластинки на основе полуволновых пластинок мультипорядка [14]. Напомним, что в процессе отработки технологии нарезки секторов выяснилось, что обычная технология лазерной резки (термораскалывание) для произвольной ориентации реза относительно оси кристалла не обеспечивает высокого качества реза (поверхности реза могут отклоняться от строгой перпендикулярности по отношению к поверхности пластинок). В результате резку секторов осуществляли штрипсовой пилой, но и она не дала нужного качества реза. На рис. 2 видно, что промежуток между пластинами составляет около 180 мкм. Края пластинок также имеют местные дефекты до 50 мкм в ширину.

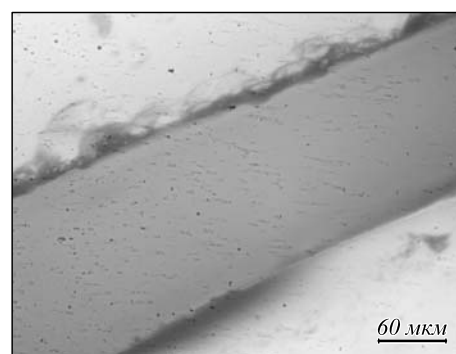


Рис. 2. Микрофотографии типичного стыка двух секций восьмисекторной пластинки на основе полуволновых пластинок мультипорядка [14]

2. Экспериментальное исследование интегрированной на кристалле секторной пластины

Рассмотрим теперь, как работает созданный преобразователь поляризации. Очевидно, что разность хода между обыкновенным и необыкновенным лучом при отсутствии интерферометрического контроля толщины пластины заранее неизвестна. Поэтому наилучшим решением для испытания пластины является экспериментальный подбор длин волн, на которых получается ортогональное поляризационное состояние пар расположенных по диагонали секторов. Понятно, что даже в видимом диапазоне таких длин волн будет большое количество, поскольку при изменении длины волны происходит периодическое изменение разности фаз по модулю 2π .

На рис. 3 приведены несколько распределений интенсивности света, прошедшего через преобразователь без анализатора и с анализатором для разных длин волн λ на расстоянии 50 мм от преобразователя. Для подбора длины волны использовался переключаемый лазер EKSPLA NT-200, который обеспечивает шаг изменения длины волны 0,1 нм. На рисунке хорошо видно, что для красного света полупериод трансформации полуволновой пластины составляет 0,4 нм, а для жёлтого – 0,3 нм.

Сравнение результатов с полученными в работе [14] в ближней зоне показывает существенное улучшение качества пучка по всем параметрам. Так, пятна от разных секторов теперь расположены почти вплотную в отличие от [14], где они располагались отдельно при таком же расстоянии плоскости наблюдения.

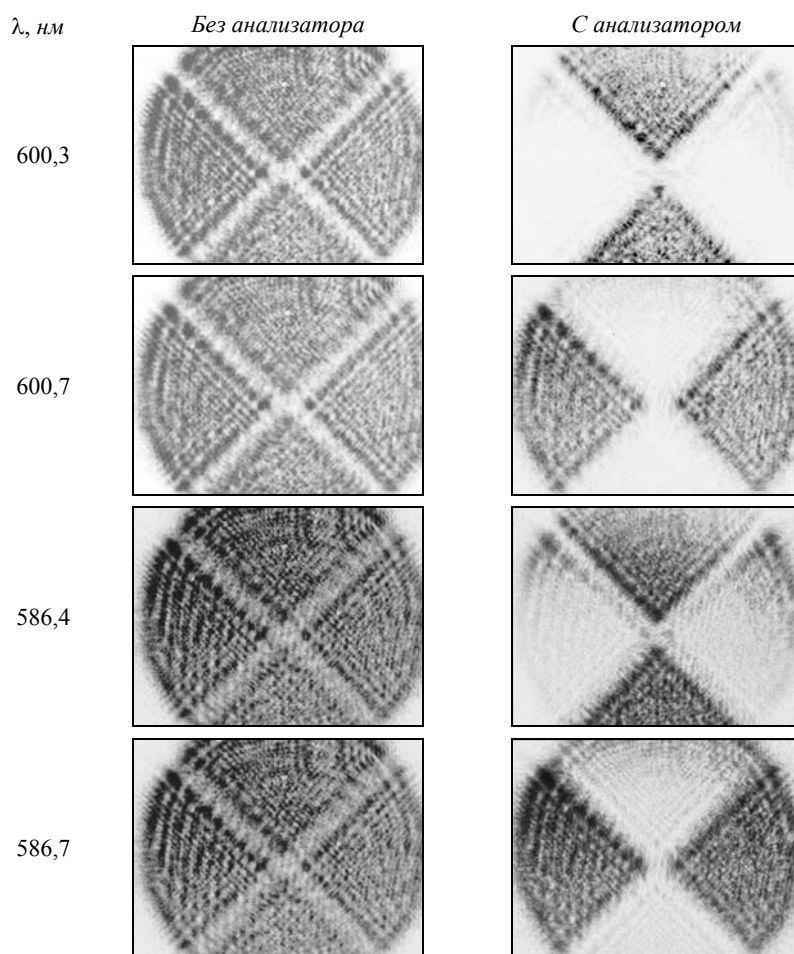


Рис. 3. Распределения интенсивности, сформированные четырёхсекторной пластинкой при различных длинах волн. Размер изображений – 3×4 мм

Заключение

В работе проведено исследование нового метода изготовления секторных пластин для преобразования поляризационного состояния пучков. Разработана и реализована технология травления кристалла кальцита для интегрирования в него секторного преобразователя поляризации. Показано, что стыки секторов при травлении кристалла кальцита получают существенно качественнее, чем стыки секторов отдельных

фрагментов волновых пластин. Реализован и экспериментально исследован четырёхсекторный преобразователь поляризации, обеспечивающий попарное ортогональное поляризационное состояние секторов. Произведён подбор длин волн, при которых происходит нужное преобразование. Экспериментально показано, что квазипериодическое повторение условий соответствия фазовой задержки ускоряется при уменьшении длины волны.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 16-29-11698-офи_м, 16-07-00825-а) и Федерального агентства научных организаций (соглашение № 007-ГЗ/Ч3363/26).

Литература

1. **Machavariani, G.** Efficient extracavity generation of radially and azimuthally polarized beams / G. Machavariani, Y. Lumer, I. Moshe, A. Meir, S. Jackel // *Optics Letters*. – 2007. – Vol. 32, Issue 11. – P. 1468-1470. – DOI: 10.1364/OL.32.001468.
2. **Machavariani, G.** Spatially-variable retardation plate for efficient generation of radially- and azimuthally-polarized beams / G. Machavariani, Y. Lumer, I. Moshe, A. Meir, S. Jackel // *Optics Communications*. – 2008. – Vol. 281, Issue 4. – P. 732-738. – DOI: 10.1016/j.optcom.2007.10.088.
3. **Man, Zh.** Arbitrary vector beams with selective polarization states patterned by tailored polarizing films / Zh. Man, Ch. Min, Y. Zhang, Z. Shen, X.-C. Yuan // *Laser Physics*. – 2013. – Vol. 23, Issue 10. – 105001. – DOI: 10.1088/1054-660X/23/10/105001.
4. **Налимов, А.Г.** Отражающий четырёхзонный субволновый элемент микрооптики для преобразования линейной поляризации в радиальную / А.Г. Налимов, Л. О'Фаолейн, С.С. Стафеев, М.И. Шанина, В.В. Котляр // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 2. – С. 229-236.
5. **Стафеев, С.С.** Четырёхзонный отражающий азимутальный микрополяризатор / С.С. Стафеев, А.Г. Налимов, М.В. Котляр, Л. О'Фаолейн // *Компьютерная оптика*. – 2015. – Т. 39, № 5. – С. 709-715. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-709-715.
6. **Berezny, A.E.** Computer-generated holographic optical elements produced by photolithography / A.E. Berezny, S.V. Karpeev, G.V. Uspleniev // *Optics and Lasers in Engineering*. – 1991. – Vol. 15, Issue 5. – P. 331-340. – DOI: 10.1016/0143-8166(91)90020-T.
7. **Niu, C.H.** A new method for generating axially-symmetric and radially-polarized beams / C.-H. Niu, B.-Y. Gu, B.-Z. Dong, Y. Zhang // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2005. – Vol. 38, Issue 6. – P. 827-832. – DOI: 10.1088/0022-3727/38/6/006.
8. **Khonina, S.N.** Generating inhomogeneously polarized higher-order laser beams by use of DOEs beams / S.N. Khonina, S.V. Karpeev // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2011. – Vol. 28, Issue 10. – P. 2115-2123. – DOI: 10.1364/JOSAA.28.002115.
9. **Phua, P.B.** Mimicking optical activity for generating radially polarized light / P.B. Phua, W.J. Lai, Y.L. Lim, K.S. Tiaw, B.C. Lim, H.H. Teo, M.H. Hong // *Optics Letters*. – 2007. – Vol. 32, Issue 4. – P. 376-378. – DOI: 10.1364/OL.32.000376.
10. **Lai, W.J.** Generation of radially polarized beam with a segmented spiral varying retarder / W.J. Lai, B.C. Lim, P.B. Phua, K.S. Tiaw, H.H. Teo, M.H. Hong // *Optics Express*. – 2008. – Vol. 16, Issue 20. – P. 15694-15699. – DOI: 10.1364/OE.16.015694.
11. **Khonina, S.N.** Generation of cylindrical vector beams of high orders using uniaxial crystals / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, S.V. Alferov, V.A. Soifer // *Journal of Optics*. – 2015. – Vol. 17, Issue 6. – 065001. – DOI: 10.1088/2040-8978/17/6/065001.
12. **Khonina, S.N.** Implementation of ordinary and extraordinary beams interference by application of diffractive optical elements / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, A.A. Morozov, V.D. Paraniin // *Journal of Modern Optics*. – 2016. – Vol. 63, Issue 13. – P. 1239-1247. – DOI: 10.1080/09500340.2015.1137368.
13. **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.
14. **Алферов, С.В.** Экспериментальное исследование фокусировки неоднородно поляризованных пучков, сформированных при помощи секторных пластинок / С.В. Алферов, С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, О.Ю. Моисеев // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 1. – С. 57-64.

Сведения об авторах

Карпеев Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва; ведущий научный сотрудник Института систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, модовые и поляризационные преобразования, волоконная оптика, оптическая обработка изображений.

E-mail: karp@smr.ru.

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. 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.

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.

Паранин Вячеслав Дмитриевич, 1986 года рождения, в 2010 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (СГАУ, ныне – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева) по специальности 210201 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств», в 2014 присуждена учёная степень кандидата физико-математических наук.

наук, работает доцентом кафедры наноинженерии Самарского университета. Область научных интересов: методы и средства управления лазерным излучением, оптические измерения. E-mail: yparanin@mail.ru.

Решетников Антон Сергеевич, в 2013 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (ныне Самарский университет) по специальности «Проектирование и технология радиоэлектронных средств», инженер кафедры наноинженерии Самарского университета. Область научных интересов: изготовление микро- и наноструктур, литография. E-mail: reshetnikovantonio@yandex.ru.

ГРПТИ: 29.31.15.

Поступила в редакцию 14 марта 2018 г. Окончательный вариант – 4 апреля 2018 г.

A FOUR-SECTOR POLARIZATION CONVERTER INTEGRATED IN A CALCITE CRYSTAL

S.V. Karpeev^{1,2}, V.V. Podlipnov^{1,2}, S.N. Khonina^{1,2}, V.D. Pararin², A.S. Reshetnikov²

¹ Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Samara, Russia,

² Samara National Research University, Samara, Russia

Abstract

A new approach to the implementation of sectorial plates for beam polarization conversion is proposed. Using a newly developed etching technology, a four-sector polarization converter integrated into a calcite crystal is implemented. A four-sector polarization converter, which provides a pairwise orthogonal polarization state of the sectors, is fabricated and experimentally characterized. A comparison is made of inter-sector joints of the integrated converter with those of a converter composed of individual wave-plate fragments. Analysis of the spectral properties of such a converter is carried out, wavelengths at which the necessary polarization conversion takes place are determined. The quasi-periodic repetition of phase matching conditions is experimentally shown to slow down with increasing wavelength.

Keywords: inhomogeneous polarization, sector polarizing plate, the quality of sector coupling, the spectral method for selecting the phase matching condition.

Citation: Karpeev SV, Podlipnov VV, Khonina SN, Pararin VD, Reshetnikov AS. A four-sector polarization converter integrated in a calcite crystal. *Computer Optics* 2018; 42(3): 401-407. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-3-401-407.

Acknowledgement: This work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (grants No. 16-29-11698-ofi_m, 16-07-00825-a) and the Federal Agency for Scientific Organizations (agreement No. 007-GZ/C3363/26).

References

- [1] Machavariani G, Lumer Y, Moshe I, Meir A, Jackel S. Efficient extracavity generation of radially and azimuthally polarized beams. *Opt Lett* 2007; 32(11): 1468-1470. DOI: 10.1364/OL.32.001468.
- [2] Machavariani G, Lumer Y, Moshe I, Meir A, Jackel S. Spatially-variable retardation plate for efficient generation of radially- and azimuthally-polarized beams. *Optics Communications* 2008; 281(4): 732-738. DOI: 10.1016/j.optcom.2007.10.088.
- [3] Man Zh, Min Ch, Zhang Y, Shen Z, Yuan X-C. Arbitrary vector beams with selective polarization states patterned by tailored polarizing films. *Laser Phys* 2013; 23(10): 105001. DOI: 10.1088/1054-660X/23/10/105001.
- [4] Nalimov AG, O'Faolain L, Stafeev SS, Shanina MI, Kotlyar VV. Reflected four-zones subwavelength microoptics element for polarization conversion from linear to radial [In Russian]. *Computer Optics* 2014; 38(2): 229-236.
- [5] Stafeev SS, Nalimov AG, Kotlyar MV, O'Faolain L. A four-zone reflective azimuthal micropolarizer. *Computer Optics* 2015; 39(5): 709-715. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-709-715.
- [6] Berezny AE, Karpeev SV, Uspleniev GV. Computer-generated holographic optical elements produced by photolithography. *Optics and Lasers in Engineering* 1991; 15(5): 331-340. DOI: 10.1016/0143-8166(91)90020-T.
- [7] Niu C-H, Gu B-Y, Dong B-Z, Zhang Y. A new method for generating axially-symmetric and radially-polarized beams. *J Phys D: Appl Phys* 2005; 38(6): 827-832. DOI: 10.1088/0022-3727/38/6/006.
- [8] Khonina SN, Karpeev SV. Generating inhomogeneously polarized higher-order laser beams by use of DOEs beams. *JOSA A* 2011; 28(10): 2115-2123. DOI: 10.1364/JOSAA.28.002115.
- [9] Phua PB, Lai WJ, Lim YL, Tiaw KS, Lim BC, Teo HH, Hong MH. Mimicking optical activity for generating radially polarized light. *Opt Lett* 2007; 32(4): 376-378. DOI: 10.1364/OL.32.000376.
- [10] Lai WJ, Lim BC, Phua PB, Tiaw KS, Teo HH, Hong MH. Generation of radially polarized beam with a segmented spiral varying retarder. *Opt Express* 2008; 16(20): 15694-15699. DOI: 10.1364/OE.16.015694.
- [11] Khonina SN, Karpeev SV, Alferov SV, Soifer VA. Generation of cylindrical vector beams of high orders using uniaxial crystals. *J Opt* 2015; 17(6): 065001. DOI: 10.1088/2040-8978/17/6/065001.
- [12] Khonina SN, Karpeev SV, Morozov AA, Pararin VD. Implementation of ordinary and extraordinary beams interference by application of diffractive optical elements. *J Mod Opt* 2016; 63(13): 1239-1247. – DOI: 10.1080/09500340.2015.1137368.
- [13] Khonina SN, Karpeev SV, Pararin 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.
[14] Alferov SV, Karpeev SV, Khonina SN, Moiseev OYu. Experimental study of focusing of inhomogeneously polar-

ized beams generated using sector polarizing plates. Computer Optics 2014; 38(1): 57-64.

Author's information

Sergei Vladimirovich Karpeev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of Samara National Research University named after S.P. Korolyov. Leading researcher of the Image Processing Systems Institute of the RAS. Research interests: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing. E-mail: karp@smr.ru.

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.

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.

Vyacheslav Dmitrievich Paraniin (b.1986), Candidate of Physical and Mathematical Sciences, professor assistant of Samara University. Research interests are methods and devices for controlling of laser radiation, optical measurements. E-mail: vparaniin@mail.ru.

Anton Sergeevich Reshetnikov, graduated (2013) from Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (Samara University). He is an engineer of Nanoengineering department of the Samara University. His current research interests are manufacturing of micro- and nanostructures, lithography. E-mail: reshetnikovantonio@yandex.ru.

Received March 14, 2018. The final version – April 4, 2018.
