

Интерференционная схема для генерации поляризационно-неоднородного лазерного излучения с использованием пространственного модулятора света

С.В. Карпеев^{1,2}, В.В. Подлипов^{1,2}, А.М. Алгубили²

¹ ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151,

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

Аннотация

Разработана и экспериментально исследована оптическая система для преобразования линейно-поляризованных лазерных пучков в цилиндрические векторные пучки. Схема основана на когерентном сложении модовых пучков с использованием интерферометра Маха–Цендера. Простота и универсальность схемы достигается за счёт применения разных участков в площади пространственного модулятора света для одновременной генерации двух пространственно разнесённых заданных модовых пучков. Каждый из пучков далее распространяется в одном из плеч интерферометра, подвергается необходимым поляризационно-фазовым преобразованиям для получения цилиндрического векторного пучка после сложения модовых пучков.

Ключевые слова: пространственный модулятор света, когерентная суперпозиция, цилиндрические векторные пучки.

Цитирование: Карпеев, С.В. Интерференционная схема для генерации поляризационно-неоднородного лазерного излучения с использованием пространственного модулятора света / С.В. Карпеев, В.В. Подлипов, А.М. Алгубили // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 2. – С. 214-218. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-698.

Citation: Karpeev SV, Podlipnov VV, Algubili AM. An interference scheme for generating inhomogeneously polarized laser radiation using a spatial light modulator. Computer Optics 2020; 44(2): 214-218. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-698.

Введение

Цилиндрические (с аксиальной симметрией) векторные пучки имеют множество приложений, включая микроскопию, литографию, ускорение электронов, обработку материалов, высокоразрешающую метрологию, микроэллипсометрию и спектроскопию. Подробный обзор приведён в работе [1].

По сравнению с обычной (линейной или круговой) поляризацией радиально-поляризованный пучок имеет удвоенную эффективность при резке металлов [2], а также неоднородно-поляризованные пучки дают возможность управления процессами лазерной абляции [3, 4], повышения разрешения в задачах микроскопии [5, 6] или создания сложных периодических поверхностных структур, индуцированных лазером [7]. Кроме того, радиально-поляризованные пучки могут применяться для передачи информации [8].

Существуют два принципиальных способа получения осесимметрично поляризованного излучения: внутррезонаторный и внрезонаторный. В первом случае в составе резонатора используют поляризационно-селективные оптические элементы [9]. Этот метод является предпочтительным для мощных лазеров, обычно имеющих высокий коэффициент усиления активной среды, низкую добротность резонатора и относительно низкое качество излучения. Однако для метрологических и иных применений,

требующих высокого качества пучка, эти методы малопригодны.

Главным преимуществом внрезонаторных методов формирования поляризационно-неоднородных мод является универсализм. Среди этих методов можно выделить однопучковые, в которых формирование нужного поляризационного состояния достигается либо за счёт пропускания пучка через анизотропный кристалл [10–12], в котором происходит интерференция обыкновенных и необыкновенных лучей, либо за счёт управляемого поворота плоскости поляризации по сечению пучка при помощи секторных пластинок [13, 15] или интерференционного поляризатора [16–18]. Данные методы, как правило, предназначены для какой-то определённой длины волны, например 1530 нм [17], и их перестройка весьма трудоёмка. Многопучковые методы основаны на когерентной суперпозиции пары различных мод, например, с помощью классического интерферометра [19]. Таким способом можно формировать любые типы векторных пучков, и, в принципе, такой метод применим для любой длины волны. Методы разделения пучков в интерферометре и их сложения могут варьироваться. Например, в работе [20] разделение пучков осуществляется при помощи бинарного ДОО с несущей частотой в парных порядках дифракции, а соединяются пучки обычным, неполяризующим све-

тоделительным кубиком. В работе [21] разделение пучков осуществляется по фронту за счёт расположенных на определённом расстоянии друг от друга во входной плоскости Фурье-каскада двух ДОЭ, а соединение происходит после прохождения линзы в выходной плоскости Фурье-каскада на дифракционной решётке, период которой подобран так, чтобы обеспечить параллельность пучков после соединения. Возможен и смешанный вариант [22], когда два элемента расположены рядом и производят встречные пучки без линзы, за счёт несущей, а дальше в месте пересечения пучков также ставят дифракционную решётку для соединения пучков. Все перечисленные методы обладают одним общим недостатком, а именно сложной перестройкой на другие типы поляризаций и, в случае фазовых ДОЭ, на другую длину волны. Для этого необходимо заново изготавливать 2–3 ДОЭ и юстировать схему. Кроме того, потери энергии при соединении пучков на дифракционной решётке больше, чем на кубике и даже теоретически при использовании бинарной фазовой решётки не могут быть меньше 60%. Все это заставляет искать пути развития интерферометрических схем. В настоящей работе предложено использовать пространственный модулятор света (ПМС, SLM) для формирования пучков в интерферометре, а объединять пучки при помощи кубика. Отметим, что светоделительный кубик, в отличие от решётки, даёт два пучка равной мощности с необходимым поляризационным состоянием, причём оба могут быть использованы.

1. Обоснование предложенной схемы экспериментальной установки

Идея использования ПМС для формирования заданного поляризационного состояния появилась достаточно давно, например, в работах [23–26] предложены схемы без разделения пучка (по нашей классификации однопучковые). Разрешение и энергетическая эффективность таких методов пока не очень высокие. В работе [27] реализована схема, в которой для разделения пучков используются парные дифракционные порядки, а объединение производится при помощи светоделительного кубика, то есть фактически в схеме [20] стационарный ДОЭ заменён на ПМС. Так же, как и в схеме [20], при помощи ПМС формируются комплексно сопряжённые вихревые пучки, единственное отличие состоит в том, что для создания пары неоднородно-поляризованных пучков использованы наложенные голограммы, дающие угловое разделение пучков. Недостатки у такой схемы те же, что и у схемы [20] – невозможность формирования других поляризационных состояний, кроме радиальной, азимутальной и смешанной поляризаций первого порядка. Что касается формирования нескольких выходных пучков, то схема [20] тоже производит два выходных пучка под прямым углом, и применение наложенных голограмм оправдано, лишь если требуется больше, чем два пучка.

В работе [28] предложена подобная [27] схема для генерации неоднородно-поляризованных пучков с участками эллиптических поляризаций. Разделение и формирование сопряжённых пучков также осуществляется в парных дифракционных порядках после прохождения лазерного пучка через сформированную на ПМС фазовую голограмму с косинусоидальной несущей. Далее, с помощью линзы в фокальной плоскости получают Фурье-образы пучков, каждому из которых придаются необходимые поляризации с помощью волновых пластинок. После прохождения второй линзы два пучка вновь соединяются в фокальной плоскости и производится компенсация углов пространства при помощи дифракционной решётки. Период решётки при этом должен быть точно таким же, как и период несущей на исходной голограмме. Предложенная схема представляет собой «гибрид» схем из [20, 22]. Основными преимуществами данной схемы являются простота и компактность, а также лёгкость юстировки и малая чувствительность к вибрациям. Однако, наряду с достоинствами, такой вариант схемы обладает и всеми недостатками, упомянутыми во введении. Следует также отдельно отметить, что даже небольшие отклонения периода решётки от требуемого приводят к существенной погрешности формирования пучка. В идеале решётку тоже следовало бы формировать при помощи ПМС, но такой путь является весьма затратным. И, наконец, самым существенным недостатком как [27], так и [28] являются ограниченные возможности формирования различных типов поляризаций и различной амплитудно-фазовой структуры пучков. По сути, из-за формирования пары пучков фактически одним ДОЭ путём использования парных дифракционных порядков для сложения могут быть сформированы лишь комплексно-сопряжённые пучки с одинаковыми амплитудными распределениями. Преодолеть указанное ограничение можно, используя для формирования каждого пучка свой ДОЭ, что приводит к принципу разделения пучков по фронту волны, описанному в [21, 22]. Теперь, на новом техническом уровне, нет необходимости устанавливать два отдельных ДОЭ, как это было в [21, 22], поскольку площади современных ПМС позволяют разместить на них всё необходимое с нужными расстояниями между элементами. Роль двух ДОЭ с использованием ПМС могут выполнять различные его участки. Разделив эти пучки пространственно, возможно осуществлять перестройку поляризационного состояния и при их совмещении получать векторные лазерные пучки. В нашей работе предложена схема с одним ПМС и без дополнительных линз. Потребность в дополнительных линзах устраняется за счёт включения в схему интерферометра Маха–Цендера в полной конфигурации. Следует заметить, что многие ПМС предназначены для работы в первом порядке дифракции из-за довольно существенных помех, создаваемых в нулевом поряд-

ке по причине недостаточной дифракционной эффективности. Предложенная схема интерферометра позволяет легко комбинировать нужные порядки дифракции за счёт настройки. В оптической схеме детально ход лучей не показан, но за счёт наклона зеркал и светоделителей можно совмещать нужные порядки дифракции. При этом в каждом плече распространяются одновременно моды, сформированные

обеими частями ПМС, но на выходе наклоны зеркал и светоделителей обеспечивают пространственное и угловое совмещение только +1 порядка от левой части ПМС и -1 порядка от правой части ПМС. Остальные порядки распространяются с таким угловым и пространственным отклонением, что они не регистрируются. Оптическая схема приведена на рис. 1.

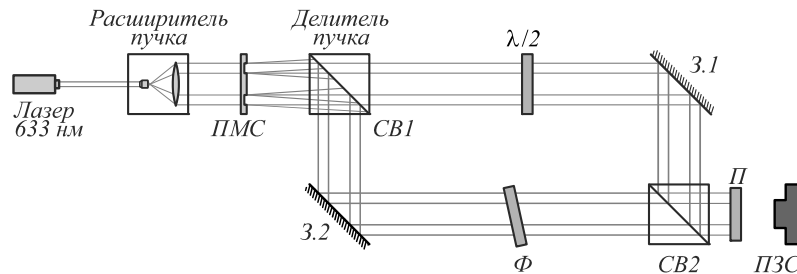


Рис. 1. Интерференционная схема для генерации поляризационно-неоднородного лазерного излучения с использованием пространственного модулятора света

Излучение лазера с длиной волны 632,8 нм расширяется коллиматором, состоящим из микрообъектива 20×, пинхола с отверстием 10 мкм и выходного объектива с фокусным расстоянием 1 м, таким образом, чтобы выходное излучение равномерно освещало всё рабочее пространство ПМС. Далее, проходя ПМС, лазерный пучок приобретает необходимые модовые составляющие, и формируются порядки дифракции. Светоделитель разделяет падающее излучение на два плеча интерферометра Маха-Цендера, в левом плече которого расположена пластинка $\lambda/2$, изменяющая поляризационное состояние. Положением зеркала 3.1 осуществляется настройка угла распространения пучка таким образом, чтобы на светоделителе СВ2 порядок +1 от левой части ПМС падал в центр. Аналогично поступаем для -1 порядка от правой части ПМС, распространяющегося в правом плече интерферометра, добиваясь падения излучения в ту же точку кубика, куда падает и излучение от левого плеча интерферометра. При прохождении светоделителя СВ2 излучение от правого плеча проходит, не изменяя угла, в сенсор ПЗС. Угловым распространением излучения от левой части модулятора можно управлять, изменяя угол поворота светоделителя СВ2. Таким образом на светоделителе СВ2 осуществляется сложение мод и формирование векторного пучка. Для подстройки разности фаз в одном из плеч интерферометра в схему добавлена кварцевая пластинка Ф. Распознавание поляризационных состояний пучка осуществлялось поляризатором П, расположенным непосредственно перед ПЗС.

2. Формирование и исследование неоднородно поляризованных пучков

Для проверки работы описанной оптической установки вначале в соответствующих секциях ПМС формировались моды Гаусса-Эрмита (0, 1) и (1, 0). Формирование осуществлялось в первом порядке дифракции путём формирования фазового ДОЭ [29] с пилообразной несущей [30–32]. Полутоновое изображение фазы показано на рис. 2.

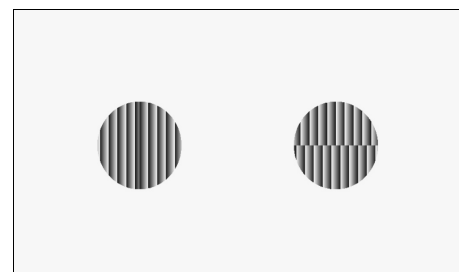


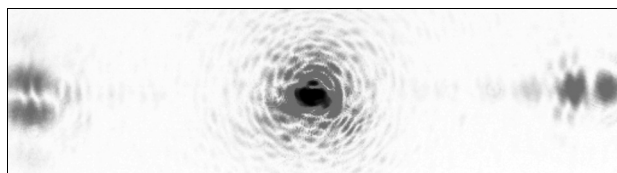
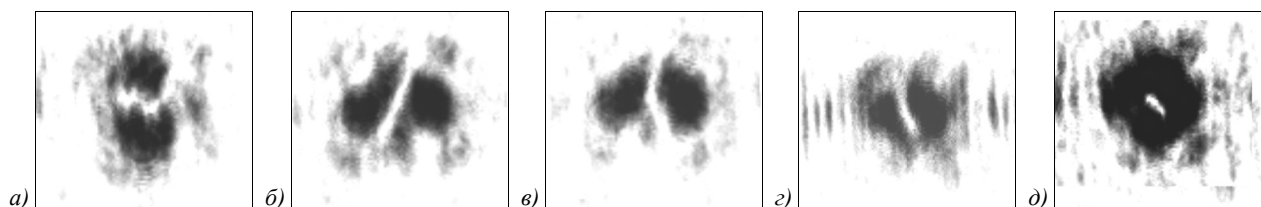
Рис. 2. Изображение фазы, выводимой на SLM для генерации поляризационно-неоднородного лазерного излучения

На рис. 3 приведено изображение распределения интенсивности на регистрирующей матрице, в начале одного из плеч интерферометра, где не произведено совмещения мод. Причём кадр ограничен таким образом, что в него попадает +1 порядок от одной половины модулятора, нулевой порядок и -1 от другой половины модулятора. Видно, что разные половины модулятора формируют образы разных требуемых мод. Видно, что формируется довольно интенсивный нулевой порядок дифракции из-за присутствия всем ПМС искажений передачи фазы в пределах периода несущей. Но, как известно [29], это явление не приводит к искажениям амплитудно-фазового распределения в полезном первом порядке дифракции.

Изображения в выходной плоскости интерферометра, полученные при различных положениях анализатора и без него, приведены на рис. 4. Хорошо видно, что пучок имеет азимутальную поляризацию.

Заключение

Экспериментально исследована новая оптическая схема для формирования векторных пучков. Эксперименты показали применимость модифицированной схемы интерферометра для работы с ПМС. Показано, что такая оптическая система позволяет формировать азимутально поляризованный пучок.

Рис. 3. Изображение в выходной плоскости сгенерированного пучка от $+1$ и -1 порядковРис. 4. Распределения интенсивности в выходном пучке в зависимости от положения анализатора 0° (а), 45° (б), 90° (в), 135° (г), изображение в отсутствие анализатора (д)

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (МК-1797.2019.2) в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части расчёта ДОЭ, гранта РФФИ (№18-29-20045 МК) в части экспериментальных исследований, а также гранта РФФИ (№18-07-01470) в части формирования вихревых пучков.

Литература

1. **Zhan, Q.** Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications / Q. Zhan // *Advances in Optics and Photonics*. – 2009. – Vol. 1, Issue 1. – P. 1-57.
2. **Niziev, V.G.** Influence of beam polarization on laser cutting efficiency / V.G. Niziev, A.V. Nesterov // *Journal of Physics D*. – 1999. – Vol. 32. – P. 1455-1461.
3. **Alferov, S.V.** On the possibility of controlling laser ablation by tightly focused femtosecond radiation / S.V. Alferov, S.V. Karpeev, S.N. Khonina, K.N. Tukmakov, O.Yu. Moiseev, S.A. Shulyapov, K.A. Ivanov, A.B. Savel'ev-Trofimov // *Quantum Electronics*. – 2014. – Vol. 44, Issue 11. – P. 1061-1065. – DOI: 10.1070/QE2014v044n11ABEH015471.
4. **Khonina, S.N.** Inverse energy flux of focused radially polarized optical beams / S.N. Khonina, A.V. Ustinov, S.A. Degtyarev // *Physical Review A*. – 2018. – Vol. 98. – 043823. – DOI: 10.1103/PhysRevA.98.043823.
5. **Khonina, S.N.** Strengthening the longitudinal component of the sharply focused electric field by means of higher-order laser beams / S.N. Khonina, S.V. Alferov, S.V. Karpeev // *Optics Letters*. – 2013. – Vol. 38, Issue 17. – P. 3223-3226. – DOI: 10.1364/OL.38.003223.
6. **Khonina, S.N.** How low can STED go? Comparison of different write-erase beam combinations for stimulated emission depletion microscopy / S.N. Khonina, I. Golub // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2012. – Vol. 29, Issue 10. – P. 2242-2246. – DOI: 10.1364/JOSAA.29.002242.
7. **Khonina, S.N.** Spatiotemporal dynamics of the polarisation state of laser radiation performed by lens-axicon combinations / S.N. Khonina, S.G. Volotovskiy, A.V. Ustinov, A.P. Porfirev // *Physics Letters A*. – 2019. – Vol. 383, Issue 21. – P. 2535-2541. – DOI: 10.1016/j.physleta.2019.05.006.
8. **Wang, H.** The propagation of radially polarized partially coherent beam through an optical system in turbulent atmosphere / H. Wang, D. Liu, Z. Zhou // *Applied Physics B*. – 2010. – Vol. 101, Issue 1. – P. 361-369. – DOI: 10.1007/s00340-010-4106-7.
9. **Kozawa, Y.** Generation of a radially polarized laser beam by use of a conical Brewster prism / Y. Kozawa, Sh. Sato // *Optics Letters*. – 2005. – Vol. 30, Issue 22. – P. 3063-3065.
10. **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. Parinin // *Journal of Modern Optics*. – 2016. – Vol. 63, Issue 13. – P. 1239-1247. – DOI: 10.1080/09500340.2015.1137368.
11. **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. Parinin, A.A. Morozov // *Physics Letters A*. – 2017. – Vol. 381, Issue 30. – P. 2444-2455. – DOI: 10.1016/j.physleta.2017.05.025.
12. **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.
13. **Алфёров, С.В.** Экспериментальное исследование фокусировки неоднородно поляризованных пучков, сформированных при помощи секторных пластинок / С.В. Алфёров, С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, О.Ю. Моисеев // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 1. – С. 57-64.
14. **Karpeev, S.V.** Anisotropic diffractive optical element for generating hybrid-polarized beams / S.V. Karpeev, V.V. Podlipnov, S.N. Khonina, V.D. Parinin, K.N. Tukmakov // *Optical Engineering*. – 2019. – Vol. 58, Issue 8. – 082402. – DOI: 10.1117/1.OE.58.8.082402.
15. **Khonina, S.N.** Formation of hybrid higher-order cylindrical vector beams using binary multi-sector phase plates / S.N. Khonina, A.V. Ustinov, S.A. Fomchenkov, A.P. Porfirev // *Scientific Reports*. – 2018. – Vol. 8. – 14320. – DOI: 10.1038/s41598-018-32469-0.
16. **Karpeev, S.V.** Generation of a controlled double-ring-shaped radially polarized spiral laser beam using a combination of a binary axicon with an interference polarizer / S.V. Karpeev, V.D. Parinin, S.N. Khonina // *Journal of Optics*. – 2017. – Vol. 19, Issue 5. – 055701. – DOI: 10.1088/2040-8986/aa640c.
17. **Подлипов, В.В.** Полностью симметричный дифракционно-интерференционный формирователь радиально-поляризованных пучков с длиной волны 1530 нм / В.В. Подлипов, С.В. Карпеев, В.Д. Паранин // *Компьютерная оптика*. – 2019. – Т. 43, № 4. – С. 577-585. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-4-577-585.

18. **Карпеев, С.В.** Формирование неоднородно поляризованных вихревых пучков Бесселя на основе интерференционного поляризатора / С.В. Карпеев, В.Д. Паранин, С.Н. Хонина // Квантовая электроника. – 2018. – Т. 48, № 6. – С. 521-526.
19. **Tidwell, S.C.** Generating radially polarized beams interferometrically / S.C. Tidwell, D.H. Ford, W.D. Kimura // Applied Optics. – 1990. – Vol. 29. – P. 2234-2239. – DOI: 10.1364/AO.29.002234.
20. **Khonina, S.N.** Polarization converter for higher-order laser beams using a single binary diffractive optical element as beam splitter / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, S.V. Alferov // Optics Letters. – 2012. – Vol. 37, Issue 12. – P. 2385-2387. – DOI: 10.1364/OL.37.002385.
21. **Khonina, S.N.** Grating-based optical scheme for the universal generation of inhomogeneously polarized beams / S.N. Khonina, S.V. Karpeev // Applied Optics. – 2010. – Vol. 49, Issue 10. – P. 1734-1738. – DOI: 10.1364/AO.49.001734.
22. **Khonina, S.N.** Generating inhomogeneously polarized higher-order laser beams by use of diffractive optical elements / 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.
23. **Davis, J.A.** Two dimensional polarization encoding with a phase only liquid-crystal spatial light modulator / J.A. Davis, D.E. McNamara, D.M. Cottrell, T. Sonchra // Applied Optics. – 2000. – Vol. 39. – P. 1549-1551.
24. **Neil, M.A.A.** Method for the generation of arbitrary complex vector wave fronts / M.A.A. Neil, F. Massoumian, R. Juškaitis, T. Wilson // Opt. Lett. – 2002. – V.27(21). – P.1929-1931.
25. **Kohler, C.** Hologram optimization for SLM-based reconstruction with regard to polarization effects / C. Kohler, T. Haist, X. Schwab, W. Osten // Optics Express. – 2008. – Vol. 16, Issue 19. – P. 14853-14861.
26. **Cancula, M.** Generation of vector beams with liquid crystal disclination lines / M. Cancula, M. Ravnik, S. Zumer // Phys Rev E. – 2014. – Vol. 90. – 022503.
27. **Rosales-Guzmán, C.** Simultaneous generation of multiple vector beams on a single SLM / C. Rosales-Guzmán, N. Bhebhe, A. Forbes // Optics Express. – 2017. – Vol 25. – P. 25697-25706.
28. **Gao, X.-Z.** Redistributing the energy flow of tightly focused ellipticity-variant vector optical fields / X.-Z. Gao, Y. Pan, G.-L. Zhang, M.-D. Zhao, Z.-Ch. Ren, Ch.-Gh. Tu, Y.-N. Li, H.-T. Wang // Photonics Research. – 2017. – Vol. 5. – P. 640-648.
29. **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.
30. Методы компьютерной оптики / А.В. Волков, Д.Л. Головашкин, Л.Д. Досколович, Н.Л. Казанский, В.В. Котляр, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Соيفер, В.С. Соловьёв, Г.В. Успенъев, С.И. Харитонов, С.Н. Хонина; под ред. В.А. Соифера. – Изд. 2-е, испр. – М.: Физматлит, 2003. – 688 с. – ISBN: 5-9221-0434-9.
31. **Khonina, S.N.** Techniques for encoding composite diffractive optical elements / S.N. Khonina, V.V. Kolyar, V.A. Soifer // Proceedings of SPIE. – 2003. – Vol. 5036. – P. 493-498. – DOI: 10.1117/12.498521.
32. **Khonina, S.N.** Encoded binary diffractive element to form hyper-geometric laser beams / S.N. Khonina, S.A. Balalayev, R.V. Skidanov, V.V. Kolyar, B. Päivänranta, J. Turunen // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. – 2009. – Vol. 11, Issue 6. – 065702. – DOI: 10.1088/1464-4258/11/6/065702.

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, научный сотрудник лаборатории микро- и нанотехнологий Института систем обработки изображений РАН – филиала Федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук (ИСОИ РАН). Область научных интересов: математическое моделирование физических процессов, оптимизация, моделирование, изготовление и исследование дифракционных оптических элементов. E-mail: podlipnovvv@ya.ru.

Алгубили Абрар Мохаммед кхухур, аспирант Самарского университета. Область научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования пучков, векторные пучки. E-mail: abrar.algubili78@gmail.com.

ГРНТИ: 29.31.15

Поступила в редакцию 7 февраля 2020 г. Окончательный вариант – 28 февраля 2020 г.

An interference scheme for generating inhomogeneously polarized laser radiation using a spatial light modulator

S.V. Karpeev^{1,2}, V.V. Podlipnov^{1,2}, A.M. Algubili²

¹IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS,
443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 151,

²Samara National Research University, 443086, Samara, Russia, Moskovskoye Shosse 34

Abstract

An optical system for converting linearly polarized laser beams into cylindrical vector beams is developed and experimentally investigated. The scheme is based on the coherent addition of mode beams using a Mach-Zehnder interferometer. The simplicity and versatility of the optical setup is achieved through the use of different sections in the area of the spatial light modulator for the simultaneous generation of two spatially separated given mode beams. Each of the beams then propagates in one of the arms of the interferometer and undergoes the necessary polarization-phase transformations to obtain a cylindrical vector beam after the addition of mode beams.

Keywords: spatial light modulator, coherent superposition, cylindrical vector beams.

Citation: Karpeev SV, Podlipnov VV, Algubili AM. An interference scheme for generating inhomogeneously polarized laser radiation using a spatial light modulator. *Computer Optics* 2020; 44(2): 214-218. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-698.

Acknowledgements: This work was supported by the RF Ministry of Science and Higher Education under the government project of FSRC «Crystallography and Photonics» RAS (“DOE calculation”) and Russian Science Foundation under projects Nos. 18-29-20045-mk (“Experimental research”) and 18-07-01470 (“Formation of vortex beams”).

References

- [1] Zhan Q. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications. *Adv Opt Photon* 2009; 1(1): 1-57.
 - [2] Niziev VG, Nesterov AV. Influence of beam polarization on laser cutting efficiency. *J Phys D: Appl Phys* 1999; 32: 1455-1461.
 - [3] Alferov SV, Karpeev SV, Khonina SN, Tukmakov KN, Moiseev OYu, Shulyapov SA, Ivanov KA, Savel'ev-Trofimov AB. On the possibility of controlling laser ablation by tightly focused femtosecond radiation. *Quantum Electronics* 2014; 44(11): 1061-1065. DOI: 10.1070/QE2014v044n11ABEH015471.
 - [4] Khonina SN, Ustinov AV, Degtyarev SA. Inverse energy flux of focused radially polarized optical beams. *Phys Rev A* 2018; 98: 043823. DOI: 10.1103/PhysRevA.98.043823.
 - [5] Khonina SN, Alferov SV, Karpeev SV. Strengthening the longitudinal component of the sharply focused electric field by means of higher-order laser beams. *Opt Lett* 2013; 38(17): 3223-3226. DOI: 10.1364/OL.38.003223.
 - [6] Khonina SN, Golub I. How low can STED go? Comparison of different write-erase beam combinations for stimulated emission depletion microscopy. *J Opt Soc Am A* 2012; 29(10): 2242-2246. DOI: 10.1364/JOSAA.29.002242.
 - [7] Khonina SN, Volotovskiy SG, Ustinov AV, Porfirev AP. Spatiotemporal dynamics of the polarisation state of laser radiation performed by lens-axicon combinations. *Physics Letters A* 2019; 383(21): 2535-2541. DOI: 10.1016/j.physleta.2019.05.006
 - [8] Wang H, Liu D, Zhou Z. The propagation of radially polarized partially coherent beam through an optical system in turbulent atmosphere. *Appl Phys B* 2010; 101(1): 361-369. DOI: 10.1007/s00340-010-4106-7.
 - [9] Kozawa Y, Sato Sh. Generation of a radially polarized laser beam by use of a conical Brewster prism. *Opt Lett* 2005; 30(22): 3063-3065.
 - [10] Khonina SN, Karpeev SV, Morozov AA, Parinin 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.
 - [11] Khonina SN, Karpeev SV, Parinin 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.
 - [12] 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.
 - [13] Alferov SV, Karpeev SV, Khonina SN, Moiseev OYu. Experimental study of focusing of inhomogeneously polarized beams generated using sector polarizing plates. *Computer Optics* 2014; 38(1): 57-64.
 - [14] Karpeev SV, Podlipnov VV, Khonina SN, Parinin VD, Tukmakov KN. Anisotropic diffractive optical element for generating hybrid-polarized beams. *Opt Eng* 2018; 58(8): 082402. DOI: 10.1117/1.OE.58.8.082402.
 - [15] Khonina SN, Ustinov AV, Fomchenkov SA, Porfirev AP. Formation of hybrid higher-order cylindrical vector beams using binary multi-sector phase plates. *Sci Rep* 2018; 8: 14320. DOI: 10.1038/s41598-018-32469-0.
 - [16] Karpeev SV, Parinin VD, Khonina SN. Generation of a controlled double-ring-shaped radially polarized spiral laser beam using a combination of a binary axicon with an interference polarizer. *J Opt* 2017; 19(5): 055701. DOI: 10.1088/2040-8986/aa640c.
 - [17] Podlipnov VV, Karpeev SV, Parinin VD. Fully symmetric diffraction-interference beam shaper for radially polarized light on a 1530-nm wavelength. *Computer Optics* 2019; 43(4): 577-585. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-4-577-585.
 - [18] Karpeev SV, Parinin VD, Khonina SN. Generation of nonuniformly polarised vortex Bessel beams by an interference polariser. *Quantum Electron* 2018; 48(6): 521-526. DOI: 10.1070/QEL16603.
-

-
- [19] Tidwell SC, Ford DH, and Kimura WD. Generating radially polarized beams interferometrically. *Appl Opt* 1990; 29: 2234-2239. DOI: 10.1364/AO.29.002234.
- [20] Khonina SN, Karpeev SV, Alferov SV. Polarization converter for higher-order laser beams using a single binary diffractive optical element as beam splitter. *Opt Lett* 2012; 37(12): 2385-2387. DOI: 10.1364/OL.37.002385.
- [21] Khonina SN, Karpeev SV. Grating-based optical scheme for the universal generation of inhomogeneously polarized beams. *Appl Opt* 2010; 49(10): 1734-1738. DOI: 10.1364/AO.49.001734.
- [22] Khonina SN, Karpeev SV. Generating inhomogeneously polarized higher-order laser beams by use of diffractive optical elements. *J Opt Soc Am A* 2011; 28(10): 2115-2123. DOI: 10.1364/JOSAA.28.002115.
- [23] Davis JA, McNamara DE, Cottrell DM, Sonehara T. Two dimensional polarization encoding with a phase only liquid-crystal spatial light modulator. *Appl Opt* 2000; 39: 1549-1551.
- [24] Neil MAA, Massoumian F, Juškaitis R, Wilson T. Method for the generation of arbitrary complex vector wave fronts. *Opt Lett* 2002; 27(21): 1929-1931.
- [25] Kohler C, Haist T, Schwab X, Osten W. Hologram optimization for SLM-based reconstruction with regard to polarization effects. *Opt Express* 2008; 16(19): 14853-14861.
- [26] Cancula M, Ravnik M, Zumer S. Generation of vector beams with liquid crystal disclination lines. *Phys Rev E* 2014; 90: 022503.
- [27] Carmelo Rosales-Guzmán, Nkosiphile Bhebhe, and Andrew Forbes. Simultaneous generation of multiple vector beams on a single SLM. *Opt. Express* 2017; 25: 25697-25706.
- [28] Gao X-Z, Pan Y, Zhang G-L, Zhao M-D, Ren Z-Ch, Tu Ch-Gh, Li Y-N, Wang H-T. Redistributing the energy flow of tightly focused ellipticity-variant vector optical fields. *Photon Res* 2017; 5: 640-648. DOI: 10.1364/PRJ.5.000640
- [29] Berezny AE, Karpeev SV, Uspleniev GV. Computer-generated holographic optical elements produced by photolithography. *Opt Lasers Eng* 1991; 15(5): 331-340. DOI: 10.1016/0143-8166(91)90020-T.
- [30] Soifer VA, ed. *Methods for computer design of diffractive optical elements*. New York: John Wiley & Sons Inc; 2002. ISBN: 978-0-471-09533-0.
- [31] Khonina SN, Koltlyar VV, Soifer VA. Techniques for encoding composite diffractive optical elements. *Proc SPIE* 2003; 5036: 493-498. DOI: 10.1117/12.498521.
- [32] Khonina SN, Balalayev SA, Skidanov RV, Kotlyar VV, Paivanranta B, Turunen J. Encoded binary diffractive element to form hyper-geometric laser beams. *J Opt A: Pure Appl Opt* 2009; 11(6): 065702. DOI: 10.1088/1464-4258/11/6/065702.
-

Authors' information

Sergei Vladimirovich Karpeev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of Samara National Research University. 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, researcher at the Micro- and Nanotechnology Laboratory of the IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Research interests: mathematical modeling of physical processes, optimization, modeling, manufacturing and research of diffractive optical elements. E-mail: podlipnovvv@ya.ru.

Abrar Mohammed khudhur Algubili graduate student of Samara University. Research interests: diffraction optics, singular optics, mode and polarization transformations laser beams, vector beams. Email: abrar.algubili78@gmail.com.

Received February 07, 2020. The final version – February 28, 2020.
