

ОПТИКА

УДК 535.428

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ КОНВЕРТОР ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИНАРНОГО ДИФРАКЦИОННОГО ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА

С. В. Карпеев^{1,2}, *С. Н. Хонина*^{1,2}, *О. Ю. Моисеев*¹,
*С. В. Алферов*², *А. В. Волков*^{1,2}

¹ Институт систем обработки изображений РАН,
443001, Россия, Самара, ул. Молодогвардейская, 151.

² Самарский государственный аэрокосмический университет им. ак. С. П. Королёва
(национальный исследовательский университет),
443086, Россия, Самара, Московское ш., 34.

E-mails: karp@smr.ru, khonina@smr.ru, moiseev@smr.ru,
alferov_s@mail.ru, volkov@ssau.ru

Предложен новый подход к генерации пары исходных пучков для поляризационного конвертора, работа которого основана на суммировании двух пучков с противоположными направлениями круговых поляризацій. Для формирования пары сопряженных вихревых пучков, согласованных с лазерными модами, используется бинарный дифракционный оптический элемент (ДОЭ). При этом один бинарный элемент выполняет одновременно две функции: формирователя и делителя пучка. Проведено сравнение двух конфигураций оптических систем по сложности юстировки и энергетической эффективности. Рассчитаны и изготовлены соответствующие ДОЭ. Проведены натурные эксперименты, демонстрирующие формирование векторных цилиндрических пучков высокого порядка.

Ключевые слова: поляризационно-неоднородные пучки; круговая, радиальная и азимутальная поляризации; бинарные дифракционные оптические элементы; оптические вихри; несущая частота; цилиндрические пучки высокого порядка.

Введение. В настоящее время всё большее внимание исследователей привлекают лазерные пучки с поляризационно-неоднородным распределением. Наибольший практический интерес представляют аксиально-поляризованные векторные пучки, которые имеют множество приложений, включая микроскопию, литографию, ускорение электронов, обработку материалов, высоко-разрешающую метрологию, микроэллипсометрию и спектроскопию [1].

Наиболее известные методы формирования поляризационно-неоднородных пучков основаны на когерентной суперпозиции пары обычных мод, например,

Сергей Владимирович Карпеев (д.ф.-м.н., проф.), ведущий научный сотрудник, лаб. микро- и нанотехнологий¹; профессор, каф. наноинженерии². *Светлана Николаевна Хонина* (д.ф.-м.н., проф.), ведущий научный сотрудник, лаб. лазерных измерений¹; профессор, каф. технической кибернетики². *Олег Юрьевич Моисеев* (к.т.н.), старший научный сотрудник, лаб. микро- и нанотехнологий. *Сергей Владимирович Алферов*, аспирант, каф. наноинженерии. *Алексей Васильевич Волков* (д.ф.-м.н., проф.), зав. лабораторией, лаб. микро- и нанотехнологий¹; профессор, каф. наноинженерии².

с помощью интерферометра [2–4]. Таким способом можно формировать векторные пучки низких порядков, например, самым известным вариантом интерференционного метода является сложение мод Эрмита-Гаусса (ЭГ) (0,1) и (1,0) с ортогональными линейными поляризациями. Существуют различные способы создания исходных мод ЭГ. В работе [4] требуемая пара мод получается в специальном интерферометре из основной моды лазера, причём в каждом плече интерферометра установлены спиральные фазовые пластинки. Главной трудностью этого метода является реализация спиральной фазовой пластинки, работающей в нулевом порядке дифракции [5]. Из-за указанных трудностей экспериментальные результаты, представленные в работе [4], демонстрируют лишь удовлетворительное качественное совпадение с результатами численного моделирования.

Возможен вариант получения исходных мод при помощи дифракционных оптических элементов (ДОЭ). В работе [6] предложен специальный ДОЭ, выполненный на подложке из двулучепреломляющего материала. Данный ДОЭ производит моду ЭГ (0,1) в обыкновенном и ЭГ (1,0) в необыкновенном лучах, которые формируются на определённом расстоянии и из которых в дальнейшем получается радиально-поляризованная мода ЛГ (0,1). В качестве недостатков метода следует, прежде всего, отметить высокую сложность изготовления многоуровневого ДОЭ с максимальной высотой рельефа в несколько длин волн на кварцевой подложке. Кроме того, такая пара ДОЭ предназначена лишь для формирования одной определённой моды с заданным типом поляризации и не допускает перестройки на другие типы поляризации. Другой вариант использования ДОЭ был ранее предложен авторами данной статьи и состоит в использовании пары отдельных ДОЭ, производящих требуемые моды. Этот вариант был реализован авторами ранее [7] с использованием ДОЭ, формирующих лазерные пучки в нулевом порядке дифракции, а в работе [8] — с использованием бинарных ДОЭ с несущей частотой. Кроме того, в этой работе предложено формирование векторных цилиндрических пучков высокого порядка с помощью дополнительного ДОЭ. Подобный же метод был предложен и в работе [4] с использованием дополнительного аксикона.

1. Обоснование метода получения сопряженных вихревых пучков с круговой поляризацией для суммирования. Существует альтернативный вариант получения радиально-поляризованных мод как низкого [2], так и более высоких порядков, который основан на суммировании двух пучков с правой и левой круговыми поляризациями. Пучки также должны иметь фазовые сингулярности противоположных знаков. Метод также применим и для формирования векторных цилиндрических пучков высокого порядка без дополнительных элементов. Однако экспериментальное преобразование гауссова пучка с линейной поляризацией в пучок с радиальной поляризацией в работе [2] оказалось неудачным из-за несовершенства спиральных фазовых пластинок.

Метод формирования пары вихревых пучков с фазовыми сингулярностями противоположных знаков без использования спиральных фазовых пластинок предложен в работе [9] и основан на астигматическом преобразовании мод ЭГ при помощи дифракционной линзы. Однако реализация данного метода усложняется тем, что исходные пучки ЭГ получают внутрирезонаторным методом, то есть данный метод является как бы комбинацией внутри

и внерезонаторного метода.

Проблема может быть решена при помощи непосредственного получения вихревых пучков из основной моды лазера при помощи ДОЭ. Как отмечено выше, для получения пучков с неоднородными поляризациями требуется два вихревых пучка с противоположными знаками топологических зарядов. Используя данный факт, предлагается для решения поставленной задачи формировать пучки с вихревыми фазовыми сингулярностями противоположных знаков в сопряженных порядках дифракции при помощи бинарных ДОЭ. Такие ДОЭ хорошо известны [10] и производят вихревые пучки более высокого качества, чем спиральные фазовые пластинки в нулевом порядке, а кроме того, гораздо проще в плане технологической реализации. Важно отметить, что ненужное или вредное в большинстве приложений свойство бинарных ДОЭ с несущей частотой — формировать сопряжённые порядки дифракции — в данном случае является необходимым и полезным, а тот факт, что одновременно используются оба порядка дифракции, увеличивает энергетическую эффективность ДОЭ.

2. Оптические схемы для формирования поляризационно-неоднородных пучков. Возможны два варианта оптической схемы, реализующей предложенный принцип формирования пучков с неоднородными поляризациями. Одна из возможных оптических схем была предложена авторами данной статьи ранее [8]. Далее она была модифицирована в работе [11] для применения в рамках предложенного подхода к формированию поляризационно-неоднородных пучков. Оптическая схема экспериментальной установки [11] показана на рис. 1. Это сделано для удобства сравнения ее с предложенной в данной работе другой схемой.

Излучение лазера ($\lambda = 632,8$ нм) с линейной поляризацией преобразуется расширителем лазерного пучка BE и освещает кодированные несущей частотой ДОЭ CD1 и CD2 через четвертьволновые пластинки WP1 и WP2, причём пластинки повернуты так, что преобразуют исходную линейную поляризацию в два пучка с правой и левой циркулярной поляризацией. Каждый кодированный ДОЭ формирует пучки с фазовыми сингулярностями в +1-м и -1-м порядках дифракции, причём эти пучки являются комплексно-сопряжёнными. Пучки, сформированные в +1-м порядке дифракции одного элемента и в -1-м порядке дифракции другого элемента, распространяются в сходящихся направлениях и попадают на дифракционную решётку G, как показано на рис. 1. Решётка обеспечивает суммирование +1-го дифрак-

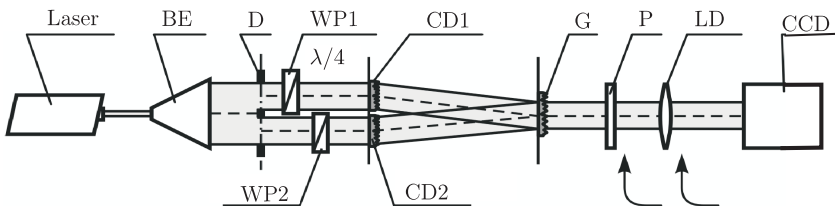


Рис. 1. Схема когерентного суммирования двух световых полей с круговыми поляризациями и фазовыми вихревыми пучками первого порядка с противоположными знаками: BE — расширитель лазерного пучка, D — диафрагма, WP1, WP2 — четвертьволновые пластинки, CD1, CD2 — ДОЭ с несущей частотой, G — дифракционная решётка, P — поляризатор-анализатор, L — Фурье-объектив, CCD — ПЗС-камера

ционного порядка для одного ДОЭ и -1 -го порядка для другого ДОЭ. Как легко видеть из рис. 1, складываться будут именно пучки с противоположными по знаку топологическими зарядами. Изменение фазового сдвига между пучками в оптической системе осуществляется, как и ранее, за счёт сдвига дифракционной решётки поперёк оптической оси. Также сформированные пучки дополнительно исследуются в фокусе Фурье-преобразующего объектива L .

Другой вариант оптической схемы, предложенный в данной статье — традиционный интерферометр (рис. 2), в котором функцию разделения пучков выполняет один бинарный ДОЭ с несущей частотой CD . Далее излучение нулевого порядка (если это необходимо) задерживается непрозрачной диафрагмой S . Регулировка необходимого фазового сдвига между суммируемыми пучками осуществляется здесь дополнительной плоскопараллельной пластинкой (компенсатор C) путем изменения угла ее установки относительно оптической оси.

Полученные пучки соединяются при помощи светоделительного кубика BS . Остальные элементы здесь обозначены так же и выполняют те же функции, что и в схеме на рис. 1. Необходимо отметить, что в данной оптической схеме в отличие от схемы на рис. 1 образуется два идентичных пучка с неоднородной поляризацией, что показано на схеме. Один из них получается при суммировании двух пучков с четным, а другой — с нечетным числом отражений от зеркал. Легко видеть, что и в том и в другом случае складываются пучки с противоположными знаками топологических зарядов.

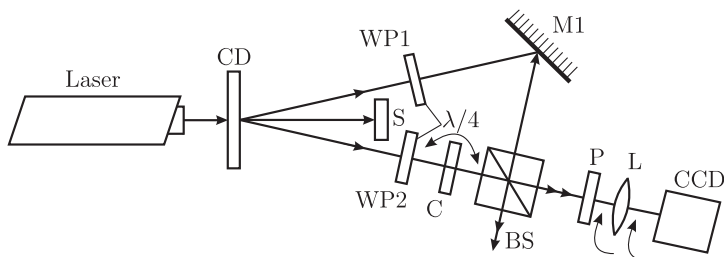


Рис. 2. Схема интерферометрического суммирования двух световых полей с круговыми поляризациями и фазовыми вихревыми пучками первого порядка с противоположными знаками: S — непрозрачная диафрагма, $WP1$, $WP2$ — четвертьволновые пластинки, C — компенсатор, CD — ДОЭ с несущей частотой, BS — светоделитель, P — поляризатор-анализатор, L — Фурье-объектив, CCD — ПЗС-камера

3. Экспериментальное формирование поляризационно-неоднородных пучков. Для проведения экспериментов были реализованы две оптические системы в соответствии со схемами на рис. 1 и рис. 2. Для первой схемы на одну подложку были записаны три пары бинарно-амплитудных ДОЭ, формирующих фундаментальную гауссову моду, моду ЛГ $(3, 0)$ и бесселевый пучок (рис. 3) в ± 1 -х порядках. К каждому из пучков были добавлены вихревые фазовые составляющие первого порядка. Для второй схемы те же ДОЭ были записаны по одному.

Бинарное кодирование элементов выполнялось с помощью метода частичного кодирования [12], позволяющего выдержать компромисс между точностью и дифракционной эффективностью формируемых пучков. Для наглядного пояснения указанного принципа на рис. 3 показан увеличенный фрагмент

мент одного из ДОЭ. На нем видна дополнительная высокочастотная решетка для передачи амплитудной составляющей функции пропускания.

Запись амплитудных бинарных ДОЭ выполнялась при помощи кругового лазерного записывающего устройства CLWS-200. Каждый ДОЭ имел размер 2×2 мм с несущей частотой около 30 лин/мм, расстояние между парными ДОЭ составляло 10 мм. Картины участков изготовленных ДОЭ, снятые с использованием оптического микроскопа, приведены на рис. 4. Приведены характерные картины для центральной части (рис. 4, а), внутри колец (рис. 4, б) и переходной зоны между информативной и вспомогательной частью ДОЭ (рис. 4, в).

По той же технологии, но на другой подложке была изготовлена соответствующая дифракционная решетка.

В качестве лазерного источника применялся гелий-неоновый лазер Melles griot 251hp 928 230. Расширитель пучка BE (использовался только для схемы, представленной на рис. 1) включал восьмикратный микрообъектив, диафрагму 50 мкм и коллимирующий объектив с фокусным расстоянием 300 мм. Параметры собранных оптических схем были выбраны близкими

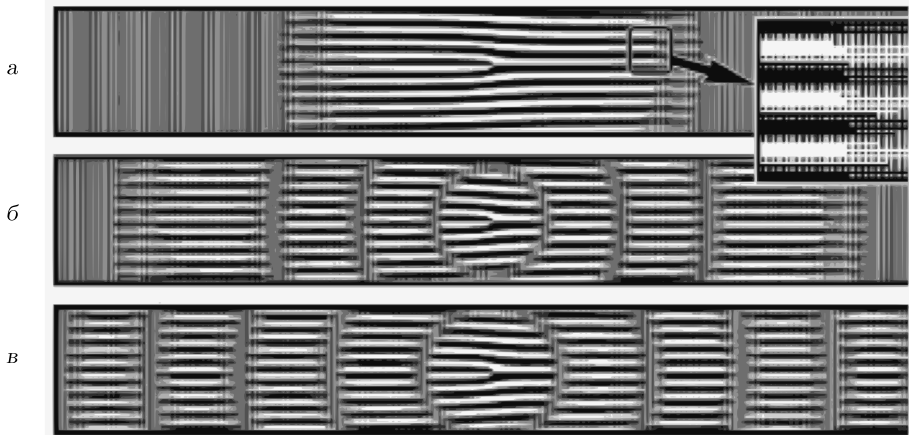


Рис. 3. Вид бинарных кодированных ДОЭ, формирующих фундаментальную гауссову моду (а), моду ЛГ (3, 0) (б) и бесселевый пучок с добавленными вихревыми фазовыми составляющими первого порядка (в). Выноска на (а) показывает увеличенный фрагмент ДОЭ

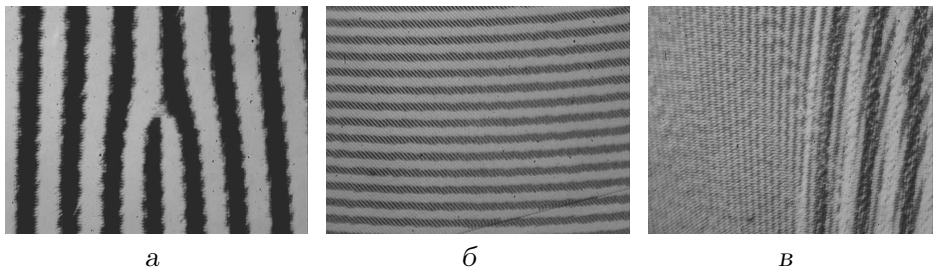


Рис. 4. Вид участков изготовленных ДОЭ под оптическим микроскопом: центральная часть (а), внутри колец (б) и в переходной зоне между информативной и вспомогательной частью ДОЭ (в)

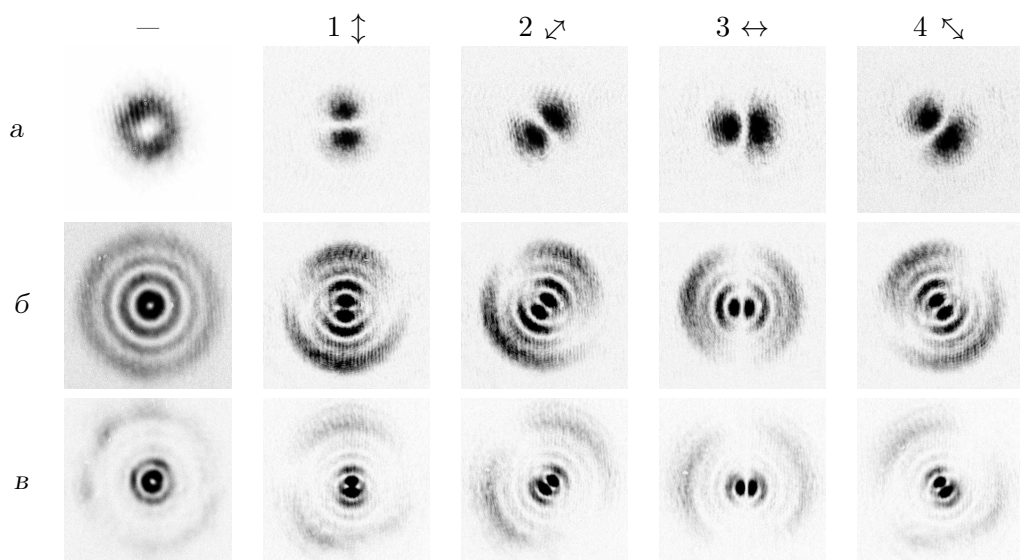


Рис. 5. Распределения интенсивности (негатив) на выходе оптической схемы для радиально-поляризованного пучка нижней гауссовой моды (а), гауссовой моды высокого порядка (б), бesselевой моды (в), полученных суперпозицией пучков с круговой поляризацией при различных положениях анализатора: 1 — вертикальное расположение, 2 — повернутое вправо на 45° , 3 — горизонтальное положение, 4 — повернутое влево на 45°

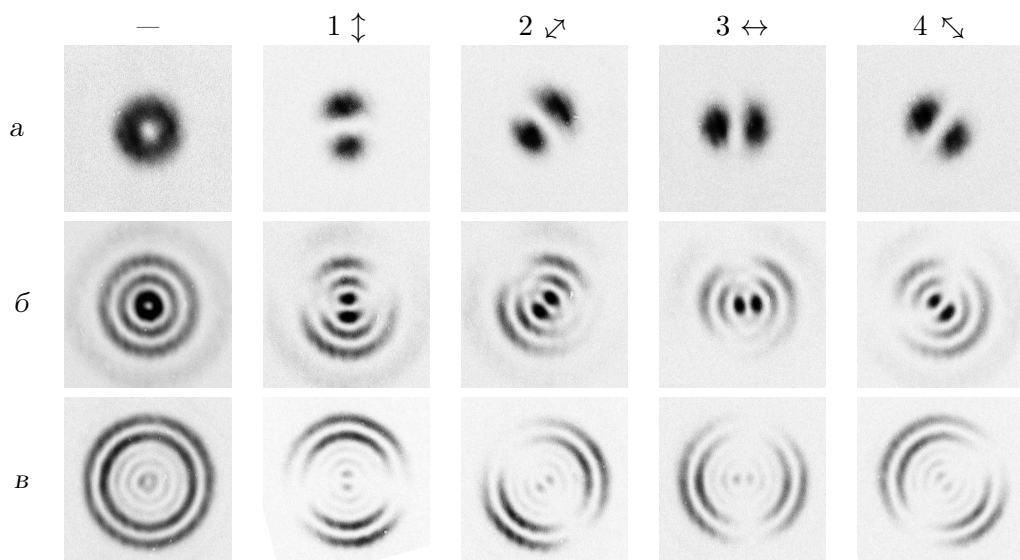


Рис. 6. Распределения интенсивности (негатив) в фокальной плоскости линзы, установленной на выходе оптической схемы при различных положениях анализатора для радиально-поляризованного пучка нижней гауссовой моды (а), гауссовой моды высокого порядка (б), бesselевой моды (в), полученных суперпозицией пучков с круговой поляризацией

к соответствующим параметрам оптической схемы, описанной в [8].

На рис. 5 приведены распределения интенсивности, зафиксированные при отсутствии и наличии поляризационного анализатора (при различных положениях) на расстоянии 200 мм от решётки либо светоделительного кубика, а на рис. 6 — аналогичные распределения в фокальной плоскости дополнительно введенной линзы с фокусным расстоянием 750 мм. Такой выбор фокусного расстояния был обусловлен близостью размеров получаемых спектров к размерам исходных распределений. Структура распределений соответствует радиальной поляризации сформированных пучков, которая сохраняется при распространении пучков как в ближней, так и дальней зоне дифракции.

Как видно из рис. 6, гауссовы пучки демонстрируют модовый характер — их распределение на выходе из конвертора и в дальней зоне (в фокусе линзы) практически не меняются. Бесселевый же пучок при распространении в зоне дифракции Френеля имеет концентрацию интенсивности в центральной части пучка, а в дальней зоне энергия переходит в периферийную зону. Явно выделяются два кольца, радиус которых связан с масштабом бесселевого пучка. Наличие двух спектральных колец вместо одного объясняется бинарной структурой оптического элемента, использованного для генерации бесселевого пучка.

На рис. 7 приведены распределения интенсивности для ДОО размером 8×8 мм. Для согласования размеров пучка и ДОО перед лазером (см. рис. 2) устанавливался телескоп с четырёхкратным увеличением.

Результаты, полученные с использованием схем, показанных на рис. 1 и 2, практически совпадают и различаются только по уровню интегральной интенсивности. Основные различия между этими схемами состоят в процессе юстировки и энергетической эффективности получения пучка с неоднород-

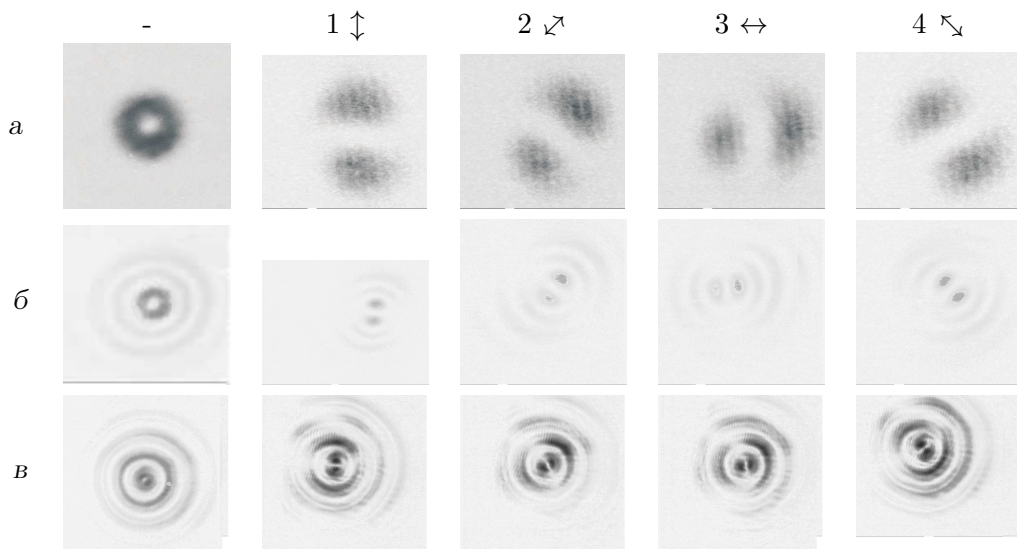


Рис. 7. Распределения интенсивности (негатив) в фокальной плоскости линзы, установленной на выходе оптической схемы при различных положениях анализатора для радиально-поляризованного пучка нижней гауссовой моды (а), гауссовой моды высокого порядка (б), бесселевой моды (в), полученных суперпозицией пучков с круговой поляризацией

ной поляризацией. В схеме на рис. 1 процесс юстировки значительно проще и сама оптическая система значительно компактней в силу меньшего числа юстируемых элементов. Однако энергетическая эффективность данной оптической системы низкая и не превышает одного процента, в то время как полученная энергетическая эффективность системы в соответствие с рис. 2 составила около 20% и теоретически может быть повышена до 80% при использовании фазовых ДОЭ.

Заключение. Предложена и экспериментально исследована новая схема поляризационного конвертера для формирования пучков низших и высших порядков с неоднородной поляризацией, основанная на применении одного бинарного ДОЭ в качестве делителя и формирователя пучков. Бинарный ДОЭ формирует сопряженные по фазе вихревые пучки, которым перед сложением придают круговые поляризации противоположных направлений.

Экспериментально реализованы две оптические системы в соответствии с данным подходом. Одна из систем характеризуется простотой юстировки и компактностью при малой энергетической эффективности, вторая имеет более высокую эффективность за счет некоторого усложнения юстировки. И та и другая оптические системы позволяют легко получать лазерные пучки с радиальной и азимутальной поляризацией и произвольным распределением радиальной амплитуды. Такие пучки могут быть полезны в задаче острой фокусировки и сверхразрешения.

Работа выполнена при поддержке российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (грант CRDF PG08-014-1), грантов РФФИ (10-07-00109-а, 10-07-00438-а, 11-07-00153-а) и гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-7414.2010.9).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhan Q. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications // *Adv. Opt. Photon.*, 2009. Vol. 1, no. 1. Pp. 1–57.
2. Tidwell S. C., Ford D. H., Kimura W. D. Generating radially polarized beams interferometrically // *Appl. Opt.*, 1990. Vol. 29, no. 15. Pp. 2234–2239.
3. Passilly N., R. de Saint Denis, Ait-Ameur K., Treussart F., Hierle R., Roch J.-F. Simple interferometric technique for generation of a radially polarized light beam // *J. Opt. Soc. Am. A.*, 2005. Vol. 22, no. 5. Pp. 984–991.
4. Tidwell S. C., Kim G. H., Kimura W. D. Efficient radially polarized laser beam generation with a double interferometer // *Appl. Opt.*, 1993. Vol. 32, no. 27. Pp. 5222–5229.
5. Tsai H.-Y., Smith H. I., Menon R. Fabrication of spiral-phase diffractive elements using scanning-electron-beam lithography // *J. Vac. Sci. Technol. B.*, 2007. Vol. 25, no. 6. Pp. 2068–2071.
6. 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.*, 2005. Vol. 38, no. 6. Pp. 827–832.
7. Khonina S. N., Karpeev S. V. Grating-based optical scheme for the universal generation of inhomogeneously polarized laser beams // *Appl. Opt.*, 2010. Vol. 49, no. 10. Pp. 1734–1738.
8. Khonina S. N., Karpeev S. V. Generating inhomogeneously polarized higher-order laser beams by use of diffractive optical elements // *J. Opt. Soc. Am. A.*, 2011. Vol. 28, no. 10. Pp. 2115–2123.
9. Волостников В.Г., Воронцов Е.Н., Котова С.П. Формирование световых полей со сложной поляризационной структурой с использованием астигматической дифракционной линзы // *Изв. Самарск. научн. центра РАН*, 2011. Т. 13, № 4(2). С. 580–583. [Volostnikov V. G., Vorontsov E. N., Kotova S. P. Light fields formation with complex

- polarization structure by using astigmatic diffraction lens // *Izv. Samarsk. Nauchn. Tsentra RAN*, 2011. Vol. 13, no. 4(2). Pp. 580–583].
10. Khonina S.N., Kotlyar V.V., Soifer V.A., Lautanen J., Honkanen M., Turunen J. Generating a couple of rotating nondiffracting beams using a binary-phase DOE // *Optik*, 1999. Vol. 110, no. 3. Pp. 137–144.
 11. Карпеев С. В., Хонина С. Н., Казанский Н. Л., Моисеев О. Ю. Формирование поляризационно-неоднородных лазерных пучков высокого порядка на основе пучков с круговой поляризацией // *Компьютерная оптика*, 2011. Т. 35, № 2. С. 224–230. [Karpeev S. V., Khonina S. N., Kazanskiy N. L., Moiseev O. Yu. Forming Inhomogeneously Polarized Higher-Order Laser Beams On the Basis of Circularly Polarised Beams // *Kompyuternaya optika*, 2011. Vol. 35, no. 2. Pp. 224–230].
 12. Khonina S.N., Balalayev S.A., Skidanov R.V., Kotlyar V.V., Paivanranta B., Turunen J. Encoded binary diffractive element to form hyper-geometric laser beams // *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2009. Vol. 11, no. 6, 065702.

Поступила в редакцию 12/V/2012;
в окончательном варианте — 24/VII/2012.

MSC: 78A60; 78A45

POLARIZATION CONVERTER FOR HIGHER-ORDER LASER BEAMS BASED ON THE USE OF FORMING BINARY DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS AS BEAM SPLITTER

S. V. Karpeev^{1,2}, *S. N. Khonina*^{1,2}, *O. Yu. Moiseev*¹,
*S. V. Alferov*², *A. V. Volkov*^{1,2}

¹ Image Processing Systems Institute, Russian Academy of Sciences,
151, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443001, Russia.

² S. P. Korolyov Samara State Aerospace University
(National Research University),
34, Moskovskoe sh., Samara, 443086, Russia.

E-mails: karp@smr.ru, khonina@smr.ru, moiseev@smr.ru,
alferov_s@mail.ru, volkov@ssau.ru

We propose a new approach to generating a pair of initial beams for a polarization converter that operates by summing up two opposite-sign circularly polarized beams. The conjugated pairs of vortex beams matched with laser modes are generated using binary diffractive optical elements. The same binary element simultaneously serves two functions: a beam shaper and a beam splitter. Two proposed optical arrangements are compared in terms of alignment complexity and energy efficiency. The diffractive optical elements in question have been designed and fabricated. Natural experiments that demonstrate the generation of vector higher-order cylindrical beams have been conducted.

Key words: *polarization-inhomogeneous beams; circular, radial, and azimuthal polarization; binary diffractive optical elements; optical vortices; carrier frequency; higher-order cylindrical beams.*

Original article submitted 12/V/2012;
revision submitted 24/VII/2012.

Sergey V. Karpeev (Dr. Sci. (Phys. & Math.)), Leading Research Scientist, Lab. of Micro and Nanotechnology¹; Professor, Dept. of Nanoengineering². *Svetlana N. Khonina* (Dr. Sci. (Phys. & Math.)), Leading Research Scientist, Lab. of Laser Measurement¹; Professor, Dept. of Technical Cybernetics². *Oleg Yu. Moiseev* (Ph. D. (Techn.)), Senior Research Scientist, Lab. of Micro and Nanotechnology. *Sergey V. Alferov*, Postgraduate Student, Dept. of Nanoengineering. *Aleksey V. Volkov* (Dr. Sci. (Phys. & Math.)), Head of Laboratory, Lab. of Micro and Nanotechnology¹; Professor, Dept. of Nanoengineering².