

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ДЛЯ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ГЕНЕРАЦИИ И КОНВЕРСИИ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-НЕОДНОРОДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОЭ

Сергей Владимирович Карпеев¹ (профессор, email: karp@smr.ru),

Светлана Николаевна Хонина^{1,2} (ведущий научный сотрудник, профессор, email: khonina@smr.ru)

¹Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева,

²Учреждение Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН

Аннотация

Разработана и экспериментально испытана новая оптическая система для преобразования поляризации модовых пучков из линейной (наиболее характерной для лазерного излучения) в аксиально-симметричные (радиальную или азимутальную, как более эффективные в различных приложениях), а также с разнообразной неоднородной структурой. Схема основана на когерентном сложении модовых пучков с использованием фазовых дифракционных решеток, позволяющих менять межмодовый фазовый сдвиг без применения дополнительных элементов. Простота и универсальность схемы достигается за счет применения дифракционных оптических элементов для генерации заданных модовых распределений не-обходимой ориентации в пространстве, а также получения одновременно нескольких разных поперечных мод в разных лучах для их дальнейшей комбинации.

Ключевые слова: поляризационно-неоднородные пучки, радиальная и азимутальная поляризации, внерезонаторный поляризационный конвертор, когерентная суперпозиция, дифракционные оптические элементы.

Введение

Большинство современных лазеров производят поляризационно-однородное излучение, т.е. поляризационные параметры во всех точках поперечного сечения лазерного пучка одинаковы. Однако с помощью дополнительных внутри- или внерезонаторных устройств возможно формирование множества различных типов векторных поляризационно-неоднородных мод с уникальными свойствами.

Наибольший практический интерес представляют пучки, имеющие аксиальную симметрию всех параметров лазерного излучения, включая поляризацию, например, пучки с радиальным и азимутальным направлением поляризации.

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

При острой фокусировке радиально-поляризованного пучка на оси в фокусе возникает мощная продольная компонента, а электрическое поле на оси пучка исчезает, придавая поперечному распределению интенсивности пучка кольцевую форму. Такая топология используется для уменьшения размеров фокального пятна [2-7], для оптического захвата и трехмерного ориентирования молекул [8-11], а также для ускорения электронов [12, 13].

По сравнению с обычной (линейной или круговой) поляризацией радиально-поляризованный пучок имеет удвоенную эффективность при резке металлов [14], также высокий уровень поглощения, характерный для этого типа поляризации, используется при взаимодействии лазерного излучения с плазмой [15]. С другой стороны, при прохождении

через полые металлические волноводы радиально-поляризованные пучки демонстрируют большие потери энергии на стенках волновода, а азимутально-поляризованные пучки, соответственно, минимальные [16].

Существуют два принципиальных способа получения осесимметрично поляризованного излучения: внутрирезонаторный и внерезонаторный. В первом случае в составе резонатора используют поляризационно-селективные оптические элементы. Этот метод является предпочтительным для мощных лазеров, обычно имеющих высокий коэффициент усиления активной среды, низкую добротность резонатора и относительно низкое качество излучения.

Известны внутрирезонаторные схемы генерации аксиально-поляризованных пучков с использованием конической призмы Брюстера [17], сегментированных волновых пластинок [4, 18], дифракционных зеркал с высокой локальной поляризационной селективностью [19], субволновых диэлектрических решеток [20]. Также можно использовать свойства двулучепреломления внутренних лазерных кристаллов [21, 22] или применить в качестве выходного зеркала резонатора специальное фотонно-кристаллическое зеркало [23].

Главным преимуществом внерезонаторных методов для формирования поляризационно-неоднородных мод является универсализм. Внерезонаторные методы основаны на когерентной суперпозиции пары обычных мод, например, с помощью интерферометра. Таким способом можно формировать любые типы векторных пучков, и, в принципе, такой метод применим для любой длины волны. Кроме интерференционных методов [24-27] известны схемы с использованием маломодовых оптических во-

локон [28, 29] и нематических жидкокристаллических пространственных модуляторов света [30-32].

Интерференционные методы основаны на использовании в качестве входного излучения одной моды, полученной, как правило, внутриврезонаторным способом. Схема получения второй моды, взаимно когерентной с исходной, но с другой поляризацией, содержит несколько оптических элементов и довольно сложна в настройке. При использовании оптических волокон необходимо выделять одну моду из целой группы возбуждаемых мод, что сказывается не лучшим образом на эффективности и «чистоте» поляризационного состояния пучка. Для жидкокристаллических пространственных модуляторов света имеется взаимосвязь фазовых и поляризационных изменений, что требует дополнительного оптимизационного кодирования, кроме того, они являются дорогостоящими устройствами с низкой энергетической эффективностью.

Применение дифракционных оптических элементов (ДОЭ) дает возможность избежать этих сложностей, поскольку методы дифракционной оптики позволяют получать из основной моды лазера любые другие моды в разных плечах оптической схемы с высокой эффективностью.

В данной работе предложена и экспериментально апробирована новая оптическая схема для комбинации поперечных мод с ортогональными поляризациями, включающая фазовую дифракционную решетку в качестве светоделительного элемента, что дает возможность менять межмодовый фазовый сдвиг без применения дополнительных элементов. Модовые пучки формируются с помощью специальных дифракционных оптических элементов. При этом ДОЭ, формирующие различные моды, могут быть размещены на одной подложке с высокой точностью позиционирования, что в дальнейшем существенно упрощает точное совмещение мод в рассматриваемой оптической системе. Таким образом, предложенная схема отличается простотой, эффективностью и широкими функциональными возможностями.

1. Описание схемы поляризационного конвертора на основе ДОЭ

Схема генерации из суперпозиции линейно-поляризованных ортогональных мод Лагерра-Гаусса пучков с различной поляризацией была рассмотрена в работе Н. Kogelnik и Т. Li [33]. Аналогичные схемы приведены в Табл. 1.

Таблица 1. Схемы генерации пучков с различной поляризацией на основе когерентной суперпозиции линейно-поляризованных ортогональных гауссовых мод

Суперпозиция	Формируемый тип поляризации
	Радиальная
	Азимутальная
	Смешанная линейная
	Смешанная линейно-круговая

Из Табл. 1 видно, что, меняя комплексные коэффициенты при сложении ортогональных мод, можно производить поляризации различных типов. Обычно для сложения или вычитания лазерных полей (возможно с комплексными коэффициентами) применяют двухлучевые интерферометры типа Маха-Цендера и Сагнака. Недостаток такого подхода состоит в сложности настройки интерферометров с точным совмещением полей мод и созданием необходимых фазовых сдвигов между модами. Также в этом случае используется большое количество сложных элементов типа призмы Дове, поляризационных разделительных призм, 90-градусного перископа и др. [24-27]. При использовании оптических волокон обычно возбуждается целая группа мод, и, чтобы выделить какую-то одну из них, необходимо подавать на вход волокна излучение с определенной поляризацией, специальным образом сдвигая волокно или изменяя его длину с высокой точностью [28, 29]. Применение же жидкокристаллических дисплеев при всей универсальности [30-32] характеризуется локально-матричной структурой с довольно грубым разрешением и низкой энергетической эффективностью.

Устранить указанные недостатки предлагается путем использования известной схемы [34] (рис. 1) когерентного суммирования двух световых полей с произвольными комплексными коэффициентами при помощи дифракционной решетки, используемой в качестве фильтра в двухкаскадной системе с одновременным Фурье-преобразованием исходных полей.

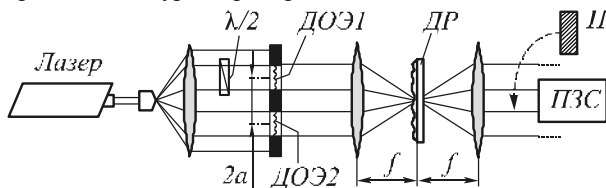


Рис. 1. Схема когерентного суммирования двух световых полей с произвольными комплексными коэффициентами при помощи дифракционной решетки

Основное преимущество предлагаемой схемы основано на использовании ДООЭ для формирования лазерных полей, что обеспечивает простоту, универсальность и эффективность конвертации. Универсальность состоит в возможности методами дифракционной оптики производить практически любые задаваемые распределения полей из фундаментального лазерного излучения, т.е. в суперпозиции могут участвовать любые пучки [35-38], а не только ТЕМ₀₁(10), как показано в Таблице 1 и реализовано в работе [26] с использованием простейшей фазовой ступеньки. Также использование фазовой дифракционной решетки в качестве светоделительного элемента позволяет менять межмодовый фазовый сдвиг без применения дополнительных элементов. Эффективность преобразования гауссового распределения с помощью бинарных ДООЭ в более высокие порядки гауссовых мод составляет около 80% [35, 36], что значительно превышает возможности жидкокристаллических модуляторов света.

Для генерации поляризационно-неоднородных мод в описанной схеме вводится полуволновая пластинка перед одним из ДООЭ (рис. 1). В этой схеме расстояние между центрами входных полей $2a$ связано с периодом дифракционной решетки d соотношением

$$a = \frac{\lambda f}{d}, \quad (1)$$

где λ – длина волны, f – фокусное расстояние линзы.

Физически это соответствует наложению двух входных полей, образующихся в плюс – минус первых дифракционных порядках, на оптической оси в выходной плоскости двухкаскадной системы за счет соответствующего выбора периода дифракционной решетки. При этом необходимые фазовые сдвиги между световыми полями могут быть обеспечены выбором начальной фазы дифракционной решетки. Физически это выполняется перемещением решетки поперек оптической оси. Таким образом, устраняются оба недостатка, присущих интерферометрической схеме сложения мод.

Совмещение полей мод осуществляется путем точного выдерживания расстояния из (1) на подложке, где записаны ДООЭ, формирующие моды. Это достигается без труда, за счет высокой точности позиционирования современных систем построения фотошаблонов ДООЭ. Остается лишь точно выставить подложку с ДООЭ так, чтобы прямая, соединяющая их центры, была перпендикулярна штрихам дифракционной решетки. Это также не вызывает трудностей, поскольку осуществляется вращением всей подложки с ДООЭ в целом, с контролем совмещения полей лишь по одной координате. Подбор необходимых фазовых сдвигов между световыми полями также существенно упрощается, поскольку используются дифракционные решетки, период которых на один – два порядка больше λ , и, соответственно, на порядок снижаются требования к точности юстировки соответствующего элемента.

2. Экспериментальное формирование поляризационно-неоднородных пучков

Оптическая система по схеме рис. 1 была реализована со следующими параметрами элементов: $f=300$ мм, $d=30$ мкм, отсюда $a=6,33$ мм для гелий-неонового лазера. Параметры расширителя лазерного пучка: микрообъектив 8х, диафрагма 50 мкм, фокусное расстояние коллимирующего объектива 300 мм.

В качестве ДООЭ1 и ДООЭ2 были использованы формирователи мод Гаусса-Эрмита ТЕМ₀₁ и ТЕМ₁₀, рассчитанные итерационным методом [39], дающие высокую (около 50%) дифракционную эффективность при низкой (менее 5%) погрешности. Данные элементы рассчитаны именно на применение в Фурье-каскадах, что дает возможность фильтрации высокочастотных шумов, образующихся во вспомогательных областях при помощи диафрагмы в фокальной плоскости Фурье-каскада. Применение Фурье-каскада

также способствует уменьшению габаритов оптической системы, поскольку дает дальнюю зону дифракции на расстоянии фокуса в отличие от работы [26], где она образуется просто за счет распространения пучков в свободном пространстве. Необходимо отметить, что в данном случае требуется точное соблюдение переднего и заднего отрезков по фокусу в Фурье-каскаде для компенсации квадратичных фазовых множителей, возникающих в противном случае.

На рис. 2 показано распределение интенсивности (негатив), зарегистрированное при отсутствии анализатора на выходе оптической схемы. Это распределение не зависит от сдвига дифракционной решетки, что легко объясняется отсутствием интерференции двух ортогонально поляризованных мод.

На рис. 3 показаны результаты применения поляризационного фильтра П (см. рис. 1) к выходному распределению в случае различных суперпозиций исходных линейно-поляризованных мод.

При наличии анализатора выходного излучения распределения интенсивности для двух взаимно перпендикулярных положений его оси, соответствующих поляризациям двух разных мод, приведены на рис. 3а1,3. Видно, что степень поляризации мод

близка к 100%, поскольку наблюдается лишь одна из них. При повороте анализатора на 45° и положении дифракционной решетки, соответствующем сложению полей, наблюдается распределение интенсивности, показанное на рис. 3а2.

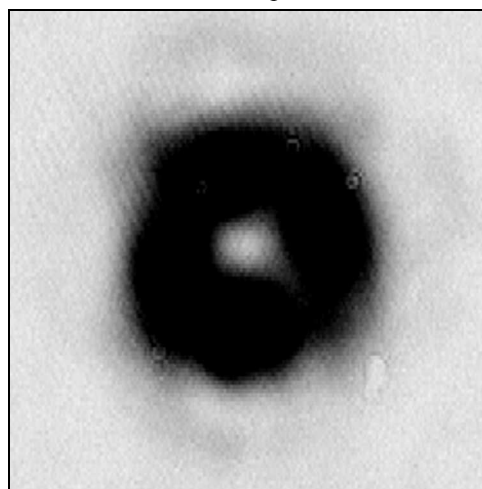


Рис. 2. Распределение интенсивности (негатив), зафиксированное на выходе поляризационного конвертора

	1 ↓	2 ↘	3 ↔	4 ↙	Схема поляризации
(а)					
(б)					
(в)					

Рис. 3. Результаты применения поляризационного фильтра (1 - вертикальное положение, 2 – повернутое на 45° направо, 3 – горизонтальное, 4 - повернутое на 45° влево) к выходному распределению в случае различных суперпозиций исходных линейно-поляризованных мод: (а) радиальная, (б) азимутальная, (в) смешанная линейно-круговая поляризации

При сдвиге дифракционной решетки на 7,5 мкм, соответствующем изменению фазового сдвига между модами на π , распределение интенсивности переходит в другую диагональ, как показано на рис. 3б2. Такой же эффект получался при повороте анализатора на -45° (рис. 3а4). Это легко объяснимо переходом

радиальной поляризации в смешанный линейный тип поляризации. Отличить один случай от другого можно по знаку поворота выходного распределения интенсивности. Если этот знак совпадает со знаком поворота анализатора, то поляризация радиальная, если нет, то смешанная.

Данная схема обеспечивает простой переход от радиальной к азимутальной поляризации, который достигается поворотом пластинки с ДОЭ на 180° вокруг оптической оси. При этом моды меняются местами и соответственно направление осей поляризаций мод меняется на 90° . Соответствующие распределения приведены на рис. 3б. На рис. 3в показан случай смешанной линейно-круговой поляризации, который был получен при сдвиге между модами на $\pi/2$.

Основным недостатком данной схемы являются погрешности формирования полей исходных мод, связанных с неравномерностью освещающего гауссова пучка (как видно из рис. 1 – ДОЭ, формирующие моды, находятся в периферийных частях пучка, где распределение интенсивности асимметрично). Эти погрешности заметны по некоторым отклонениям от радиальной симметрии распределений интенсивности. Однако сравнение с результатами других работ [26] показывает более высокое качество формирования моды, даже несмотря на эти погрешности. Кроме того, данная погрешность может быть легко уменьшена за счет большего расширения гауссова пучка, правда сопряженного с некоторой потерей световой энергии.

Заключение

Таким образом, предложен простой способ генерации поляризационно-неоднородных мод, позволяющий легко переходить от одного типа поляризации к другому без существенной перенастройки оптической схемы. Реализована соответствующая оптическая система для $\lambda = 633$ нм. В данной системе использованы фазовые ДОЭ для формирования мод. Из линейной поляризации модовых пучков получены радиальная, азимутальная, а также смешанные линейные и линейно-круговые поляризации. Полученные результаты позволяют надеяться на дальнейшее развитие данного метода, возможно, за счет использования мод более высоких порядков, а также суперпозиции разных мод.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (грант CRDF PG08-014-1), гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-3086.2008.9) и гранта РФФИ 08-07-99007.

Литература

1. **Zhan, Qiwen** Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications // *Advances in Optics and Photonics*. – 2009. – 1. – P.1–57.
2. Focusing light to a tighter spot / S. Quabis, R. Dorn, M. Eberler, O. Glockl, and G. Leuchs // *Opt. Commun.* – 2000. – V.179. – P.1–7.
3. **Youngworth, K.S.** Focusing of high numerical aperture cylindrical-vector beams, / K. S. Youngworth and T. G. Brown // *Opt. Express*. – 2000. – V.7. – P.77–87.
4. **Dorn, R.** Sharper focus for a radially polarized light beam, / R. Dorn, S. Quabis, and G. Leuchs // *Phys. Rev. Lett.* – 2003. – V.91. – P.233901.
5. **Kozawa, Y.** Sharper focal spot formed by higher-order radially polarized laser beams / Y. Kozawa and S. Sato // *Journal of Optical Society of America A*. – 2007. – V.24. – P.1793.
6. Focus shaping of cylindrically polarized vortex beams by a high numerical-aperture lens / Lianzhou Rao, Jixiong Pu, Zhiyang Chen, Pu Yei // *Optics & Laser Technology*. – 2009. – V.41. – P.241–246.
7. **Котляр, В.В.** Моделирование острой фокусировки радиально-поляризованной лазерной моды с помощью конического и бинарного микроаксионона / В.В. Котляр, С.С. Стафеев // *Компьютерная оптика*. – 2009. – Т.33, №1. – С.52–60.
8. **Sick, B.** Orientational imaging of single molecules by annular illumination / B. Sick, B. Hecht, and L. Novotny // *Phys. Rev. Lett.* – 2000. – V.85. – P.4482–4485.
9. Longitudinal field modes probed by single molecules / L. Novotny, M.R. Beversluis, K.S. Youngworth, and T.G. Brown // *Phys. Rev. Lett.* – 2001. – V.86. – P.5251–5254.
10. **Zhan, Qiwen** Focus shaping using cylindrical vector beams / Qiwen Zhan and James R. Leger // *Opt. Express*. – 2002. – V.10(7). – P.324–331.
11. Calculation of optical trapping forces on a dielectric sphere in the ray optics regime produced by a radially polarized laser beam / H. Kawauchi, K. Yonezawa, Y. Kozawa and S. Sato // *Optics Letters*. – 2007. – V.32. P.1839.
12. **Romea, R.D.** Modeling of inverse Cherenkov laser acceleration with axicon laser beam focusing. / R.D. Romea and W.D. Kimura // *Physical Review D*. – 1990. – V.42, N.5. – P.1807.
13. Electron acceleration to GeV energy by a radially polarized laser / Devki Nandan Gupta, Niti Kant, Dong Eon Kim, Hyyong Suk // *Physics Letters A*. – 2007. – V.368. – P.402–407.
14. **Niziev, V.G.** Influence of Beam Polarization on Laser Cutting Efficiency / V.G. Niziev, A.V. Nesterov // *Journal of Physics D*. – 1999. – V.32. – P.1455–1461.
15. **Venkatakrishnan, Krishnan** Interconnect microvia drilling with a radially polarized laser beam / Krishnan Venkatakrishnan and Bo Tan // *J. Micromech. Microeng.* – 2006. – V.16. – P.2603–2607.
16. Excitation of a single hollow waveguide mode using inhomogeneous anisotropic subwavelength structures / Yaniv Yirmiyahu, Avi Niv, Gabriel Biener, Vladimir Kleiner, and Erez Hasman // *Opt. Express*. – 2007. – V.15(20). – P.13404–13414.
17. **Kozawa, Yuichi** Generation of a radially polarized laser beam by use of a conical Brewster prism / Yuichi Kozawa and Shunichi Sato // *Opt. Lett.* – 2005. – V.30(22). – P.3063–3065.
18. Simultaneous generation of helical beams with linear and radial polarization by use of a segmented half-wave plate / Hikaru Kawauchi, Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, Takashi Sato, and Shojiro Kawakami // *Opt. Lett.* – 2008. – V.33(4). – P.399–401.
19. **Низьев, В.Г.** Генерация поляризационно-неоднородных мод в мощном CO₂-лазере / В. Г. Низьев, В.П. Якунин, Н.Г. Туркин // *Квантовая электроника*. – 2009. – № 39(6). – С.505–514.
20. Radially and azimuthally polarized beams generated by space-variant dielectric subwavelength gratings / Ze'ev Bomzon, Gabriel Biener, Vladimir Kleiner, and Erez Hasman // *Opt. Lett.* – 2002. – V.27(5). – P.285–287.
21. **Yonezawa, K.** Generation of a radially polarized laser beam by use of the birefringence of a c-cut Nd:YVO₄

- crystal / K. Yonezawa, Y. Kozawa, and S. Sato // *Opt. Lett.* – 2006. – V.31(14). – P.2151-2153.
22. **Yonezawa, K.** Compact Laser with Radial Polarization Using Birefringent Laser Medium, Jpn. / K. Yonezawa, Y. Kozawa, and S. Sato // *J. Appl. Phys.* – 2007. – V.46(8A). – P.5160–5163.
 23. Cylindrical Vector Laser Beam Generated by the Use of a Photonic Crystal Mirror / Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, Takashi Sato, Yoshihiko Inoue, Yasuo Ohtera, and Shojiro Kawakami // *Applied Physics Express.* – 2008. – V.1. – P.022008.
 24. **Tidwell, S.C.** Generating radially polarized beams interferometrically / S.C. Tidwell, D.H. Ford, and W.D. Kimura // *Applied Optics.* – 1990. – V.29. – P.2234–2239.
 25. **Youngworth, K.** Focusing of high numerical aperture cylindrical-vector beams / K. Youngworth and T. Brown // *Opt. Express.* – 2000. – V.7. – P.77–87.
 26. Simple interferometric technique for generation of a radially polarized light beam / Nicolas Passilly, Renaud de Saint Denis, and Kamel Ait-Ameur, François Treussart, Rolland Hierle, and Jean-François Roch // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 2005. – V.22(5). – P.984-991.
 27. **Biss, D.P.** Dark-field imaging with cylindrical-vector beams / D.P. Biss, K.S. Youngworth, and T.G. Brown // *Appl. Opt.* – 2006. – V.45. – P.470–479.
 28. **Volpe, G.** Generation of cylindrical vector beams with few-mode fibers excited by Laguerre–Gaussian beams / G. Volpe, D. Petrov // *Opt. Comm.* – 2004. – V.237. – P.89–95.
 29. Generation of a cylindrically symmetric, polarized laser beam with narrow linewidth and fine tenability / Toru Hirayama, Yuichi Kozawa, Takahiro Nakamura and Shunichi Sato // *Opt. Express.* – 2006. – V.14(26). – P.12839-12845.
 30. Two dimensional polarization encoding with a phase only liquid-crystal spatial light modulator / J.A. Davis, D.E. McNamara, D.M. Cottrell, and T. Sonehara // *Appl. Opt.* – 2000. – V.39. – P.1549–15541.
 31. Method for the generation of arbitrary complex vector wave fronts / Mark A.A. Neil, Farnaz Massoumian, Rimvydas Juškaitis, and Tony Wilson // *Opt. Lett.* – 2002. – V.27(21). – P.1929-1931.
 32. Hologram optimization for SLM-based reconstruction with regard to polarization effects / C. Kohler, T. Haist, X. Schwab and W. Osten // *Opt. Express.* – 2008. – V.16(19). – P.14853-14861.
 33. **Kogelnik, H.** Laser beams and resonators / H. Kogelnik, T. Li // *Appl. Opt.* – 1966. – V.5(10). – P.1550–1567.
 34. **Юу, Ф.Т.С.** Введение в теорию дифракции, обработку информации и голографию: Пер. с англ. / Под ред. В.К. Соколова. // М.: Сов. Радио, 1979. – 304 с.
 35. **Хонина, С.Н.** Дифракционные оптические элементы, согласованные с модами Гаусса-Лагерра, / С.Н. Хонина, В.В. Котляр, В.А. Сойфер // *Компьютерная оптика.* – 1997. – Вып.17. – С.25-31.
 36. **Хонина, С.Н.** Формирование мод Гаусса-Эрмита с помощью бинарных ДОЭ. II. Оптимизация апертурной функции // *Компьютерная оптика.* – 1998. – Вып.18. – С.28-36.
 37. **Балалаев, С.А.** Исследование возможности формирования гипергеометрических лазерных пучков методами дифракционной оптики / С.А. Балалаев, С.Н. Хонина, Р.В. Скиданов // *Известия Самарского научного центра РАН.* – 2008. – №10(3). – С.694-706.
 38. **Хонина, С.Н.** Формирование лазерных пучков Эйри с помощью бинарно-кодированных дифракционных оптических элементов для манипулирования микрочастицами / С.Н. Хонина, Р.В. Скиданов, О.Ю. Моисеев // *Компьютерная оптика.* – 2009. – Т.33, №2. – С.138-146.
 39. Дифракционная компьютерная оптика / под ред. В.А. Сойфера // М.: Физматлит, 2007. – 736 с.

References

1. Qiwen Zhan, Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications, *Advances in Optics and Photonics* 1, 1–57 (2009).
2. S. Quabis, R. Dorn, M. Eberler, O. Glockl, and G. Leuchs, “Focusing light to a tighter spot,” *Opt. Commun.* 179, 1–7 (2000).
3. K. S. Youngworth and T. G. Brown, “Focusing of high numerical aperture cylindrical-vector beams,” *Opt. Express* 7, 77–87 (2000).
4. R. Dorn, S. Quabis, and G. Leuchs, “Sharper focus for a radially polarized light beam,” *Phys. Rev. Lett.* 91, 233901 (2003).
5. Y. Kozawa and S. Sato, Sharper focal spot formed by higher-order radially polarized laser beams, *Journal of Optical Society of America A*, 24, 1793 (2007).
6. Lianzhou Rao, Jixiong Pu, Zhiyang Chen, Pu Ye, Focus shaping of cylindrically polarized vortex beams by a high numerical-aperture lens, *Optics & Laser Technology* 41 (2009) 241–246.
7. V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, Modeling sharp focus radially-polarized laser mode with conical and binary microaxicons, *Computer Optics* 33(1) 52-60 (2009) (in Russian).
8. B. Sick, B. Hecht, and L. Novotny, “Orientational imaging of single molecules by annular illumination,” *Phys. Rev. Lett.*, 85, 4482–4485 (2000).
9. L. Novotny, M.R. Beversluis, K.S. Youngworth, and T.G. Brown, “Longitudinal field modes probed by single molecules,” *Phys. Rev. Lett.*, 86, 5251–5254 (2001).
10. Qiwen Zhan and James R. Leger, Focus shaping using cylindrical vector beams, *Opt. Express* 10(7) 324-331 (2002).
11. H. Kawauchi, K. Yonezawa, Y. Kozawa and S. Sato, Calculation of optical trapping forces on a dielectric sphere in the ray optics regime produced by a radially polarized laser beam, *Optics Letters*, 32, 1839 (2007).
12. Romeo R.D. and Kimura W.D. Modeling of inverse Cherenkov laser acceleration with axicon laser beam focusing. *Physical Review D*, 1990, v.42, n.5, p.1807.
13. Devki Nandan Gupta, Niti Kant, Dong Eon Kim, Hyyong Suk, Electron acceleration to GeV energy by a radially polarized laser, *Physics Letters A* 368 (2007) 402–407.
14. V.G.Niziev, A.V.Nesterov Influence of Beam Polarization on Laser Cutting Efficiency *Journal of Physics D Appl. Phys.* V.32, (1999), p. 1455-1461.
15. Krishnan Venkatakrishnan and Bo Tan, Interconnect microvia drilling with a radially polarized laser beam, *J. Microelectromech. Syst.* 16 (2006) 2603–2607.
16. Yaniv Yirmiyahu, Avi Niv, Gabriel Biener, Vladimir Kleiner, and Erez Hasman, Excitation of a single hollow waveguide mode using inhomogeneous anisotropic sub-wavelength structures, *Opt. Express* 15(20) 13404-13414 (2007).
17. Yuichi Kozawa and Shunichi Sato, Generation of a radially polarized laser beam by use of a conical Brewster prism, *Opt. Lett.* 30(22) 3063-3065 (2005).
18. Hikaru Kawauchi, Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, Takashi Sato, and Shojiro Kawakami, Simultaneous generation of helical beams with linear and radial polarization by use of a segmented half-wave plate, *Opt. Lett.* 33(4) 399-401 (2008).
19. V.G. Niziev, V.P. Yakunin, N.G. Turkin, Generation of nonuniform polarized modes in the powerful CO₂-laser, *Quantum Electronics*, 39(6) 505-514 (2009) (in Russian).

20. Ze'ev Bomzon, Gabriel Biener, Vladimir Kleiner, and Erez Hasman, Radially and azimuthally polarized beams generated by space-variant dielectric subwavelength gratings, *Opt. Lett.* 27(5) 285-287 (2002).
21. K. Yonezawa, Y. Kozawa, and S. Sato, Generation of a radially polarized laser beam by use of the birefringence of a cut Nd:YVO₄ crystal, *Opt. Lett.* 31(14) 2151-2153 (2006).
22. K. Yonezawa, Y. Kozawa, and S. Sato, Compact Laser with Radial Polarization Using Birefringent Laser Medium, *Jpn. J. Appl. Phys.* 46(8A) 5160-5163 (2007).
23. Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, Takashi Sato, Yoshihiko Inoue, Yasuo Ohtera, and Shojiro Kawakami, Cylindrical Vector Laser Beam Generated by the Use of a Photonic Crystal Mirror, *Applied Physics Express* 1, 022008 (2008).
24. S. C. Tidwell, D. H. Ford, and W. D. Kimura, "Generating radially polarized beams interferometrically," *Applied Optics*, 29, 2234-2239 (1990).
25. K. Youngworth and T. Brown, "Focusing of high numerical aperture cylindrical-vector beams," *Opt. Express*, 7, 77-87, (2000).
26. Nicolas Passilly, Renaud de Saint Denis, and Kamel Ait-Ameur, François Treussart, Rolland Hierle, and Jean-François Roch, Simple interferometric technique for generation of a radially polarized light beam, *J. Opt. Soc. Am. A* 22(5) 984-991 (2005).
27. D.P. Biss, K.S. Youngworth, and T.G. Brown, "Dark-field imaging with cylindrical-vector beams," *Appl. Opt.*, 45, 470-479 (2006).
28. G. Volpe, D. Petrov, Generation of cylindrical vector beams with few-mode fibers excited by Laguerre-Gaussian beams, *Opt. Comm.* 237, 89-95 (2004).
29. Toru Hirayama, Yuichi Kozawa, Takahiro Nakamura and Shunichi Sato, Generation of a cylindrically symmetric, polarized laser beam with narrow linewidth and fine tunability, *Opt. Express*, 14(26) 12839-12845 (2006).
30. J. A. Davis, D. E. McNamara, D. M. Cottrell, and T. Sonehara, "Two dimensional polarization encoding with a phase only liquid-crystal spatial light modulator," *Appl. Opt.*, 39, 1549-15541 (2000).
31. Mark A. A. Neil, Farnaz Massoumian, Rimvydas Ju'skaitis, and Tony Wilson, Method for the generation of arbitrary complex vector wave fronts, *Opt. Lett.* 27(21) 1929-1931 (2002).
32. C. Kohler, T. Haist, X. Schwab and W. Osten, Hologram optimization for SLM-based reconstruction with regard to polarization effects, *Opt. Express* 16(19) 14853-14861 (2008).
33. H. Kogelnik and T. Li, "Laser beams and resonators," *Appl. Opt.* 5 (10), 1550-1567 (1966).
34. F.T.S. Yu, Introduction to diffraction, information processing, and holography: translated from English /Edited by V.K. Sokolov, M.: Sov. Radio, 1979. 304 p. (in Russian).
35. S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, Diffractive optical elements matched with Gauss-Laguerre modes, *Computer Optics*, 17, 25-31 (1997) (in Russian).
36. S.N. Khonina, Formation of Gauss-Hermite modes by means of binary DOEs. II. Optimisation of aperture function, *Computer Optics*, 18, 28-36 (1998) (in Russian).
37. S.A. Balalaev, S.N. Khonina, R.V. Skidanov, Examination of possibility to form hypergeometric laser beams by means of diffractive optics, *Izvest. Samarskogo nauchnogo centra RAS*, 10(3), 694-706 (2008) (in Russian).
38. S.N. Khonina, R.V. Skidanov, O.Yu. Moiseev, Airy laser beams generation by binary-coded diffractive optical elements for microparticles manipulation, *Computer Optics*, 33(2), 138-146 (2009) (in Russian).
39. Diffractive computer optics, edited by V.A. Sofer, M., Fizmatit, 736 p. (2007). (in Russian).

THE OPTICAL SCHEME FOR UNIVERSAL GENERATION AND CONVERSION OF NONUNIFORM POLARIZED LASER BEAMS BY MEANS OF DOEs

*Sergei Vladimirovich Karpeev*¹ (professor, email: karp@smr.ru),
Svetlana Nikolaevna Khonina^{1,2} (leading researcher, professor, email: khonina@smr.ru)

¹*S.P. Korolyov Samara State Aerospace University,*

²*Institution of Russian Academy of Sciences, Image Processing Systems Institute RAS,
Molodogvardeiskaya 151, Samara, 443001, Russia*

Abstract

The new optical system for conversion of linear polarized laser beams (as the most typical for laser radiation) into cylindrical vector beams (radial or azimuthal, as more effective in various applications), and also into various nonuniform polarized beams is developed and experimentally tested. The scheme is based on coherent superposition mode beams with use of phase diffractive grating allowing to change mode's phase shift without application of additional elements. Simplicity and universality of the scheme is reached owing to application of diffractive optical elements for generation prescribed mode distributions of necessary orientation in space, and also for forming simultaneously several different transverse modes in different rays for their further combination.

Key words: nonuniform polarized beams, radial and azimuthal polarization, extracavity polarization converter, coherent superposition, diffractive optical elements.

В редакцию поступила 11.09.2009г.