

*А. Г. Седухин*¹, В. П. Корольков¹*

Тонкопленочный конвертер поляризации на основе двухаксиконной оптической системы

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: sedukhin@iae.nsk.su

Аннотация. Предложен двухкомпонентный тонкопленочный конвертер для преобразования однородной круговой поляризации лазерного пучка в неоднородную радиальную либо азимутальную поляризацию. Он позволяет селективировать полезную компоненту поляризации и подавлять паразитную компоненту. Данный конвертер построен на базе двухаксиконной оптической системы и может быть использован в составе ряда интерферометров (в частности, Физо), а также в оптических системах острой субволновой фокусировки лазерных пучков. Применительно к сильно-преломляющим аксиконам (с углом преломления световых лучей в аксиконных элементах, близким к углу полного внутреннего отражения), синтезирована структура тонкопленочного конвертера поляризации и исследованы его спектральные характеристики, с использованием матричного метода анализа тонких пленок и методов глобальной и локальной оптимизации. Установлено, что данный вид конвертера способен обеспечить высокую поляризационную чистоту выходного пучка и высокое качество волнового фронта выходного пучка при умеренных вариациях конической формы аксиконов. В численном эксперименте, для длины волны лазерного излучения 405 нм и угла клина аксиконов 40°, исследованные 53-слойные покрытия на конических поверхностях аксиконов обеспечили допустимый спектральный диапазон работы тонкопленочных конвертеров, равный 27 нм (по длинам волн) при коэффициенте экстинкции паразитной поляризации, превышающем 10^5 .

Ключевые слова: конвертер поляризации, стопы из тонких пленок, рефракционные аксиконы, коллимированные лазерные пучки, радиальная и азимутальная поляризация

*A. G. Sedukhin*¹, V. P. Korolkov¹*

Thin-Film Polarization Converter Based on Two-Axicon Optical System

Institute of Automation and Electrometry, SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: sedukhin@iae.nsk.su

Abstract. A two-component thin-film converter for transforming a homogeneous circular polarization of a laser beam into an inhomogeneous radial or azimuthal polarization is proposed; with selection of the useful polarization component and suppression of the parasitic component. This converter is constructed on the basis of a two-axicon optical system and can be used as part of a number of interferometers (in particular, Fizeau), as well as in optical systems for tight subwavelength focusing of laser beams. As applied to highly refractive axicons (with an angle of refraction of light rays inside axicon elements close to the angle of total internal reflection), the structure of a thin-film polarization converter is synthesized and its spectral characteristics are studied using the matrix method for thin-film analysis and methods of global and local optimization. It has been found that this type of converter is capable of providing high polarization purity of the output beam and high quality of the wavefront of the output beam at moderate variations in the conical shape of the axicons. In a numerical experiment, for a laser radiation wavelength of 405 nm and an axicon wedge angle of 40°, the

investigated 53-layer coatings on the conical surfaces of axicons provided an allowable spectral range of operation of thin-film converters equal to 27 nm (in terms of wavelengths) at the extinction coefficient of the parasitic polarization exceeding 10^5 .

Keywords: polarization converter, thin film stacks, collimated laser beams, refractive axicons, radial and azimuthal polarization

Введение

Во многих современных оптических системах все большее распространение находят лазерные пучки с неоднородными распределениями поляризации в поперечных сечениях. Причиной этого является то, что такие пучки позволяют обеспечивать ряд более высоких либо принципиально новых технических характеристик, важных для разнообразных приложений. Например, для сокращения площади сфокусированного лазерного пятна и устранения его эллипсовидности (при линейной поляризации), в высокоапертурных системах острой субволновой фокусировки применяются пучки с радиальным и азимутальным распределением поляризации [1–6], которые получили собирательное название «цилиндрически поляризованные пучки». Указанное свойство цилиндрически поляризованных пучков важно для таких приложений, как лазерная литография [7], обработка материалов [8], оптический захват микро- и наночастиц [9] и других. Также, в оптических системах дальней связи [10], туннельной оптической микроскопии [11], лазерных генераторах [12] и оптических интерферометрах [13] находят применение коллимированные цилиндрически поляризованные пучки. Например, было показано, что лазерные пучки с радиальной поляризацией позволяют увеличить информационную емкость оптической связи в свободном пространстве за счет мультиплексирования с разделением мод [10].

Оптическая система конвертера поляризации

В настоящей работе для получения цилиндрически-поляризованных лазерных пучков с высокой поляризационной чистотой предлагается и исследуется новая разновидность оптического конвертера поляризации коллимированного лазерного пучка из круговой в радиальную либо азимутальную. Оптическая система конвертера построена на основе двух коммерческих встречно установленных положительных рефракционных аксиконов. Для лучшего понимания работы предлагаемого конвертера и сравнения его устройства с другими известными разновидностями конвертеров, на рис. 1(а) показан продольный вид исходной стандартной двухаксиконной оптической конфигурации, часто используемой для преобразования формы поперечной интенсивности пучка из равномерной в кольцевую [14], с изменением размера кольца при подборе расстояния L между вершинами аксиконов. Указанные, на рис. 1(а) минимальный и максимальный радиусы входного лазерного пучка, $\rho_{in.min}$ и $\rho_{in.max}$, определяются по допустимым величинам из паспортных данных аксиконов (последняя величина определяется технологическим радиусом скругления вершины аксикона), а соответствующие величины минимального и максимального радиусов выходного пучка, $\rho_{out.min}$ и

$\rho_{out.max}$, находятся из простых геометрических соотношений [15]. При нанесении специально рассчитанных тонкопленочных покрытий на боковые поверхности аксиконов (показанных тройными пунктирными линиями) и дополнении такой системы ротатором поляризации, состоящим из двух полуволновых двулучепреломляющих пластин (не показанных на рисунке), система может обеспечить конвертацию поляризации из круговой в цилиндрическую с эффективностью 100%, при использовании аккумулированного сдвига фаз ортогональных поляризаций (радиальной и азимутальной) за счет эффекта наведенного двулучепреломления при наклонном прохождении света через тонкопленочные покрытия [15]. В то же время, такая система неизбежно будет изменять поперечную форму пучка и вносить искажения волнового фронта при остаточных погрешностях формы аксиконов, в особенности конических поверхностей, а также возможных искажений волнового фронта элементами ротатора поляризации. Этот недостаток не позволяет применить такую оптику для ряда приложений.

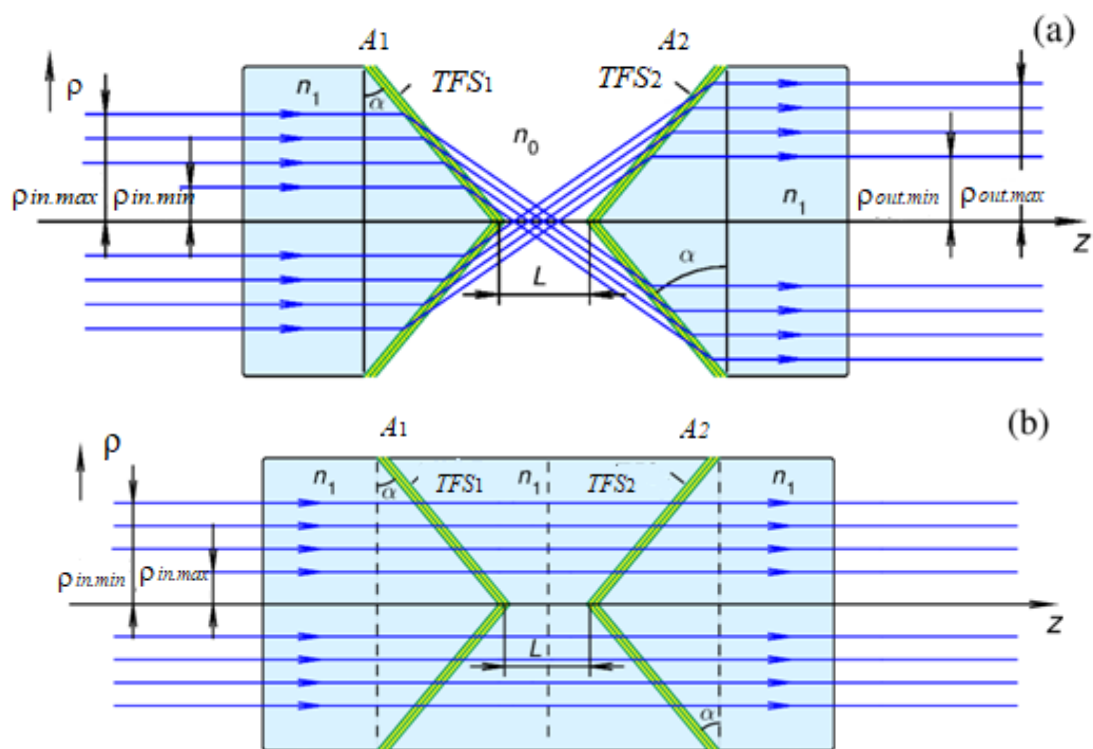


Рис. 1. Продольный вид стандартной двухаксиконной оптической конфигурации для преобразователя формы пучка (а) и продольное сечение предлагаемой оптической конфигурации конвертера поляризации (б)

Для устранения названного недостатка и упрощения системы за счет устранения ротатора поляризации в предлагаемом конвертере поляризации, продольный разрез которого показан на рис 1(б), конические поверхности аксиконных элементов окружаются иммерсионной средой с показателем преломления, приближенно равным показателю преломления материала аксиконов.

В другом монолитном варианте взамен иммерсионной среды можно использовать два отрицательных рефракционных аксикона (на рис. 1(b) вертикальная пунктирная линия показывает границу раздела аксиконов) со склейкой всех сопрягаемых поверхностей аксиконов. Как можно видеть, в системе рис. 1(b), направление распространения световых лучей и форма волнового профиля выходного пучка не изменяются, в первом приближении. Возможные остаточные отклонения хода световых лучей и соответствующие искажения волнового фронта выходного пучка являются в данном случае крайне малыми и могут быть вызваны различием показателей преломления основных и комплементарных аксиконов, а также искажениями конических поверхностей аксиконов. По нашим предварительным оценкам, в предлагаемой системе искажения волнового фронта выходного пучка являются существенно меньшими, чем искажения конической формы аксиконов (в основном, за счет устранения двух границ раздела стекло-воздух между аксиконами). Также, как можно легко установить, данные искажения являются существенно меньшими, чем во многих других конвертерах поляризации. Например, относительно больших искажений волнового фронта можно ожидать в близких по типу конвертерах на основе двухаксиконных систем, работающих на основе эффекта Брюстера с зеркальным [11] либо рефракционным [12] практически полным разделением ортогональных мод поляризации на границах раздела стекло-воздух-стекло аксиконов при соответствующем угле клина аксиконов. В зеркальной системе [11] дополнительные искажения волнового фронта будут вноситься технологически сложным в изготовлении дополнительным цилиндрическим рефлектором между двумя аксиконами. Следует отметить также технологическую сложность изготовления специализированных заказных остроконечных аксиконов для работы их конических поверхностей под углом Брюстера на конкретной длине волны. Применение стандартных коммерческих «небрюстеровских» (более тупоконечных) аксиконов и возможность обеспечения малых искажений волнового фронта выходного пучка может явиться одним из важнейших факторов выбора предлагаемой конфигурации для многих приложений. Подробное исследование искажений волнового фронта выходного пучка в данной работе не проводится. Акцент же делается на исследовании характеристик тонкопленочного конвертера для типового случая использования коммерческих «небрюстеровских» аксиконов. Также следует отметить, что предлагаемый конвертер не обеспечивает подавление вихревой компоненты пучка с круговой поляризацией и, при необходимости, компенсации такой компоненты следует включить в состав системы (на ее входе либо выходе) спиральную фазовую пластинку. С другой стороны, для ряда приложений, присутствие вихревой компоненты может явиться дополнительным преимуществом конвертера.

Моделирование поляризационных характеристик системы из двух тонкопленочных стоп

В проведенном численном эксперименте рабочая длина волны источника лазерного излучения принималась равной $L_W = 405$ нм. Угол клина аксиконов был выбран равным $\alpha = 40^\circ$, а материалом служил плавленый кварц с коэффициентом преломления $n_s = 1,4696$ при L_W . Структура двух последовательно расположенных тонкопленочных стоп, наносимых на конические поверхности аксиконов и обеспечивающих фильтрацию ортогонально поляризованных компонентов, была найдена итерационными методами глобальной и локальной оптимизации с использованием матричного метода анализа тонких пленок [16]. В качестве оптических материалов стоп были выбраны фтористый магний с низким показателем преломления ($n_L = 1,3836$ при L_W) и оксид гафния с высоким показателем преломления ($n_H = 1,9348$ при L_W). В расчетах учитывалась дисперсия показателей преломления материалов аксиконов и тонкопленочных стоп при отклонении от рабочей длины волны. Для упрощения расчетов предполагалось использование вышеуказанных отрицательных аксиконов из плавленого кварца. В качестве расчетной модели стоп для каждой конической поверхности аксиконов была выбрана следующая однотипная 53-слойная структура:

$$\text{кварц} \left| L^{(4)} H^{(4)} L^{(3)} H^{(3)} L^{(2)} H^{(2)} \left(L^{(1)} H^{(1)} L^{(1)} \right)^{20} H^{(2)} L^{(2)} H^{(3)} L^{(3)} H^{(4)} L^{(4)} \right| \text{кварц} .$$

Найденные толщины данной структуры составили: $L^{(1)} = 0,5854L$, $H^{(1)} = 0,9178H$, $L^{(2)} = 1,2494L$, $H^{(2)} = 1,3048H$, $L^{(3)} = 0,2628L$, $H^{(3)} = 1,0245H$, $L^{(4)} = 1,112L$, $H^{(4)} = 1,1522H$, где $L = \lambda_f / (4n_L) = 77,6959$ нм; $H = \lambda_f / (4n_H) = 55,5613$ нм; $\lambda_f = 430$ нм. Общая толщина каждой многослойной стопы составила 3,63 мкм.

На рис. 2 приведены спектральные зависимости коэффициентов общего пропускания радиально и азимутально поляризованных компонентов входного лазерного пучка с круговой поляризацией через аксиконы, соответственно T_p и T_s , а также коэффициента экстинкции T_p/T_s .

Как можно видеть из графиков, в спектральном диапазоне шириной 27 нм, центрированном относительно рабочей длины волны L_W и выделенном желтым цветом, наблюдается сильное ослабление азимутально поляризованной компоненты по отношению к практически не ослабляемой радиально поляризованной компоненте, при коэффициенте экстинкции, превышающем 10^5 . Френелевские потери на плоских входных и выходных поверхностях аксиконных элементов не учитывались. Данные поверхности могут быть просветлены с помощью стандартных пленочных покрытий.

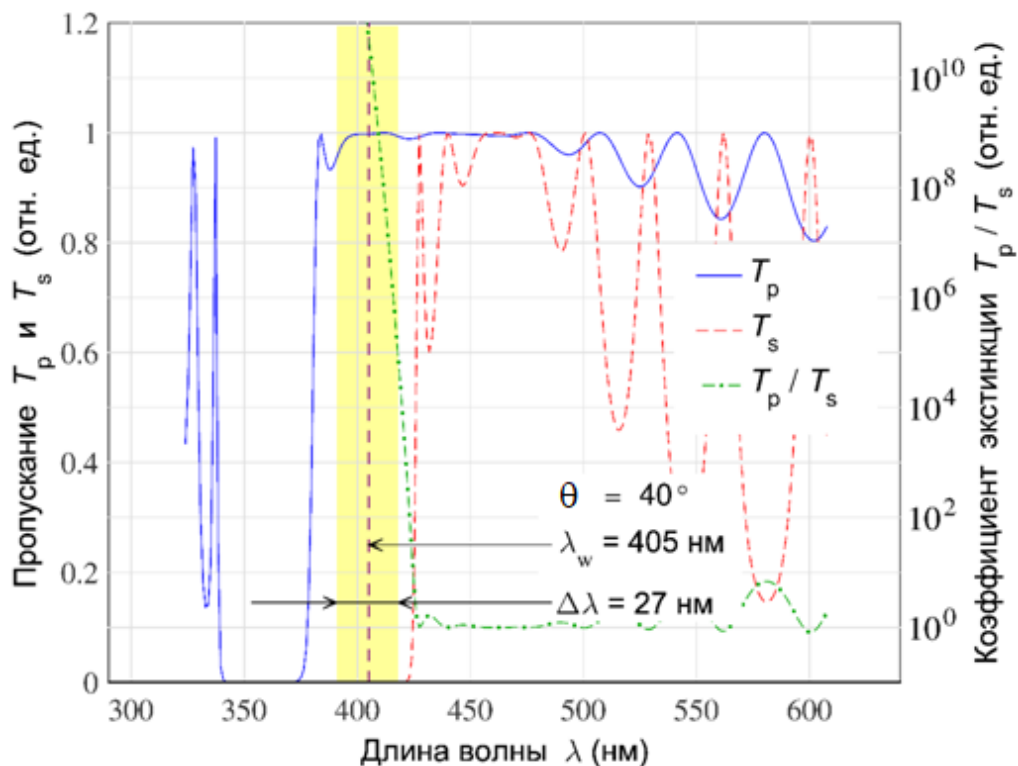


Рис. 2. Спектральные зависимости коэффициентов общего пропускания радиально и азимутально поляризованных компонентов входного лазерного пучка с круговой поляризацией

Результаты и заключение

Полученные спектральные характеристики предложенного конвертера поляризации представляются достаточно хорошими для его использования во многих приложениях, требующих получения высокой поляризационной чистоты, поддержания коллимированности пучка на выходе, а также сохранения формы его поперечного распределения интенсивности при малых искажениях волнового фронта.

Благодарности

Работа выполнена за счет средств субсидии на финансовую поддержку государственного задания (гос. регистрационный № 121041500060-2).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Youngworth K. S. and Brown T. G. Focusing of high numerical aperture cylindrical vector beams, *Opt. Express*, 2000. – Vol. 7. – P. 77–87.
2. Zhan Q. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications. *Advances in Optics and Photonics*. 2009. – Vol. 1. – P. 1–57.
3. Quabis S., Dorn R., Eberler M., Glockl O., Leuchs G. Focusing light to a tighter spot. *Opt. Commun.* 2000. – Vol. 179. – P. 1–7.
4. Dorn R., Quabis S., Leuchs G. Sharper focus for a radially polarized light beam. *Phys. Rev. Lett.* 2003. – Vol. 91. – P. 233901–233904.

5. Sheppard C.J.R., Choudhury A. Annular pupils, radial polarization, and superresolution. *Appl. Opt.* 2004. – Vol. 43. – P. 4322–4327.
6. Yang L., Xie X., Wang S., Zhou J. Minimized spot of annular radially polarized focusing beam. *Opt. Lett.* 2013. – Vol. 38. – P. 1331–1333.
7. Van M.P., Ushakova K., Bastiaansen C.W.M., Pereira S.F., Urbach H.P., Broer D.J. Enhanced lithographic resolution using longitudinal polarization state of light. *J. Micro/Nanolith. MEMS and MOEMS.* 2015. – Vol.14(4). – 043509, 6 pp.
8. Drevinskas R., Zhang J., Beresna M., Gecevičius M., Kazanskii A.G., Svirko Y.P., Kazansky P.G. Laser material processing with tightly focused cylindrical vector beams. *Appl. Phys. Lett.* 2016. – Vol. 108 (22). – 221107, 5 pp.
9. Moradi H., Shahabadi V., Madadi E., Karimi E., Hajizadeh F. Efficient optical trapping with cylindrical vector beams. *Opt. Express.* 2019. – Vol. 27(5). – P. 7266–7276.
10. Milione G., Lavery M.-P.J., Huang H., Ren Y., Xie G., Nguyen T.A., Karimi E., Marrucci L., Nolan D.A., Alfano R.R., and Willner A.E. 4×20 Gbit/s mode division multiplexing over free space using vector modes and a q-plate mode (de)multiplexer. *Opt. Lett.* 2015. – Vol. 40(9). – P. 1980–1983.
11. Guerra J.M. Photon tunneling microscopy. *Appl. Opt.* 1990. – Vol. 29(26). – P. 3741–3752.
12. Kozawa Y. and Sato S. Generation of a radially polarized laser beam by use of a conical Brewster prism. *Opt. Lett.* 2005. – Vol. 30(22). – P. 3063–3065.
13. Lerman G.M. and Levy U. Radial polarization interferometer. *Opt. Express.* 2009. – Vol. 17(25). – P. 23234–23246.
14. Ochiai N., Ozeki Y. Low-loss microscope optics with an axicon-based beam shaper. *Appl. Opt.* 2021. – Vol. 60(8). – P. 2252–2262.
15. Sedukhin A.G. Efficient generation of annular cylindrical vector beams by refractive axicons with high-transmission thin-film retarders. *Opt. Commun.* 2021. – Vol. 499. – 127293, 10 pp.
16. Meleod H.A., *Thin Film Optical Filters*, 4th ed., CRS Press, Taylor & Francis Group, 2010, Ch. 3.

© *A. Г. Седухин, В. П. Корольков, 2023*