

Полностью симметричный дифракционно-интерференционный формирователь радиально-поляризованных пучков с длиной волны 1530 нм

В.В. Подлипов^{1,2}, С.В. Карпеев^{1,2}, В.Д. Паранин¹

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,
443086, Россия, Самарская область, Самара, Московское шоссе, д. 34,

² ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
443001, Россия, Самарская область, Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151

Аннотация

Предложена полностью симметричная схема формирователя цилиндрических векторных пучков, в которой два дифракционных аксикона и помещённый между ними интерференционный поляризатор образуют сэндвич-структуру минимально возможной толщины. Проведён расчёт и экспериментальное исследование интерференционного поляризатора для формирования радиально-поляризованного излучения на длине волны 1530 нм. Изготовлена пара амплитудных дифракционных аксиконов с периодом 3,62 мкм, соответствующим требуемому углу дифракции $24,5^\circ$ для формирования радиальной поляризации. Экспериментально продемонстрировано преобразование пучка с круговой поляризацией в радиально-поляризованный вихревой пучок.

Ключевые слова: многослойное оптическое покрытие, интерференционный поляризатор, дифракционный аксикон, сэндвич-структура, радиальная поляризация.

Цитирование: 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.

Введение

Поляризационные преобразования, происходящие при наклонном падении света на границу раздела двух сред, уже достаточно давно используются для формирования цилиндрических векторных пучков, которые имеют множество приложений, включая микроскопию, литографию, ускорение электронов, обработку материалов, спектроскопию [1]. Особо следует отметить использование вихревых пучков с различными поляризационными состояниями при кодировании информации в системах связи [2–4].

Вначале появились оптические системы для генерации неоднородных поляризаций на основе прохождения пучков через поверхность под углом Брюстера [5–7]. Такие системы могут быть как внутри- [5, 6], так и внерезонаторными [7] и основаны на использовании конических волновых фронтов, сформированных соответствующими оптическими элементами. Наибольшей эффективностью обладают внутрирезонаторные системы, поскольку обеспечивают многократное прохождение Брюстеровских окон или призм. Брюстеровские окна [5], обеспечивающие радиальную либо азимутальную поляризацию, представляют сложности в изготовлении. Более простой является система Брюстеровских призм [6], которая по сути является комбинацией рассеивающего и собирающего аксиконов. Для повышения коэффициента отражения азимутальной поляризации в [6] применялось многослойное диэлектрическое покрытие конических поверхностей аксиконов. Такая система производит только радиально-поляризованное распре-

деление с амплитудой, соответствующей кольцевой моде R-TEM_(0,1).

Для внерезонаторных оптических систем с падением света под углом Брюстера отсутствуют ограничения, связанные с многопроходностью, поэтому именно в такой системе [7] впервые были применены дифракционные аксиконы. Другим отличием внерезонаторных систем является использование круговой поляризации в освещающем пучке. Как показано в работе [8], это приводит к появлению вихревой фазы в сформированном пучке, так же как и в схемах [9–11]. Поскольку излучение проходит через оптическую систему однократно, для увеличения степени поляризации прошедшего излучения в системе [7] использовалась стопа Столетова. Основная проблема при использовании такого устройства – это большие углы расходимости полученного пучка с радиальной поляризацией, что связано с большими значениями угла Брюстера для основных марок оптических стёкол. Первый по ходу лучей аксикон может быть малого диаметра, что позволяет изготовить его методом электронной литографии и получить достаточно малый период, обеспечивающий дифракцию под углом Брюстера. Однако даже при относительно небольшом (4–5) числе пластин в стопе Столетова за счёт толщины диаметр пучка после стопы сильно увеличивается из-за большого угла расходимости. Для коллимации этого пучка требуется второй аксикон с существенно большей апертурой, который невозможно изготовить методом электронной литографии. Лазерный фотопостроитель, который обеспечивает такую апертуру, не обладает достаточным разрешением, и в результате на выходе не

получается параллельного пучка. Именно по этой причине в работе [7] даже с дополнительной линзой не удалось сколлимировать полученный пучок, а проверка получения радиальной поляризации осуществлялась по изображению на матовом экране. Таким образом, для преодоления указанных проблем следует, с одной стороны, уменьшать толщину поляризующего элемента и устанавливать его как можно ближе к аксиконам, а с другой – уменьшать угол расходимости пучка, что также приводит и к снижению требований по разрешению фотопостроителя. В этом же направлении действует и увеличение рабочей длины волны.

Одним из способов решения обеих указанных задач является применение многослойных интерференционных поляризующих покрытий [8–11], которое позволяет как существенно уменьшить рабочий угол падения при сохранении достаточно высокого поляризационного контраста, так и существенно уменьшить толщину пакета в целом. Уменьшение толщины позволяет использовать как неоднородно поляризованный пучок Бесселя в ближней зоне [12, 13], так и кольцевые распределения, получающиеся в дальней зоне [8, 14]. Все указанные устройства предназначались для работы в видимом диапазоне.

Если задаваться целью в дальнейшем использовать полученный пучок для атмосферных линий связи, то коллимация пучка необходима. Сохранить плоскопараллельность пучка можно лишь при коллимации вторым аксиконом с точно такой же числовой апертурой, что и у первого. В работе [8] с целью избежать появления дополнительных дифракционных порядков коллимация осуществлялась рефракционным аксиконом со специально подобранным углом при вершине. Разумеется, энергетическая эффективность такого решения максимальная, но, во-первых, толщина рефракционного аксикона приводит к существенному увеличению рабочей апертуры, а во-вторых, широкоапертурный рефракционный аксикон высокого оптического качества с точно заданным углом при вершине – весьма дорогой оптический элемент. Учитывая все вышесказанное, а также известное свойство интерференционных поляризаторов подавлять нулевой порядок дифракции, было решено перейти к полностью симметричной схеме формирователя поляризации в виде сэндвич-структуры из двух дифракционных аксиконов с помещённым между ними интерференционным поляризатором. Таким образом, толщина формирователя уменьшается до минимально возможной, а увеличение длины волны до 1,53 мкм при сохранении рабочего угла поляризатора позволяет почти в 3 раза увеличить период аксикона по сравнению с [8, 12, 13].

1. Проектирование многослойных интерференционных структур для ИК-диапазона

Интерференционный поляризатор представляет собой нанесённое на подложку многослойное оптическое покрытие, спектральное пропускание которого отличается для *p*- и *s*-поляризованного излучения при ненулевых углах падения. При этом можно подобрать

такие толщины слоёв и угол падения, что в окрестности заданной длины волны λ_0 будет наблюдаться максимальное пропускание для *p*-поляризации и минимальное для *s*-поляризации. В работе [8] использовался поляризатор, состоящий из 20 слоёв Ta₂O₅/SiO₂, рассчитанный на длину волны 632,8 нм на кварцевой подложке 12,7 мм диаметром и 5 мм толщиной. С его помощью был получен радиально-поляризованный пучок с углом падения 30° и отношением радиальной и азимутальной компонент 100:1–140:1. Пропускание радиальной компоненты составляло около 70%. В работе [9] применялся более совершенный поляризатор, состоящий из 43 слоёв Nb₂O₅/SiO₂. Улучшение конструкции позволило уменьшить угол падения с 30° до 20° с отношением радиальной и азимутальной компонент 80:1–90:1, а также обеспечить отношение азимутальной и радиальной компонент 40:1–50:1 для угла падения 25°. Пропускание радиальной и азимутальной компонент на углах 20° и 25° составляло 72% и 62%.

Разработка аналогичных поляризаторов для ближнего инфракрасного диапазона имеет конструкторско-технологические сложности. Увеличение длины волны с 632,8 нм до 1530–1570 нм приводит к пропорциональному повышению толщины покрытия и его стоимости. Кроме этого, в длинноволновой части спектра снижается разность показателей преломления используемых материалов SiO₂ и Ta₂O₅. Тем самым уменьшается коэффициент поляризации по сравнению с видимым диапазоном при одинаковом числе слоёв. По всей видимости, необходим компромисс между поляризационными и угловыми характеристиками элемента.

В работе предложен поляризатор, состоящий из 33 чередующихся слоёв SiO₂/Nb₂O₅ различной толщины (табл. 1). Показатели преломления слоев в расчётах принимались равными $n(\text{SiO}_2) = 1,4555$, $n(\text{Nb}_2\text{O}_5) = 2,1856$. Показатель преломления подложки (стекло BK7) составлял 1,52. Конструктивно первый слой прилегает к подложке, 33-й слой контактирует с воздушной средой. В проектировании использовалось программное обеспечение вакуумной установки напыления.

Табл. 1. Толщина и порядок нанесения слоёв

N	Толщина, нм	Материал	N	Толщина, нм	Материал
1	173,2	Nb ₂ O ₅	18	258,7	SiO ₂
2	261,5	SiO ₂	19	166,3	Nb ₂ O ₅
3	165,0	Nb ₂ O ₅	20	253,6	SiO ₂
4	246,5	SiO ₂	21	160,9	Nb ₂ O ₅
5	153,9	Nb ₂ O ₅	22	243,1	SiO ₂
6	229,8	SiO ₂	23	152,7	Nb ₂ O ₅
7	144,5	Nb ₂ O ₅	24	230,3	SiO ₂
8	221,0	SiO ₂	25	145,0	Nb ₂ O ₅
9	143,1	Nb ₂ O ₅	26	221,7	SiO ₂
10	225,6	SiO ₂	27	142,7	Nb ₂ O ₅
11	149,3	Nb ₂ O ₅	28	224,4	SiO ₂
12	237,9	SiO ₂	29	149,0	Nb ₂ O ₅
13	157,9	Nb ₂ O ₅	30	238,7	SiO ₂
14	250,0	SiO ₂	31	160,1	Nb ₂ O ₅
15	164,7	Nb ₂ O ₅	32	255,2	SiO ₂
16	257,5	SiO ₂	33	174,8	Nb ₂ O ₅
17	167,6	Nb ₂ O ₅			

По данным табл. 1 моделировалось спектральное пропускание в окрестности рабочей длины волны (рис. 1). Использовалась программа TFCalc, основанная на матричном методе расчёта интерференционных фильтров. В расчётах учитывалась интерференция в многослойной оптической структуре и отражение от непокрытой поверхности подложки. Поскольку поляризатор предназначен для работы с узкополосным лазерным излучением, дисперсионная зависимость оптических материалов во внимание не принималась.

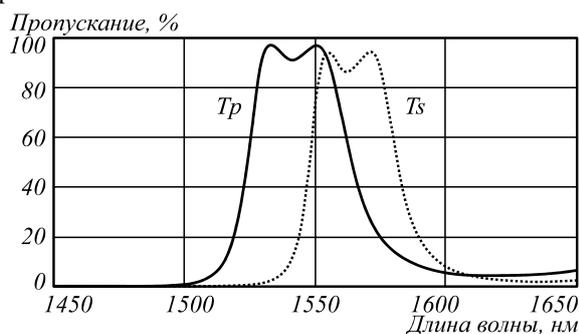


Рис. 1. Спектральное пропускание *p*- и *s*-поляризованного света при угле падения 25°

Для определения углов пропускания *p*- и *s*-поляризованного излучения и характерного отношения *Ts/Tr* в программе TFCalc была вычислена угловая характеристика (рис. 2). Характерные отношения *Tr/Ts* и *Ts/Tr* приведены на рис. 3.

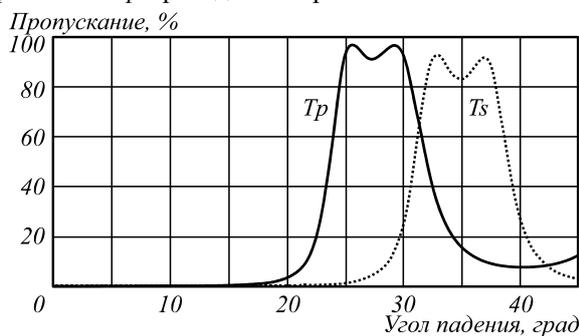


Рис. 2. Угловое пропускание *p*- и *s*-поляризованного света на $\lambda = 1530$ нм

Из расчётов следует, что максимальное отношение *Tr/Ts* наблюдается для угла 24,5° и составляет 62:1. Максимальное отношение пропускания *Ts/Tr* равно 9,5:1 при угле падения 37,5°. Это невысокое значение, и для его улучшения в следующем варианте конструкции предусмотрено увеличение числа слоёв. Полуширина угловых характеристик приблизительно равна 4,5°, что обуславливает относительно низкий допуск на период дифракционного аксикона.

Также для сравнения был рассчитан поляризатор, состоящий из 43 чередующихся слоёв SiO₂/Nb₂O₅ различной толщины (табл. 2). Показатели преломления слоёв и подложки сохранялись прежними. Конструктивно 1-й слой прилегает к подложке, 43-й слой контактирует с воздушной средой.

По данным табл. 2 моделировалось спектральное пропускание в окрестности рабочей длины волны

(рис. 4). Как и в предыдущем случае, использовалась программа TFCalc и аналогичная методика расчёта.

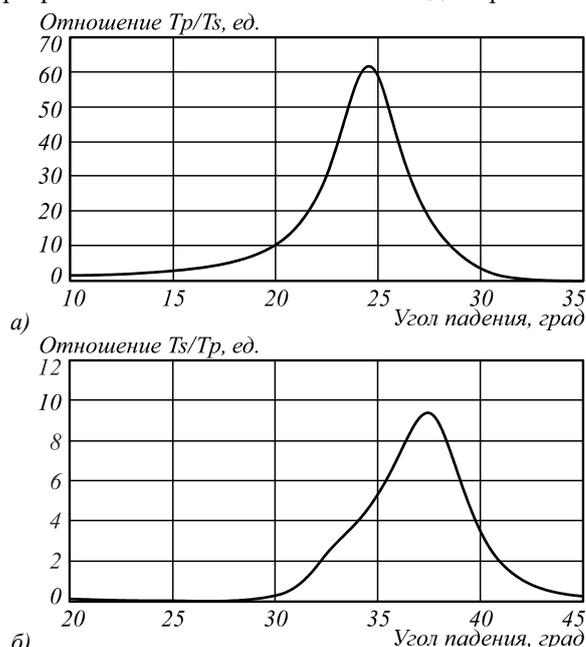


Рис. 3. Отношение углового пропускания поляризованных компонент: отношение *Tr/Ts* (а), отношение *Ts/Tr* (б)

Табл. 2. Толщина и порядок нанесения слоёв

N	Толщина, нм	Материал	N	Толщина, нм	Материал
1	171,3	Nb ₂ O ₅	23	164,7	Nb ₂ O ₅
2	260,3	SiO ₂	24	255,3	SiO ₂
3	162,9	Nb ₂ O ₅	25	162,6	Nb ₂ O ₅
4	247,7	SiO ₂	26	251,1	SiO ₂
5	154,3	Nb ₂ O ₅	27	158,5	Nb ₂ O ₅
6	237,7	SiO ₂	28	245,3	SiO ₂
7	148,4	Nb ₂ O ₅	29	153,8	Nb ₂ O ₅
8	232,8	SiO ₂	30	239,7	SiO ₂
9	146,0	Nb ₂ O ₅	31	149,8	Nb ₂ O ₅
10	232,2	SiO ₂	32	235,5	SiO ₂
11	146,3	Nb ₂ O ₅	33	147,1	Nb ₂ O ₅
12	233,9	SiO ₂	34	232,7	SiO ₂
13	148,2	Nb ₂ O ₅	35	145,8	Nb ₂ O ₅
14	237,3	SiO ₂	36	231,8	SiO ₂
15	151,6	Nb ₂ O ₅	37	146,5	Nb ₂ O ₅
16	242,2	SiO ₂	38	234,1	SiO ₂
17	156,1	Nb ₂ O ₅	39	150,5	Nb ₂ O ₅
18	248,2	SiO ₂	40	241,7	SiO ₂
19	160,7	Nb ₂ O ₅	41	158,2	Nb ₂ O ₅
20	253,5	SiO ₂	42	253,9	SiO ₂
21	164,0	Nb ₂ O ₅	43	173,8	Nb ₂ O ₅
22	256,2	SiO ₂			

Спектральные характеристики получились более узкими, чем в предыдущем случае (рис. 1), что обусловлено большим числом слоёв. Для определения угла пропускания *s*-поляризованного излучения вначале была вычислена угловая характеристика (рис. 5). По ней далее определялись отношения *Tr/Ts* и *Ts/Tr*, приведённые на рис. 6. Максимальное отношение *Tr/Ts* наблюдается для угла 23,75° и составляет 490:1. Полуширина этой угловой характеристики со-

ставляет около $2,5^\circ$, что увеличивает требования к точности воспроизведения периода аксикона по сравнению с предыдущим случаем.

Для реализации и дальнейших экспериментальных исследований был выбран поляризатор в соответствии с табл. 1 как обеспечивающий большие допуски на период аксикона.

2. Экспериментальное исследование образцов интерференционных поляризаторов

Изготовленные интерференционные поляризаторы содержали по 33 слоя Nb_2O_5/SiO_2 с номинальными толщинами, приведёнными в табл. 1. В качестве подложки использовалось стекло марки BK7 диаметром 25,4 мм и толщиной 3 мм. Рабочая длина волны поляризатора составляла 1530 нм, расчётный угол падения – 25° . Всего было изготовлено 2 элемента.

Угловое пропускание исследовалось на спектральном эллипсометре J.A. Wollam V-VASE в диапазоне углов $0-45^\circ$ с шагом $0,25^\circ$. Длина волны излучения устанавливалась равной 1530 нм, ширина спектра –

не более 1 нм. Для большей точности перед каждым измерением определялась мощность излучения монохроматора эллипсометра, а результаты измерений усреднялись во времени по 10 точкам. Зависимости пропускания p - и s -поляризованного излучения от угла падения для каждого образца приведены на рис. 7. Из измеренных данных следует, что пропускание элементов достигает 75–80%. Образец №1 лучше соответствует расчётным характеристикам, приведённым на рис. 2. Характеристика образца №2 смещена в сторону больших углов падения. На рис. 8, 9 показаны отношения пропускания p - и s -поляризованного света, вычисленные по данным рис. 7. Колебания характеристик T_p/T_s на рисунках обусловлены погрешностью измерения (в связи с зашумлённостью малых сигналов T_s). Измеренное отношение T_p/T_s равно около 80:1 для углов падения $24,5-25^\circ$. Отношение T_s/T_p составляет не менее 10:1 при углах падения $37,5-38,5^\circ$. Полученные характеристики соответствуют расчётным значениям.

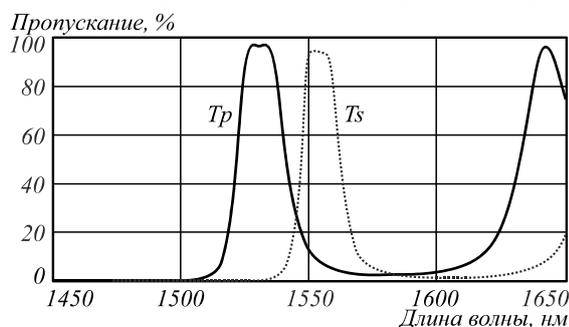


Рис. 4. Спектральное пропускание p - и s -поляризованного света при угле падения 25°

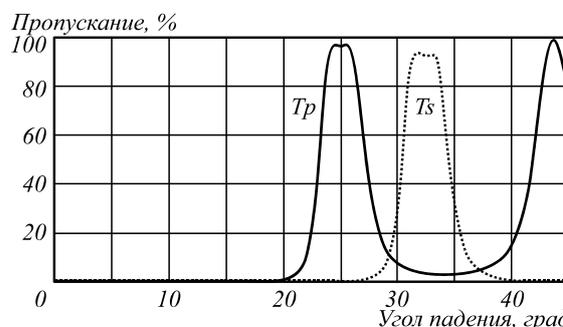


Рис. 5. Угловое пропускание p - и s -поляризованного света на $\lambda = 1530$ нм

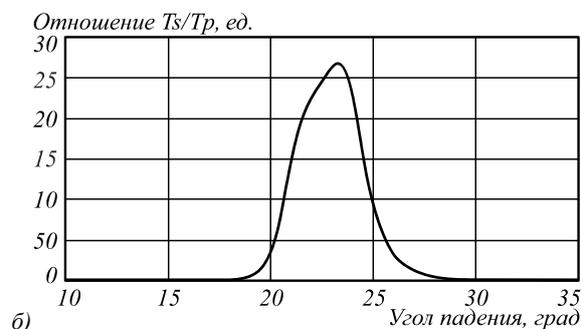
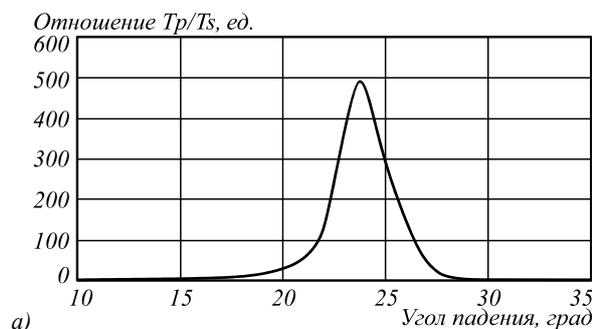


Рис. 6. Отношение углового пропускания поляризованных компонент: отношение T_p/T_s (а), отношение T_s/T_p (б)

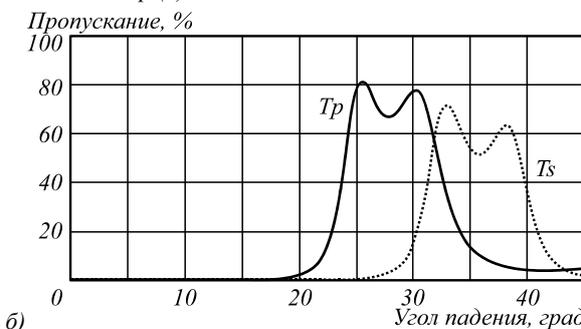
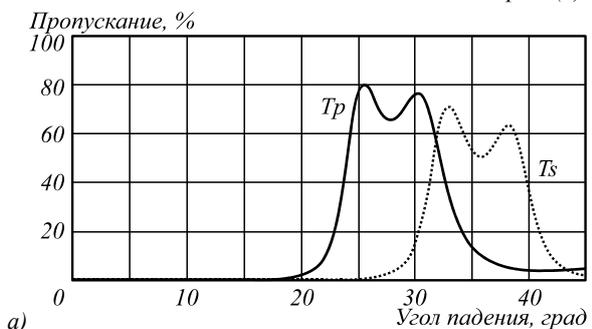


Рис. 7. Угловое пропускание p - и s -поляризованного света на $\lambda = 1530$ нм: образец №1 (а), образец №2 (б)

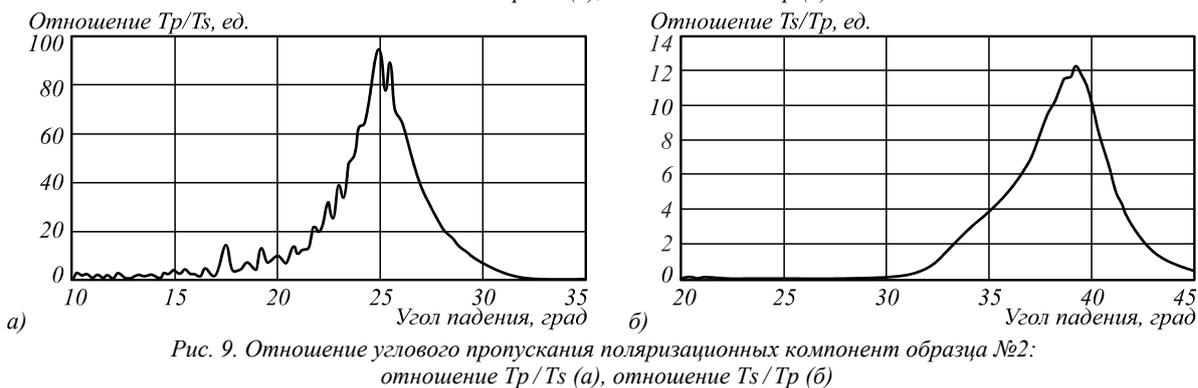
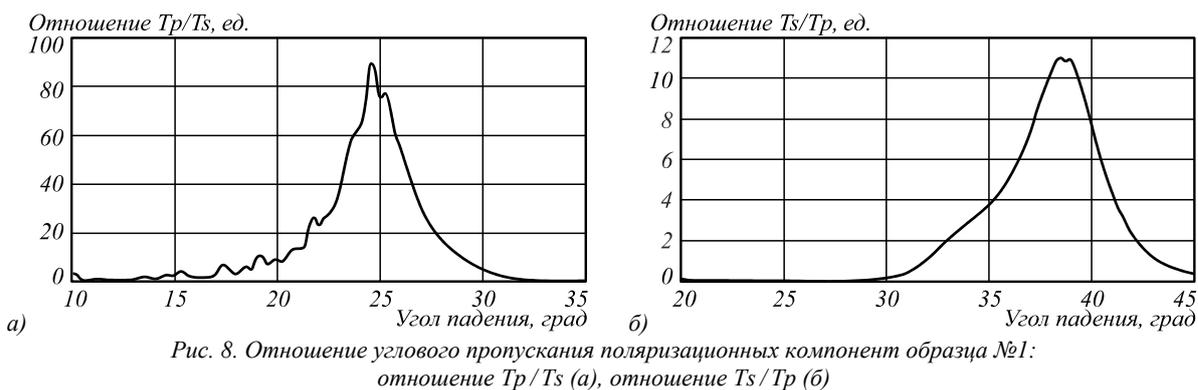


Табл. 3. Распределение интенсивности радиально-поляризованного вихревого пучка Бесселя в ближней (с использованием микрообъектива – первая строка) и дальней зонах при различных положениях поляризатора (с использованием аксикона – вторая строка) (негативные изображения)

Без поляризатора	Направления поляризации			

3. Формирование радиально-поляризованного вихревого пучка Бесселя с длиной волны 1530 нм

Для исследования сформированного радиально-поляризованного вихревого пучка Бесселя нулевого порядка в ближней и дальней зонах была собрана экспериментальная установка, показанная на рис. 10. Установка включала источник излучения – лазерный диод (ЛД), расширитель-коллиматор пучка (РП), четвертьволновую фазовую пластину ($\lambda/4$), дифракционные аксиконы, интерференционный поляризатор (ИП), линзу (Л), анализатор (А) и ПЗС-камеру.

Источником излучения служил лазерный диод с волоконным выводом излучения ЛПМ-1530 СТ с длиной волны 1530 нм и мощностью излучения 2 мВт. Состояние поляризации на выходе волокна со-

хранялось линейным в течение всего времени эксперимента. В качестве расширителя-коллиматора использовался коллиматор излучения с волоконным входом F810FC-1550. Четвертьволновая пластинка обеспечивала разность хода обыкновенного и необыкновенного лучей $4,75\lambda$. С целью ахроматизации [15] дифракционные аксиконы с периодом 3,62 мкм были изготовлены на круговом лазерном записывающем устройстве CLWS-200S в виде амплитудных масок методом термохимического окисления плёнки хрома. Первый по ходу лучей аксикон устанавливался в оправу с линейной регулировкой Thorlabs в одно посадочное место с интерференционным поляризатором. Для исследования распределения интенсивности света, формируемого в ближней зоне от дифракцион-

ного аксикона, прошедшего через интерференционный поляризатор, следом устанавливался микрообъектив и поляризатор в качестве анализирующего устройства. Для исследования распределения интенсивности света, формируемого в дальней зоне от дифракционного аксикона, прошедшего через интерференционный поляризатор, на место микрообъектива устанавливался второй аксикон в оправу Thorlabs с угловой регулировкой (рис. 11). Данное техническое решение пришлось применить из-за весьма высоких требований по точности взаимного положения аксиконов. В устройстве CLWS-200S не предусмотрено прецизионное позиционирование центров выводимых радиально симметричных элементов относительно центра подложки. Поэтому предпочтительная в смысле толщины пакета установка всех трёх элементов – двух аксиконов и интерференционного поляризатора вплотную друг к другу в одно посадочное место не представляется возможной. Можно лишь объединить в одну сборку первый аксикон и интерференционный поляризатор, поскольку они не требуют взаимной юстировки. Легко видеть, что эта сборка из двух элементов как минимум должна обладать регулировкой поперечных перемещений по двум осям, а отдельно стоящий второй аксикон – двумя угловыми степенями свободы. Минимально возможное расстояние между этими двумя компонентами схемы, достижимое для держателей Thorlabs, – около 5 мм. Увеличение диаметра пучка из-за расходимости на таком расстоянии будет около 4,6 мм. Очевидно, что освещающий пучок должен иметь диаметр меньше на эту величину, если мы хотим использовать весь свет от источника. В реальности коллиматор как раз и даёт примерно такой диаметр выходного пучка. Анализ поляризационного состояния выходного пучка проводился поляризатором LPMIR050-MP2 диаметром около 12 мм с поляризационным контрастом не менее 2000:1 в диапазоне 1500–5000 нм. Надо учитывать, что световой диаметр анализатора является наименьшим среди всех элементов, и, соответственно, масштабировать пучок, попадающий на камеру, при помощи линзы Л (рис. 11). Регистрация распределений интенсивности осуществлялась ПЗС-камерой VS320-BCL (КБ «Вита») с рабочим диапазоном 900–1700 нм.

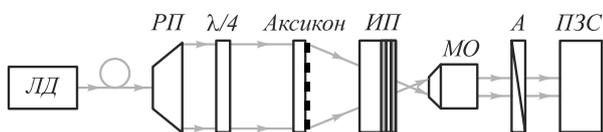


Рис. 10. Схема экспериментальной установки для исследования работы интерференционного поляризатора в ближней зоне

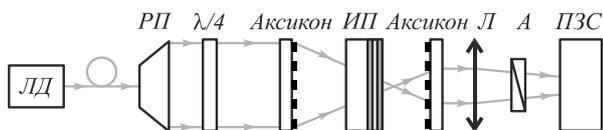


Рис. 11. Схема экспериментальной установки для исследования работы интерференционного поляризатора в дальней зоне

Вначале проводилось исследование поляризационного состояния пучка Бесселя в ближней зоне. Для этого второй аксикон не устанавливался, а в качестве линзы Л использовался микрообъектив 40×, строящий увеличенное изображение пучка на ПЗС-камере. В первой строке табл. 3 показаны соответствующие распределения интенсивности при различных положениях анализатора. Видно, что пучок обладает требуемым поляризационным состоянием. Такие пучки обладают сильной расходимостью, что затрудняет их использование, например, для передачи информации в атмосфере.

Далее для получения коллимированных пучков с квазиплоским волновым фронтом в схему устанавливался второй аксикон. При этом для получения изображений выходных пучков при различных углах ориентации анализатора вместо микрообъектива ставилась линза Л с фокусным расстоянием 70 мм. Соответствующие изображения приведены во второй строке табл. 3. В поле зрения ПЗС-камеры попадает лишь одно кольцо из формируемых аксиконом двух в дальней зоне из-за наличия нерабочего технологического участка в центральных частях аксиконов. Это приводит к увеличению расстояния между кольцами до такой степени, что показать их вместе весьма сложно. Пример изменения масштаба кольца путём перемещения линзы Л показан на рис. 12.

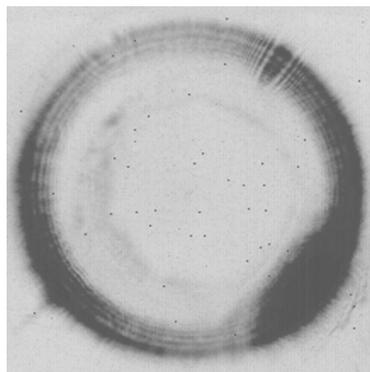


Рис. 12. Распределение интенсивности, промасштабированное путём смещения линзы в экспериментальной установке (негативное изображение)

Изображения второй строки табл. 3 демонстрируют неплохой поляризационный контраст и в целом даже большую равномерность, чем в схожей схеме в работе [5].

Заключение

В работе реализован полностью симметричный формирователь радиально-поляризованного излучения с длиной волны 1530 нм в виде сэндвич-структуры, включающей интерференционный поляризатор и пару аксиконов. Два элемента установлены в одной оправе вплотную друг к другу, а третий – в отдельной оправе с угловой регулировкой.

Проведён расчёт поляризатора для длины волны 1530 нм с рабочим углом 24,5°. Рассчитанный поляризатор состоит из 33 слоёв и при этом имеет поляризационный контраст 62:1. Полуширина угловой зависимости составляет 4,5°, что позволяет обеспечить

достаточную точность построения на фотопостроителе CLWS-200S. Экспериментальное исследование рассчитанного поляризатора подтвердило расчётные характеристики.

Зарегистрированы распределения интенсивности радиально поляризованного вихревого пучка Бесселя в ближней и дальней зоне при различных положениях анализатора, подтверждающие радиальную поляризацию пучка. Полученные результаты могут послужить основой для создания атмосферных систем передачи данных с поляризационным и вихревым уплотнением каналов.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-29-20003) в части «Проектирование многослойных интерференционных структур для ИК-диапазона» и Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение 007-ГЗ/Ч3363/26) в части «Экспериментальное исследование образцов интерференционных поляризаторов».

Литература

1. **Zhan, Q.** Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications / Q. Zhan // *Advances in Optics and Photonics*. – 2009. – Vol. 1. – P. 1-57.
2. **Millione, G.** Using the nonseparability of vector beams to encode information for optical communication / G. Millione, Th.A. Nguyen, J. Leach, D.A. Nolan, R.R. Alfano // *Optics Letters*. – 2015. – Vol. 40, Issue 21. – P. 4887-4890.
3. **Khonina, S.N.** A technique for simultaneous detection of individual vortex states of Laguerre–Gaussian beams transmitted through an aqueous suspension of microparticles / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, V.D. Paraniin // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2018. – Vol. 105. – P. 68-74. – DOI: 10.1016/j.optlaseng.2018.01.006.
4. **Porfirev, A.P.** Study of propagation of vortex beams in aerosol optical medium / A.P. Porfirev, M.S. Kirilenko, S.N. Khonina, R.V. Skidanov, V.A. Soifer // *Applied Optics*. – 2017. – Vol. 56, Issue 11. – P. E8-E15. – DOI: 10.1364/AO.56.0000E8.
5. **Tovar, A.A.** Production and propagation of cylindrically polarized Laguerre–Gaussian laser beams / A.A. Tovar // *Journal of the Optical Society of America A*. – 1998. – Vol. 15, Issue 10. – P. 2705-2711.
6. **Kozawa, Y.** Generation of a radially polarized laser beam by use of a conical Brewster prism / Y. Kozawa, S. Sato // *Optics Letters*. – 2005. – Vol. 30. – P. 3063-3065.
7. **Скиданов, Р.В.** Дифракционные аксиконы для формирования радиально-поляризованного света на основе использования стопы Столетова / Р.В. Скиданов, А.В. Морозов // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 614-618.
8. **Карпеев, С.** Generation of a controlled double-ring-shaped radially polarized spiral laser beam using a combination of a binary axicon with an interference polarizer / S. Karpeev, V. Paraniin, S. Khonina // *Journal of Optics*. – 2017. – Vol. 19, Issue 5. – 055701. – DOI: 10.1088/2040-8986/aa640c.
9. **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.
10. **Man, Zh.** Arbitrary vector beams with selective polarization states patterned by tailored polarizing films / Zh. Man, Ch. Min, Y. Zhang, Z. Shen, X.-C. Yuan // *Laser Physics*. – 2013. – Vol. 23, Issue 10. – 105001. – DOI: 10.1088/1054-660X/23/10/105001.
11. **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. Мойсеев // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 1. – С. 57-64.
12. **Карпеев, С.В.** Формирование радиально-поляризованных пучков Бесселя нулевого порядка методами дифракционной и поляризационной оптики / С.В. Карпеев // *Компьютерная оптика*. – 2016. – Т. 40, № 4. – С. 583-587. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-583-587.
13. **Паранин, В.Д.** Расчёт формирования радиально-поляризованных пучков на основе рефракционных оптических элементов с интерференционными поляризующими покрытиями / В.Д. Паранин, С.В. Карпеев, С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика*. – 2015. – Т. 39, № 4. – С. 492-499. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-492-499.
14. **Карпеев, С.В.** Исследование влияния широкополосного излучения на распределение интенсивности, формируемое дифракционным оптическим элементом / С.В. Карпеев, С.В. Алфёров, С.Н. Хонина, С.И. Кудряшов // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 689-694.

Сведения об авторах

Подлипов Владимир Владимирович, инженер НИЛ-35 и ассистент кафедры технической кибернетики Самарского университета, инженер лаборатории микро- и нанотехнологий Института систем обработки изображений РАН – филиала Федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук. Область научных интересов: математическое моделирование, электронно-лучевая литография и оптимизация технологических процессов травления в микроэлектронике, дифракционной оптике, технологии обработки и контроля поверхности. E-mail: podlipnovvv@ya.ru.

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.

Паранин Вячеслав Дмитриевич, 1986 года рождения, в 2010 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (СГАУ, ныне – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева) по специальности 210201 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств», в 2014 присуждена учёная степень кандидата физико-математических наук, работает доцентом кафедры наноинженерии Самарского университета. Область научных интересов: методы и средства управления лазерным излучением, оптические измерения. E-mail: vparanin@mail.ru.

ГРПТИ: 29.31.15

Поступила в редакцию 29 мая 2019 г. Окончательный вариант – 18 июня 2019 г.

Fully symmetric diffraction-interference beam shaper for radially polarized light on a 1530-nm wavelength

V.V. Podlipnov^{1,2}, S.V. Karpeev^{1,2}, V.D. Pararin¹

¹Samara National Research University, Moskovskoye Shosse 34, 443086, Samara, Russia;

²IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Molodogvardeyskaya 151, 443001, Samara, Russia

Abstract

A completely symmetrical scheme of a shaper of cylindrical vector beams is proposed in which two diffractive axicons and an interference polarizer placed in-between form a sandwich structure of the smallest possible thickness. The design and experimental study of an interference polarizer for generating the radially polarized radiation at a 1530-nm wavelength is carried out. A pair of amplitude diffractive axicons with a period of 3.62 μm to provide the diffraction angle of 24.5° required for generating radial polarization is fabricated. The transformation of a circularly polarized beam into a radially polarized vortex beam is experimentally demonstrated.

Keywords: multilayer optical coating, interference polarizer, diffraction axicon, sandwich structure, radial polarization.

Citation: Podlipnov VV, Karpeev SV, Pararin VD. Fully symmetric diffraction-interference beam shaper for radially polarized light on a 1530-nm wavelength. *Computer Optics* 2019; 43(4): 577-585. DOI: 10.18287/0134-2452-2019-43-4-577-585.

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research under project No. 18-29-20003 (“Designing multilayer interference structures for the infrared range”), the RF Ministry of Science and Higher Education under the government project of the FSRC “Crystallography and Photonics”, RAS (“An experimental study of samples of interference polarizers”).

References

- [1] Zhan Q. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications. *Advances in Optics and Photonics* 2009; 1: 1-57.
- [2] Millione G, Nguyen ThA, Leach J, Nolan DA, Alfano RR. Using the nonseparability of vector beams to encode information for optical communication. *Opt Lett* 2015; 40(21): 4887-4890.
- [3] Khonina SN, Karpeev SV, Pararin VD. A technique for simultaneous detection of individual vortex states of Laguerre–Gaussian beams transmitted through an aqueous suspension of microparticles. *Optics and Lasers in Engineering* 2018; 105: 68-74. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2018.01.006.
- [4] Porfirev AP, Kirilenko MS, Khonina SN, Skidanov RV, Soifer VA. Study of propagation of vortex beams in aerosol optical medium. *Appl Opt* 2017; 56(11): E8-E15. DOI: 10.1364/AO.56.0000E8.
- [5] Tovar AA. Production and propagation of cylindrically polarized Laguerre–Gaussian laser beams. *J Opt Soc Am A* 1998; 15(10): 2705-2711.
- [6] Kozawa Y, Sato S. Generation of a radially polarized laser beam by use of a conical Brewster prism. *Opt Lett* 2005; 30: 3063-3065.
- [7] Skidanov RV, Morozov AA. Diffractive optical elements for forming radially polarized light, based on the use stack of Stoletov. *Computer Optics* 2014; 38(4): 614-618.
- [8] Karpeev S, Pararin V, Khonina S. 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.
- [9] Karpeev SV, Pararin 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.
- [10] Man Zh, Min Ch, Zhang Y, Shen Z, Yuan X-C. Arbitrary vector beams with selective polarization states patterned by tailored polarizing films. *Laser Phys* 2013; 23(10): 105001. DOI: 10.1088/1054-660X/23/10/105001.
- [11] 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.
- [12] Karpeev SV. Generation of radially polarized zero-order Bessel beams by diffractive and polarization optics. *Computer Optics* 2016; 40(4): 583-587. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-583-587.
- [13] Pararin VD, Karpeev SV, Khonina SN. Generation of radially polarized beams based on the refractive optical elements with interference polarizing coatings. *Computer Optics* 2015; 39(4): 492-9. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-492-499.

[14] Karpeev SV, Alferov SV, Khonina SN, Kudryashov SI. Study of the broadband radiation intensity distribution

formed by diffractive optical elements. *Computer Optics* 2014; 38(4): 689-694.

Author's information

Vladimir Vladimirovich Podlipnov, an engineer at Samara National Research University's Lab-35, an engineer of the laboratory of Micro- and Nanotechnology of the Image Processing Systems Institute of the RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences. His research interests: mathematical modeling, electron-beam lithography, optimization of etching procedures in microelectronics, diffractive optics and techniques for surface processing and inspection. E-mail: podlipnovvv@ya.ru.

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.

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

Received May 29, 2019. The final version – June 18, 2019.
