

## РАСЧЁТ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИАЛЬНО-ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПУЧКОВ НА ОСНОВЕ РЕФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМИ ПОЛЯРИЗУЮЩИМИ ПОКРЫТИЯМИ

В.Д. Паранин<sup>1</sup>, С.В. Карпеев<sup>1,2</sup>, С.Н. Хонина<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия,

<sup>2</sup> Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия

### Аннотация

Проведен расчёт и моделирование интерференционного поляризатора для формирования радиально-поляризованного излучения. Метод основан на преобразовании конических волновых фронтов при прохождении через интерференционный поляризатор. Многослойное оптическое покрытие может наноситься и на поверхность аксикона. Показано, что таким путём удаётся как существенно уменьшить рабочий угол падения, так и добиться практически значимых степеней поляризации сформированного пучка при существенно меньших потерях энергии.

**Ключевые слова:** многослойное оптическое покрытие, интерференционный поляризатор, аксикон, радиальная поляризация.

**Цитирование:** Паранин, В.Д. Расчёт формирования радиально-поляризованных пучков на основе рефракционных элементов с интерференционными поляризирующими 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.

### Введение

В последнее время всё большее внимание исследователей привлекают лазерные пучки с поляризационно-неоднородным распределением. Наибольший практический интерес представляют так называемые цилиндрические (с аксиальной симметрией) векторные пучки, которые имеют множество приложений, включая микроскопию, литографию, ускорение электронов, обработку материалов, высокоразрешающую метрологию, микроэллипсометрию и спектроскопию [1]. На данный момент существует множество методов формирования таких пучков, различающихся как по параметрам сформированных пучков, так и по свойствам формирующих систем. В каждом приложении [1] существуют свои приоритеты по требованиям к пучкам и устройствам. Где-то, например, в обработке материалов, на первое место выходит эффективность формирования, а где-то (например, в метрологических приложениях) требуется высокое качество пучков и стабильность свойств формирующих систем. Основной задачей, таким образом, является достижение компромисса между противоречивыми требованиями при разработке новых методов для каждого из приложений.

Большая группа методов основана на когерентной суперпозиции пары обычных мод [2–5], например, с помощью интерферометра [2–4]. Таким способом можно формировать любые типы векторных пучков, и, в принципе, такой метод применим для любой длины волны. Основным недостатком таких методов, как и вообще интерферометров типа Маха–Цендера со светоделительными элементами, является низкая виброзащищённость и, вследствие этого, низкая стабильность. Несколько отличается от указанных метод [5], где разделение пучков осуществляется путём пространственного разнесения элементов, формиру-

ющих требуемые моды. Метод имеет несколько большую стабильность, чем интерферометр Маха–Цендера, однако проигрывает в энергетической эффективности, которая у интерферометрических методов и так, как правило, не больше 50 %. Основное достоинство интерферометрических методов – это весьма высокое качество формирования пучков как по шумовым характеристикам, так и по поляризационному контрасту, который достигает 1000:1.

Следующими по распространённости следует признать методы, основанные на применении кристаллических секторных пластинок [6–9]. Методы характеризуются высокой энергетической эффективностью (теоретически 100 %) и стабильностью, однако качество формируемых пучков сильно зависит от качества изготовления пластинок, которые, по сути, всегда дискретны, и в большинстве случаев такие пучки требуют дополнительной фильтрации, что снижает эффективность формирования. Сами пластинки высокого качества достаточно сложны в производстве и дороги. Разновидность этого метода [10–13] основана на применении субволновых дифракционных решёток. Недостатки, свойственные кристаллическим секторным пластинкам, присущи этому методу ещё в большей степени. Изготавливать субволновые дифракционные решётки приемлемого качества особенно сложно.

Отдельную группу методов составляют методы на основе применения анизотропных материалов [14–16]. Такие методы имеют также достаточно высокую эффективность, однако она делится между одновременно получаемыми пучками с радиальной и азимутальной поляризациями, разделение которых порождает те же проблемы фильтрации, как и в случае секторных пластинок. Стабильность этого метода нареканий не вызывает, также как и качество пучков. Следует лишь отметить, что, как и для многих интерференционных методов, здесь требуется генерация специ-

ческих исходных пучков с вихревой фазой, что составляет отдельную проблему. Такие пучки наиболее просто получить при помощи дифракционных оптических элементов (ДОО), однако это неизбежно приводит к потерям энергии.

В свете вышесказанного перспективным представляется решение, основанное на поляризационных преобразованиях, происходящих при падении наклонных пучков на поверхность диэлектрика [17, 18]. Как внутрирезонаторная [17], так и внерезонаторная [18] модификации этого метода основаны на падении света на границу раздела под углом Брюстера. Совершенно очевидным достоинством метода является простота. Стабильность устройства также не вызывает сомнений при сравнении с другими методами энергетической эффективности. Аксикон, являющийся обязательным элементом такого устройства, конечно, представляет некоторые сложности в изготовлении, однако, основываясь на последних достижениях в области прецизионной штамповки стекла, эта проблема может быть решена. 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. Именно по этой причине в работе [18] не удалось сфокусировать полученный пучок, а проверка получения радиальной поляризации осуществлялась по изображению на матовом экране. Кроме того, в стопе Столетова качество пучка и его поляризационный контраст напрямую связаны с количеством пластинок в стопе, а каждая новая пластинка вносит свои потери энергии.

Кардинальным решением сразу обеих указанных проблем является применение многослойных интерференционных поляризующих покрытий либо самой поверхности аксикона, либо отдельной пластинки, выполняющей в данном случае роль стопы Столетова. В дальнейшем будет показано, что таким путём удаётся как существенно уменьшить рабочий угол падения, так добиться практически значимых степеней поляризации сформированного пучка при существенно меньших потерях энергии.

Таким образом, целью работы является теоретическое изучение формирования радиально-поляризованного излучения составным рефракционно-интерференционным элементом.

### 1. Теоретические основы и расчёт многослойной структуры

Предлагаемый подход направлен на повышение энергетической эффективности и оптического качества формирования радиально-поляризованных пучков и основан на использовании интерференционного поляризатора. Последний 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  $\lambda_0$  будет наблюдаться

максимальное пропускание для  $p$ -поляризации и минимальное для  $s$ -поляризации. Для создания угла падения, одинакового по всему сечению пучка, необходимо использовать рефракционный аксикон – оптический элемент с конической преломляющей поверхностью. Указанный подход позволяет сформировать радиальную поляризацию выходного пучка с высокой эффективностью. При этом многослойное оптическое покрытие может наноситься и на поверхность аксикона, снижая массу и упрощая юстировку оптического элемента. Варианты исполнения составного рефракционно-интерференционного элемента, формирующего радиально-поляризованное излучение, показаны на рис. 1.

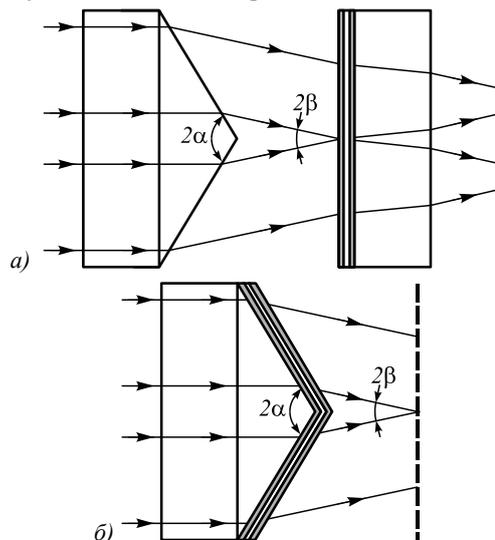


Рис. 1. Варианты изготовления рефракционно-интерференционного элемента

Рефракционный аксикон также оказывает влияние на поляризацию прошедшего излучения, поскольку падение излучения на коническую поверхность отличается от нормального. Для моделирования поляризационной избирательности аксикона использовались формулы Френеля [19].

Рефракционный аксикон с достаточно малым углом при вершине ( $70-85^\circ$ ) оказывает влияние на поляризацию пучка. Зависимость пропускания от угла падения для стеклянного аксикона с показателем преломления показана на рис. 2. Предполагалось, что аксикон изготовлен из стекла ВК7 с  $n_m \approx 1,52$  в окрестности  $\lambda_0 = 632,8$  нм.

С увеличением угла падения происходит заметное снижение пропускания  $s$ -поляризованного излучения по сравнению с  $p$ -поляризованным. Для углов более  $41,1^\circ$  характерно полное внутреннее отражение излучения с любой поляризацией. Из расчётов следует, что для достижения высокой эффективности пропускания  $p$ -поляризации ( $P \geq 80\%$ ) угол падения ( $90-\alpha$ ) должен быть не более  $40^\circ$ , а половинный угол при вершине аксикона  $\alpha \geq 50^\circ$ .

Для расчёта интерференционного поляризатора необходимо вычислить угол падения  $\beta$ , обеспечиваемый аксиконом. Используем для этого формулу, полученную в приближении геометрической оптики:

$\beta = \alpha + \arcsin(n_m \cos(\alpha)) - 90^\circ$ , где  $\alpha$  – половинный угол при вершине аксикона, град.;  $n_m$  – показатель преломления аксикона. Зависимость угла падения на интерференционный поляризатор  $\beta$  от половинного угла при вершине аксикона  $\alpha \geq 50^\circ$  при  $n_m \approx 1,52$  приведена на рис. 3.

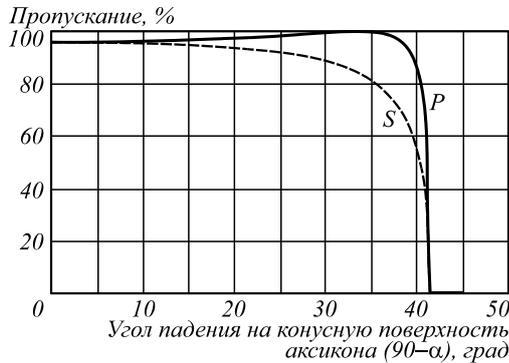


Рис. 2. Зависимость интенсивности пропускания конической поверхности аксикона от угла падения (90-α)

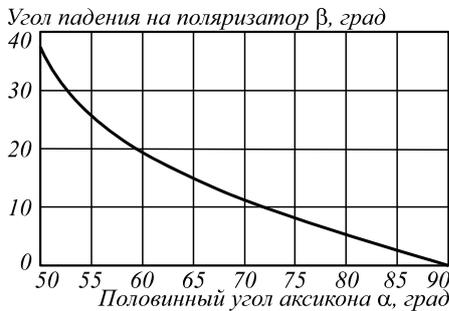


Рис. 3. Зависимость угла падения β на интерференционный поляризатор от половинного угла при вершине аксикона α

Угол  $\alpha$  для рефракционного аксикона будет ограничен снизу углом полного внутреннего отражения для стекла BK7  $\alpha \geq 48,9^\circ$ . Сверху величина  $\alpha$  ограничена минимальным углом падения на интерференционный поляризатор, при котором обеспечивается необходимая ширина спектра  $\Delta\lambda$  и коэффициент поляризации  $K_p(\lambda) = P(\lambda)/S(\lambda)$ . Кроме того, существует требование минимального угла падения для удобства коллимации сформированного пучка в последующих каскадах оптической схемы.

Исследуем зависимость коэффициента поляризации  $K_p(\lambda)$  от углов падения и количества слоёв оптического покрытия. Моделируемый интерференционный поляризатор был образован нанесёнными на стеклянную подложку BK7 с  $n_m \approx 1,52$  чередующимися четвертьволновыми слоями SiO<sub>2</sub> и Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> с показателями преломления  $n_1 = 1,457$  и  $n_2 = 2,183$  при  $\lambda_0 = 632,8$  нм. Для расчёта спектрального пропускания по интенсивности для  $p$ - и  $s$ -поляризованного излучения  $P(\lambda)$  и  $S(\lambda)$  интерференционным поляризатором применялся матричный метод [20]:

$$S(\lambda) = 1 - \frac{|r_s|^2}{|r_s|^2 + \frac{n_m}{n_0} \cdot |t_s|^2}, \quad P(\lambda) = 1 - S(\lambda), \quad (1)$$

где  $r_s, t_s$  – амплитудные коэффициенты отражения и пропускания  $s$ -поляризованного излучения, равные:

$$r_s = \frac{n_0 m_{11s} + i n_0 n_m m_{12s} - i m_{21s} - n_m m_{22s}}{n_0 m_{11s} + i n_0 n_m m_{12s} + i m_{21s} + n_m m_{22s}},$$

$$t_s = \frac{2n_0}{n_0 m_{11s} + i n_0 n_m m_{12s} + i m_{21s} + n_m m_{22s}}, \quad (2)$$

где  $n_m, n_0$  – показатель преломления подложки и окружающей среды;  $m_{i,j_s}$  – элементы характеристической матрицы  $M_s$  многослойного оптического покрытия для  $s$ -поляризованного излучения:

$$M_s = \begin{pmatrix} m_{11s} & i m_{12s} \\ i m_{21s} & m_{22s} \end{pmatrix} = M_{2s} M_{1s} M_{2s} \dots M_{2s} M_{1s} M_{2s}. \quad (3)$$

В выражении (3) матрицы  $M_{1s}, M_{2s}$  определяют свойства одиночных оптических слоёв интерференционного поляризатора для  $s$ -поляризованного излучения. Рассматриваемый поляризатор образован чередующимися слоями двух типов: с высоким и низким показателями преломления. Поэтому спектральное пропускание будет описываться произведением матриц  $M_{1s}, M_{2s}$ :

$$M_{1s} = \begin{pmatrix} \cos(\phi_{1s}) & \frac{i}{n_{1s}} \sin(\phi_{1s}) \\ i n_{1s} \sin(\phi_{1s}) & \cos(\phi_{1s}) \end{pmatrix},$$

$$M_{2s} = \begin{pmatrix} \cos(\phi_{2s}) & \frac{i}{n_{2s}} \sin(\phi_{2s}) \\ i n_{2s} \sin(\phi_{2s}) & \cos(\phi_{2s}) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где  $\phi_{1s}, \phi_{2s}$  – фазовые толщины слоёв с низким и высоким показателем преломления для  $s$ -поляризованного излучения:

$$\phi_{1s} = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 h_1 \cos(\alpha_1),$$

$$\phi_{2s} = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 h_2 \cos(\alpha_2), \quad (5)$$

где  $h_1, h_2$  – физические толщины слоёв, м;  $\alpha_1, \alpha_2$  – углы преломления в слоях, град;  $n_1, n_2$  – показатели преломления слоёв, которые для наклонного падения  $s$ -поляризованного излучения имеют вид:

$$n_{1s} = n_1 \cos(\alpha_1), \quad n_{2s} = n_2 \cos(\alpha_2),$$

$$\alpha_1 = \arccos \left( \sqrt{1 - \frac{n_0^2}{n_1^2} \sin^2(\alpha_0)} \right),$$

$$\alpha_2 = \arccos \left( \sqrt{1 - \frac{n_0^2}{n_2^2} \sin^2(\alpha_0)} \right). \quad (6)$$

Расчёт спектров пропускания  $P(\lambda)$  и  $S(\lambda)$  для  $p$ - и  $s$ -поляризованного излучения проводился в диапазоне 610–650 нм с шагом 0,1 нм. Отличие угла падения от нормального приводит к небольшому отличию оптических толщин слоёв по сравнению с  $\lambda/4$ . Толщины слоёв для заданного угла падения подбирались вручную и для 20° составили: 23 слоя – 0,8762·(λ/4), 25 слоёв – 0,8777·(λ/4), 27 слоёв – 0,8793·(λ/4). Для угла падения 30°: 23 слоя – 0,902·(λ/4), 25 слоёв – 0,904·(λ/4), 27 слоёв – 0,906·(λ/4).

На рис. 4 приведён коэффициент поляризации  $K_p(\lambda) = P(\lambda)/S(\lambda)$  для многослойного оптического покрытия, спроектированного для углов падения  $\beta = 20^\circ$  и  $\beta = 30^\circ$  (половинные углы аксионов  $\alpha = 59,5^\circ$  и  $\alpha = 52,6^\circ$  соответственно). На рис. 5 также приведена угловая зависимость коэффициента поляризации.

Таким образом, покрытие из 23–27 слоёв позволяет получить коэффициент поляризации  $K_p(\lambda)$  от единиц до нескольких десятков при отклонении угла падения в 1–2° от номинального. Если необходимо повысить значение  $K_p(\lambda)$ , то можно увеличить число

слоёв до 39, что при углах падения  $\beta = 20\text{--}30^\circ$  обеспечит теоретический  $K_p(\lambda) = 130:1\text{--}3500:1$ .

Вторым вариантом оптического элемента, обеспечивающего радиальную поляризацию, является аксикон с интерференционным поляризатором, нанесённым непосредственно на коническую поверхность. На рис. 6 показаны результаты моделирования спектральной зависимости коэффициента поляризации для аксионов, обеспечивающих углы падения  $\beta = 20^\circ$  и  $\beta = 30^\circ$  (половинные углы аксионов  $\alpha = 59,5^\circ$  и  $\alpha = 52,6^\circ$ ), по аналогии с данным рис. 4.

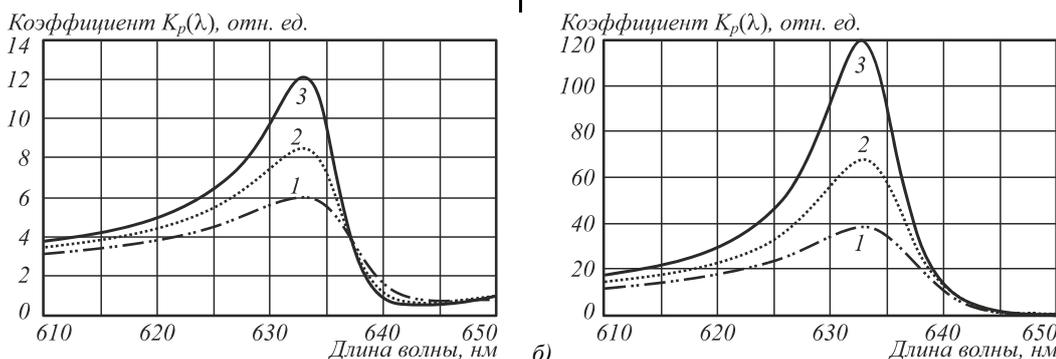


Рис. 4. Спектральная зависимость коэффициента поляризации для поляризующего покрытия  $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$  на отдельной подложке: а) угол падения  $\beta = 20^\circ$ , б) угол падения  $\beta = 30^\circ$ ; 1 – 23 слоя, 2 – 25 слоёв, 3 – 27 слоёв

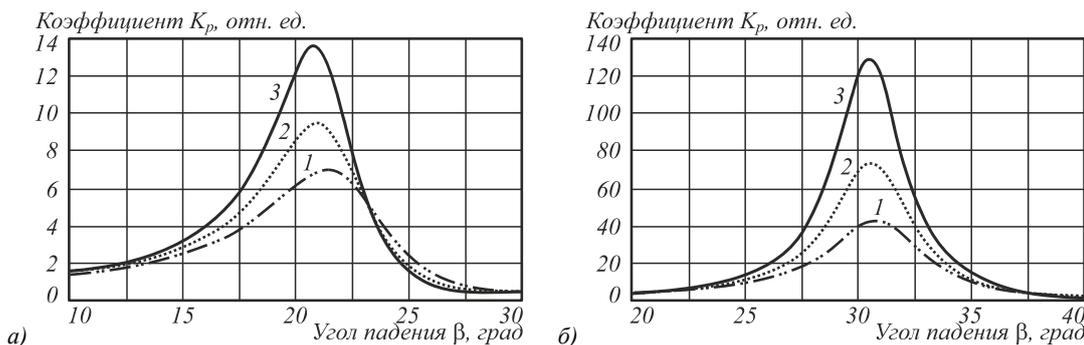


Рис. 5. Угловая зависимость коэффициента поляризации для поляризующего покрытия  $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$  на отдельной подложке для  $\lambda_0 = 632,8$  нм: 1 – 23 слоя, 2 – 25 слоёв, 3 – 27 слоёв

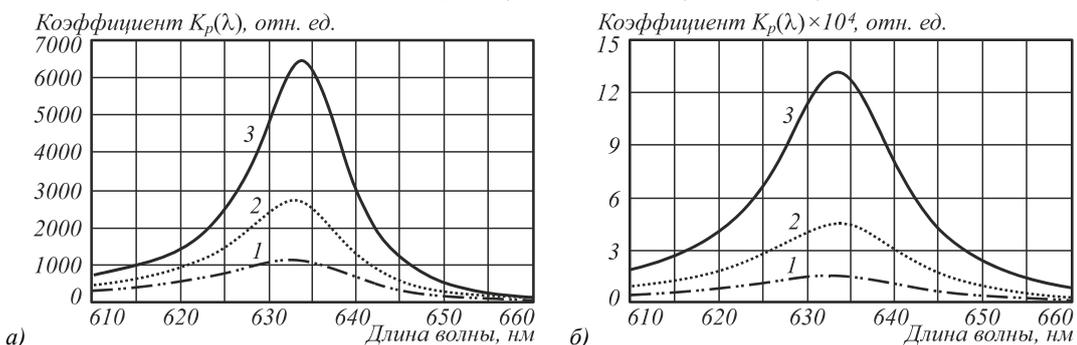


Рис. 6. Спектральная зависимость коэффициента поляризации для поляризующего покрытия  $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$  на конической поверхности: а) половинный угол  $\alpha = 59,5^\circ$  (угол падения  $\beta = 20^\circ$ ), б) половинный угол  $\alpha = 52,6^\circ$  (угол падения  $\beta = 30^\circ$ ); 1 – 23 слоя, 2 – 25 слоёв, 3 – 27 слоёв

Толщины слоёв для заданного угла аксикона подбирались вручную и для  $\alpha = 59,5^\circ$  составили: 23 слоя –  $0,9845 \cdot (\lambda/4)$ , 25 слоёв –  $0,9874 \cdot (\lambda/4)$ , 27 слоёв –  $0,9913 \cdot (\lambda/4)$ . Для угла падения  $\alpha = 52,6^\circ$ : 23 слоя –  $1,064 \cdot (\lambda/4)$ , 25 слоёв –  $1,069 \cdot (\lambda/4)$ , 27 слоёв –  $1,072 \cdot (\lambda/4)$ .

Достоинства последнего варианта исполнения заключаются в меньших числовых апертурах лазерного пучка, что повышает удобство его использования. Кроме того, достигается значительно более высокая поляризация излучения.

Для всех рассмотренных случаев характерно высокое пропускание рабочей *p*-поляризации многослойным оптическим покрытием, близкое к 100%. На рис. 7 показано спектральное пропускание *p*- и *s*-поляризованного излучения для интерференционного поляризатора, нанесённого на отдельную подложку (рис. 7а) и коническую поверхность аксикона (рис. 7б). Моделируемое покрытие SiO<sub>2</sub>/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> содержало 26 четвертьволновых слоёв.

Из результатов моделирования следует, что напыление многослойного покрытия на коническую поверхность аксикона существенно, в сотни раз увеличивает коэффициент поляризации. Это позволяет уменьшить количество слоёв многослойного оптического покрытия или снизить требования к точности изготовления. Кроме того, увеличивается ширина спектра пропускания по заданному уровню поляризации по сравнению с отдельным интерференционным поляризатором.

**2. Численное моделирование поляризационного преобразования для пучков Бесселя**

Известно, что аксиконы [21, 22] используются для формирования бездифракционных пучков Бесселя. Поэтому для моделирования поляризационного преобразования излучения, предложенного выше, рас-

смотрим прохождение ограниченных пучков Бесселя нулевого порядка через периодическую слоистую структуру с различным количеством слоёв.

В работе [23] был разработан универсальный алгоритм, позволяющий моделировать прохождение произвольных лазерных пучков через слоистую структуру. Параметры моделирования выбраны следующие: радиус падающего пучка Бесселя – 10 мкм, поляризация линейная и круговая, числовая апертура – 0,5; поляризационная структура из 10 и 30 слоёв SiO<sub>2</sub>/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> с набегом фазы примерно λ/4 каждый.

В табл. 1 показано распределение интенсивности компонент после прохождения пучка Бесселя через слоистую структуру с различным количеством периодом в зависимости от поляризации и порядка пучка Бесселя.

Из приведённых результатов видно, что степень поляризационного преобразования существенно зависит не только от числа периодов, но и типа поляризации входного пучка, а также его фазовой структуры. Очевидно, поляризация с цилиндрической симметрией формируется из циркулярно-поляризованного пучка. При этом, однако, наличие фазовой вихревой сингулярности позволяет получить более выраженное поляризационное преобразование даже для небольшого количества слоёв.

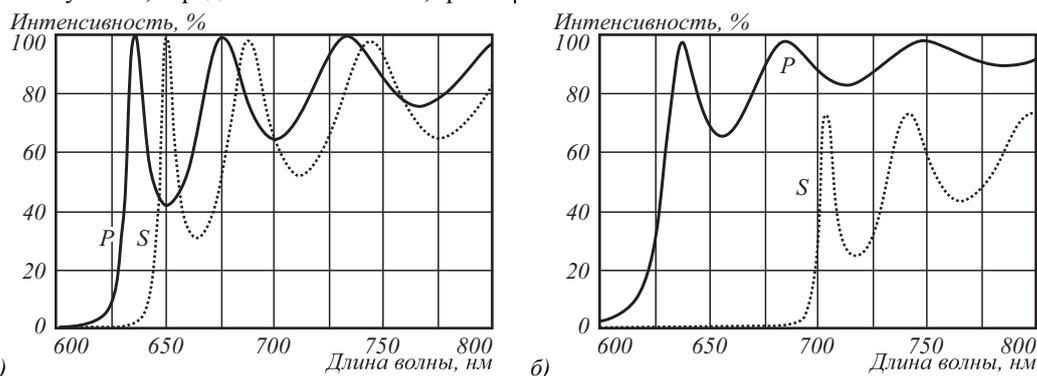


Рис. 7. Спектральная зависимость пропускания для поляризующего покрытия SiO<sub>2</sub>/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> при угле падения β = 30° и 25 слоях: а) вариант с поляризатором на отдельной подложке, б) вариант с поляризатором на конической поверхности

Табл. 1. Распределение интенсивности компонент после прохождения пучка Бесселя через слоистую структуру (E<sub>x</sub> – красный цвет, E<sub>y</sub> – зелёный цвет, E<sub>z</sub> – синий цвет)

Входное поле	Линейно-поляризованный пучок нулевого порядка	Циркулярно-поляризованный пучок нулевого порядка	Циркулярно-поляризованный пучок первого порядка
10 периодов			
30 периодов			

### Заклучение

В работе выполнен теоретический анализ нового метода формирования радиально-поляризованного излучения. Метод основан на использовании интерференционного поляризатора и аксикона – оптического элемента с конической преломляющей поверхностью, формирующего сходящийся пучок.

Установлено, что указанный подход имеет высокую энергетическую эффективность, поскольку пропускание необходимой *p*-поляризации многослойным оптическим покрытием близко к 100%. При этом р-фракционный аксикон также характеризуется высоким пропусканием радиально-поляризованного излучения: не менее 80% до углов падения на коническую поверхность 35–40°.

На основе матричного метода выполнен анализ спектрального пропускания *p*- и *s*-поляризованного излучения четвертьволновым поляризатором, образованным чередующимися слоями SiO<sub>2</sub>/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Показано, что для угла падения 30° при числе слоёв 23–27 достигается коэффициент поляризации 40:1–120:1, а для угла падения 20° – 6:1–12:1. Для повышения коэффициента поляризации рассмотрено два подхода. Первый основан на увеличении числа слоёв, например, до 39, что при углах падения 20–30° обеспечит расчётный коэффициент поляризации 130:1–3500:1. Второй подход заключается в напылении оптических покрытий непосредственно на коническую поверхность аксикона. В результате достигается существенно больший коэффициент поляризации ~10<sup>3</sup>–10<sup>5</sup> при тех же углах падения. Это позволяет уменьшить углы падения излучения (т.е. числовую апертуру выходного пучка) с 20–30° до 10–15°. Тем самым снижаются требования к углам зрения и качеству преломляющих элементов оптической схемы, повышается удобство работы с радиально-поляризованным пучком.

В процессе напыления вакуумной установкой контролируется и физическая, и оптическая толщина каждого слоя. При появлении погрешности толщина следующего напыляемого слоя автоматически корректируется для обеспечения требуемой спектральной характеристики многослойного покрытия. Это позволяет формировать интерференционные покрытия из десятков слоёв, обеспечивающие спектральные характеристики, весьма близкие к заданным.

Результаты численного моделирования с пучками Бесселя показали, что степень поляризационного преобразования существенно зависит не только от числа периодов слоистой структуры, но и типа поляризации входного пучка, а также его фазовой структуры.

### Благодарности

Результаты, связанные с расчетом многослойных интерференционных фильтров получены в рамках выполнения работ по гранту 14-31-00014 Российского научного фонда. Результаты, связанные с формированием цилиндрических векторных пучков получены в

рамках выполнения работ по программе Министерства образования и науки Российской Федерации.

### 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. **Tidwell, S.C.** Generating radially polarized beams interferometrically / S.C. Tidwell, D.H. Ford, W.D. Kimura // *Applied Optics*. – 1990. – Vol. 29. – P. 2234-2239.
3. **Khonina, S.N.** Generating inhomogeneously polarized higher-order laser beams by use of DOEs beams / S.N. Khonina, S.V. Karpeev // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2011. – Vol. 28(10). – P. 2115-2123.
4. **Khonina, S.N.** Polarization converter for higher-order laser beams using a single binary diffractive optical element as beam splitter / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, S.V. Alferov // *Optics Letters*. – 2012. – Vol. 37(12). – P. 2385-2387.
5. **Khonina, S.N.** Grating-based optical scheme for the universal generation of inhomogeneously polarized laser beams / S.N. Khonina, S.V. Karpeev // *Applied Optics*. – 2010. – Vol. 49(10). – P. 1734-1738.
6. **Machavariani, G.** Efficient extracavity generation of radially and azimuthally polarized beam / G. Machavariani, Y. Lumer, I. Moshe, A. Meir, S. Jackel // *Optics Letters*. – 2007. – Vol. 32, Issue 11. – P. 1468-1470.
7. **Kawauchi, H.** Simultaneous generation of helical beams with linear and radial polarization by use of a segmented half-wave plate / H. Kawauchi, Y. Kozawa, S. Sato, T. Sato, S. Kawakami // *Optics Letters*. – 2008. – Vol. 33, Issue 4. – P. 399-401.
8. **Lai, W.J.** Generation of radially polarized beam with a segmented spiral varying retarder / W.J. Lai, B.C. Lim, P.B. Phua, K.S. Tiaw, H.H. Teo, and M.H. Hong // *Optics Express*. – 2008. – Vol. 16, Issue 20. – P. 15694-15699.
9. **Алфёров, С.В.** Экспериментальное исследование фокусировки неоднородно поляризованных пучков, сформированных при помощи секторных пластинок / С.В. Алфёров, С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, О.Ю. Моисеев // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 1. – С. 57-64.
10. **Bomzon, Z.** Pancharatnam–Berry phase in space-variant polarization-state manipulations with subwavelength gratings / Z. Bomzon, V. Kleiner, E. Hasman // *Optics Letters*. – 2001. – Vol. 26, Issue 18. – P. 1424-1426.
11. **Lerman, G.M.** Generation of a radially polarized light beam using space-variant subwavelength gratings at 1064 nm / G.M. Lerman, U. Levy // *Optics Letters*. – 2008. – Vol. 33(23). – P. 2782-2784. – ISSN 0146-9592.
12. **Chadyani, Z.** Discontinuous space variant sub-wavelength structures for generating radially polarized light in visible region / Z. Chadyani, S. Dmitriev, N. Lindlein, G. Leuchs, O. Rusina, I. Harder // *Journal of the European Optical Society – Rapid Publications*, 2011. – Vol. 6. – P. 11041-11047.
13. **Налимов, А.Г.** Отражающий четырёхзонный субволновый элемент микрооптики для преобразования линейной поляризации в радиальную / А.Г. Налимов, Л. О'Фалеин, С.С. Стафеев, М.И. Шанина, В.В. Котляр // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 2. – С. 229-236.
14. **Machavariani, G.** Birefringence-induced bifocusing for selection of radially or azimuthally polarized laser modes / G. Machavariani, Y. Lumer, I. Moshe, A. Meir, S. Jackel, N. Davidson // *Applied Optics*. – 2007. – Vol. 46. – P. 3304-3310.

15. **Yonezawa, K.** Compact laser with radial polarization using birefringent laser medium / K. Yonezawa, Y. Kozawa, S. Sato // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2007. – Vol. 46. – P. 5160-5163/
16. **Khonina, S.N.** Generation of cylindrical vector beams of high orders using uniaxial crystals / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, S.V. Alferov and V.A. Soifer // *Journal of Optics*. – 2015. – Vol. 17. – P. 065001 (11p).
17. **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. – ISSN 0146-9592.
18. **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.
19. **Ахманов, С.А.** Физическая оптика. / С.А. Ахманов, С.Ю. Никитин. – 2-е изд. – М.: Наука, 2004. – 656 с.
20. **Путилин, Э.С.** Оптические покрытия: учеб. пособие / Э.С. Путилин. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – 227 с.
21. **McLeod, J.H.** The axicon: a new type of optical element / J.H. McLeod // *Journal of the Optical Society of America*. – 1954. – Vol. 44. – P. 592-597.
22. **Jaroszewicz, Z.** Axicon – the most important optical element / Z. Jaroszewicz, A. Burvall, A.T. Friberg // *Optics & Photonics News*. – 2005, April. – Vol. 16, Issue 4. – P. 34.
23. **Kazanskiy, N.L.** Simulation of spectral filters used in hyperspectrometer by decomposition on vector Bessel modes / N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, S.N. Khonina, S.G. Volotovskiy // *Proceedings of SPIE*. – 2015. – Vol. 9533. – P. 95330L (7 pp).
- radial polarization by use of a segmented half-wave plate. *Optics Letters* 2008; 33(4): 399-401.
- [8] Lai WJ, Lim BC, Phua PB, Tiaw KS, Teo HH, Hong MH. Generation of radially polarized beam with a segmented spiral varying retarder. *Optics Express* 2008; 16(20): 15694-9.
- [9] Alferov SV, Karpeev SV, Khonina SN, Moiseev OYu. Experimental study of focusing of inhomogeneously polarized beams generated using sector polarizing plates [in Russian]. *Computer Optics* 2014; 38(1): 57-64.
- [10] Bomzon Z, Kleiner V, Hasman E. Pancharatnam–Berry phase in space-variant polarization-state manipulations with subwavelength gratings. *Optics Letters* 2001; 26(18): 1424-6.
- [11] Lerman GM, Levy U. Generation of a radially polarized light beam using space-variant subwavelength gratings at 1064 nm. *Optics Letters* 2008; 33(23): 2782-4.
- [12] Chadyani Z, Dmitriev S, Lindlein N, Leuchs G, Rusina O, Harder I. Discontinuous space variant sub-wavelength structures for generating radially polarized light in visible region. *Journal of the European Optical Society – Rapid Publications* 2011; 6: 11041-7.
- [13] Nalimov AG, O'Faolain L, Stafeev SS, Shanina MI, Koltlyar VV. Reflected four-zones subwavelength microoptics element for polarization conversion from linear to radial [in Russian]. *Computer Optics* 2014; 38(2): 229-36.
- [14] Machavariani G, Lumer Y, Moshe I, Meir A, Jackel S, Davidson N. Birefringence-induced bifocusing for selection of radially or azimuthally polarized laser modes. *Applied Optics* 2007; 46: 3304-10.
- [15] Yonezawa K, Kozawa Y, Sato S. Compact laser with radial polarization using birefringent laser medium. *Japanese Journal of Applied Physics* 2007; 46: 5160-3.
- [16] Khonina SN, Karpeev SV, Alferov SV, Soifer VA. Generation of cylindrical vector beams of high orders using uniaxial crystals. *Journal of Optics* 2015; 17: 065001 (11pp).
- [17] Kozawa Y, Sato S. Generation of a radially polarized laser beam by use of a conical Brewster prism. *Optics Letters* 2005; 30: 3063-5.
- [18] R.V. Skidanov, A.A. Morozov Diffraction optical elements for forming radially polarized light, based on the use stack of stoletov. *Computer Optics* 2014; 38(4): 614-8.
- [19] Akhmanov SA, Nikitin SYu. *Physical optics*. Oxford: Clarendon Press. 1997.
- [20] Putilin ES. *Optical Coating*. Textbook [in Russian]. Saint-Petersburg: St. Petersburg ITMO, 2010.
- [21] McLeod JH. The Axicon: A New Type of Optical Element. *J Opt Soc Am* 1954; 44: 592-7.
- [22] Jaroszewicz Z, Burvall A, Friberg AT. Axicon – the Most Important Optical Element. *Optics & Photonics News* 2005; 16(4): 34.
- [23] Kazanskiy NL, Kharitonov SI, Khonina SN, Volotovskiy SG. Simulation of spectral filters used in hyperspectrometer by decomposition on vector Bessel modes. *Proceedings of SPIE* 2015; 9533: 95330L (7 pp).

### References

## GENERATION OF RADIALLY POLARIZED BEAMS

### BASED ON THE REFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS WITH INTERFERENCE POLARIZING COATINGS

V.D. Parani<sup>1</sup>, S.V. Karpeev<sup>1,2</sup>, S.N. Khonina<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University,

<sup>2</sup>Image Processing Systems Institute, Russian Academy of Sciences

### Abstract

The calculation and simulation of an interference polarizer to generate radially polarized light are conducted. The method is based on the conversion of a conical wavefront as it passes through the interference polarizer. A multilayer optical coating can be applied on the surface of the axicon. It is shown that in this way we noticeably reduce both the operating angle of incidence and achieve a practically significant polarization degree of the generated beam at much lower energy losses.

**Keywords:** multilayer optical coatings, interference polarizer, axicon, radial polarization.

**Citation:** Parani V.D., Karpeev S.V., Khonina S.N. Generation of radially polarized beams based on the refractive elements with interference polarizing coatings. *Computer Optics* 2015; 39(4): 492-9. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-492-499.

**Acknowledgement:** Results related to the calculation of multilayer interference filters are realized as a part of the work under the grant 14-31-00014 of the Russian Science Foundation. The results related to the formation of cylindrical vector beams obtained in the performance of work financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

---

### Сведения об авторах

**Паранин Вячеслав Дмитриевич**, 1986 года рождения, в 2010 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королёва (СГАУ) по специальности 210201 «Проектирование и технология электронных средств», работает ассистентом кафедры наноинженерии СГАУ. Область научных интересов: методы и средства управления лазерным излучением.

E-mail: [vparanin@mail.ru](mailto:vparanin@mail.ru).

**Vyacheslav Dmitrievich Parani** (b. 1986) graduated from Samara State Aerospace University (SSAU) in 2010, majoring in Design and Technology of Radio-electronic Equipment. Currently he works as the professor assistant at Nanoengineering department of SSAU. Research interests are methods and devices for controlling of laser radiation.

**Карпеев Сергей Владимирович**, доктор физико-математических наук, профессор Самарского государственного аэрокосмического 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](mailto:karp@smr.ru).

**Sergei Vladimirovich Karpeev**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov. 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.

*Сведения об авторе Хонина Светлана Николаевна – см. стр. 479 этого номера.*

---

*Поступила в редакцию 8 сентября 2015 г.  
Окончательный вариант – 25 сентября 2015 г.*