

ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 535.55: 548.0: 535

ОТРАЖЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ПУЧКА ЛУЧЕЙ СВЕТА НА ПОВЕРХНОСТЯХ ЛИНЗ ИЗ ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННОГО ЛЕЙКОСАФИРА

© 2007 г. В. Н. Ветров, канд. техн. наук; Б. А. Игнатенков; Е. В. Урбанович

Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения
ВНЦ “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

E-mail: antitov@peterlink.ru

Предложена физическая модель отражения параллельного пучка лучей выпукло-вогнутой линзой из пластически деформированного лейкосапфира, позволяющая рассчитать коэффициент отражения света от внешней и внутренней поверхностей линзы. Рассмотрены варианты снижения потерь на отражение от внутренней поверхности линзы.

Коды OCIS: 160.1190, 160.4760.

Поступила в редакцию 11.01.2007.

В настоящее время существуют две основные технологии менисковых линз из лейкосапфира: получение заготовок сложной формы, например полусферы, методом механической обработки или путем высокотемпературной пластической деформации дисков, полученных из Z-среза монокристалла, которая приводит к образованию сходящегося пучка оптических осей, образующих прямой круговой конус (в центральном сечении веер), и позволяет реализовать изотропную асферическую линзу [1, 2]. Так как отражение в одноосных кристаллах обусловлено как азимутом колебаний падающей волны, так и углом падения луча, углом между направлением луча и направлением оптической оси, а также плоскостью падения, то проблема оценки отражающей способности линзы весьма актуальна для новой оптической среды [3].

Целью настоящей работы является определение особенностей отражения параллельного пучка лучей естественного света, падающих вдоль оси симметрии изотропной линзы из пластически деформированного лейкосапфира.

Рассмотрение оптической задачи в плоскости, проходящей через ось симметрии линзы или оптическую ось, правомерно для объемной осесимметричной фигуры, в нашем случае оптической линзы.

Имея фокус оптических осей в точке O на расстоянии D от начала координат, как показано на рис. 1, лучи, преломляясь на внешней поверхности линзы, превращаются в сходящийся пучок с фокусом в той же точке O на оси симметрии оптической

линзы. На внешней поверхности отражение в каждой точке определяется углом падения φ и углом между направлением луча и оптической осью кристалла θ . Первый определяли как угол между перпендикуляром к касательной профиля асферической поверхности и направлением оси ординат, а второй – как изменяющийся угол апертуры α .

Для расчета коэффициента отражения от внешней поверхности используем решения, позволяю-

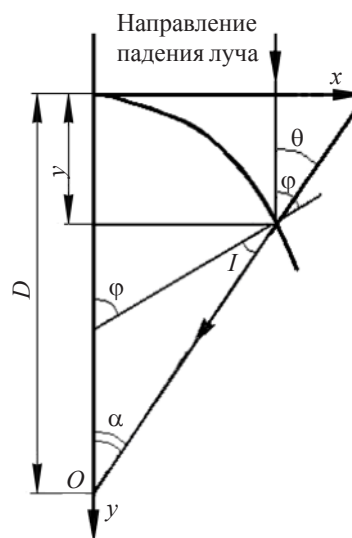


Рис. 1. Схема преломления луча на внешней поверхности линзы из пластически деформированного лейкосапфира.

щие получить амплитуды отраженных и прошедших волн света при произвольной ориентации одноосного кристалла, полученные авторами [4]. В рамках используемой модели для случая, когда оптическая ось кристалла находится в плоскости падения луча, имеем $l_1 = 0$, а $K = f(n_1, \eta_e, \eta_1)$, где l_1 – коэффициент разложения единичного вектора оптической оси, а K – коэффициент, введенный при решении системы уравнений и учитывающий изменение векторов рефракции и нормалей на границе сред. Результаты расчета коэффициентов отражения изотропной линзы из лейкосапфира (квадрат амплитудных коэффициентов r^2), имеющей асферическую поверхность, описываемую уравнением второго порядка: $y = 59,78722x^2 + 0,07387x - 0,0114$, показывают, что зависимость от угла падения для амплитудных коэффициентов отражения, как и для коэффициента отражения естественного света, с учетом угла между оптической осью и направлением луча подобна классической зависимости, приводимой для стекол во всех учебниках по оптике, а для лейкосапфира представлена нами в работе [5]. Из рис. 1 видно, что смещение луча от центра $X = (D - y)\text{tg}\alpha$, и это позволяет определить изменение отражения света по апертуре линзы. На рис. 2 приведена зависимость коэффициента отражения $R = 0,5(r_\perp^2 + r_\parallel^2)$ от внешней асферической поверхности линзы для естественного света, показывающая, что в центральной части коэффициент отражения мало изменяется и для его расчета можно использовать формулу (1). Для сравнения на рисунке приведены зависимости коэффициентов отражения для полусферических поверхностей линз из деформи-

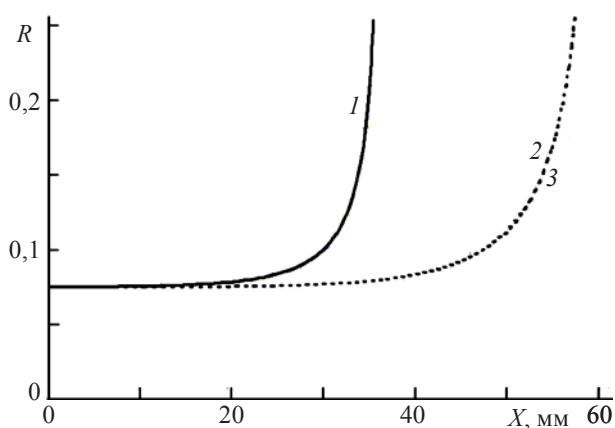


Рис. 2. Зависимости коэффициента отражения $R = 0,5(r_\perp^2 + r_\parallel^2)$ от отклонения луча X для разных поверхностей линзы из лейкосапфира. 1 – асферическая поверхность, 2 – полусферическая из деформированного лейкосапфира, 3 – полусферическая из монокристаллического лейкосапфира ($D = 60$ мм, $h = 5$ мм, $\lambda = 1,1$ мкм).

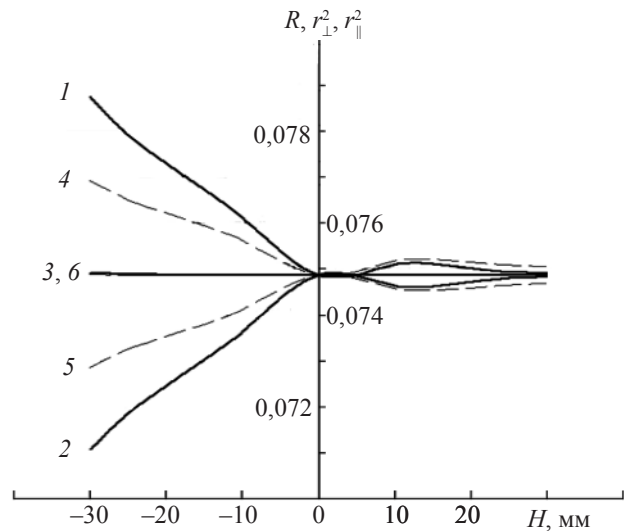


Рис. 3. Зависимости коэффициентов отражения от внутренней поверхности линзы $r_\perp^2, r_\parallel^2, R$ от смещения фокуса лучей H ($D = 60$ мм, $\lambda = 1,1$ мкм). 1, 2, 3 – $X = 24,7$ мм ($\varphi = 42^\circ$); 4, 5, 6 – $X = 16,5$ мм ($\varphi = 30^\circ$); 3 и 6 – R , 1 и 4 – $r_\perp^2$, 2 и 5 – $r_\parallel^2$.

рованного (кривая 2) и монокристаллического (кривая 3) лейкосапфира, позволяющие оценить вклад изменения угла падения на поверхность и угла между направлением луча и оптической осью. Из рисунка видно, что коэффициент отражения обусловлен в основном изменением угла падения луча на поверхность, а вклад рассогласования между направлением луча и оптической осью для коэффициента отражения составляет менее 10^{-4} .

Если внутренняя поверхность линзы имеет форму полусферы (т. е. в сечении получается окружность с радиусом $D - h$, равным радиусу полусферической заготовки), то после преломления лучи падают на внутреннюю поверхность линзы перпендикулярно ей в каждой точке поверхности. Отражение для любой точки поверхности постоянно и равно

$$r_\perp^2 = r_\parallel^2 = [(n_0 - 1)/(n_0 + 1)]^2. \quad (1)$$

На рис. 3 представлены результаты расчета коэффициентов отражения для двух точек поверхности, отстоящих от оси линзы на 16,5 и 24,7 мм, а также для случая изменения радиуса полусферы внутренней поверхности, т. е. смещения H фокуса лучей относительно центра оптических осей. Амплитудные коэффициенты отражения средней и крайней точек поверхности в большей степени обусловлены кривизной внутренней поверхности линзы. При смещении фокуса лучей в сторону меньших значений это объясняется влиянием азимута колебаний падающей волны. Из асимметрии графиков относительно оси симметрии линзы можно заклю-

чить: поляризация при отрицательных смещениях центра осей относительно D (рис. 1) увеличивается в большей степени, чем при положительных значениях смещения. Для естественного света коэффициент отражения мало изменяется (не более 2×10^{-4}) с изменением фокуса лучей относительно фокуса оптических осей, что позволяет использовать значения, полученные по формуле (1) (с учетом дисперсии показателя преломления), при расчетах линз из пластически деформированного лейкосапфира.

Суммируя отражение от внешней и внутренней поверхностей линзы, можно получить полный коэффициент отражения по всей апертуре линзы из пластически деформированного лейкосапфира. Минимальное отражение параллельного пучка лучей естественного света наблюдается только в случае изготовления внутренней поверхности в форме полусферы радиусом, равным радиусу пуансона, используемого при высокотемпературной пластической деформации.

Учитывая полученные результаты, можно заключить, что для расчета отражения света в асферических линзах из пластически деформированного лейкосапфира можно использовать решения, предложенные авторами [4], для произвольно ориентированной пластинки одноосного кристалла. Данный алгоритм также позволяет оценить коэффициент отражения от внешней поверхности полусферической линзы из монокристалла для параллельного пучка лучей, направленных вдоль оси симметрии линзы.

Полученные результаты позволяют оценить потери на отражение при использовании деталей слож-

ной конфигурации одноосных кристаллов в проходной оптике и учесть изменение рабочей апертуры детали, обусловленное значительными потерями на отражение света. Технология менисковых линз из лейкосапфира, основанная на процессе неоднородной пластической деформации лейкосапфира, позволяет управлять не только формой оптической детали, но и оптическими свойствами – двулучепреломлением [6] и отражением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев И.И., Ветров В.Н., Игнатенков Б.А. и др. Способ получения оптических линз // Патент РФ. № 1773956. 1993.
2. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Письменный В.А. и др. Способ получения оптических линз // Заявка на патент РФ № 2005100065/03 от 11.01.2005.
3. Afanasev I.I., Vetrov V.N., Ignatenkov B.A. Textural sapphire crystals new optical medium // 4 Intern. Confer. "Single Growth and Heat & Mass Transfer". 2001. V. 3. P. 585.
4. Константинова А.Ф., Лонский Э.С. Прохождение света через пластинку из одноосного кристалла при наклонном падении // Кристаллография. 1977. Т. 22. В. 1. С. 14–20.
5. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Урбанович Е.В. Отражение параллельного пучка лучей света в линзах из пластически деформированного лейкосапфира // Сб. трудов VII Международной конференции "Прикладная оптика-2006". Т. 3.
6. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А. Минимизация двулучепреломления в линзах из лейкосапфира // Сб. трудов VI Международной конференции "Прикладная оптика-2004". Т. 4. С. 116.