

1. K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, V.V. Maltsev, N.I. Leonyuk, and N.V. Kuleshov // Optics Letters, 38, 2446 (2013).

2. K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, V.V. Maltsev, N.I. Leonyuk and N.V. Kuleshov // Optics Letters, 41, 918 (2016).

УДК 535.317

**АБЕРРАЦИОННЫЙ РАСЧЕТ ДВУХЗЕРКАЛЬНОГО ОБЪЕКТИВА С ТРЕМЯ ОТРАЖЕНИЯМИ**

**Аргюхина Н.К.<sup>1</sup>, Самбрано Л.Ф.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск Республика, Беларусь

<sup>2</sup>Национальный центр оптических технологий, Мериды, Венесуэла

В последнее время большое распространение получили зеркальные системы из-за отсутствия хроматических aberrаций при любых апертурах и фокусных расстояниях. Они используются в разнообразных областях науки и техники.

Развитие схемных решений зеркальных систем идет по пути улучшения оптических характеристик: увеличение угловых полей, сокращение габаритов, повышение качества изображения, а также точность и технологичность изготовления отражающих поверхностей. Окончательный выбор схемы с различным числом зеркальных элементов всегда осуществляется для конкретной задачи. Накоплен значительный потенциал по разработке и исследованию двухзеркальных систем [1].

В данной работе представлено проектирование двухзеркального объектива с тремя отражениями от двух параболических зеркал, причем используется двойное отражение от главного зеркала. Такой объектив построен на основе телескопической системы Мерсенна [2]. Абберационный анализ показал, что исследуемая композиция обладает исправлением сферической aberrации, соблюдением условия синусов Аббе и исправлением астигматизма при наблюдении телецентрического хода главных лучей в пространстве между обоими зеркалами.

Схема объектива показана на рисунке 1. Второе зеркало имеет центральное отверстие для прохождения светового пучка лучей. Деформация для каждой отрагательной поверхности:  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = -1$ .

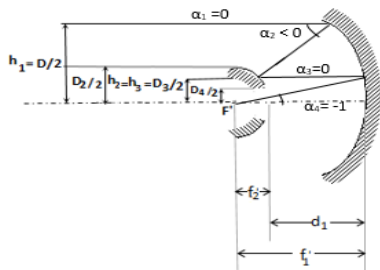


Рисунок 1 – Схема двухзеркального объектива с ходом первого параксиального луча

Проектирование зеркального объектива проведено в два этапа: габаритный расчет и aberrационный (оценка коэффициентов Зейделя). При этом применим алгебраический метод проектирования [1]. Сначала установлены

условия нормировки для первого параксиального луча:

$$\alpha_1 = \alpha_3 = 0, \alpha_2 < 0, \alpha_4 = -1, h_1 = 1..$$

Отметим, что наибольший эффект укорочения получается при следующем дополнительном условии  $f_1/D = 0,25$ .

Получим сводки формул для первого этапа параметрического расчета:

$$\begin{aligned} -1 &= f' = f'_1 \cdot \Gamma, \\ \frac{D}{D_2} = \frac{f'_1}{f'_2} &= \Gamma, \quad \frac{D_2}{D_3} = \Gamma, \quad \frac{D_3}{D_4} = \Gamma, \\ d_1 &= f'_1 - f'_2, \quad f'_1 = -\frac{1}{\Gamma}, \quad f'_2 = -\frac{1}{\Gamma^2}, \\ d_1 &= -\frac{\Gamma-1}{\Gamma^2}, \quad h_2 = h_3 = \frac{1}{\Gamma}. \end{aligned}$$

Значение свободного коррекционного параметра  $\alpha_2$ , влияющего на конструктивное решение системы можно определить с помощью следующей формулы:

$$\alpha_2 = -\frac{h_2 - h_1}{d_1} = -\Gamma.$$

Формулы для расчета величин радиусов зеркал:

$$r_1 = \frac{2}{\alpha_2} = -\frac{2}{\Gamma}, \quad r_2 = \frac{2h_2}{\alpha_2} = -\frac{2}{\Gamma^2}, \quad r_3 = -\frac{2h_2}{\alpha_4}.$$

Из-за двойного отражения главного зеркала имеем , т.е. .

В процессе проектирования данного объектива возникают некоторые дополнительные условия.

Расчитанная система имеет высокое относительное отверстие  $D/f' = 1:0.5$ , но малое поле зрения (порядка  $2\omega = 12'$ ).

Расчетные значения конструктивных параметров системы (радиусов кривизны, диаметров и расстояний между поверхностями) представлены в таблице 1.

Таблица 1. Конструктивные параметры системы, мм, (когда  $\alpha_2 = -2$ )

$R_1=R_3$	$R_2$	$d_1$	$D$	$D_2$	$D_3$	$D_4$
-2000	-500	-750	2000	1000	500	250

На втором этапе получены коэффициенты aberrаций третьего порядка, которые описываются пятью уравнениями:

$$\begin{aligned} V &= V_0 = 0, \\ K &= K_0 - tB_0 = K_0, \\ C &= C_0 - 2tK_0 + t^2B_0, \\ D - C &= D_0 - C_0, \\ E &= E_0 - t(2C_0 + D_0) + 3t^2K_0 - t^3B_0, \end{aligned}$$

Результаты расчета коэффициентов абберации представлена в таблице 2.

Таблица 2. Коэффициенты 3-го порядка

B	K	C	D
0	$-\frac{1}{4}$	0	1

Коэффициенты  $B = C = 0$ , т.е. исправлены сферическая абберация и астигматизм. Присутствуют абберация комы (K), кривизна изображения (D), а также дисторсия.

Абберационные характеристики зеркального объектива с двойным отражением от главного зеркала, рассчитанные в ППП Орал, представлены в таблице 3.

Таблица 3. Абберации (расчеты в ППП Орал)

m	$\Delta S'$	$\Delta Y'$	$\eta, \%$	$Z'_m$	$Z'_s$	$\Delta Y', \%$
1	0.000	0.000	0.389	0.148	0.139	0.007

$\Delta S'$ ,  $\Delta Y'$  - соответственно продольная и поперечная сферическая абберация;  $\eta, \%$  - неизопланатизм;  $\Delta Y', \%$  - дисторсия; - астигматические отрезки.

На рисунках 2 и 3 показано компьютерное моделирование зеркального объектива и диаграмма пятна рассеяния в программной среде Zemax: габаритная схема с ходом лучей и диаграмма пятна рассеяния.

Таким образом получен анастигматический светосильный объектив с большим относительным отверстием, нои малым полем зрения. Такой объектив можно использовать для солнечных телескопов.

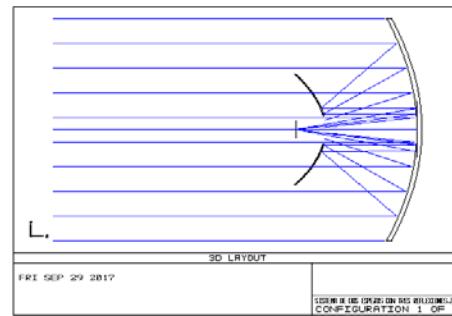


Рисунок 2 – Моделирование анастигматического двухзеркального объектива с тремя отражениями в ППП Zemax

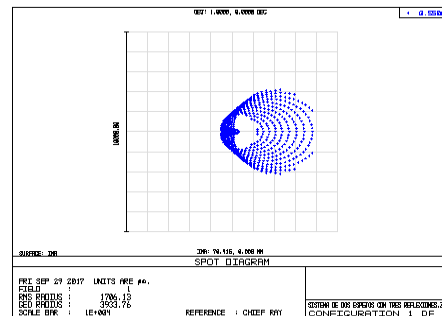


Рисунок 3 – Диаграмма пятна рассеяния анастигматического двухзеркального объектива ( $2\omega=12^\circ$ ) в ППП Zemax

1. Артюхина, Н.К. Теория, методы проектирования и расчет зеркальных систем: монография / Н.К. Артюхина. – Минск: БНТУ, 2009. – 309 с.
2. Русинов М.М. Несферические поверхности в оптике: Расчет, изготовление и контроль. /М.М. Русинов, 4-е изд.– М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. – 296 с.

УДК 621.372.821.1

### ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ НА ЭПИТАКСИАЛЬНОМ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ СЛОЕ $\text{Er}_{1.3} \text{at.}\% : \text{KGd}_{0.2} \text{Yb}_{0.15} \text{Y}_{0.65} (\text{WO}_4)_2$ С РЕЗОНАНСНОЙ НАКАЧКОЙ

Дернович О.П.<sup>1</sup>, Курильчик С.В.<sup>2</sup>, Горбаченя К.Н.<sup>1</sup>, Кисель В.Э.<sup>1</sup>, Кулешов Н.В.<sup>1</sup>, Кравцов А.В.<sup>3</sup>, Гурецкий С.А.<sup>3</sup>, Колесова И.М.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Оптических материалов и технологий» БНТУ, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Optoelectronics Research Centre, University of Southampton, UK

<sup>3</sup>ГНПО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Беларусь

В работе [1] нами сообщалось об успешном росте экспериментального образца эпитаксиального слоя  $\text{Er}_{0.01} : \text{KGd}_{0.2} \text{Yb}_{0.148} \text{Y}_{0.642} (\text{WO}_4)_2$  на подложке  $\text{KY} (\text{WO}_4)_2$ , состав которого, обеспечивающий согласование параметров кристаллической решетки слоя и подложки, был определен с помощью разработанной математической модели, позволяющей рассчитывать параметры кристаллической ячейки и показатель преломления слоя  $\text{KGd}_x \text{Yb}_y \text{Y}_{(1-x-y)} (\text{WO}_4)_2$  при различном соотношении ионов Gd и Yb.

В настоящее время методом жидкофазной эпитаксии был получен новый образец монокристаллического слоя состава  $\text{Er} : \text{KGd}_{0.2} \text{Yb}_{0.15} \text{Y}_{0.65} (\text{WO}_4)_2$  на подложке из кристалла  $\text{KY} (\text{WO}_4)_2$ , на котором впервые среди эпитаксиальных кристаллических слоев вольфраматов,

легированных ионами эрбия, реализована лазерная генерация.

Отполированный образец слоя толщиной 180 мкм (вдоль кристаллографической оси b) был вырезан вдоль осей оптической индикатрисы кристалла  $N_m$  и  $N_g$ . Снимок слоя, сделанный через микроскоп Полам РП-1 (ЛОМО), представлен на рисунке 1.

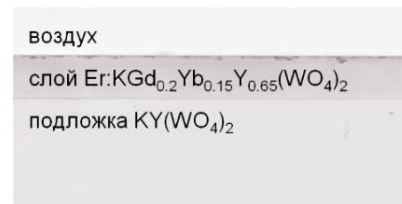


Рисунок 1 – Фотография монокристаллического слоя  $\text{Er} : \text{KGd}_{0.2} \text{Yb}_{0.15} \text{Y}_{0.65} (\text{WO}_4)_2$ , выращенного на кристалле  $\text{KY} (\text{WO}_4)_2$