

# **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ЗЕРКАЛ С РАДИАЛЬНО ЗАВИСИМЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ОТРАЖЕНИЯ**

А.И. Арефьев, В.Н. Горнов, Ю.Ю. Смирнов, А.П. Котов, Р.А. Бызов

## **АННОТАЦИЯ**

Градиентные диэлектрические системы широко применяются в лазерных резонаторах для создания гауссовых и супергауссовых световых пучков. Важным моментом в технологии изготовления таких систем, основанной на вакуумных методах нанесения покрытий с использованием различной оснастки, является получение покрытий с заданными геометрическими и оптическими параметрами.

В данной работе рассмотрены некоторые технологические аспекты изготовления лазерных зеркал с радиально зависимым коэффициентом отражения. Показан алгоритм выбора конструкции покрытия и оптимальной геометрии нанесения градиентного слоя покрытия с требуемым профилем коэффициента отражения. Изготовлены зеркала с заданным показателем степени супергауссовой функции распределения коэффициента отражения.

## **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА**

ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ЗЕРКАЛА С РАДИАЛЬНО ЗАВИСИМЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ОТРАЖЕНИЯ, ГРАДИЕНТНОЕ ПОКРЫТИЕ, КОЭФФИЦИЕНТ ОТРАЖЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

## **TECHNOLOGICAL ASPECTS OF MANUFACTURING LASER MIRRORS WITH RADIALY DEPENDENT REFLECTION COEFFICIENT**

A.I. Arefev, V.N. Gornov, Yu.Yu. Smirnov, A.P. Kotov, R.A. Byzov

## **ANNOTATION**

Gradient dielectric systems are widely used in laser cavities to create Gaussian and super-Gaussian light beams. An important point in the manufacturing technology of such systems, based on vacuum coating methods using various equipment, is the production of coatings with specified geometric and optical parameters.

This paper discusses some technological aspects of manufacturing laser mirrors with a radially dependent reflection coefficient. An algorithm for selecting a coating design and the optimal geometry for applying a gradient coating layer with the required reflectance profile is shown. Mirrors with a given exponent of the super-Gaussian distribution function of the reflection coefficient were manufactured.

## **KEYWORDS**

LASER RADIATION, MIRRORS WITH RADIALY DEPENDENT REFLECTION COEFFICIENT, GRADIENT COATING, LASER RADIATION REFLECTANCE

## **ВВЕДЕНИЕ**

Одним из способов улучшения пространственных характеристик лазерного излучения неустойчивых резонаторов является использование в оптической схеме лазерного источника выходного зеркала с переменным радиальным распределением коэффициента отражения. Наличие плавной радиальной зависимости и вариативность параметров (коэффициента отражения в центре, радиуса и показателя степени) профиля

отражательной способности такого зеркала позволяют обеспечить требуемые радиальные распределения интенсивности выходного излучения в ближней зоне и высокую яркость излучения в дальней зоне.

Лазерные зеркала с радиально зависимым коэффициентом отражения отличаются от обыкновенных лазерных зеркал в одном аспекте: по крайней мере, один из осажденных диэлектрических слоев покрытия обладает радиально изменяющейся толщиной. Это достигается управляемым затенением подложки во время осаждения пленки [1].

Зеркала с радиально зависимым коэффициентом отражения часто состоят из двух функциональных частей [1]. Первая – просветляющее покрытие, нанесенное на всю апертуру подложки. Вторая часть – это градиентное (переменное по толщине) покрытие, которое наносится на часть апертуры подложки с использованием маски (диафрагмы). Профиль коэффициента отражения такого покрытия зависит от следующих параметров:

- размера и формы диафрагмы;
- взаимного расположения элементов системы испаритель - диафрагма - подложка;
- размеров и формы испарителя;
- конструкции просветляющего покрытия и толщины градиентного слоя.

Исходя из этого, для изготовления градиентных покрытий с радиально зависимым коэффициентом отражения необходима специальная оснастка, которая позволяет проводить нанесение покрытий с управляемым затенением части детали. Данная оснастка должна содержать элементы, позволяющие изменять профиль получаемого градиента толщины слоя (слоев) покрытия.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНАСТКА И СХЕМА НАНЕСЕНИЯ ГРАДИЕНТНОГО СЛОЯ

Для освоения технологии нанесения на поверхность оптических элементов диэлектрических покрытий с радиальной переменной толщиной была разработана и изготовлена технологическая оснастка (рисунок 1). Для управления профилем получаемого градиента толщины слоя (слоев) покрытия служат: три вставки (поз. 6 на рисунке 1), от высоты которых зависит расстояние  $h$  между диафрагмой (поз. 3) и подложкой (поз. 5);  $D$  – диаметр диафрагмы (поз. 3).



Рис. 1. 1 – фланец, 2 – оправа, 3 – диафрагма с отверстием диаметром  $D$ , 4 – фланец, 5 – подложка, 6 – вставка, управляющая расстоянием  $h$ .

Технологическая оснастка для нанесения диэлектрических покрытий переменной толщины

Данная оснастка предназначена для размещения на планетарном механизме вращения держателя подложек установки ВУ-2М, оснащенной двумя электронно-лучевыми испарителями (ЭЛИ). На рисунке 2 показана схема размещения оснастки в вакуумной камере установки. На профиль получаемого градиента толщины слоя покрытия существенное влияние будут оказывать диаметр таблетки  $d$  пленкообразующего материала (ПОМ) и угол наклона приемной поверхности подложки  $\alpha$ .

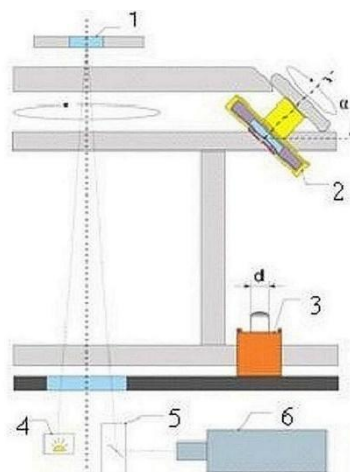


Рис. 2 1- тестовый образец; 2 – оснастка, установленная на планетарном механизме вращения; 3 – тигель ЭЛИ с таблеткой ПОМ диаметром  $d$ ; 4 – осветитель; 5 – система зеркал осветителя; 6 – акустооптический спектрофотометр AOS-3S.

Схема размещения оснастки в вакуумной камере установки ВУ-2М

## ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ ПОКРЫТИЯ

В качестве целевой функции радиального распределения отражающей способности рабочей поверхности градиентного зеркала, которой должны были соответствовать изготовленные образцы, являлась зависимость следующего вида:

$$R(r) = 0,24 \cdot e^{-2 \cdot \left(\frac{r}{3,55}\right)^4}, \quad (1)$$

где  $r$  – радиальная координата.

График зависимости требуемого коэффициента отражения лазерного излучения с длиной волны  $\lambda=1064$  нм от радиальной координаты представлен на рисунке 3(а).

Рассмотрим градиентное зеркало, состоящее из двух функциональных частей:

1- двухслойное просветляющее покрытие, нанесенное на всю апертуру подложки из стекла К8;

2- переменный по толщине слой диоксида циркония, который наносится на часть апертуры подложки с использованием оснастки.

В качестве просветляющего покрытия использовалась стандартная конструкция [2], толщины слоев которой были оптимизированы с помощью программы OptiLayer. Оптимизацию проводили с учетом коэффициентов преломления материалов слоев покрытия, рассчитанных с помощью модуля OptiChar программы OptiLayer. В расчетах использовались данные коэффициентов отражения монослоев  $\text{SiO}_2$  и  $\text{HfO}_2$ , нанесенные на поверхность подложек из стекла К8 на установке ОАС-75 и измеренные с помощью спектрофотометра Cary 5000. Алгоритм расчетов показан в работе [3]. Оптимизированная конструкция просветляющего покрытия выглядит следующим образом:

$$G + 1,58H + 0,74L, \quad (2)$$

где  $G$  – подложка из К8 с коэффициентом преломления  $n=1,51$  на длине волны 1064 нм;  $H$  – четвертьволновый слой оксида гафния с  $n(\text{HfO}_2)=2,0$ ;  $L$  – четвертьволновый слой кварца с  $n(\text{SiO}_2)=1,46$ ; числовой коэффициент перед  $L$  означает оптическую толщину данного слоя, выраженную в долях четвертьволнового слоя для длины волны 1064 нм.

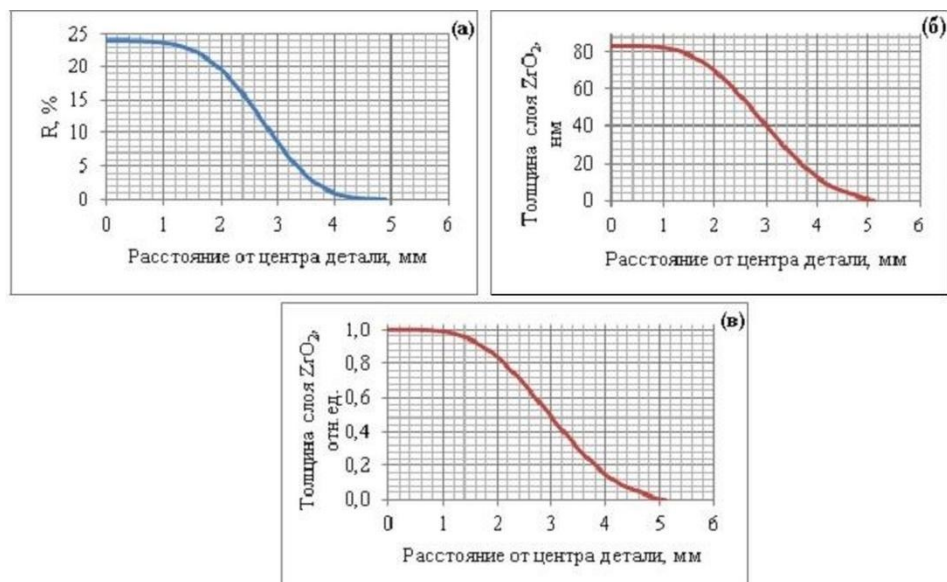


Рис. 3 Распределение вдоль радиальной координаты: (а)-значений требуемого коэффициента отражения для  $\lambda=1064$  нм; (б)-расчетных значений толщины градиентного слоя  $ZrO_2$ ; (в)-расчетных значений относительной толщины градиентного слоя  $ZrO_2$ .

Исходя из профиля требуемого коэффициента отражения, с помощью программы OptiLayer были найдены толщины градиентного слоя  $ZrO_2$  в нескольких точках этого профиля. В расчетах использовались данные коэффициентов отражения монослоя  $ZrO_2$ , нанесенные на поверхность подложки из стекла КУ на установке ВУ-2М и измеренные с помощью спектрофотометра Cary 5000. На рисунке 3 показаны зависимости от радиальной координаты требуемых значений толщины слоя  $ZrO_2$  (б), а также относительной толщины этого слоя (в).

Таким образом, необходимо подобрать такую геометрию нанесения градиентного слоя, которая способна обеспечить распределение толщины слоя по подложке, соответствующее рисункам 3(б) и 3(в).

### ПОИСК ОПТИМАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ НАНЕСЕНИЯ ГРАДИЕНТНОГО СЛОЯ

Для поиска оптимальной геометрии нанесения градиентного слоя, необходимой для получения требуемого распределения толщины слоя по поверхности подложки, на установке ВУ-2М были выполнены 2 процесса нанесения монослоя оксида циркония на подложку из стекла К8. Значения изменяемых параметров оснастки представлены в таблице 1.

Таблица 1  
Значения изменяемых параметров оснастки.

№ образца	$D$ , мм	$h$ , мм	$d$ , мм	$\alpha$ , градус
1	6	7,7	12	45
2	6	2,2	12	45

Измерение радиального распределения коэффициента отражения полученных образцов выполняли на стенде с использованием лазера LCS-T-12 (длина волны непрерывного излучения – 1064 нм, размер пучка зондирующего излучения в области поверхности подложки  $\approx 140$  мкм, точность установки образца – 0,01 мм). По результатам измерений с помощью программы OptiLayer было найдено радиальное распределение толщин полученных слоев для образцов №1 и №2 (рисунок 4). Здесь же показано требуемое распределение.

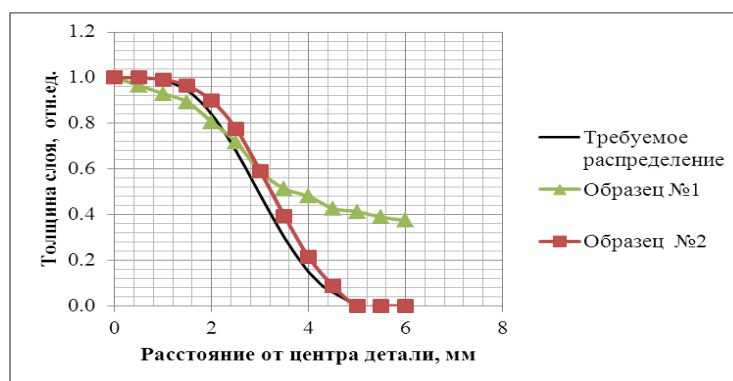


Рис.4 Распределение толщины слоя ZrO2 вдоль радиальной координаты.

Как видно из рисунка 4, кривая распределения толщины слоя для образца №2 практически совпадает с требуемым распределением, имея чуть более широкий профиль. Поэтому, для дальнейших экспериментов вместо маски с диаметром отверстия D=6мм, использовалась диафрагма Ø5 мм, установленная на расстоянии 2,2 мм от детали.

### ИЗГОТОВЛЕНИЕ ГРАДИЕНТНОГО ПОКРЫТИЯ

Прозветляющие покрытия, конструкция которых соответствует формуле 2, были изготовлены методом электронно-лучевого испарения с ионным ассистированием на установке ОАС-75. Покрытия наносились на обе стороны деталей из стекла К8 диаметром 25,4 мм.

Градиентный слой наносился на установке ВУ-2М методом электронно-лучевого испарения. Контроль толщины слоев в процессе нанесения покрытий выполняли с помощью акустооптического спектрофотометра АОС-3S. Таким образом, было изготовлено три образца градиентных зеркал. На рисунке 5 показано радиальное распределение коэффициента отражения зеркала №3. Для сравнения на этом рисунке приведена характеристика одного из зеркал, изготовленных чешской компанией Srytur, а также целевые значения распределения коэффициента отражения.

В программном пакете Qtiplot на основе алгоритма Нелдера – Мида была проведена аппроксимация данных измерения профиля коэффициента отражения изготовленных зеркал и десяти образцов компании Srytur, а также проведена оценка их соответствия функции вида (см. таблицу 2):

$$R(r) = R_{\max} \cdot e^{-2\left(\frac{r}{w}\right)^n} \quad (3)$$

Коэффициент достоверности аппроксимации (детерминации) рассчитывался как [4]:

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (4)$$

где  $y_i$  – фактическое значение переменной,  $\hat{y}_i$  – переменная аппроксимационной кривой регрессии,  $\bar{y}$  – среднее арифметическое значение переменных,  $n$  – количество переменных.

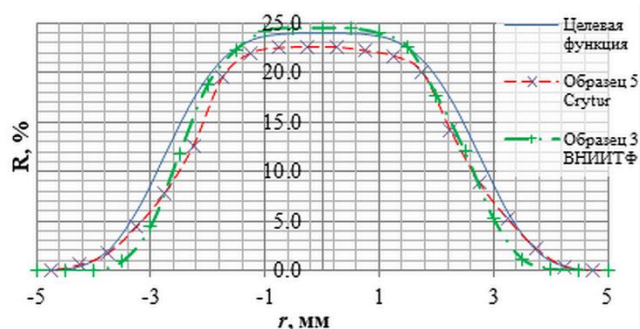


Рис. 5 Радиальное распределение коэффициента отражения зеркал.

Таблица 2

Сравнительные характеристики градиентных зеркал.

Производитель	$R_{\max}$ , %	w, мм	n	$r^2$
Требуемые значения	24	3,55	4	
Crytur	$(21,5 \div 23,1) \pm 1,3$	$(3,39 \div 3,50) \pm 0,05$	$(3,52 \div 3,73) \pm 0,19$	$\geq 0,996$
ВНИИТФ	$(24,5 \div 26,5) \pm 1,3$	$(3,14 \div 3,43) \pm 0,03$	$(4,08 \div 4,47) \pm 0,12$	$\geq 0,998$

Как видно из рисунка 5 и таблицы 2, идеального совпадения с требуемыми параметрами нет ни у одного из производителей. При этом максимальные отклонения основных параметров исследованных образцов градиентных зеркал от целевых значений не превышают 12%.

## ВЫВОДЫ

В результате освоения технологии изготовления лазерных зеркал с радиально зависимым коэффициентом отражения были решены следующие задачи:

- разработана и изготовлена технологическая оснастка, имеющая в своем составе элементы для управления профилем получаемого градиента толщины слоя (слоев) покрытия;
- собран стенд для определения основных параметров градиентных зеркал;
- исходя из профиля требуемого коэффициента отражения, выбрана конструкция покрытия и рассчитан профиль толщины градиентного слоя;
- экспериментально определены значения изменяемых параметров оснастки для получения требуемого профиля толщины градиентного слоя;

Разработанная технология позволяет изготавливать градиентные покрытия с заданным профилем коэффициента отражения. Изготовленные образцы зеркал с заданным профилем радиального распределения отражающей способности по своим параметрам не уступают зеркалам чешской фирмы Crytur.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Bostanjoglo G, Hodgsont N, Weber H 1994 Design of variable reflectivity mirrors and unstable resonators for Nd:YAG lasers with high average power. Pure Appl. Opt. 3 497-506
2. Суйковская Н В, Широкина З Б и др. 2004 Справочник технолога-оптика под ред. М А. Окатова (Санкт-Петербург: Политехника) с. 496
3. Горнов В Н 2019 Технологии оптических покрытий ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И.Забабихина». Труды 14-й международной конференции «Пленки и покрытия -2019». 516-9
4. Е В Рябева 2019 Статистические методы обработки результатов измерений (Москва: Буки Веди) 396 с.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Арефьев Александр Иванович - инженер-исследователь специзделий (ORCID: 0009-0002-2317-4698), ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им.академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск, Россия, der5@vniitf.ru (с пометкой для Арефьева А.И.)

Горнов Владимир Николаевич - ведущий инженер-исследователь специзделий (ORCID: 0009-0001-6828-2476), ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им.академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск, Россия der5@vniitf.ru (с пометкой для Горнова В.Н.)

Смирнов Юрий Юрьевич - инженер-исследователь специзделий (ORCID: 0009-0004-6581-1741), ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им.академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск, Россия der5@vniitf.ru (с пометкой для Смирнова Ю.Ю.)

Котов Александр Павлович - лаборант физической лаборатории (ORCID: 0009-0003-2768-9434), ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им.академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск, Россия der5@vniitf.ru (с пометкой для Котова А.П.)

Бызов Роман Андреевич - старший научный сотрудник (ORCID: 0009-0001-5118-9320), ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им.академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск, Россия der5@vniitf.ru (с пометкой для Бызова Р.А.)