

УДК 681.7.064.45

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ПРОСВЕТЛЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЯХ МАЛОГО РАДИУСА

Л.А. Губанова<sup>а</sup>, Хоанг Лонг Тхань<sup>а</sup>, До Тай Тан<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: [la7777@mail.ru](mailto:la7777@mail.ru)

### Информация о статье

Поступила в редакцию 05.09.14, принята к печати 20.01.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-2-234-240

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Губанова Л.А., Хоанг Лонг Тхань, До Тай Тан. Исследование распределения коэффициента отражения просветляющих покрытий на оптических деталях малого радиуса // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 2. С. 234–240.

**Аннотация.** Приведены результаты исследования распределения энергетического коэффициента отражения просветляющего покрытия по поверхности оптических элементов малого радиуса (2–12 мм). Определены факторы, влияющие на величину зоны поверхности оптического элемента, в которой энергетический коэффициент отражения постояен. Для решения поставленных задач использованы основные положения теоретических моделей, которые описывают спектральные характеристики многослойных интерференционных покрытий. Относительный размер зоны просветления определен как отношение радиуса зоны поверхности оптического элемента, в котором отражение меньше некоторой величины, к его радиусу ( $\rho/r$ ). Получено, что этот размер постояен при разных значениях радиуса кривизны оптического элемента, изготовленного из одного материала. Его величина определяется показателем преломления материалов, из которых изготовлен оптический элемент ( $n_m$ ), и конструкцией просветляющего покрытия. Для однослойных покрытий эта величина составляет  $\rho/r = 0,5$  при  $n_m = 1,51$  и  $\rho/r = 0,73$  при  $n_m = 1,75$ , для двухслойных покрытий  $\rho/r = 0,35$  при  $n_m = 1,51$  и  $\rho/r = 0,41$  при  $n_m = 1,75$ . Показано, что с увеличением значений показателя преломления подложки размер зоны минимального коэффициента отражения увеличивается. В работе рассмотрены однослойные, двухслойные, трехслойные и пятислойные структуры просветляющих покрытий. Результаты исследования позволяют сделать вывод, что для получения равномерного отражения от всей поверхности оптического элемента малого радиуса нельзя формировать на его поверхности равнотолщинные покрытия, а следует искать распределение толщины слоя, которое обеспечит равномерное отражение излучения во всех точках сферической поверхности.

**Ключевые слова:** просветляющее покрытие, оптическая деталь малого радиуса, зона постоянного коэффициента отражения.

**Благодарности.** Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01).

## STUDY OF REFLECTION COEFFICIENT DISTRIBUTION FOR ANTI-REFLECTION COATINGS ON SMALL-RADIUS OPTICAL PARTS

L.A. Gubanova<sup>а</sup>, Hoang Long Thanh<sup>а</sup>, Do Tai Tan<sup>а</sup>

<sup>а</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: [la7777@mail.ru](mailto:la7777@mail.ru)

### Article info

Received 05.09.14, accepted 20.01.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-2-234-240

Article in Russian

**For citation:** Gubanova L.A., Hoang Long Thanh, Do Tai Tan. Study of reflection coefficient distribution for anti-reflection coatings on small-radius optical parts. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol.15, no. 2, pp. 234–240. (in Russian)

**Abstract.** The paper deals with findings for the energy reflection coefficient distribution of anti-reflection coating along the surface of optical elements with a very small radius (2-12 mm). The factors influencing the magnitude of the surface area of the optical element, in which the energy reflection coefficient is constant, were detected. The main principles for theoretical models that describe the spectral characteristics of the multilayer interference coatings were used to achieve these objectives. The relative size of the enlightenment area is defined as the ratio of the radius for the optical element surface, where the reflection is less than a certain value, to its radius ( $\rho/r$ ). The result of research is the following: this size is constant for a different value of the curvature radius for the optical element made of the same material. Its value is determined by the refractive index of material ( $n_m$ ), from which the optical element was made, and the design of antireflection coatings. For

single-layer coatings this value is  $\rho/r = 0.5$  when  $n_m = 1.51$ ; and  $\rho/r = 0.73$  when  $n_m = 1.75$ ; for two-layer coatings  $\rho/r = 0.35$  when  $n_m = 1.51$  and  $\rho/r = 0.41$  when  $n_m = 1.75$ . It is shown that with increasing of the material refractive index for the substrate size, the area of minimum reflection coefficient is increased. The paper considers a single-layer, two-layer, three-layer and five-layer structures of antireflection coatings. The findings give the possibility to conclude that equal thickness coverings formed on the optical element surface with a small radius make no equal reflection from the entire surface, and distribution of the layer thickness needs to be looked for, providing a uniform radiation reflection at all points of the spherical surface.

**Keywords:** anti-reflection coating, small-radius optical detail, area of constant reflection coefficient.

**Acknowledgements.** This work was partially financially supported by the Government of the Russian Federation (Grant 074-U01).

## Введение

Микрооптические приборы и элементы широко используются в волоконной оптике, медицинских приборах, микролазерных системах, в фотолитографии и т.п. Обычно в состав микрооптических приборов входит до нескольких десятков оптических элементов малого (до 12 мм) радиуса кривизны [1–4].

Практически на все преломляющие и отражающие поверхности оптических элементов наносится интерференционные покрытия, влияющие на его энергетические и фазовые характеристики [5]. На поверхности сферических элементов чаще всего наносят просветляющие покрытия, основной целью которых является снижение коэффициента отражения от границы раздела двух сред с разными показателями преломления, что позволяет увеличивать пропускание таких элементов [6]. В ряде работ [7–11] рассматривается необходимость создания равнотолщинных интерференционных слоев, поскольку спектральные характеристики покрытий определяются показателями преломления и геометрическими толщинами слоев, которые их формируют. Однако при падении излучения на микролинзу энергетический коэффициент отражения (пропускания) по поверхности оптического элемента не будет постоянным. Это объясняется тем, что при падении параллельного пучка на линзы малого радиуса в зонах линзы, удаленных от центра на некоторую величину, излучение будет проходить под неким углом, величина которого растет по мере удаления координаты подложки от центра. В результате значение коэффициента отражения будет существенно увеличиваться в зонах, удаленных от центра, из-за большой кривизны оптического элемента. Исследование факторов, влияющих на распределение энергетического коэффициента отражения просветляющего покрытия по поверхности оптических элементов малого радиуса (2–12 мм), с целью определения величины зоны поверхности оптического элемента, в которой энергетический коэффициент отражения постоянен, является целью настоящей работы.

## Теоретический анализ

Рассмотрим схему прохождения излучения через интерференционную систему, расположенную на оптическом элементе малого радиуса  $r$  (рис. 1). Пусть слои на границе раздела двух сред характеризуются показателем преломления  $n_i$  и равномерной геометрической толщиной  $d_i$ , а показатель преломления оптического элемента, на котором расположено покрытие, равен  $n_m$ . Излучение падает из воздуха, т.е.  $n_0 = 1$ .

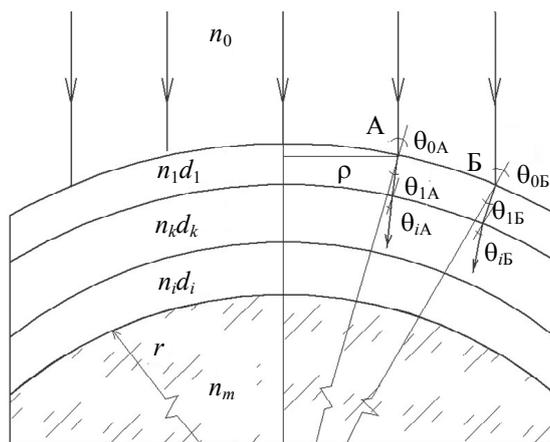


Рис. 1. Схема прохождения излучения через интерференционную систему, расположенную на оптическом элементе малого радиуса

При нормальном падении светового излучения на оптическом элементе для каждой точки, расположенной на его поверхности и удаленной от ее центра на некоторое расстояние  $\rho$ , фазовая толщина слоев будет различной из-за большой кривизны оптического элемента. Например, как показано на рис. 1, для точек А и В фазовые толщины  $i$ -го слоя соответственно могут быть определены из следующих соотношений [6]:

$$\varphi_{iA} = 2 \cdot \pi \cdot n_i \cdot d_i \cdot \lambda^{-1} \cdot \cos \theta_{iA},$$

$$\varphi_{iB} = 2 \cdot \pi \cdot n_i \cdot d_i \cdot \lambda^{-1} \cdot \cos \theta_{iB},$$

где  $\theta_{iA}$ ,  $\theta_{iB}$  – углы падения на поверхности оптического элемента;  $\lambda$  – длина волны. При этом  $\theta_{iA} \neq \theta_{iB}$ ,  $\theta_{iA} = \arcsin(\rho \cdot r^{-1})$ .

Если свет падает нормально на прозрачную среду, то угол падения излучения из воздуха для каждой точки с координатой  $\rho$ , расположенной на поверхности сферического элемента радиуса  $r$ , можно рассчитать с помощью схемы прохождения излучения, представленной на рис. 1:

$$\sin \theta_0 = \rho \cdot r^{-1} \rightarrow \theta_0 = \arcsin(\rho \cdot r^{-1}).$$

Углы распространения излучения в  $i$ -ом слое и подложке определяются из закона Снеллиуса:

$$\theta_i = \arcsin((n_0 \cdot \sin \theta_0) \cdot n_i^{-1}) = \arcsin((n_0 \cdot \rho \cdot r^{-1}) \cdot n_i^{-1}),$$

$$\theta_m = \arcsin(n_0 \cdot \sin \theta_0 \cdot n_m^{-1}) = \arcsin(n_0 \cdot \sin \theta_0 \cdot \rho \cdot r^{-1} \cdot n_m^{-1}).$$

Если излучение распространяется в слоях, формирующих покрытие, под некоторым углом, то его фазовая толщина для каждой точки может быть определена из соотношения

$$\varphi_i = 2 \cdot \pi \cdot n_i \cdot d_i \cdot \lambda^{-1} \cdot \cos \theta_i.$$

Если воспользоваться матричным методом расчета энергетических характеристик тонкослойных интерференционных систем, то следует учесть, что при падении излучения под некоторым углом для  $s$  и  $p$  компоненты матрицы интерференции будут отличаться [12]:

$$M^s = \sum_{i=1}^k \mathbf{M}_i^s = \begin{bmatrix} m_{11}^s & m_{11}^s \\ m_{11}^s & m_{11}^s \end{bmatrix}, \quad M^p = \sum_{i=1}^k \mathbf{M}_i^p = \begin{bmatrix} m_{11}^p & m_{11}^p \\ m_{11}^p & m_{11}^p \end{bmatrix},$$

где  $\mathbf{M}_i^s$  и  $\mathbf{M}_i^p$  – матрицы интерференции для  $s$  и  $p$  компонентов  $i$ -го слоя:

$$\mathbf{M}_i^s = \begin{bmatrix} \cos \varphi_i & \frac{i \cdot \sin \varphi_i}{n_i^s} \\ i \cdot n_i^s \cdot \sin \varphi_i & \cos \varphi_i \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_i^p = \begin{bmatrix} \cos \varphi_i & \frac{i \cdot \sin \varphi_i}{n_i^p} \\ i \cdot n_i^p \cdot \sin \varphi_i & \cos \varphi_i \end{bmatrix}.$$

Амплитудный коэффициент отражения для  $s$  и  $p$  компонентов равен

$$\begin{cases} r^s = \left[ (n_0^s \cdot m_{11}^s - n_m^s \cdot m_{22}^s) + i \cdot (n_0^s \cdot n_m^s \cdot m_{12}^s - m_{21}^s) \right] \cdot \left[ (n_0^s \cdot m_{11}^s + n_m^s \cdot m_{22}^s) + i \cdot n_0^s \cdot n_m^s \cdot m_{12}^s + m_{21}^s \right]^{-1}, \\ r^p = \left[ (n_0^p \cdot m_{11}^p - n_m^p \cdot m_{22}^p) + i \cdot (n_0^p \cdot n_m^p \cdot m_{12}^p - m_{21}^p) \right] \cdot \left[ (n_0^p \cdot m_{11}^p + n_m^p \cdot m_{22}^p) + i \cdot (n_0^p \cdot n_m^p \cdot m_{12}^p + m_{21}^p) \right]^{-1}, \end{cases}$$

где  $n_i^s$  и  $n_i^p$  – эффективные показатели преломления материалов, из которых изготовлены слои и оптический элемент. Эти величины, согласно [6], могут быть определены следующим образом:

$$\begin{cases} n_i^s = n_i \cos \theta_i = n_i \arccos(n_0 \rho r^{-1} n_i^{-1}), \\ n_i^p = n_i (\cos \theta_i)^{-1} = n_i \arccos(n_0 \rho r^{-1} n_i^{-1})^{-1}. \end{cases}$$

Энергетический коэффициент отражения для неполяризованного излучения, согласно [6], равен

$$R = \frac{|r_s|^2 + |r_p|^2}{2}.$$

Приведенные зависимости позволяют утверждать, что распределение энергетического коэффициента отражения по поверхности оптического элемента определяется радиусом кривизны оптического элемента, показателем преломления материала, из которого изготовлен оптический элемент, и структурой (количество слоев, показатели преломления материалов, из которых они изготовлены) просветляющего покрытия. В работе изучалось влияние этих параметров на характер распределения энергетического коэффициента отражения по поверхности оптического элемента. Проведено исследование влияния указанных выше факторов на относительный размер зоны, в которой наблюдается оптимальный эффект просветления, при использовании просветляющих покрытий различных конструкций.

### Основные результаты

Определим влияние радиуса кривизны оптического элемента на характер распределения энергетического коэффициента отражения по его поверхности. С этой целью рассмотрим распределение энергетического коэффициента отражения однослойного просветляющего покрытия по поверхности оптического элемента различного радиуса кривизны, изготовленного из оптического стекла с показателями преломления  $n_m = 1,51$  и  $n_m = 1,75$ . Пусть однослойное просветляющее покрытие сформировано из материала с показателем преломления  $n_1 = 1,35$  и имеет оптическую толщину  $n_1 d_1 = 0,25 \lambda_0$ , где рабочая длина волны  $\lambda_0 = 500$  нм. На рис. 2 представлено распределение энергетического коэффициента отражения однослой-

ного просветляющего покрытия по поверхности оптического элемента разного радиуса. Кривые 1–6 соответствуют однослойному покрытию, сформированному на оптическом элементе, изготовленном из материала с показателем преломления 1,51, а кривые 7–12 – с показателем преломления 1,75. Из этого рисунка видно, что для оптических элементов различного радиуса кривизны наблюдается постоянная зона минимального коэффициента отражения в относительных единицах ( $\rho/r$ ). Относительный размер зоны, в которой энергетический коэффициент отражения меньше одного процента, составляет  $\rho/r = 0,5$  для подложки с показателем преломления  $n_m = 1,51$ , и  $\rho/r = 0,73$  для  $n_m = 1,75$ . Вне этой зоны наблюдается существенное увеличение значения энергетического коэффициента отражения.

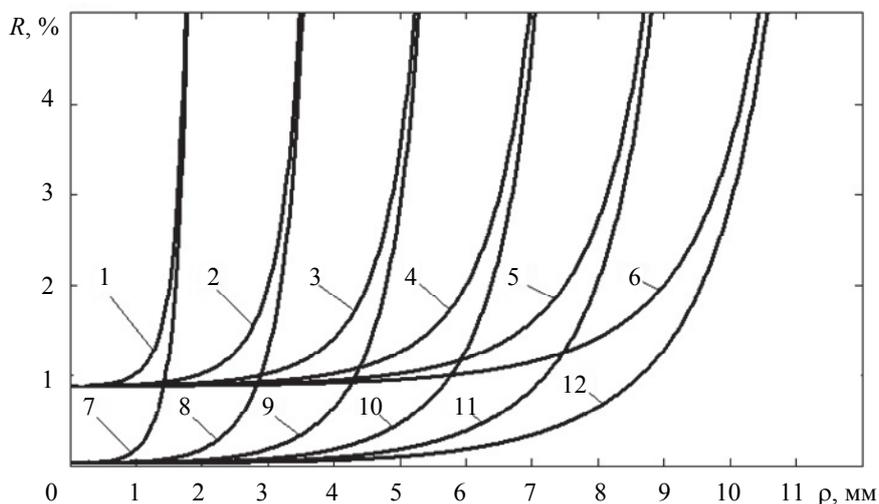


Рис. 2. Распределение энергетического коэффициента отражения однослойного просветляющего покрытия по поверхности оптического элемента разного радиуса с различным показателем преломления: 1,51 – кривые 1–6; 1,75 – кривые 7–12. Кривым 1 и 7 соответствует радиус кривизны элемента 2 мм; кривым 2 и 8 – 4 мм; кривым 3 и 9 – 6 мм; кривым 4 и 10 – 8 мм; кривым 5 и 11 – 10 мм; кривым 6 и 12 – 12 мм

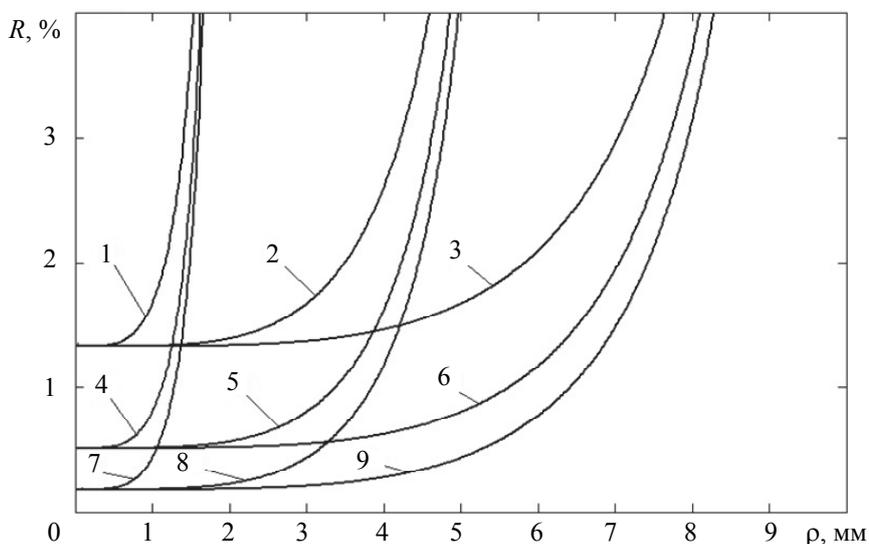


Рис. 3. Распределение энергетического коэффициента отражения двухслойного просветляющего покрытия по поверхности оптических элементов, изготовленных из материалов с различным показателем преломления: 1,51 – кривые 1–3; 1,65 – кривые 4–6; 1,75 – кривые 7–9. Кривым 1, 4 и 7 соответствует радиус кривизны элемента 2 мм; кривым 2, 5 и 8 – 6 мм; кривым 3, 6 и 9 – 12 мм

Величина остаточного энергетического коэффициента отражения оптического элемента при наличии на его поверхности просветляющего покрытия определяется структурой просветляющего покрытия, которая, в свою очередь, зависит от показателя преломления материала, из которого изготовлен оптический элемент. Выбор конструкции просветляющего двухслойного покрытия, обеспечивающего нулевой коэффициент отражения на некоторой длине волны, может быть осуществлен с помощью диаграммы Шустера [6]. На рис. 3 представлено распределение энергетического коэффициента отражения двухслойного просветляющего покрытия по поверхности оптических элементов, изготовленных из оптических материалов с различными показателями преломления. Кривые 1–3 соответствуют распределению энергетического коэффициента отражения просветляющего покрытия, сформированного на оптическом эле-

менте, изготовленном из материала с показателем преломления  $n_m = 1,51$ . Просветляющее покрытие имеет следующую структуру: оптические толщины слоев  $n_1d_1 = 0,168\lambda_0$ ,  $n_2d_2 = 0,396\lambda_0$ ,  $\lambda_0$  – рабочая длина волны. Кривые 4–6 соответствуют распределению энергетического коэффициента отражения просветляющего покрытия, сформированного на оптическом элементе, изготовленном из материала с показателем преломления  $n_m = 1,65$ . Просветляющее покрытие имеет следующую структуру: оптические толщины слоев  $n_1d_1 = 0,208\lambda_0$ ,  $n_2d_2 = 0,377\lambda_0$ . Аналогично, кривые 7–9 отображают распределение энергетического коэффициента отражения для  $n_m = 1,75$  и структуры покрытия  $n_1d_1 = 0,222\lambda_0$ ,  $n_2d_2 = 0,360\lambda_0$ . Для всех рассмотренных конструкций показатель преломления слоя, граничащего с воздухом,  $n_1 = 1,45$ , а с оптическим элементом –  $n_2 = 2,00$ , рабочая длина волны  $\lambda_0 = 500$  нм. Получено, что размеры зон, в которых отклонение минимального отражения двухслойного просветляющего покрытия не превышает 10%, составляют для материала с  $n_m = 1,51$  –  $\rho/r = 0,35$ , с  $n_m = 1,65$  –  $\rho/r = 0,38$ , с  $n_m = 1,75$  –  $\rho/r = 0,41$ . Таким образом, с увеличением показателя преломления подложки значение минимального коэффициента отражения уменьшается, и зона просветления увеличивается.

Рассмотрим, какой вид будет иметь распределение энергетического коэффициента отражения по поверхности оптического элемента, изготовленного из оптического материала с показателем преломления  $n_m = 1,51$ , если на его поверхности сформировано одно из просветляющих покрытий: двух-, трех- или пятислойные системы. На рис. 4 показано распределение энергетического коэффициента отражения двухслойного просветляющего покрытия, имеющего разные структуры и сформированного из разных пленкообразующих материалов на поверхности оптического элемента с радиусом кривизны 2 мм. Структуры двухслойного покрытия по-прежнему определяются с помощью диаграммы Шустера. Кривая 1 соответствует распределению энергетического коэффициента отражения двухслойного просветляющего покрытия по поверхности оптического элемента, сформированного из пленкообразующих материалов с показателями преломления слоя  $n_1 = 1,45$  и  $n_2 = 1,90$ , которые имеют оптические толщины  $n_1d_1 = 0,198\lambda_0$  и  $n_2d_2 = 0,368\lambda_0$  соответственно, рабочая длина волны  $\lambda_0 = 500$  нм. Кривая 2 отражает распределение энергетического коэффициента отражения двухслойного просветляющего покрытия по поверхности оптического элемента, сформированного из пленкообразующих материалов с показателями преломления слоя  $n_1 = 1,35$  и  $n_2 = 1,70$  и оптическими толщинами  $n_1d_1 = 0,221\lambda_0$  и  $n_2d_2 = 0,341\lambda_0$  соответственно. Как видно из рисунка, разные структуры просветляющего покрытия обеспечивают разный размер зоны просветления. Если рассматривать зоны оптического элемента, где энергетический коэффициент отражения меньше одного процента, то для первой структуры относительный размер зоны просветления составляет  $\rho/r = 0,66$ , а для второй структуры –  $\rho/r = 0,70$ .

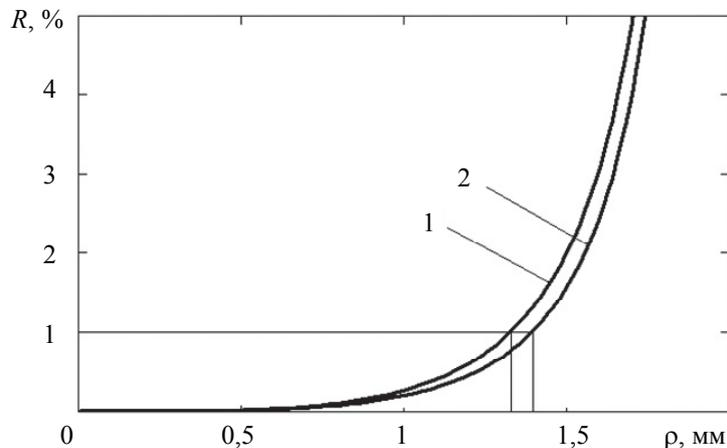


Рис. 4. Распределение коэффициента отражения двухслойного просветляющего покрытия по поверхности оптического элемента с различными структурами: кривая 1 –  $n_1 = 1,45$ ;  $n_2 = 1,90$  и оптические толщины  $n_1d_1 = 0,198\lambda_0$ ,  $n_2d_2 = 0,368\lambda_0$ ; кривая 2 –  $n_1 = 1,35$ ;  $n_2 = 1,70$  и оптические толщины  $n_1d_1 = 0,221\lambda_0$ ,  $n_2d_2 = 0,341\lambda_0$ ;  $n_m = 1,51$

Просветляющие покрытия, состоящие из трех и более слоев, обеспечивают более широкий диапазон минимального значения энергетического коэффициента отражения. На рис. 5, 6 представлены спектральные зависимости энергетического коэффициента отражения трехслойного и пятислойного просветляющих покрытий в различных точках падения излучения по поверхности оптического элемента с радиусом кривизны 2 мм [13]. На рис. 5 показано распределение энергетического коэффициента отражения трехслойного просветляющего покрытия, сформированного из материалов с показателями преломления  $n_1 = 1,45$ ,  $n_2 = 2,00$ ,  $n_3 = 1,80$  и имеющего одинаковую оптическую толщину  $n_1d_1 = n_2d_2 = n_3d_3 = 0,25\lambda_0$ , рабочая длина волны  $\lambda_0 = 500$  нм. Покрытие сформировано на оптическом элементе, изготовленном из оптического материала с показателем преломления  $n_m = 1,51$  [14]. Кривая 1 соответствует спектральному распределению энергетического коэффициента отражения в точке, расположенной в центре кривизны

оптического элемента  $\rho = 0$  мм, кривая 2 – в точке с координатой  $\rho = 1$  мм и кривая 3 –  $\rho = 1,5$  мм. Как видно из рис. 5, в области значений энергетического коэффициента отражения меньше 1% диапазон длин волн для трехслойного просветляющего покрытия составляет примерно 200 нм (от 422 нм до 622 нм) при  $\rho = 0$  мм, а при увеличении  $\rho$  энергетический коэффициент отражения быстро увеличивается, и его положение смещается в коротковолновую область спектра.

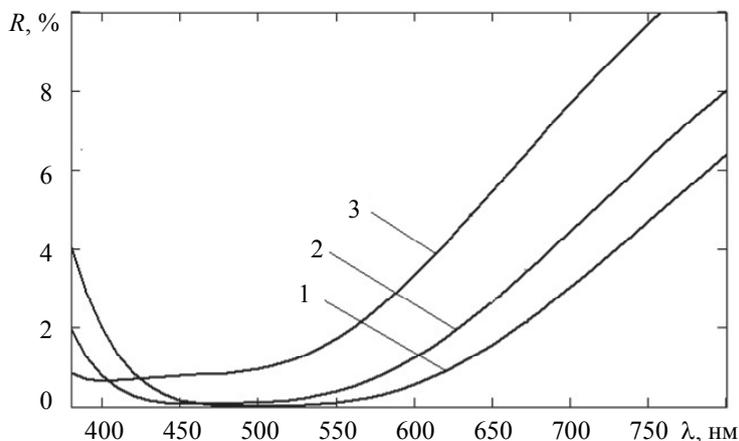


Рис. 5. Спектральная зависимость энергетического коэффициента отражения трехслойного просветляющего покрытия в различных точках падения по поверхности оптического элемента с радиусом кривизны 2 мм. Структура покрытия с показателями преломления слоев  $n_1 = 1,45$ ,  $n_2 = 2,00$ ,  $n_3 = 1,80$  и оптическими толщинами  $n_1d_1 = n_2d_2 = n_3d_3 = 0,25\lambda_0$ ,  $\lambda_0 = 500$  нм,  $n_m = 1,51$ . Кривые 1–3 соответствуют значениям  $\rho = 0, 1, 1,5$  мм

На рис. 6 представлено спектральное распределение энергетического коэффициента отражения, которое соответствует пятислойному просветляющему покрытию. Данное покрытие сформировано из материалов с показателями преломления  $n_1 = 1,35$ ,  $n_2 = 2,00$ ,  $n_3 = 2,20$ ,  $n_4 = 1,74$ ,  $n_5 = 1,45$ , оптическая толщина  $n_1d_1 = n_2d_2 = n_3d_3 = n_4d_4 = n_5d_5 = 0,25\lambda_0$ , рабочая длина волны  $\lambda_0 = 500$  нм, оптический элемент изготовлен из материала с показателем преломления  $n_m = 1,51$  [15]. Кривая 1 соответствует спектральному распределению энергетического коэффициента отражения в центре оптического элемента  $\rho = 0$  мм, кривая 2 – в точке, имеющей координаты  $\rho = 1$  мм, и кривая 3 – при  $\rho = 1,5$  мм. Как видно из рисунка, диапазон длин волн, в котором энергетический коэффициент отражения не превышает 1%, для пятислойного просветляющего покрытия лежит в интервале от 400 нм до 800 нм при  $\rho = 0$  мм. По мере удаления от центра область просветления существенно сужается, энергетический коэффициент отражения быстро увеличивается, и его положение смещается в коротковолновую область спектра.

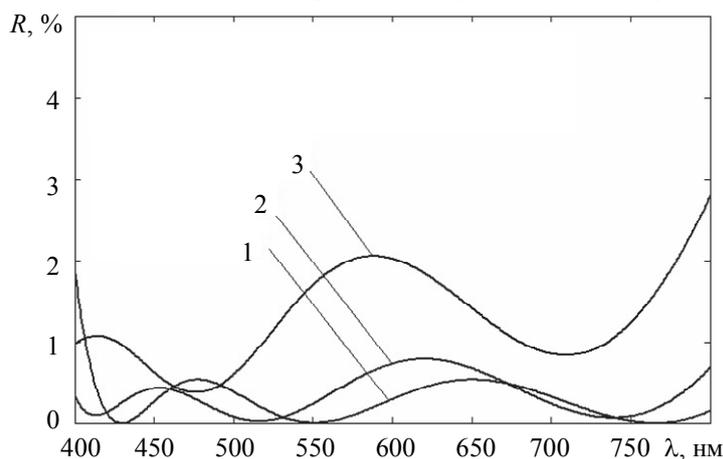


Рис. 6. Спектральная зависимость энергетического коэффициента отражения пятислойного просветляющего покрытия в различных точках падения по поверхности оптического элемента с радиусом кривизны 2 мм. Структура покрытия с показателями преломления слоев  $n_1 = 1,35$ ,  $n_2 = 2,00$ ,  $n_3 = 2,20$ ,  $n_4 = 1,74$ ,  $n_5 = 1,45$  и оптическими толщинами  $n_1d_1 = n_2d_2 = n_3d_3 = n_4d_4 = n_5d_5 = 0,25\lambda_0$ ,  $\lambda_0 = 500$  нм,  $n_m = 1,51$ . Кривые 1–3 соответствуют значениям  $\rho = 0, 1, 1,5$  мм

### Заключение

Представленный в работе анализ факторов, влияющих на зону минимального коэффициента отражения, показал, что относительная зона минимального коэффициента отражения постоянна в относительных единицах при изменении радиуса кривизны линзы. Относительный размер зоны, при которой энергетиче-

ский коэффициент отражения меньше 1%, составляет  $\rho/r = 0,5$  для подложки с показателем преломления  $n_m = 1,51$ , для  $n_m = 1,75$   $\rho/r = 0,73$ . Вне этой зоны наблюдается существенное увеличение коэффициента отражения. Рассмотрение просветляющих покрытий на оптических элементах, изготовленных из материалов с различными показателями преломления, показало, что с увеличением показателя преломления материала, из которого изготовлен оптический элемент, размер зоны минимального коэффициента отражения увеличивается. Получено, что размеры зон, в которых отклонение минимального отражения двухслойного просветляющего покрытия не превышает 10%, составляют для материала с  $n_m = 1,51$   $\rho/r = 0,35$ , с  $n_m = 1,75$   $\rho/r = 0,41$ . Величина спектральной области, в которой наблюдается эффект просветления, зависит не только от показателя преломления материала, из которого изготовлен оптический элемент, но и от структуры просветляющего покрытия. Получено, что относительный размер зоны просветления разных структур двухслойного просветляющего покрытия, рассмотренных выше, при значении энергетического коэффициента отражения меньше 1%, составляет  $\rho/r = 0,66$  и  $\rho/r = 0,70$  для различных структур двухслойного покрытия, сформированных на оптическом элементе, изготовленном из одного материала.

Полученные результаты позволяют утверждать, что для равномерного отражения от всей поверхности оптического элемента малого радиуса на ней должен быть сформирован слой с неким распределением толщины слоя просветляющего покрытия. Поиск этого распределения является задачей дальнейших исследований.

### References

1. Kuzin A.A., Zabolotskiy A.V., Baturin A.S., Lapshin D.A., Melent'ev P.N., Balykin V.I. Method for production of microlenses less than 50 nm in diameter for nanolithography using atomic projective optics. *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, 2009, vol. 7, no. 1, pp. 163–168.
2. Khryachkov V.V., Fedosov Yu.N., Davydov A.I., Shumilov V.G., Fed'ko R.V. *Endoskopiya. Bazovyi Kurs Lektsii* [Endoscopy. Base Course of Lectures]. Moscow, GEOTAR-Media, 2012, 160 p.
3. Khatsevich T.N., Mikhailov I.O. *Endoskopy* [Endoscopes]. Novosibirsk, SGGA Publ., 2002, 196 p.
4. *Micro-Optics: Elements, Systems and Applications*. Ed. H.P. Herzig. London, Taylor & Francis, 1997, 600 p.
5. Macleod H.A. *Thin-Film Optical Filters*. 4<sup>th</sup> ed. Boca Raton, CRC Press, 2010, 800 p.
6. Putilin E.S. *Opticheskie Pokrytiya* [Optical Coatings]. St. Petersburg, SPbSU ITMO Publ., 2010, 227 p.
7. Baumeister P.W. *Optical Coating Technology*. SPIE Press monograph, 2004, vol. PM137, 840 p.
8. Grunwald R., Mischke H., Rehak W. Microlens formation by thin-film deposition with mesh-shaped masks. *Applied Optics*, 1999, vol. 38, no. 19, pp. 4117–4124.
9. Hermans K., Hamidi S.Z., Spoelstra A.B., Bastiaansen C.W.M., Broer D.J. Rapid, direct fabrication of antireflection-coated microlens arrays by photoembossing. *Applied Optics*, 2008, vol. 47, no. 35, pp. 6512–6517. doi: 10.1364/AO.47.006512
10. Tomofuji T., Okada N., Hiraki S., Murakami A., Nagatsuka J. A new coating technique for lenses which have steep curved surface. *Optical Interference Coatings, OSA Technical Digest Series*, 2001, art. MD2.
11. Karasev N.N., Nuzhin A.V., Starovoitov S.F., Putilin E.S., Bol'shanin A.F., Mashekhin V.T., Slobodyanyuk A.A. *Opticheskie Tekhnologii* [Optical Technologies]. St. Petersburg, SPbSU ITMO Publ., 2006, 98 p.
12. Ershov A.V., Mashin A.I. *Mnogosloynye Opticheskie Pokrytiya. Proektirovanie, Materialy, Osobennosti Tekhnologii Polucheniya Metodom Elektronno-luchevego Ispareniya* [Multilayer Optical Coatings. Design, Materials, Production Technology Features by Electron Beam Evaporation]. Nizhnii Novgorod, NNGU Publ., 2006, 99 p.
13. Kotlikov E.N., Varfolomeev G.A., Lavrovskaya N.P., Tropin A.N., Khonineva E.V. *Proektirovanie, Iizgotovlenie i Issledovanie Interferentsionnykh Pokrytii* [Design, Manufacture and Research of Interference Coatings]. St. Petersburg, GUAP Publ., 2009, 188 p.
14. *Spravochnik Tekhnologa-Optika* [Handbook of Optics Technologist]. Ed. M.A. Okatov. 2<sup>nd</sup> ed. St. Petersburg, Politekhnik Publ., 2004, 679 p.
15. Tai Do T., Gubanova L.A., Putilin E.S., Van Khoa P. Five-layer quarter-wave anti reflective coatings for the IR region. *Journal of Optical Technology (A Translation of Opticheskii Zhurnal)*, 2014, vol. 81, no. 10, pp. 72–76. doi: 10.1364/JOT.81.000612

<b>Губанова Людмила Александровна</b>	–	доктор технических наук, доцент, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, la7777@mail.ru
<b>Хоанг Лонг Тхань</b>	–	студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Xuanson_langmoi_dl@yahoo.com
<b>До Тай Тан</b>	–	аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, tantaido@yahoo.com
<b>Lyudmila A. Gubanova</b>	–	D.Sc., Associate professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, la7777@mail.ru
<b>Hoang Long Thanh</b>	–	student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Xuanson_langmoi_dl@yahoo.com
<b>Do Tai Tan</b>	–	postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, tantaido@yahoo.com