

## УВЕЛИЧЕНИЕ ЗОНЫ ПРОСВЕТЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА МАЛОГО РАДИУСА ПУТЕМ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ С ЗАДАНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ТОЛЩИНЫ

Л. А. ГУБАНОВА, ХОАНГ ТХАНЬ ЛОНГ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: la7777@mail.ru*

Исследовано распределение энергетического коэффициента отражения по поверхности оптического элемента малого радиуса (2—12 мм), на которой сформировано просветляющее покрытие (слои покрытия имеют заданное распределение геометрической толщины). Установлено: при рассматриваемой конструкции покрытия относительный размер зоны просветления, отношение радиуса поверхности оптического элемента, в котором коэффициент отражения меньше некоторой величины, к его радиусу —  $\rho/r$ , не зависит от радиуса кривизны оптического элемента, изготовленного из одного материала. Этот размер зависит от показателя преломления материала, из которого изготовлен оптический элемент ( $n_m$ ), и конструкции просветляющего покрытия. При значении коэффициента отражения меньше 1 % возможно получить максимальную зону просветления  $\rho/r = 80\%$  для однослойных покрытий, 82 % — для двуслойных и 81,5 % — для трехслойных. Показано, что с увеличением числа слоев покрытия зона просветления незначительно увеличивается, но работает в более широком диапазоне длин волн. Результаты исследования позволяют сделать вывод, что для увеличения зоны просветления нужно формировать слои с неким заданным распределением геометрической толщины.

**Ключевые слова:** *просветляющее покрытие, зона просветления, оптическая деталь малого радиуса*

**Введение.** Задачи современного оптического приборостроения [1] включают повышение качества оптических систем, уменьшение их веса и габаритов. С этой целью используются малогабаритные оптические элементы. Обычно микрооптические приборы содержат до нескольких десятков оптических элементов с малым радиусом кривизны [2—5].

Задача просветления микрооптических элементов весьма актуальна. Эта задача стоит не только перед разработчиками оптических покрытий, но и перед исследователями, инженерами и создателями оптических систем [6—8]. Развитие оптического приборостроения невозможно без использования новейших интерференционных покрытий. Для повышения эффективности микролинз на их поверхности обычно наносят просветляющие покрытия с целью увеличения коэффициента пропускания каждого оптического элемента и корректировки цветопередачи всей оптической системы [9—12]. В работе [13] исследуется распределение энергетического коэффициента отражения равнотолщинных просветляющих покрытий, формируемых на поверхности оптического элемента малого радиуса. Полученные результаты показали, что система таких покрытий не позволяет получить широкую зону просветления, потому что при формировании покрытий на поверхности оптического элемента малого радиуса при нормальном падении излучения фазовая толщина уменьшается от центра к краю элемента, это нарушает условие просветления. Для того чтобы увеличить область, в которой значение коэффициента отражения постоянно, необходимо найти другой подход, который позволит скорректировать изменение фазовой толщины слоев, формирующих интерференционные

покрытия. Для решения этой задачи в настоящей статье предлагается формировать слои с заданным распределением геометрической толщины.

**Теоретический анализ.** Для решения поставленной задачи использованы теоретические модели, которые описывают спектральные характеристики многослойных интерференционных покрытий.

Рассмотрим схему прохождения излучения через интерференционную систему, расположенную на оптическом элементе малого радиуса кривизны  $r$  (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  $n_m$ . Излучение падает на оптический элемент из воздуха по нормали, т.е.  $n_0 = 1$ . В этом случае для каждой точки, расположенной на поверхности и удаленной от ее центра на некоторое расстояние  $\rho$ , фазовая толщина слоев будет различной из-за большой кривизны оптического элемента. Например, для точек  $A$  и  $B$  фазовая толщина  $i$ -го слоя может быть определена из следующих соотношений [14]:

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

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

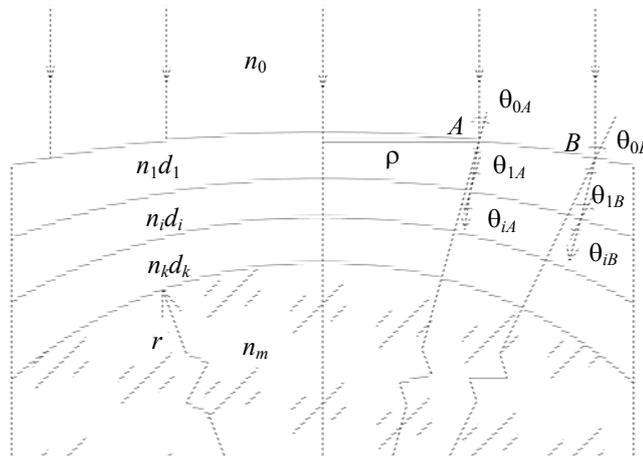


Рис. 1

Если свет падает на прозрачную среду по нормали, то угол падения излучения из воздуха для каждой точки можно рассчитать с помощью схемы прохождения излучения, представленной на рис. 1:

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

Углы распространения излучения в  $i$ -м слое и подложке  $n_m$  определяются согласно закону Снеллиуса:

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

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

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

Из формулы видно, что если значения  $n_i$ ,  $d_i$  и  $\lambda$  постоянны, то с увеличением  $\theta_i$  фазовая толщина будет уменьшаться и это нарушает условие просветления. Для неизменной фазовой толщины необходимо, чтобы толщина слоев различалась в каждой точке детали: это позволит корректировать изменение значения угла падения излучения на поверхность оптического элемента.

Геометрическая толщина слоя может быть определена из отношения:

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

В случае интерференционных покрытий эта величина зависит от конструкции покрытия и показателя преломления оптического материала.

При использовании матричного метода расчета энергетических характеристик тонкослойных интерференционных систем следует учесть, что в случае падения излучения в точку, удаленную от центра оптического элемента на некоторое расстояние  $\rho$ , для компонентов  $s$  и  $p$  матрицы интерференции будут различаться [12]:

$$M^s = \sum_{i=1}^k M_i^s = \begin{bmatrix} m_{11}^s & m_{12}^s \\ m_{21}^s & m_{22}^s \end{bmatrix}, \quad M^p = \sum_{i=1}^k M_i^p = \begin{bmatrix} m_{11}^p & m_{12}^p \\ m_{21}^p & m_{22}^p \end{bmatrix},$$

где  $M_i^s$  и  $M_i^p$  — матрицы интерференции для  $s$  и  $p$  компонентов  $i$ -го слоя:

$$M_i^s = \begin{bmatrix} \cos \varphi_i & \frac{i \sin \varphi_i}{n_i^s} \\ in_i^s \sin \varphi_i & \cos \varphi_i \end{bmatrix}, \quad M_i^p = \begin{bmatrix} \cos \varphi_i & \frac{i \sin \varphi_i}{n_i^p} \\ in_i^p \sin \varphi_i & \cos \varphi_i \end{bmatrix}.$$

Амплитудный коэффициент отражения для  $s$  и  $p$  определяется из следующих соотношений:

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

где  $n^s$  и  $n^p$  — эффективные показатели преломления материалов, из которых изготовлены слои и оптический элемент [15]

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

Энергетический коэффициент отражения для неполяризованного излучения, согласно [15], равен:

$$R = (|r_s|^2 + |r_p|^2) / 2.$$

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, толщина) просветляющего покрытия. В работе исследовано влияние указанных выше факторов на относительный размер зоны, в которой наблюдается максимальное просветление благодаря использованию просветляющих покрытий различных конструкций.

**Основные результаты.** Для определения влияния радиуса кривизны оптического элемента на характер распределения энергетического коэффициента отражения по его поверхности рассмотрим оптический элемент, изготовленный из стекла с показателем преломления  $n_m = 1,75$ , показатель преломления пленкообразующего материала  $n_1 = 1,35$  (покрытие однослойное), рабочая длина волны  $\lambda_0 = 500$  нм, радиусы кривизны различны.

Кривые 1 ( $r=2$  мм), 2 (4 мм), 3 (6 мм) на рис. 2 соответствуют однослойному покрытию, сформированному на оптическом элементе с равнотолщинным покрытием  $d_1 = \lambda_0 / (4n_1)$ , кривые 4 ( $r=2$  мм), 5 (4 мм), 6 (6 мм) — покрытию с заданным распределением геометрической толщины по поверхности оптического элемента, описанной формулой (1). В первом случае фазовая толщина зависит от угла падения излучения на поверхность оптического элемента,

во втором  $\varphi_1 = \pi/2$ , при этом изменяется только геометрическая толщина. Из рисунка видно, что для оптических элементов с различным значением  $r$  зона с минимальным коэффициентом отражения (в относительных единицах) постоянна. Энергетический коэффициент отражения меньше одного процента (зона просветления) при  $\rho/r = 73\%$  для равнотолщинного покрытия, а  $\rho/r = 80\%$  для покрытия с заданным распределением геометрической толщины  $n_m = 1,75$ . Вне этой зоны наблюдается существенное увеличение коэффициента отражения.

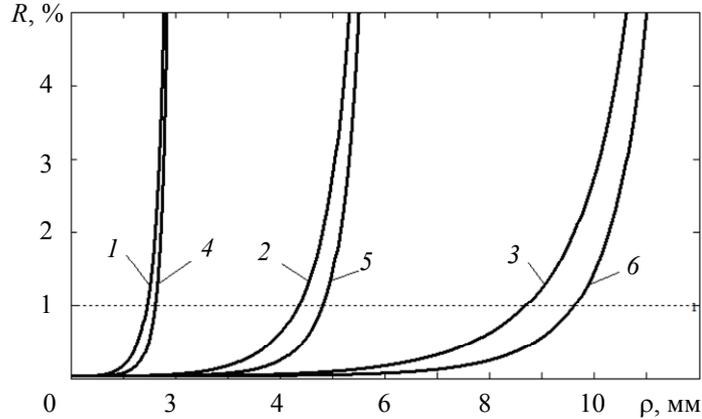


Рис. 2

В работе также рассмотрено распределение энергетического коэффициента отражения многослойных просветляющих покрытий по поверхности оптического элемента разного радиуса: двуслойного, сформированного из материала с  $n_1 = 1,45$  и  $n_2 = 1,90$  на оптическом элементе, изготовленном из материала с показателем преломления  $n_m = 1,52$ , и трехслойного с показателями преломления  $n_1 = 1,35$ ,  $n_2 = 2,00$ ,  $n_3 = 1,80$ ,  $n_m = 1,52$ , рабочая длина волны  $\lambda_0 = 500$  нм. Результаты исследования приведены в таблице.

Относительный размер зоны просветления (%) для разных типов покрытий

Тип покрытия	Покрытия, сформированные из слоев равной геометрической толщины	Покрытия с расчетным распределением толщины (1)
Двуслойное	66	79
Трехслойное	76	81

Из таблицы видно, что относительный размер зоны просветления многослойных просветляющих покрытий по поверхности оптического элемента с радиусом 2, 6 и 12 мм для указанной конструкции просветляющего покрытия увеличивается на 13 % при формировании слоев с заданным распределением, а для трехслойного покрытия этот размер увеличивается на 5 %.

Рассмотрим, как влияет показатель преломления материала, из которого изготовлен оптический элемент, на размер зоны просветления при одинаковой конструкции просветляющего покрытия, геометрическая толщина которого меняется согласно формуле (1). Проанализируем распределение энергетического коэффициента отражения однослойного, двуслойного и трехслойного просветляющего покрытия по поверхности оптического элемента с  $r = 2$  мм на длине волны  $\lambda = \lambda_0 = 500$  нм. Для работы в видимой области используются оптические материалы с  $n = 1,45—2,20$ .

На рис. 3, а представлено распределение энергетического коэффициента отражения однослойного просветляющего покрытия. Показатель преломления материала, из которого изготовлен слой,  $n_1 = 1,35$ ; материала, из которого изготовлен оптический элемент,  $1 — n_m = 1,45$ ;  $2 — 1,75$ ;  $3 — 2,20$ ; фазовая толщина слоя  $\varphi_1 = \pi/2$ . В случае  $n_m = 1,75$  зона просветления максимальна:  $\rho/r = 0,80$ .

На рис. 3, б показано распределение энергетического коэффициента отражения двуслойного просветляющего покрытия, конструкция которого выбрана по диаграмме Шустера [15]:

$n_1 = 1,35$ ,  $n_2 = 1,65$ . Кривая 1 соответствует системе  $\varphi_1 = 1,404$  и  $\varphi_2 = 2,012$ , сформированной на детали, изготовленной из материала с  $n_m = 1,45$ ; кривая 2 —  $\varphi_1 = 0,993$  и  $\varphi_2 = 0,935$  — системе, сформированной на детали, изготовленной из материала с  $n_m = 2,20$ . Показано, что относительный размер зоны просветления составляет  $\rho/r = 82\%$  для  $n_m = 1,45$  и  $78\%$  — для  $n_m = 2,20$ , т.е. с увеличением показателя преломления подложки относительный размер зоны просветления уменьшается на  $4\%$ .

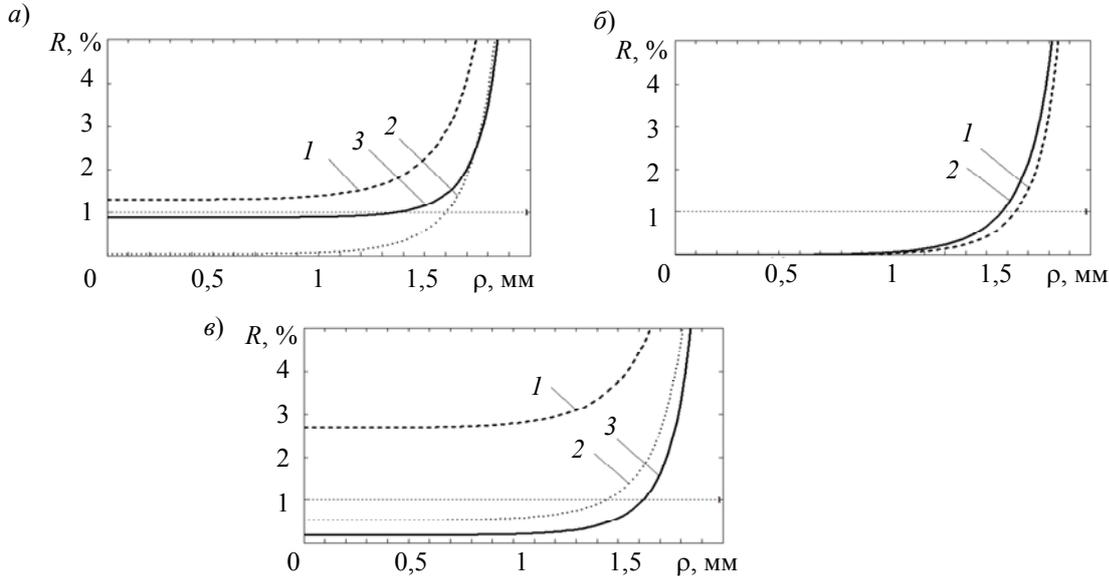


Рис. 3

На рис. 3, в приведено распределение для трехслойного покрытия,  $n_1 = 1,35$ ,  $n_2 = 1,90$ ,  $n_3 = 2,00$ ;  $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \pi/2$  (1 —  $n_m = 1,45$ , 2 —  $1,75$ , 3 —  $2,20$ );  $\rho/r = 81\%$  для  $n_m = 2,20$ ;  $78,5\%$  — для  $n_m = 1,75$ , а для  $n_m = 1,45$  минимальный коэффициент отражения больше  $1\%$ , т.е. на этом материале нельзя получить эффект просветления, используя такой вид покрытия.

Величина энергетического коэффициента отражения оптического элемента зависит не только от показателя преломления материала, из которого изготовлен оптический элемент, но и от конструкции просветляющего покрытия. Рассмотрим влияние конструкции покрытия на относительный размер зоны просветления трехслойного просветляющего покрытия, изготовленного из пленкообразующего материала с показателем преломления  $n_1 = 1,45$ ;  $n_2 = 2,00$ ;  $n_3 = 1,80$  (рис. 4, кривая 1) и  $n_1 = 1,35$ ;  $n_2 = 2,10$ ;  $n_3 = 1,65$  (2), на оптическом элементе  $r=2$  мм, изготовленном из стекла с показателем преломления  $n_m = 1,52$ . Фазовая толщина для двух конструкций одинакова:  $\varphi_1 = \varphi_3 = \pi/2$ ,  $\varphi_2 = \pi$ .

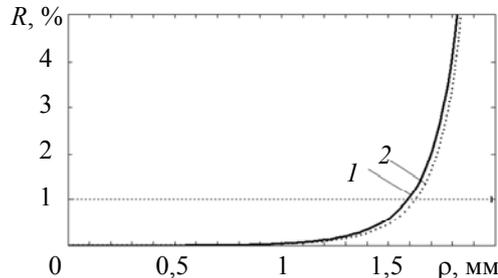


Рис. 4

Как видно из рисунка, относительный размер зоны просветления составляет  $79,5\%$  (кривая 1) и  $81,5\%$  (2), т.е. значение относительного размера зоны просветления зависит от показателя преломления каждого слоя покрытия.

**Заключение.** Анализ показал, что относительная зона минимального коэффициента отражения постоянна в относительных единицах при изменении радиуса кривизны линзы. При формировании просветляющего покрытия с заданным распределением геометрической тол-

щины слоя максимальное значение относительного размера зоны, при которой энергетический коэффициент отражения меньше 1 %, составляет  $\rho/r = 80$  % для однослойных покрытий, 82% — для двуслойных и 81,5 % — для трехслойных. По сравнению с формированием равнотолщинных покрытий размер зоны просветления увеличивается на 7 % для однослойных покрытий, 16 % — для двуслойных и 5,5 % — для трехслойных.

На увеличение зоны, в которой значение энергетического коэффициента отражения минимально, влияет показатель преломления материалов, из которых изготовлен оптический элемент. При  $n_m = n_1^2$  значение энергетического коэффициента отражения стремится к нулю, в этом случае для однослойного просветляющего покрытия размер зоны просветления максимален. При дальнейшем увеличении показателя преломления материала подложки значение энергетического коэффициента отражения увеличивается, и зона просветления сужается. С увеличением показателя преломления подложки относительный размер зоны просветления уменьшается для двуслойного покрытия (структура которого выбрана согласно диаграмме Шустера), а для трехслойного — увеличивается. Изменение размера зоны просветления зависит от соотношения показателей преломления материалов, из которых формируются слои и изготовлен оптический элемент, для рассмотренного выше двуслойного покрытия зона уменьшается на 4 %.

На размер зоны просветления влияет не только показатель преломления материала, из которого изготовлен оптический элемент, но и структура интерференционной системы. С увеличением числа слоев просветляющего покрытия зона просветления увеличивается и работает в более широком диапазоне длин волн. Ближе к краю оптической детали малого радиуса минимальное значение коэффициента отражения быстро увеличивается. Это явление приводит к „окраске“ оптического элемента.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №14-23-00136).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Herzig H. P.* Micro-Optics: Elements, Systems and Applications. CRC Press, 1997. 600 p.
2. *Rancourt J. D.* Optical Thin Films: User Handbook. Bellingham: SPIE, 1996. 304 p.
3. *Кузин А. А., Заблоцкий А. В., Батулин А. С., Лапшин Д. А., Мелентьев П. Н., Балькин В. И.* Способ создания микролинз диаметром менее 50 нм для нанолитографии методами атомной проекционной оптики // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. 2009. Т. 7, № 1. С. 163—168.
4. *Хрячков В. В., Федосов Ю. Н., Давыдов А. И., Шумилов В. Г., Федько Р. В.* Эндоскопия. Базовый курс лекций. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2012. 160 с.
5. *Хацевич Т. Н., Михайлов И. О.* Эндоскопы: Уч. пособие. Новосибирск: СГГА, 2002. 196 с.
6. *Macleod H. A.* Thin-Film Optical Filters. 4th ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2010. 800 p.
7. *Baumeister P. W.* Optical Coating Technology // SPIE Press monograph, 2004. V. PM137. 840 p.
8. *Grunwald R., Mischke H., Rehak W.* Microlens formation by thin-film deposition with mesh-shaped masks // Appl. Optics. 1999. Vol. 38, N 19. P. 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 // Appl. Optics. 2008. Vol. 47, N 35. P. 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. *Карасев Н. Н., Нужин А. В., Старовойтов С. Ф., Путилин Э. С., Большанин А. Ф., Машехин В. Т., Слободянюк А. А.* Оптические технологии. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. 98 с.

12. Котликов Е. Н., Варфоломеев Г. А., Лавровская Н. П., Тропин А. Н., Хонинева Е. В. Проектирование, изготовление и исследование интерференционных покрытий: Уч. пособие. СПб: ГУАП, 2009.
13. 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. Т. 15, № 2. С. 234—240.
14. Еришов А. В., Машин А. И. Многослойные оптические покрытия. Проектирование, материалы, особенности технологии получения методом электроннолучевого испарения. Н. Новгород: ННГУ, 2006. 99 с.
15. Путилин Э. С. Оптические покрытия: Уч. пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. 227 с.

**Сведения об авторах**

- Людмила Александровна Губанова** — д-р техн. наук, доцент; Университет ИТМО; кафедра оптоинформационных технологий и материалов; E-mail: la7777@mail.ru
- Лонг Тхань Хоанг** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра оптоинформационных технологий и материалов; E-mail: xuanson\_langmoi\_dl@yahoo.com

Рекомендована кафедрой  
оптоинформационных технологий и  
материалов

Поступила в редакцию  
18.04.16 г.

**Ссылка для цитирования:** Губанова Л. А., Хоанг Тхань Лонг. Увеличение зоны просветления оптического элемента малого радиуса путем нанесения покрытий с заданным распределением толщины // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 10. С. 860—866.

**EXTENDING ENLIGHTENMENT AREA OF SMALL-SIZE OPTICAL ELEMENT BY COATING  
WITH A SPECIFIED THICKNESS DISTRIBUTION**

**L. A. Gubanova, Long Thanh Hoang**

*ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia  
E-mail: la7777@mail.ru*

Anti-reflection coating formed by layers with specified distribution of geometric thickness on the surface of optical elements of a very small radius (2—12 mm), is investigated. Distribution of the energy reflection coefficient along the optical element surface is studied. It is revealed that for the given coating structure, the relative size of the enlightenment area defined as the ratio of the radius for the optical element surface where the reflection is less than a certain value ( $\rho$ ) to the element radius ( $r$ ), is independent of the curvature radius of the optical element made of homogeneous material. The relative size  $\rho/r$  depends of the refractive index of the optical element material and of the antireflection coating design. For the reflection coefficient of less than 1 %, it is possible to obtain the maximum enlightenment area of relative size  $\rho/r = 80$  % with single layer coating,  $\rho/r = 82$  % with double-layer coating, and  $\rho/r = 81.5$  % with three-layer coating. It is shown that multiplying the number of coating layers allows for insignificant extension of the enlightenment area, but makes the coating applicable in a wider range of wavelengths. It is concluded that for extending the enlightenment area, formation of coating layers with a specified distribution of geometric thickness is required.

**Keywords:** anti-reflective coating, area of enlightenment, small-radius optical detail

**Data on authors**

- Ludmila A. Gubanova** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Optical Information Technologies and Materials; E-mail: la7777@mail.ru
- Long Tkhan Hoang** — Post-Graduate Student, ITMO University, Department of Optical Information Technologies and Materials; E-mail: xuanson\_langmoi\_dl@yahoo.com

**For citation:** Gubanova L. A., Hoang Long Thanh. Extending enlightenment area of small-size optical element by coating with a specified thickness distribution // Izv. vuzov. Priborostroenie. 2016. Vol. 59, N 10. P. 860—866 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-10-860-866