

УСЛОВИЕ ПОЛУЧЕНИЯ ПОСТОЯННОГО КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ОТ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ БОЛЬШОЙ КРИВИЗНЫ

ХОАНГ ТХАНЬ ЛОНГ, Л. А. ГУБАНОВА, НГУЕН ВАН БА

Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: la7777@mail.ru

Рассмотрен способ увеличения размера зоны просветления, определенного как отношение радиуса зоны поверхности оптического элемента, в которой отражение меньше некоторой величины, к радиусу элемента (ρ/R). Увеличение достигается за счет использования круглой диафрагмы, находящейся между испарителем и подложкой, которая экранирует часть молекулярного потока испаряемого вещества и перераспределяет его на заданном участке поверхности оптической детали. Показано, что размер зоны просветления увеличивается на 17 % при формировании однослойного просветляющего покрытия с показателем преломления $n_1 = 1,35$ на поверхности оптической детали большой кривизны (радиус $R = 10$ мм), изготовленной из материала с показателем преломления $n_m = 1,52$. Проанализированы факторы, влияющие на размер зоны просветления, при использовании круглой диафрагмы; показано распределение энергетического коэффициента отражения однослойного просветляющего покрытия по поверхности оптического элемента большой кривизны.

Ключевые слова: просветляющее покрытие, зона просветления, оптическая деталь большой кривизны, диафрагма

Введение. В работе [1] исследовано распределение энергетического коэффициента отражения равнотолщинных просветляющих покрытий, формируемых на поверхности оптического элемента малого радиуса (2—12 мм). Полученные результаты показали, что система таких покрытий не позволяет получить большой размер зоны просветления, определенный как отношение радиуса зоны поверхности оптического элемента, в которой отражение меньше некоторой величины, к радиусу самого элемента (ρ/R), потому что при формировании покрытий на поверхности оптического элемента большой кривизны при нормальном падении излучения фазовая толщина уменьшается от центра к краю элемента, это нарушает условие просветления. Для того чтобы увеличить область, в которой значение энергетического коэффициента отражения постоянно, необходимо формировать слои, распределение толщины которых позволит корректировать изменение фазовой толщины слоев, формирующих интерференционные покрытия. Такие интерференционные слои [2] имеют заданное распределение геометрической толщины, которая плавно увеличивается вдоль радиальной координаты оптической детали по некому закону. Исследование распределения энергетического коэффициента отражения по поверхности оптического элемента, на которой сформированы такие слои, показало, что для коэффициента меньше 1 % возможно получить максимальную зону просветления $\rho/R > 80$ %. Обычно при формировании слоя на поверхностях сферической детали большой кривизны (малого радиуса) в вакуумной установке толщина его уменьшается от центра к краю оптической детали, а получение слоя, геометрическая толщина которого постепенно увеличивается по поверхности детали, практически невозможно.

В настоящей работе рассмотрен способ увеличения размера зоны просветления, а также проанализировано влияние распределения заданной толщины слоя на размер зоны просветления по поверхности сферического элемента при использовании круглой диафрагмы [3—6], находящейся между испарителем и подложкой, экранирующей часть молекулярного потока

испаряемого вещества и перераспределяющей его на заданном участке поверхности оптической детали.

Постановка задачи. При формировании слоев на сферических поверхностях оптической детали большой кривизны методом термического испарения пленкообразующих материалов в вакуумной установке ВУ-2М без применения диафрагмы (экрана) толщина слоев уменьшается от центра к краю оптического элемента [7—11]. Уменьшение геометрической толщины слоя при увеличении радиальной координаты ρ по поверхности оптической детали зависит от ряда параметров: расстояния от полюса подложки до плоскости, в которой расположен испаритель H ; расстояния от плоскости, в которой расположена диафрагма, до плоскости, в которой расположен испаритель h ; радиуса кольцевого поверхностного испарителя (расстояния от испарителя до оси вращения детали) a . С уменьшением геометрической толщины слоя при увеличении ρ коэффициент отражения быстро увеличивается и размер зоны просветления будет незначительным.

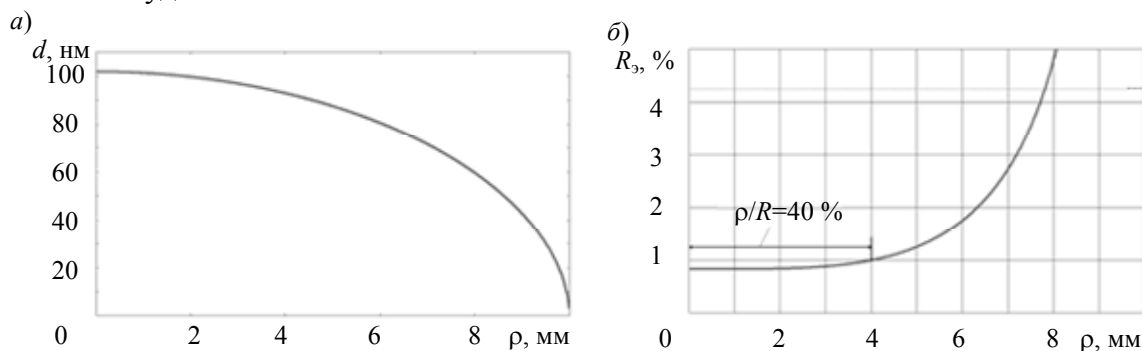


Рис. 1

В качестве примера можно рассмотреть зависимость распределения геометрической толщины слоя d (рис. 1, а) и энергетического коэффициента отражения R_3 (рис. 1, б) однослойного просветляющего покрытия на выпуклой поверхности сферической детали радиуса $R=10$ мм (координата по поверхности $\rho_0 = 10$ мм) от радиальной координаты, при показателе преломления воздуха $n_0 = 1,0$, слоя $n_1 = 1,35$, материала детали $n_m = 1,52$, $\lambda = \lambda_0 = 550$ нм. Геометрическая толщина слоя в центре такова, что $H = 460$ мм, $a = 230$ мм. Оптическая толщина слоя в центральной зоне формируется таким образом, что выполняется соотношение $d_1 = \lambda_0/(4n_1)$, и она постепенно уменьшается с удалением от центра детали так, как показано на рис. 1, б.

Как видно из рис. 1, б, в центральной зоне оптической детали значение R_3 минимально, так как здесь выполняется условие просветления для однослойного покрытия оптической толщиной $n_1 d_1 = \lambda_0/4$. При удалении от центра детали значение R_3 быстро возрастает из-за уменьшения геометрической толщины и увеличения угла падения излучения; $R_3 < 1\%$ для $\approx \rho/R = 40\%$. Для увеличения размера зоны просветления необходимо обеспечить возрастание толщины слоя на краю оптической детали и корректировать изменение фазовой толщины в этой зоне.

Способ увеличения размера зоны просветления. Для увеличения ρ/R целесообразно использовать комбинированный слой: сначала на поверхности сферической детали формируется слой без применения диафрагмы, оптическая толщина которого в центральной зоне детали выбрана по условию просветления, а затем на край оптической детали, в зоне которого коэффициент отражения существенно увеличивается, наносится дополнительный слой с таким же показателем преломления. Суммарная толщина слоев на краю оптической детали увеличивается, при этом комбинированный слой корректирует изменение фазовой толщины так, что значение ρ/R возрастает. Дополнительный слой следует формировать, используя диафрагму, которая экранирует часть потока испаряемого вещества, падающего на центральную

зону: в нем толщина слоя остается прежней, а на краю формируется слой, распределение толщины которого определяется по следующей формуле [12—15]:

$$d/d_0 = \frac{(H^2 + a^2)^2}{\pi H^2} \left[\frac{(ED - CF) \sin \varphi_0}{(E^2 - F^2)(E + F \cos \varphi_0)} + \frac{2(CE - DF)}{(E^2 - F^2)^{3/2}} \operatorname{arctg} \left[\sqrt{\frac{E - F}{E + F}} \operatorname{tg} \left(\frac{\varphi_0}{2} \right) \right] \right], \quad (1)$$

$$C = \frac{Z_p(Z_p \sqrt{R^2 - \rho^2} \mp \rho^2)}{R}, \quad D = \frac{\pm \rho a Z_p}{R}, \quad E = a^2 + \rho^2 + Z_p^2, \quad F = -2a\rho, \quad z_p = H \pm (R - \sqrt{R^2 - \rho^2}),$$

φ_0 — угол, определяющий зону видимости на поверхности оптической детали от испарителя, d_0 — толщина слоя при $\rho=0$, r_d — радиус диафрагмы, R — радиус сферической детали, ρ — радиальная координата любой точки на поверхности сферической детали ($0 \leq \rho \leq \rho_0$).

Схема комбинированного слоя представлена на рис. 2.

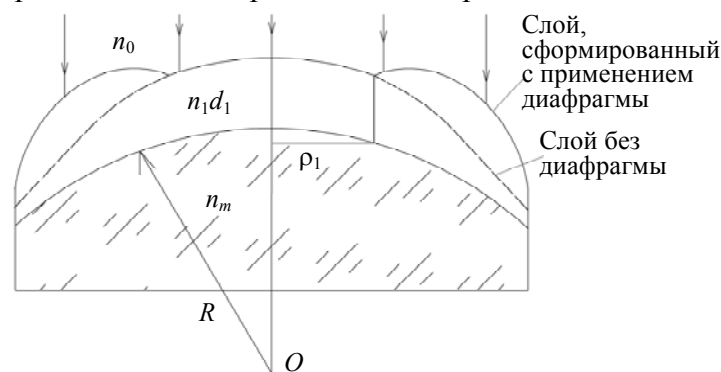


Рис. 2

Для примера рассмотрим описанную структуру однослойного просветляющего покрытия при формировании дополнительного слоя с использованием той же оснастки вакуумной камеры $H = 460$ мм, $a = 230$ мм. Дополнительный слой формируется от радиальной координаты $\rho_1 = 3$ мм при использовании диафрагмы радиусом $r_d = 5,66$ мм, которая расположена на расстоянии $h = 443,34$ мм от плоскости, в которой расположен испаритель. На рис. 3 представлено распределение геометрической толщины слоя (а) и энергетического коэффициента отражения (б) однослойного просветляющего покрытия по поверхности оптического элемента.

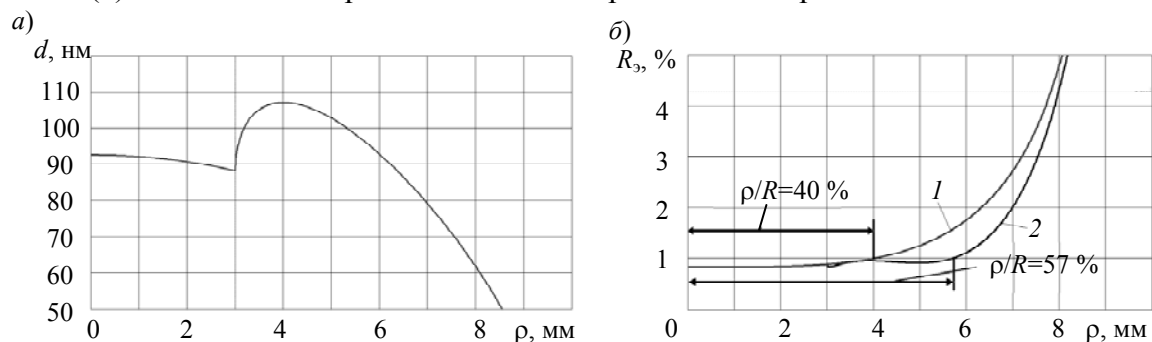


Рис. 3

Как видно из рис. 3, б, формирование слоя при применении диафрагмы (кривая 2) существенно увеличивает зону просветления — до 57 %, в то время как без использования диафрагмы (1) $\rho/R \approx 40$ %.

Анализ факторов, влияющих на размер зоны просветления. При формировании комбинированного слоя на поверхностях сферической детали большой кривизны на размер зоны просветления влияют следующие факторы:

- размер области постоянной толщины, в которой слой формируется без применения диафрагмы и энергетический коэффициент отражения считается постоянным, соответствующей $\rho=0-\rho_1$ (рис. 2);
- профиль, полученный с применением диафрагмы (рис. 2);
- конструкция просветляющего покрытия.

В качестве примера было рассмотрено просветляющее однослойное покрытие для оптических элементов, изготовленных из оптического стекла марки ТК21 ($n_m = 1,65$), для разных размеров области постоянной толщины, в которой слой формируется без применения диафрагмы, ограниченной радиальными координатами $0-\rho_1$.

На рис. 4 показано распределение энергетического коэффициента отражения однослойного просветляющего покрытия на выпуклой поверхности оптического элемента для разных значений ρ_1 . Слой формируется при следующих условиях: $R = 10$, $\rho_0 = 10$, $H = 460$, $a = 230$ мм, $n_0 = 1,0$, $n_1 = 1,35$, $n_m = 1,65$, $\lambda = \lambda_0 = 550$ нм. Кривая 1 соответствует $\rho_1 = 2$ мм и положению диафрагмы радиусом $r_d = 6,09$ мм на высоте $h = 444,15$ мм, кривая 2 — $\rho_1 = 3$, $h = 443,34$, $r_d = 5,66$ мм; 3 — $\rho_1 = 4$, $h = 442,59$, $r_d = 5,26$ мм. Видно, что зона просветления, в которой $R_s < 1\%$, увеличивается при увеличении области постоянной толщины в центре.

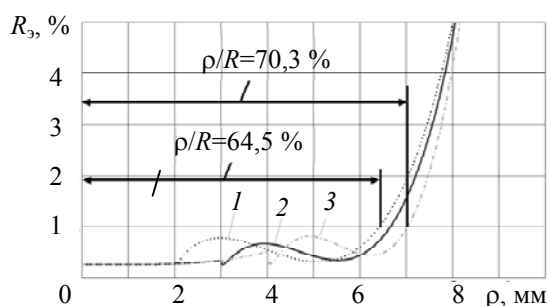


Рис. 4

Согласно формуле (1), при изменении геометрических параметров оснастки, таких как H , h , a и r_d , могут быть получены два вида профиля толщины слоя. В первом случае диафрагма экранирует поток испаряемого вещества так, что слой формируется в диапазоне $\rho_1 \leq \rho \leq \rho_2$, во втором случае слой может быть сформирован от координаты ρ_1 до края оптической детали и зона просветления будет шире, так как от максимума толщина дополнительного слоя плавно уменьшается и энергетический коэффициент отражения незначительно увеличивается.

Для примера на рис. 5, а представлены распределения геометрической толщины просветляющего однослойного покрытия на выпуклой поверхности оптической детали. Слой формируется при следующих геометрических параметрах вакуумной оснастки: $H = 460$ мм, $a = 230$ мм на выпуклой поверхности детали с радиусом кривизны $R = 10$ мм и $\rho_0 = 10$ мм. В первом случае круглая диафрагма с $r_d = 1,36$ мм расположена на высоте $h = 451,84$ мм от плоскости, в которой расположен испаритель. Эта диафрагма экранирует поток испаряемого вещества так, что переменный слой может быть сформирован на площади, ограниченной $\rho_1 = 3$ и $\rho_2 = 7$ мм (кривая 1). Во втором случае (кривая 2) $h = 443,34$ и $r_d = 5,66$ мм, здесь, как было описано выше, поток испаряемого вещества проходит так, что переменный слой не ограничен радиальной координатой ρ_2 на краю оптической детали; $n_0 = 1,0$, $n_1 = 1,35$, $n_m = 1,65$, $\lambda = \lambda_0 = 500$ нм, в центральной зоне оптической детали оптическая толщина слоя $n_1 d_1 = \lambda_0/4$.

На рис. 5, б представлено распределение энергетического коэффициента отражения рассмотренных структур просветляющего покрытия при двух профилях распределения геометрической толщины слоя по поверхности оптической детали выпуклой формы. Во втором случае (кривая 2) зона просветления с $R_s < 1\%$ увеличивается на 4,2 % по сравнению с первым.

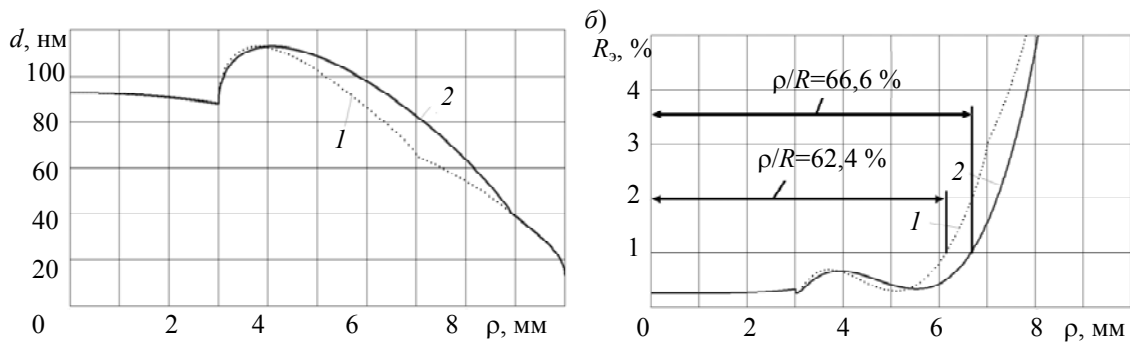


Рис. 5

На размер зоны просветления влияет структура просветляющего покрытия для выбранной оптической детали. На рис. 6 показано влияние показателя преломления пленкообразующего материала (n_1) однослойного просветляющего покрытия на распределение энергетического коэффициента отражения на выпуклой поверхности оптической детали с $R = 10$, $\rho_0 = 10$ мм. Условия, при которых формировался рассматриваемый слой, следующие: $H = 460$, $a = 230$, $r_d = 5,66$, $h = 443,34$, $\rho_1 = 3$ мм. Слой сформирован на поверхности оптического элемента, изготовленного из материала с показателем преломления $n_m = 1,75$ (ТФ4), при $\lambda = \lambda_0 = 550$ нм. Кривая 1 соответствует слою, изготовленному из материала с показателем преломления 1,35 (MgF_2), 2 — 1,40 (CaF_2), 3 — 1,46 (SiO_2). Как видно из рис. 6, чем меньше нарушается условие просветления для однослойного покрытия [7], тем меньше энергетический коэффициент отражения в центральной зоне, а зона просветления шире. Действительно, при $R_3 < 1\%$ для слоя, изготовленного из MgF_2 , $\rho/R = 67,2\%$; CaF_2 — 65,6%; SiO_2 — 20,3%.

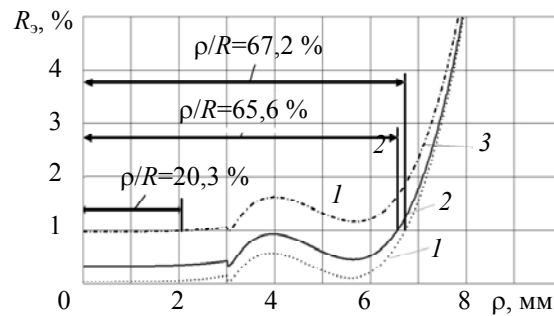


Рис. 6

Заключение. В работе рассмотрен способ увеличения размера зоны просветления на поверхностях оптической детали большой кривизны за счет формирования на ней слоя с заданным распределением толщины. Суть способа заключается в том, что на краю оптической детали большой кривизны, в зоне которой энергетический коэффициент отражения быстро увеличивается, на слой, сформированный без использования диафрагмы, наносится слой такого же материала.

Показано, что на размер зоны просветления влияют размер области постоянной толщины, в которой слой формируется без применения диафрагмы; профиль, сформированный с применением диафрагмы, и конструкция просветляющего покрытия. Также в работе приведены примеры распределения энергетического коэффициента отражения однослойного просветляющего покрытия по поверхности оптического элемента большой кривизны, полученные для разных материалов при разных условиях формирования слоев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.

2. Губанова Л. А., Хоанг Т. Л. Увеличение зоны просветления оптического элемента малого радиуса путем нанесения покрытий с заданным распределением толщины // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 10. С. 860—866.
3. Губанова Л. А. Градиентные интерференционные системы: Дис. ... докт. техн. наук. СПб: СПбИТМО, 2008. 243 с.
4. Gubanova L. A., Putilin E. S. Forming gradient layers on spherical substrates // J. of Optical Technology. 2008. Vol. 75, N 4. P. 278—281.
5. Дмитренко В. А. Технология получения тонкопленочных покрытий с переменным отражением: Дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2003. 153 с. РГБ ОД, 61:04-5/2003.
6. 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.
7. Путилин Э. С. Губанова Л. А. Оптические покрытия. СПб: Лань, 2016. 268 с.
8. Baumeister P. W. Optical Coating Technology. SPIE Press monograph, 2004. 840 p.
9. Кузин А. А., Заблоцкий А. В., Батулин А. С., Лапшин Д. А., Мелентьев П. Н., Балыкин 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.
10. Петухов В. Ю., Гумаров Г. Г. Ионно-лучевые методы получения тонких пленок: Учеб.-метод. пособие для студ. физ. ф-та. Казань, 2010. 87 с.
11. Борисенко В. Е., Воробьева А. И. Нанoeлектроника. Ч. 2. Мн.: БГУИР, 2003. 77 с.
12. Macleod H. A. Thin-Film Optical Filters. 4th ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2010. 800 p.
13. Herzig H. P. Micro-Optics: Elements, Systems and Applications. CRC Press, 1997. 600 p.
14. Holland L. Vacuum Deposition of Thin-Films. London: Chapman and Hall, 1966.
15. Губанова Л. А. Формирование градиентных слоев на сферических подложках // Оптический журнал. 2008. Т. 75, № 4. С. 87—91.

Сведения об авторах

- | | |
|---------------------------------------|---|
| Хоанг Тхань Лонг | — аспирант; Университет ИТМО, кафедра оптоинформационных технологий и материалов; E-mail: dragonitmo@gmail.com |
| Людмила Александровна Губанова | — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, кафедра оптоинформационных технологий и материалов; E-mail: la7777@mail.ru |
| Нгуен Ван Ба | — аспирант; Университет ИТМО, кафедра оптоинформационных технологий и материалов; E-mail: thulavang@gmail.com |

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных средств

Поступила в редакцию
15.04.17 г.

Ссылка для цитирования: Хоанг Тхань Лонг, Губанова Л. А., Нгуен Ван Ба. Условие получения постоянного коэффициента отражения от сферических поверхностей большой кривизны // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 12. С. 1177—1183.

THE CONDITION FOR OBTAINING A CONSTANT REFLECTION COEFFICIENT FROM SPHERICAL SURFACES OF GREAT CURVATURE

Hoang Thanh Long, L. A. Gubanova, Nguyen Van Ba

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

A method is proposed to increase the size of enlightenment area defined as the ratio of the radius for the optical element surface, where the reflection is less than a certain value, to the element radius. The increase is achieved due to the use of a circular diaphragm, located between the evaporator and the substrate, which shields a part of the evaporated molecular flow and redistributes it over a specified portion on surface of the optical element. It is shown that the size of the enlightenment area increases by 17% when a single-layer antireflection coating with refractive index $n_l = 1,35$ is formed on the surface of large-curvature optical element (radius $R = 10$ mm) made of a material with the refractive index $n_m = 1,52$.

Analysis of factors influencing the size of the enlightenment area is carried out for the case when a circular diaphragm is used, and distribution of the reflection coefficient of single-layer antireflection coating over the surface of large-curvature optical element is demonstrated.

Keywords: anti-reflective coating, area of enlightenment, large-curvature optical detail, diaphragm

Data on authors

- | | | |
|----------------------------|---|--|
| Hoang Thanh Long | — | Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Optical Information Technologies and Materials; E-mail: dragonitmo@gmail.com |
| Ludmila A. Gubanova | — | Dr. Sci, Professor; ITMO University, Department of Optical Information Technologies and Materials; E-mail: la7777@mail.ru |
| Nguyen Van Ba | — | Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Optical Information Technologies and Materials; E-mail: thulavang@gmail.com |

For citation: Hoang Thanh Long, Gubanova L. A., Nguyen Van Ba. The condition for obtaining a constant reflection coefficient from spherical surfaces of great curvature. *Journal of Instrument Engineering*. 2017. Vol. 60, N 12. P. 1177—1183 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-12-1177-1183