

УДК 681.7.064

МНОГОСЛОЙНЫЕ АНТИБЛИКОВЫЕ ПОКРЫТИЯ С ТОНКИМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ СЛОЯМИ

Ю.А. Константинова^а, Л.А. Губанова^а

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: llaavvee@list.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 26.10.15, принята к печати 11.01.16

doi:10.17586/2226-1494-2016-16-2-375-378

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Константинова Ю.А., Губанова Л.А. Многослойные антибликовые покрытия с тонкими металлическими слоями // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 2. С. 375–378. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-2-375-378

Аннотация

Предложены конструкции антибликовых покрытий для металлических поверхностей Al, Ti, Ni, Cr. Покрытия представляют собой чередующиеся слои диэлектрик–металл–диэлектрик с числом ячеек до 15. Предложена методика расчета подобных покрытий. Рассчитаны покрытия вида $[\text{HfO}_2/\text{Cr}/\text{HfO}_2]^{15}$, $[\text{ZrO}_2/\text{Ti}/\text{Al}_2\text{O}_3]^{15}$, $[\text{ZrO}_2/\text{Cr}/\text{ZrO}_2]^{15}$. Показано, что предложенные интерференционные покрытия обеспечивают снижение остаточного коэффициента отражения на металле в несколько раз (от 3,5 до 6,0) в широком спектральном диапазоне (300–1000 нм). Предложенные покрытия могут быть рекомендованы в качестве антибликовых покрытий энергосберегающих солнечных систем и батарей, а также для фотоэлектрических преобразователей.

Ключевые слова

антибликовое покрытие, тонкие слои, металлическая поверхность, коэффициент отражения

Благодарности

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке Российского научного фонда (соглашение № 14-23-00136)

ANTIREFLECTION MULTILAYER COATINGS WITH THIN METAL LAYERS

Yu.A. Konstantinova^а, L.A. Gubanova^а

^а ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: llaavvee@list.ru

Article info

Received 26.10.15, accepted 11.01.16

doi:10.17586/2226-1494-2016-16-2-375-378

Article in Russian

For citation: Konstantinova Yu.A., Gubanova L.A. Antireflection multilayer coatings with thin metal layers. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 375–378. doi:10.17586/2226-1494-2016-16-2-375-378

Abstract

The design of anti-reflective coatings for metal surfaces of Al, Ti, Ni, Cr is proposed. The coatings have the form of alternating layers of dielectric/metal/dielectric with the number of cells up to 15. The method of calculation of such coatings is proposed. We have calculated the coatings of the type $[\text{HfO}_2/\text{Cr}/\text{HfO}_2]^{15}$, $[\text{ZrO}_2/\text{Ti}/\text{Al}_2\text{O}_3]^{15}$, $[\text{ZrO}_2/\text{Cr}/\text{ZrO}_2]^{15}$. It is shown that the proposed interference coatings provide reduction of the residual reflectance of the metal several times (from 3.5 to 6.0) in a wide spectral range (300–1000 nm). The proposed coatings can be recommended as anti-reflective coatings for energy saving solar systems and batteries, and photovoltaic cells.

Keywords

anti-reflective coating, thin layers, metal surface, reflection coefficient

Acknowledgements

The work is financially supported by the Government of the Russian Federation and the Russian Scientific Foundation (Agreement No. 14-23-00136)

Развитие новых технологий, усложнение конструкций интерференционных покрытий, появление более точных методов контроля толщины слоев в процессе их изготовления позволили создавать достаточно тонкие слои (геометрическая толщина может составлять $d_{\min}=2$ нм), которые смогут вносить свой вклад в выходные характеристики разрабатываемых многослойных покрытий. На границе двух сред с разными показателями преломления наблюдается некоторое отражение, определяемое формулой Френеля

[1]. Формирование на рассматриваемой границе тонкослойных структур изменяет этот коэффициент. Когда структура выполняет функцию антибликового покрытия, наблюдается снижение коэффициента отражения. Он достигает некой величины и носит название остаточного коэффициента отражения. Уменьшение коэффициента отражения от границы раздела металл–воздух возможно при использовании интерференционного покрытия, которое сформировано из чередующихся слоев металлов и диэлектриков [2]. Антибликовые покрытия наносятся в целях увеличения эффективности работы солнечных батарей [3], нейтральных фильтров, фотоэлектрических преобразователей [4] и других элементов.

Для создания антибликовых покрытий применяют пленки нитрида кремния и диоксида титана [5, 6], керметные пленки [7], структуры со слоями из фторида магния [8], светопоглощающие покрытия на основе углеродных нанотрубок [9] и покрытия с металлическими наночастицами [10]. В настоящей работе представлены структуры многослойных покрытий, состоящих из чередующихся тонких металлических и диэлектрических слоев. За счет наличия поглощения в металлических слоях такие структуры, по сравнению с покрытиями только из диэлектрических слоев, позволяют существенно снизить коэффициент отражения металлических поверхностей.

Для расчета остаточного коэффициента отражения авторами использован матричный метод [11]. При нормальном падении света на границу раздела двух сред с разными показателями преломления амплитудный коэффициент отражения изотропного, однородного, бесконечно протяженного плоскопараллельного слоя равен

$$r = \frac{(n_0 m_{11} - n_p m_{22}) + i(n_0 n_p m_{12} - m_{21})}{(n_0 m_{11} + n_p m_{22}) + i(n_0 n_p m_{12} + m_{21})}, \quad (1)$$

где m_{11} , m_{12} , m_{21} , m_{22} – элементы матрицы интерференции преобразования электромагнитного излучения, которая иногда в литературе называется матрицей интерференции [12]; n_0 , n_p – показатели преломления сред, из которых распространяется излучение, и на которых расположен слой. Рассмотрим структуры покрытия, состоящие из чередующихся диэлектрических и металлических слоев. Предположим, что это покрытие формируется из повторяющихся элементарных симметричных ячеек, состоящих из трех слоев – диэлектрик–металл–диэлектрик, и они повторяются L раз. Фазовые толщины каждого слоя этой ячейки соответственно равны $\varphi_1 = \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda L}$, $\varphi_2 = \frac{2\pi(n_2 - ik_2)d_2}{\lambda L}$, $\varphi_3 = \frac{2\pi n_3 d_3}{\lambda L}$, где λ – длина волны; n_1 , n_3 – показатели преломления соответствующих диэлектриков; n_2 – показатель преломления металлического слоя; k_2 – коэффициент поглощения; d_1 , d_2 , d_3 – геометрические толщины соответствующих слоев. Тогда матрицы интерференции каждого слоя будут иметь следующий вид:

$$\mathbf{M}_1 = \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 & \frac{i}{n_1} \sin \varphi_1 \\ in_1 \sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 \end{pmatrix}^L;$$

$$\mathbf{M}_2 = \begin{pmatrix} \cos \varphi_2 & \frac{i}{n_2 - ik_2} \sin \varphi_2 \\ i(n_2 - ik_2) \sin \varphi_2 & \cos \varphi_2 \end{pmatrix}^L;$$

$$\mathbf{M}_3 = \begin{pmatrix} \cos \varphi_3 & \frac{i}{n_3} \sin \varphi_3 \\ in_3 \sin \varphi_3 & \cos \varphi_3 \end{pmatrix}^L.$$

Матрица, характеризующая всю структуру интерференционного покрытия, может быть определена следующим образом [11]:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{M}_2 \cdot \mathbf{M}_3.$$

Элементы результирующей матрицы используются для расчета амплитудного коэффициента отражения r по формуле (1). Остаточный коэффициент отражения, оценка которого производилась в работе, выражен через следующую закономерность:

$$R = |r|^2.$$

Расчеты остаточного коэффициента отражения для различных сочетаний диэлектриков и металлов выполнены с использованием пакетов программ MathCAD и Matlab. При формировании покрытия в качестве диэлектриков использованы тугоплавкие окислы: оксид гафния HfO_2 , оксид циркония ZrO_2 , оксид алюминия Al_2O_3 ; металлические слои формируются из металлов – алюминий, титан, никель, хром. Металлы выбирались из технологических возможностей формирования тонких слоев в вакууме, их стоимости и химической стабильности. Расчеты реализовывались при условии, что толщина металла, на котором формируется покрытие, в тысячи раз превосходит толщину металлов в покрытии. Это действительно так, поскольку толщины слоев составляют доли длины волны видимого диапазона, а толщина де-

талей из металлов измеряется в миллиметрах. Повторяющиеся симметричные системы из трех слоев для краткости назовем ячейками.

В процессе исследования был проведен анализ спектральных характеристик различных конструкций предложенных покрытий. Сравнивались спектральные характеристики конструкции покрытий, включающих в себя от 1 до 29 ячеек, среди которых наилучшими антибликовыми свойствами обладали системы, сформированные из 15 ячеек. При формировании покрытия, состоящего из 15 ячеек ($\text{HfO}_2/\text{Cr}/\text{HfO}_2$), на поверхности алюминия в диапазоне длин волн 300–1000 нм остаточный коэффициент отражения снизился в 6,06 раз, в среднем он составил величину $R=14,9\%$. Антибликовое покрытие, состоящее из ячеек ($\text{ZrO}_2/\text{Ti}/\text{Al}_2\text{O}_3$)¹⁵ позволило снизить остаточный энергетический коэффициент отражения оптической поверхности детали, изготовленной из титана в 3,68 раз, и в среднем составляет $R=12,3\%$. Покрытие, состоящее из системы ячеек ($\text{HfO}_2/\text{Cr}/\text{HfO}_2$)¹⁵, снижает остаточный коэффициент отражения у никеля на подложке в 3,89 раз и в среднем имеет значение $R=14,2\%$. На поверхность из хрома лучше всего нанести покрытие из ($\text{ZrO}_2/\text{Cr}/\text{ZrO}_2$)¹⁵, оно обеспечит снижение остаточного коэффициента отражения в 3,54 раза и в среднем $R=14,95\%$. Полученные данные сведены в таблицу.

Материал подложки	Средний коэффициент отражения металла в области длин волн 300–1000 нм, %	Покрытие	Минимальное значение коэффициента отражения в области длин волн 300–1000 нм, %	Средний коэффициент отражения в области длин волн 300–1000 нм, %
Al	90,3	$[\text{HfO}_2/\text{Cr}/\text{HfO}_2]$ ¹⁵	4,3	14,9
Ti	45,3	$[\text{ZrO}_2/\text{Ti}/\text{Al}_2\text{O}_3]$ ¹⁵	1	12,3
Ni	55,3	$[\text{HfO}_2/\text{Cr}/\text{HfO}_2]$ ¹⁵	7,5	14,2
Cr	53	$[\text{ZrO}_2/\text{Cr}/\text{ZrO}_2]$ ¹⁵	6,2	14,95

Таблица. Таблица значений коэффициентов отражения для разных металлических подложек

Рассмотренные антибликовые покрытия представляют ценность с точки зрения энергосбережения и могут быть использованы при изготовлении элементов солнечных батарей [13] и систем, обеспечивающих нагрев воды с использованием солнечной энергии [14]. Все вышеуказанные интерференционные покрытия работают в широком диапазоне длин волн. Эти покрытия можно формировать на металлических поверхностях (массивных и тонких), формирующих нейтральные фильтры [15], фотоэлектрические преобразователи, а также на приборах, испытывающих оптические потери, связанные с отражением излучения от поверхности прибора.

Литература

1. Ершов А.В., Машин А.И. Многослойные оптические покрытия. Проектирование, материалы, особенности технологии получения методом электроннолучевого испарения. Н. Новгород: ННГУ, 2006. 99 с.
2. Адамсон П.В. Антиотражающие поверхностные покрытия с непрерывно изменяющимся комплексным показателем преломления // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. №22. С. 50–57.
3. Достанко А.П., Коробко А.О., Кайдов О.А. Новые тенденции в развитии в технологии и конструкций кремниевых тонкопленочных солнечных элементов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. 2011. №3. С. 69–75.
4. Василевич В.П., Васильев Ю.Б., Достанко А.П., Кайдаров О.Л. Фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии. Минск: Бестпринт, 2008. 420 с.
5. Хасс Г., Франкомб М., Гофман Р. Физика тонких пленок. М.: Мир, 1978. Т. 8. 359 с.
6. Ibrahim A., El-Amin A.A. Etching, evaporated contacts and antireflection coating on multicrystalline silicon solar cell // International Journal of Renewable Energy Research. 2012. V. 2. N 3. P. 356–362.
7. Li X.-F., Chen Y.-R., Maio J., Zhou P., Zheng Y.-X., Chen L.-Y., Lee Y.-P. High solar absorption of a multi-layered thin film structure // Optics Express. 2007. V. 15. N 4. P. 1907–1912. doi: 10.1364/OE.15.001907
8. Yang H.-H., Park G.-C. A study on the properties of MgF_2 antireflection film for solar cells // Transactions on Electrical and Electronic Materials. 2010. V. 11. N 1. P. 33–36. doi: 10.4313/TEEM.2010.11.1.033
9. Garcia-Vidal F.J. Metamaterials: Towards the Dark Side // Nature Photonics. 2008. V. 2. P. 215–216. doi: 10.1038/nphoton.2008.45
10. Моисеев С.Г., Явтушенко М.С., Явтушенко И.О., Жуков А.В. Антиотражающее покрытие с металлическими наночастицами // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15. № 4–3. С. 749–754.
11. Путилин Э.С. Оптические покрытия: Учебное пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. 227 с.
12. Фурман Ш.А. Тонкослойные оптические покрытия. Л.: Машиностроение, 1977. 264 с.
13. Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К. Солнечная энергетика: учебное пособие для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 317 с.

14. Aiken D.J. High performance anti-reflection coatings for broadband multi-junction solar cells // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2000. V. 64. N 4. P. 393–404.
 15. Macleod H.A. Thin-Film Optical Filters. 4th ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2010. 800 p.

- Константинова Юлия Андреевна** – инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, llaavvee@list.ru
Губанова Людмила Александровна – доктор технических наук, доцент, профессор, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, la7777@mail.ru
Yulia A. Konstantinova – engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, llaavvee@list.ru
Lyudmila A. Gubanova – D.Sc., Associate professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, la7777@mail.ru