

- Дукельский Константин Владимирович* – кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия, KDukel@GOI.ru
- Тер-Нерсесянц Егеше Вавикович* – кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия, volokno@goi.ru
- Anatoly Korobeynikov* – D.Sc., Professor, Deputy director for science, Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences St. Petersburg Branch (SPbF IZMIRAN), Saint Petersburg, Russia, Korobeynikov_A_G@mail.ru
- Yury Gatchin* – D.Sc., Professor, Department head, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia, Gatchin@mail.ifmo.ru
- Konstantin Dukel'skiy* – PhD, Associate professor, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia, KDukel@GOI.ru
- Egеше Ter-Nersesyantz* – PhD, Associate professor, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia, volokno@goi.ru

УДК 681.7.064.454

МНОГОЗОННОЕ ПРОСВЕТЛЯЮЩЕЕ ПОКРЫТИЕ НА ПОДЛОЖКЕ ИЗ ОПТИЧЕСКОГО СУЛЬФИДА ЦИНКА

Тан Тай До^а, Л.А. Губанова^а

^аСанкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия, La7777@mail.ru

Представлена методика создания многозонного просветляющего покрытия на подложке из оптического сульфида цинка. Покрытие одновременно эффективно работает в нескольких спектральных диапазонах: в видимой области (450–700 нм), в ближней инфракрасной области (1000–1100 нм), на длине волны 1,55 мкм, а также в средней инфракрасной области спектра (3–5 мкм). Коэффициент отражения в диапазоне 450–700 нм не превышает 2%, в диапазоне 1000–1100 нм – менее 0,5%, в диапазоне 1500–1700 нм близок к 1,5% и в диапазоне 3–5 мкм – к 0,6%. В работе представлены результаты анализа влияния отклонений в толщинах слоев, формирующих разработанное покрытие, на изменение значения энергетического коэффициента отражения в рассматриваемых областях. Получено, что отклонение в толщине слоя, граничащего с воздухом, оказывает максимальное влияние на спектральную характеристику полученного покрытия. Отклонение показателя преломления этого слоя влияет на величину остаточного отражения.

Ключевые слова: просветляющие покрытия, градиентные покрытия, многозонные покрытия, сульфид цинка.

MULTI-ZONE ANTIREFLECTION COATING ON A SUBSTRATE MADE OF OPTICAL ZINC SULPHIDE

Тан Тай До^б, L. Gubanova^б

^бSaint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, La7777@mail.ru

The paper deals with creation technique for a multi-zone antireflection coating on a substrate made of the optical zinc sulphide ZnS. The coating effectively operates simultaneously in the following spectral ranges: visible region of 450 - 700 nm, in the near infrared region of 1000 - 1100 nm, at the wavelength of 1.55 μm , and in the mid-infrared (IR) spectrum of 3 - 5 microns. Reflection coefficient in the range of 450 - 700 nm is not more than 2%, in the range of 1000 - 1100 nm is less than 0.5%, in the range of 1500 - 1700 nm is close to 1.5% and in the range of 3 - 5 μm is equal to 0.6%. Analysis results of the deviation impact in the thickness of layers on the value changing of the energy reflection coefficient in the considered areas are given. Deviation in the thickness of the layer, contiguous with the air, is shown to have the greatest effect on the spectral characteristics of the obtained coating. Refractive index deviation for this layer influences the magnitude of the residual reflection.

Keywords: antireflection coatings, gradient coatings, multi-zone coatings, zinc sulphide.

Введение

Потребность в оптических приборах, способных работать в нескольких спектральных (видимой, ближней и средней инфракрасной (ИК)) областях, постоянно возрастает [1–7]. Такие системы оснащены датчиками, которые работают в определенной области спектра, и имеют ряд преимуществ, в том числе

позволяют получать более полную информацию об объекте, использовать общий точный механизм стабилизации, компактны, имеют минимальный вес и габаритные размеры [8–11].

Среди материалов, используемых в оптических схемах при создании многоспектральных оптических устройств, сульфид цинка (ZnS) является одним из наиболее часто используемых. Это можно объяснить следующими причинами: он обладает широким диапазоном прозрачности (0,4–14 мкм), не ядовит, нерастворим в воде [6]. ZnS имеет показатель преломления $n_m = 2,2$, поэтому оптический элемент, изготовленный из ZnS без просветляющего покрытия, пропускает не более 73% падающего излучения. Формирование просветляющих покрытий на оптических элементах, изготовленных из сульфида цинка, существенно увеличивает эффективность его использования.

Просветление оптического ZnS было изучено разными авторами [12–14]. Покрытия, рассмотренные в работе [12], состоят из трех и пяти слоев. Эти покрытия снижают энергетический коэффициент отражения в диапазоне длин волн 0,5–0,9 мкм, на длине волны 1,064 мкм и в диапазоне 8–12 мкм. Среднее значение энергетического коэффициента отражения в этих областях спектра составляет 2–3%. Конструкция разработана так, что входящие в его состав слои имеют дискретно меняющиеся показатели преломления. Рассматриваемое покрытие не обеспечивает снижение отражения в средней ИК области. В работе [13] описывается просветляющее покрытие, рассчитанное численным методом. Покрытие снижает отражение до 1–2% в трех диапазонах: 8–12 мкм, 3–5 мкм и на длине волны 1,064 мкм. Недостатками этого покрытия является отсутствие просветления в видимом диапазоне и узкая зона просветления в ближней ИК области. В работе [14] рассматривается покрытие, у которого в формирующих слоях изменение показателя преломления является градиентным. Полученное покрытие имеет среднее отражение не меньше 5% в видимом (0,45–0,65 мкм) и среднем ИК (3–5 мкм) диапазонах.

Часто встречается случай, когда в состав покрытия входят слои с «нереальным показателем преломления», т.е. рассматривается пленкообразующий материал, которого нет в природе. Эту проблему можно решить путем совместного напыления нескольких материалов из одного испарителя или из отдельных испарителей. Применение такого метода в настоящее время ограничивается из-за отсутствия точных технологий.

Представляемая авторами работа расширяет ранее полученные результаты и посвящена методике конструирования просветляющего покрытия на оптическом ZnS с использованием реальных и устойчивых пленкообразующих материалов. Покрытие одновременно эффективно работает в видимой (0,4–0,6 мкм) области для лазера с длиной волны генерации 1064 нм, лазерного дальномера, работающего на длине волны 1,55 мкм и в средней ИК (3–5 мкм) области. Покрытие разработано с использованием градиентного метода [15], который основан на том, что показатель преломления слоев, формирующих покрытие, является функцией общей толщины покрытия.

Методика расчета

Чтобы получить многослойное просветляющее покрытие, выбираем конструкцию покрытия, в которой оптическая толщина каждого слоя равна, причем показатель преломления слоев непрерывно увеличивается от среды (воздуха), из которой падает излучение, до подложки согласно уравнению пятой степени [15]:

$$n(x) = n_0 + (n_m - n_0) \cdot \left(10 \cdot \left(\frac{x}{D} \right)^3 - 15 \cdot \left(\frac{x}{D} \right)^4 + 6 \cdot \left(\frac{x}{D} \right)^5 \right), \quad (1)$$

где x – расстояние от границы с воздухом до границы раздела между i -м и $(i+1)$ -м слоями ($i = 0, 1, 2, 3, 4$); D – общая физическая толщина покрытия, состоящего из нескольких слоев; n_m – показатель преломления подложки; n_0 – показатель преломления окружающей среды (для воздуха $n_0 = 1$).

Синтез покрытий осуществляется в несколько этапов.

На первом этапе задаются значения D и x_i . По формуле (1) для каждого набора значений $(x_{i+1} - x_i)$ получаем значения показателей преломления $(i+1)$ -го слоя. Таким образом, получаем структуру просветляющего покрытия, состоящего из $(i-1)$ слоев, имеющих полученное значение показателя преломления. Физическая толщина каждого слоя определяется как $d_i = x_{i+1} - x_i$.

Как известно из [16], энергетический коэффициент отражения многослойной системы может быть определен из выражения

$$R(\lambda) = |r(\lambda)|^2,$$

где

$$r(\lambda) = \frac{n_0 m_{11} - n_m m_{22} + i \cdot (n_0 n_m m_{12} - m_{21})}{n_0 m_{11} + n_m m_{22} + i \cdot (n_0 n_m m_{12} + m_{21})}, \quad \begin{vmatrix} m_{11} & i m_{12} \\ i m_{21} & m_{22} \end{vmatrix} = \prod_{j=1}^k \begin{vmatrix} \cos \varphi_j(\lambda) & \frac{i \sin \varphi_j(\lambda)}{n_j} \\ i n_j \sin \varphi_j(\lambda) & \cos \varphi_j(\lambda) \end{vmatrix},$$

k – количество слоев, формирующих систему, $\varphi_j(\lambda)$ – фазовая толщина j -го слоя, n_j – показатель преломления j -го слоя.

Рассмотрим структуру, формирующую покрытие из четырех слоев, характеризующихся показателями преломления (n_1, n_2, n_3, n_4), физическими толщинами (d_1, d_2, d_3, d_4), оптическими толщинами ($n_1d_1, n_2d_2, n_3d_3, n_4d_4$) и фазовыми толщинами ($\varphi_1 = 2\pi n_1d_1(\lambda)^{-1}$, $\varphi_2 = 2\pi n_2d_2(\lambda)^{-1}$, $\varphi_3 = 2\pi n_3d_3(\lambda)^{-1}$, $\varphi_4 = 2\pi n_4d_4(\lambda)^{-1}$). Световое излучение падает из окружающей среды с показателем преломления n_0 . Покрытие сформировано на подложке с показателем преломления n_m .

Среднее значение энергетического коэффициента отражения в диапазоне длин волн (λ_1, λ_2)

$$R_{\text{средний}} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) d\lambda.$$

Если среднее арифметическое значение энергетического коэффициента отражения просветляющего покрытия в указанных диапазонах больше требуемого значения отражения, то процедура повторяется с первого этапа до тех пор, пока не получается желаемое значение энергетического коэффициента отражения в указанных диапазонах.

Практическая реализация методики

По представленной методике была получена структура покрытия, параметры которой приведены в табл. 1. С целью получения оптимального энергетического коэффициента отражения в видимом и среднем ИК диапазонах следует изменять оптическую толщину каждого слоя. Первоначальное значение толщины равняется 50 нм [17], финальное значение толщины равняется 450 нм, перебор осуществляется с шагом 10 нм. В итоге было получено покрытие с конструкцией H0,964H'V0,349B' , где H, H' – четвертьволновый слой с низким показателем преломления $n_H = 1,35$, $n_{H'} = 1,5$; B, B' – четвертьволновые слои с высоким показателем преломления $n_B = 1,8$, $n_{B'} = 2,15$; $\lambda_0 = 1,66$ мкм. Данное покрытие имеет характеристику, приведенную в табл. 2. На рис. 1 представлена спектральная характеристика энергетического коэффициента отражения разработанного покрытия.

Номер слоя	$n(x)$	Физическая толщина d , нм	Оптическая толщина nd , нм
1	1,35	307	415
2	1,5	276	415
3	1,82	228	415
4	2,15	193	415
Суммарная толщина покрытия		$D = 1004$	1660

Таблица 1. Значения показателей преломления и толщин слоев разработанного просветляющего покрытия

Диапазон спектра λ , нм	450–700	1000–1100	1500–1700	1000–1700	3000–5000
$R_{\text{средний}}$	1,5%	0,4%	1,4%	2%	0,6%

Таблица 2. Средний коэффициент энергетического отражения просветляющего покрытия с конструкцией H0,964H'V0,349B'

Используемые в разработанной конструкции пленкообразующие материалы должны удовлетворять следующим условиям: иметь полученный при расчетах показатель преломления и быть прозрачными в рабочих диапазонах спектра. В качестве слоев с низким показателем преломления $n_H = 1,35$, $n_{H'} = 1,5$ могут быть использованы пленкообразующие материалы MgF_2 ($n = 1,35$, область прозрачности 0,11–11 мкм) и YF_3 ($n = 1,5$, область прозрачности 0,3–14 мкм). В качестве слоев с высоким показателем преломления $n_B = 1,82$, $n_{B'} = 2,15$ могут быть использованы пленкообразующие материалы Y_2O_3 ($n = 1,82$, область прозрачности 0,3–12 мкм) и CeO_2 ($n = 2,15$, область прозрачности 0,4–12 мкм).

При изготовлении покрытия существенную роль играет устойчивость спектральной характеристики коэффициента отражения покрытия к ошибкам в слоях, которые могут возникнуть при его формировании. Далее приводится спектральная характеристика просветляющего покрытия при наличии ошибок в толщинах. В расчете для отдельного j -го слоя с оптимальной оптической толщиной $n_j d_j$ ($j = 0, 1, 2, 3, 4$) прибавляем значение ошибки в толщинах Δj . Рассмотрим, как при этом изменится спектральная характеристика отражения просветляющего покрытия.

Изменения спектральной характеристики отражения просветляющего покрытия приведены на рис. 2, 3. Авторами были рассмотрены ситуации, когда оптическая толщина каждого слоя имеет отрицательные и положительные ошибки, и, таким образом, ошибка была лишь в рассматриваемом слое. Анализ показал, что наиболее существенное влияние на спектральную характеристику оказывает слой, гра-

ничающий с воздухом. Слой, лежащий на подложке, оказывает минимальное влияние на спектральную характеристику просветляющего покрытия.

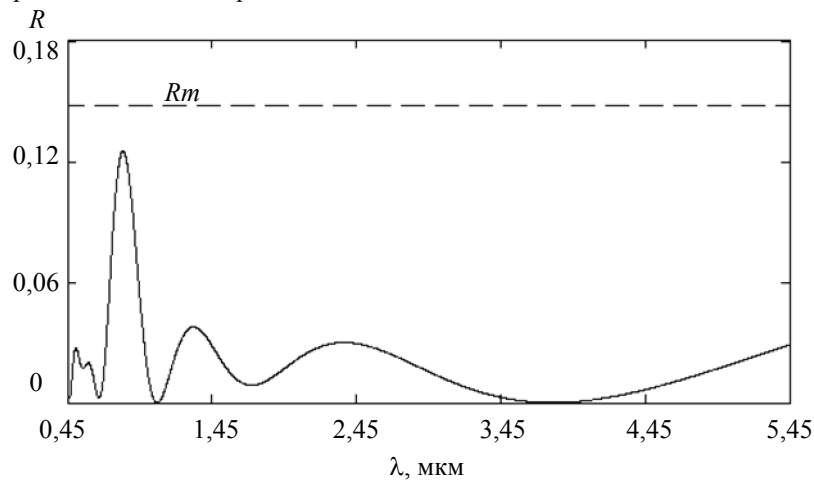


Рис. 1. Спектральная характеристика отражения просветляющего покрытия на подложке из оптического ZnS. Покрытие имеет конструкцию $H0,964H^1V0,349V^1$, $\lambda_0 = 1,66$ мкм.

R_m – коэффициент отражения подложки из оптического сульфида цинка без просветляющего покрытия

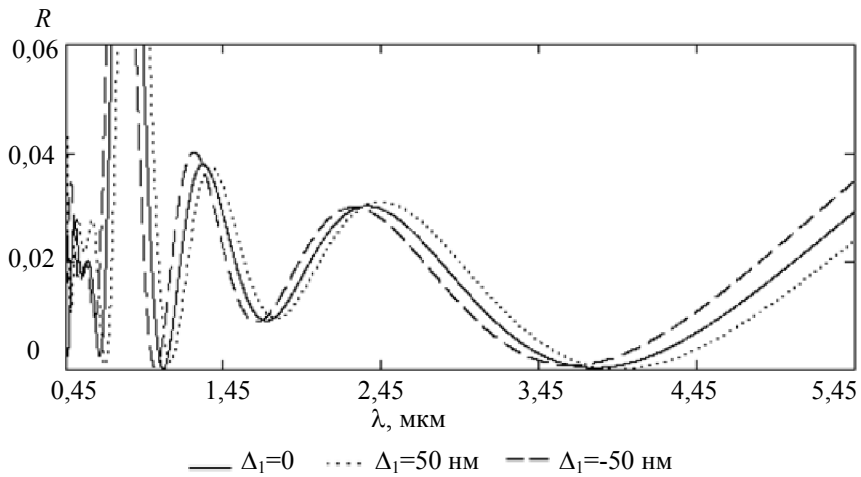


Рис. 2. Спектральная характеристика просветляющего покрытия $H0,964H^1V0,349V^1$, $\lambda_0 = 1,66$ мкм. $n_H = 1,35$, $n_H^1 = 1,5$, $n_V = 1,8$, $n_V^1 = 2,15$, $n_m = 2,2$. Первый слой принимает значения оптической толщины больше и меньше оптимальной толщины

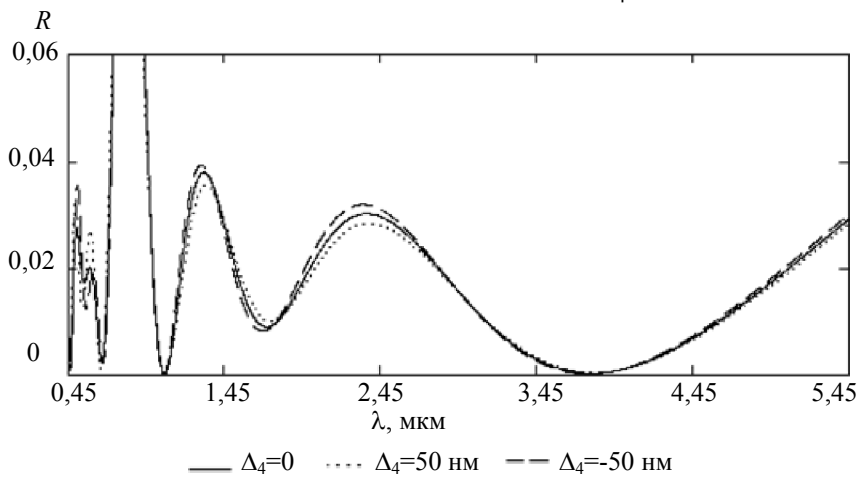


Рис. 3. Спектральная характеристика просветляющего покрытия $H0,964H^1V0,349V^1$, $\lambda_0 = 1,66$ мкм. $n_H = 1,35$, $n_H^1 = 1,5$, $n_V = 1,8$, $n_V^1 = 2,15$, $n_m = 2,2$. Четвертый слой принимает значения оптической толщины больше и меньше оптимальной толщины

Аналогично рассмотрим, как будет изменяться спектральная характеристика просветляющего покрытия при ошибках в показателе преломления отдельного слоя.

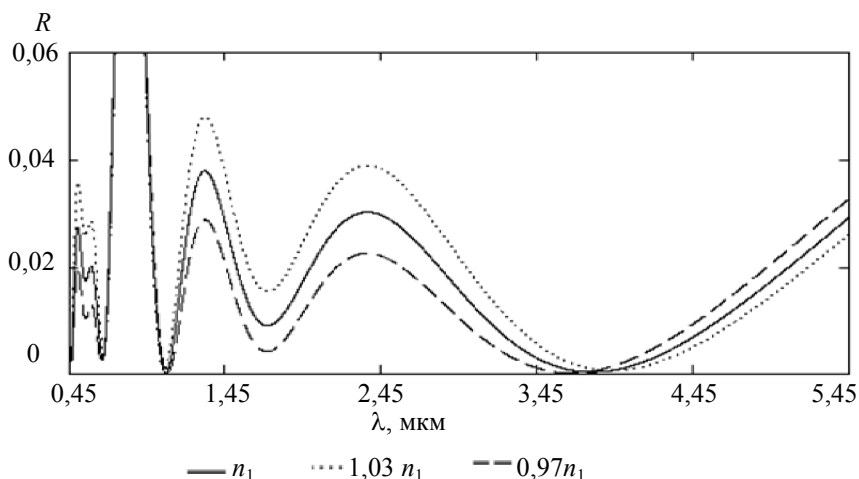


Рис. 4. Спектральная характеристика просветляющего покрытия $H\ 0,964H^{\prime}V_0,349V^{\prime}$, $\lambda_0 = 1,66$ мкм. $n_H = 1,35$, $n_H^{\prime} = 1,5$, $n_B = 1,8$, $n_B^{\prime} = 2,15$, $n_m = 2,2$. Первый слой принимает значения показателя преломления больше и меньше 3% от исходного значения

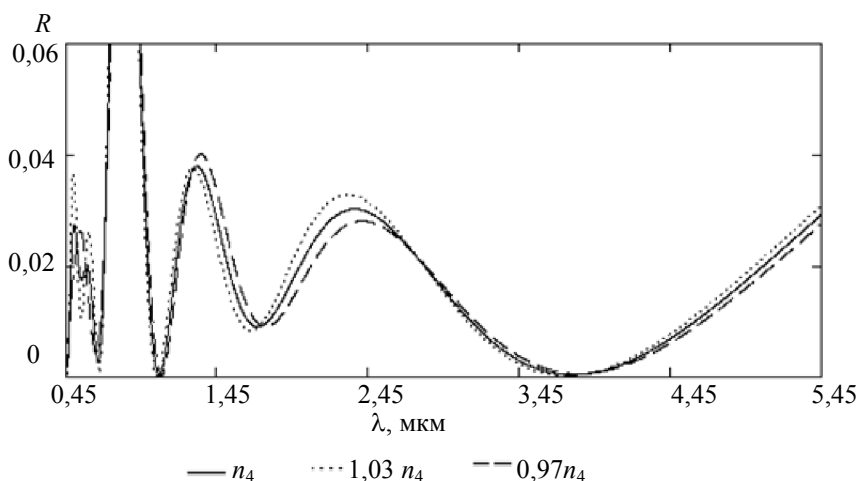


Рис. 5. Спектральная характеристика просветляющего покрытия $H\ 0,964H^{\prime}V_0,349V^{\prime}$, $\lambda_0 = 1,66$ мкм. $n_H = 1,35$, $n_H^{\prime} = 1,5$, $n_B = 1,8$, $n_B^{\prime} = 2,15$, $n_m = 2,2$. Четвертый слой принимает значения показателя преломления больше и меньше 3% от исходного значения

На рис. 4, 5 приведены изменения спектральной характеристики просветляющего покрытия при ошибках в показателе преломления слоя, входящего в состав полученного покрытия. Ошибки принимают положительное и отрицательное значение, которое составляет 3% от исходного значения показателя преломления отдельного слоя. Проведенный анализ показал, что изменение показателя преломления слоя, граничащего с воздухом, оказывает наиболее существенное влияние на спектральную характеристику просветляющего покрытия по сравнению со слоем, лежащим на подложке.

Заключение

В работе была показана возможность получения структуры покрытия, обеспечивающая низкое отражение в нескольких диапазонах спектра. Структура покрытия была получена с использованием градиентных слоев, в которых показатель преломления является функцией общей толщины покрытия.

В ходе выполнения работы получены конструкции просветляющих интерференционных покрытий на основе четырех слоев. Полученное покрытие способно снизить энергетический коэффициент отражения подложки из сульфида цинка одновременно в видимой области (450–700 нм), в диапазонах длины волн лазеров 1000–1100 нм, 1500–1700 нм и в средней ИК области 3–5 мкм.

В работе исследовано изменение спектральной характеристики просветляющего покрытия при отклонении значения оптических толщин и показателя преломления от расчетных. Получено, что наиболее существенное влияние на спектральную характеристику оказывает слой, граничащий с воздухом. С уменьшением показателя преломления уменьшается энергетический коэффициент отражения, при увели-

чении показателя преломления энергетический коэффициент отражения увеличивается. Отклонение показателя преломления слоя, лежащего на подложке, практически не оказывает влияния на спектральную характеристику. При изменении оптической толщины слоя, находящегося на границе с воздухом, изменяется положение минимального энергетического коэффициента отражения в шкале длин волн. С уменьшением толщины минимумы отражения смещаются в коротковолновую область, с увеличением – в длинноволновую область.

References

1. Bayya S.S., Sanghera J.S., Kim W.R., Gibson D.J., Fleet E.F., Shaw B., Hunt M., Aggarwal I.D. New multiband IR imaging optics. *Proc. of SPIE*, 2013, vol. 8704, pp. 870428-1- 870428-6. doi: 10.1117/12.2016332
2. Fateev V.F., Lagutkin V.N., Luk'yanov A.P., Podkorytov E.N., Slyn'ko Yu.V., Starostenko A.M. Modelirovanie vkhodnoi informatsii opticheskoi sistemy malykh kosmicheskikh apparatov [Modeling the input information of the optical system of small satellites]. *Izv. vuzov. Priborostroenie*, 2009, vol. 52, no. 4, pp. 18–21.
3. Vaillancourt J., Vasinajindakaw P., Lu X., Qian X., Vangala S.R., Goodhue W.D. Thermo-electrically cooled shortwave infrared and longwave infrared dual band quantum-dot photodetector. *Proc. of SPIE*, 2011, vol. 8012, pp. 801200-1-801200-7. doi: 10.1117/12.887363
4. Mordvin N.N., Popov G.N. Kontseptsiya postroeniya optiko-elektronnykh priborov nablyudeniya universal'nogo naznacheniya [The concept of construction of optical-electronic devices of supervision of the universal destination]. *Izv. vuzov. Priborostroenie*, 2009, vol. 52, no. 6, pp. 34–39.
5. Pulov I.D., Chuikin V.M., Shirobokov A.M. Mnogospektral'nyi teplovizor "Terma-2" i ego metrologicheskie vozmozhnosti [Multi-spectral imager "Terma-2" and its metrological capabilities]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2002, no. 1 (5), pp. 105–106.
6. Golitsyn A.V., Zhuravlev P.V., Zhurov G.E., Koryakin A.V., Chikhonadskikh A.P., Shlishevskii V.B., Yashina T.V. Psevdobinokulyarnyi dvukhkanal'nyi pribor obnaruzheniya potentsial'nykh ugroz [Pseudobinocular dual-channel device detection of potential threats]. *Izv. vuzov. Priborostroenie*, 2009, vol. 52, no. 6, pp. 27–34.
7. Zadavec D., Franks J.W., Rogers K.A., Hendry A.F., Drach P. A Multi-Spectral Optical System (1.55 μ m and 8–12 μ m) of GASIR ® 1 Design and Coating Aspects. *Proc. of SPIE*, 2009, vol. 7298, pp. 72982L-1-72982L-9. doi: 10.1117/12.828737
8. Mal'tsev G.N., Kungurtsev V.V., Kozinov I.A. Distsionnoe zondirovanie Zemli na osnove klastera malykh kosmicheskikh apparatov mnogospektral'nogo nablyudeniya [Remote sensing of the Earth on the basis of a cluster of small spacecraft multi-spectral surveillance]. *Izv. vuzov. Priborostroenie*, 2009, vol. 52, no. 4, pp. 22–28.
9. Gorbunin V.I., Panchenko V.V., Radionov N.V. Tekhniko-ekonomicheskii podkhod k vyboru sistemy malykh kosmicheskikh apparatov [Techno-economic approach to the choice of a system of small spacecraft]. *Izv. vuzov. Priborostroenie*, 2009, vol. 52, no. 4, pp. 46–51.
10. Pavlov N.I., Yasinskii G.I. Compact optoelectronic scanning device for aerial photography in the visible and IR regions. *Journal of Optical Technology*, 2003, vol. 70, no. 4, pp. 230–233. doi: 10.1364/JOT.70.000230
11. Tarasov V.V., Yakushenkov Yu.G. Opticheskoe schityvanie – odin iz putei sovershenstvovaniya mikrobolometricheskikh priemnikov izlucheniya (po materialam zarubezhnoi pechati) [Optical pickup is one of the ways to improve micro-bolometric radiation receivers (based on foreign press)]. *Izv. vuzov. Priborostroenie*, 2008, vol. 51, no. 9, pp. 41–46.
12. Sokolova R.S., Mikhailov A.V., Muranova G.A., Gorelkina Zh.N. Multispectral antireflection coatings for the visible, near-IR, and IR regions. *Journal of Optical Technology*, 2005, vol. 72, no. 10, pp. 784–786. doi: 10.1364/JOT.72.000784
13. Cohen D., Stolov Y., Azran A., Gilo M. Dual- and triple-band AR coatings for IR systems. *Proc. of SPIE*, 2013, vol. 8704, pp. 870422-1-870422-6. doi: 10.1117/12.2014826
14. Awasthi S., Nautiyal B.B., Kumar R., Bandyopadhyay P.K. Multi-spectral antireflection coating on zinc sulphide simultaneously effective in visible, eye safe laser wave length and MWIR region. *Infrared Physics & Technology*, 2012, vol. 55, no. 5, pp. 395–398.
15. Southwell W.H. Coating design using very thin high- and low-index layers. *Applied Optics*, 1985, vol. 24, no. 4, pp. 457–460.
16. Berning P.H. Theory and calculations of optical thin films. *Physics of Thin Films*. Ed. G. Hass. NY–London, Academic Press, 1963, vol. 1, pp. 69–121. (Russ. ed.: Berning P.Kh. Teoriya i metody rascheta opticheskikh svoystv tonkikh plenok. *Fizika tonkikh plenok*. Ed. G. Khass. Moscow, Mir Publ., 1967, vol. 1, pp. 91–151.)
17. Gubanova L.A., Putilin E.S. Printsipy formirovaniya struktury interferentsionnykh spektrodelitelei [Structure formation principles of interference beam splitters]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2012, no. 1 (77), pp. 1–6.

До Тан Тай

– аспирант, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия, tantaiddo@yahoo.com

Губанова Людмила Александровна

– доктор технических наук, профессор, доцент, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия, La7777@mail.ru

Tan Tai Do

- postgraduate, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia, tantaiddo@yahoo.com

Lyudmila Gubanova

- D.Sc., Professor, Associate professor, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia, La7777@mail.ru

УДК 676.22.017; 676.262; 539.211

КОНТРОЛЬ СТРУКТУРЫ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ БУМАГИ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

М.В. Жуков^а

^а Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия, cloudjyk@yandex.ru, zerocomb@bk.ru

Рассматриваются вопросы высокоточного контроля параметров выпускаемой бумажной продукции, а именно, различных видов бумаги и фотобумаги для печати. В рамках данной работы методом атомно-силовой микроскопии проведены исследования необработанной, матовой, глянцевой и ламинированной бумаги. Для исследований использовался учебно-научный сканирующий зондовый микроскоп NanoEducator LE. Проведена визуализация характерной структуры каждого вида исследуемой бумаги, получены гистограммы шероховатости, определена средняя шероховатость перепадов высот для каждого типа бумаги. Наименьшей шероховатостью обладает ламинированная бумага (R_a около 70 нм), шероховатость глянцевой бумаги составляет около 170 нм, шероховатость необработанной бумаги с волокнами целлюлозы – 530–540 нм. Самыми высокими параметрами шероховатости характеризуется матовая бумага (R_a порядка 670–680 нм). Продемонстрировано, что применение сканирующей зондовой микроскопии позволяет проводить экспресс-контроль параметров целлюлозной бумажной продукции, что может быть использовано при ее производстве.

Ключевые слова: бумага, атомно-силовая микроскопия, шероховатость, фотобумага, сканирующий зондовый микроскоп.

STRUCTURE CONTROL FOR DIFFERENT TYPES OF PAPER BY ATOMIC FORCE MICROSCOPY

M. Zhukov^b

^b Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia, cloudjyk@yandex.ru, zerocomb@bk.ru

The paper deals with the precision control for the parameters of manufactured paper production, such as various kinds of paper and photo paper for printing. Research of untreated, matte, glossy and laminated paper is conducted by atomic force microscopy by means of educational and scientific scanning probe microscope NanoEducator LE in the framework of this paper. Visualization of characteristic structure for each type of studied paper was conducted, histogram of roughness was obtained, and average roughness of height differences was defined. A laminated paper has got the lowest roughness (R_a of about 70 nm) and glossy paper has got R_a of about 170 nm; roughness of untreated paper with cellulose fibers is about 530-540 nm, and matte paper has got the highest roughness parameters (R_a about 670-680 nm). Scanning probe microscopy application for parameters monitoring of cellulosic paper production is shown to give the possibility of such microscopy type application in the production of paper products and high-precision control of its parameters.

Keywords: paper, atomic force microscopy, roughness, photo paper, scanning probe microscope.

Введение

Вопросы высокоточного контроля параметров выпускаемой бумажной продукции имеют все возрастающее значение, особенно при изготовлении бумаги и фотобумаги для печати, бумаги для денежных знаков. Структура и свойства этой продукции напрямую влияют на качество печатных документов, отображение мелких особенностей изображений. Многие компании-производители проводят контроль выпускаемой бумажной продукции методами сканирующей электронной микроскопии [1, 2] и конфокальной оптической микроскопии [3–5]. Наиболее актуальными в последнее время являются исследования, направленные на высокоточное отображение параметров бумаги в нанометровом диапазоне методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) [6, 7], визуализацию ее структуры [8, 9], изучение показателей шероховатости и адгезии [10]. Особое значение приобретают работы по неразрушающему исследованию манускриптов, пергаментов и древней бумаги, сохранившейся до наших дней [11, 12], для чего также используются методы АСМ [13].

При этом перечисленные исследования довольно дорогостоящи и требуют присутствия высококвалифицированного, специально обученного персонала. Предложенный в настоящей работе метод визуализации предполагает использование доступного учебно-исследовательского сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) NanoEducator LE (НТ-СПб, Россия) [14], не требующего для работы на нем специализированной подготовки в области методов силовой зондовой микроскопии. В качестве рабочего зондового датчика в NanoEducator LE используется вольфрамовая игла, которую можно легко изготовить методом электрохимического травления вольфрамовой проволоки [15]. Стоимость вольфрамовой про-