

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.18698/0236-3933-2016-3-3-12

УДК 534:535

Измерение распределения толщин многослойных пленочных структур методами спектральной рефлектометрии

**В.Г. Цепулин, В.Л. Толстогузов, В.Е. Карасик,
А.В. Перчик, А.П. Арефьев**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: v.tsepulin@bmstu.ru

Рассмотрен спектральный метод измерения распределения толщин слоев многослойных пленочных структур, предложены методы калибровки измерительной установки и фильтрации полученных решений. Указанные методы проверены экспериментально с помощью собранного гиперспектрального микроскопа на основе двойного акусто-оптического видеомонохроматора. Приведен анализ результатов измерения толщины двухслойной пленочной структуры из диоксида кремния (SiO₂) и полиметилметакрилата на кремниевой подложке.

Ключевые слова: многослойные пленочные структуры, рефлектометрия, профилометрия, акусто-оптический фильтр, тонкие пленки.

Thickness Distribution Measurement of Multilayer Film Structures by Spectral Reflectometry Methods

**V.G. Tsepulin, V.L. Tolstoguzov, V.E. Karasik, A.V. Perchik,
A.P. Arefev**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: v.tsepulin@bmstu.ru

We examine the spectral method of measurement of multilayer film structures layers thickness distribution. Moreover, we propose a method of the measurement unit calibration and a method of filtering the obtained solutions. The methods mentioned are validated experimentally by means of the assembled hyperspectral microscope based on the dual acousto-optical videomonochromator. We analyse the thickness measurement results of the two-layer silicon dioxide (SiO₂) film structure and polymethylmethacrylate structure on silicon substrate.

Keywords: multilayer film structures, reflectometry, profilometry, acousto-optical filter, thin films.

Введение. Многослойные пленочные структуры широко применяют при производстве большого числа современных устройств, в том числе микросхем, жидкокристаллических и сенсорных экранов, солнечных батарей [1]. Толщина слоев таких структур зачастую определяет основные характеристики производимых компонентов. Для повышения качества продукции необходимо проводить ее непрерывный контроль на этапе производства. Чтобы выявить отклонения в параметрах слоев требуются методы, которые позволяют осуществлять быстрое и одновременно точное измерение распределения толщин слоев пленочных структур, использующихся в оптоэлектронных устройствах.

Для нахождения толщин пленочных покрытий используют такие оптические методы, как эллипсометрия, оптическая рефлектометрия и интерферометрия белого света [2–6]. Для высокоскоростного контроля толщин в жестких вибрационных условиях наиболее подходящим из перечисленных методов является метод оптической спектральной рефлектометрии [5], который включает в себя регистрацию спектра отражения излучения пленочным покрытием и последующую обработку этого спектра в целях нахождения неизвестных толщин [5, 6]. Этот метод также позволяет получить латеральное распределение толщин многослойных пленочных структур.

В настоящей работе представлен метод измерения распределения толщин многослойных пленочных структур на основе принципов оптической спектральной рефлектометрии, описан метод определения толщин пленочных покрытий по спектральным изображениям, приведена схема экспериментального стенда с использованием перестраиваемого акусто-оптического фильтра, а также рассмотрен метод, позволяющий устранить неоднородности интенсивности спектральных изображений. В заключительной части работы приведен пример измерения параметров двухслойной пленочной структуры и анализ полученных результатов.

Метод нахождения толщины пленочного покрытия. Коэффициент отражения по интенсивности многослойного поглощающего пленочного покрытия может быть вычислен матричным методом [8]. Для слоистой среды, состоящей из L слоев, этот коэффициент определяют из выражения

$$R = |r|^2 = \left| \frac{(M_{11} + M_{12}p_L)p_1 - (M_{21} + M_{22}p_L)}{(M_{11} + M_{12}p_L)p_1 + (M_{21} + M_{22}p_L)} \right|^2,$$

где M_{ij} — коэффициенты характеристической матрицы слоистой среды; для немагнитной среды коэффициент $p_l = \hat{n}_l \cos \theta_l$, $l = 1, \dots, L$, $\hat{n}_l = n_l(1 + k_l)$ — комплексный показатель преломления материала.

Для случая нормального падения излучения матрица слоистой среды имеет вид

$$M = \prod_{l=1}^N \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \hat{n}_l d_l\right) & -\frac{i}{p_l} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \hat{n}_l d_l\right) \\ -ip_l \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \hat{n}_l d_l\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \hat{n}_l d_l\right) \end{pmatrix}.$$

Здесь d_l — толщина l -го слоя.

Для нахождения неизвестной толщины применяют нелинейную регрессию. Если принять, что измерения коэффициента отражения распределены по нормальному закону с дисперсией σ_i^2 для длины волны λ_i , то можно ввести функцию невязки [9]:

$$\eta(\mathbf{d}) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} [R_t(\lambda_i, \mathbf{d}) - R_m(\lambda_i)]^2, \quad (1)$$

где N — число измерений; $R_t(\lambda_i, \mathbf{d})$ — значение коэффициента отражения пленки, вычисленное теоретически для длины волны λ_i и толщины $\mathbf{d} = (d_1, \dots, d_L)^T$; $R_m(\lambda_i)$ — значения коэффициента отражения, измеренные на длине волны λ_i . Тогда толщину пленки определяют как величину, которая минимизирует функцию (1): $\mathbf{d} = \operatorname{argmin}\{\eta(\mathbf{d})\}$.

Метод калибровки измерительной установки. Для нахождения латерального распределения толщин многослойного пленочного покрытия с помощью оптической рефлектометрии требуется измерить распределение спектральной зависимости коэффициента отражения по поверхности исследуемого образца. Такое измерение рационально проводить с использованием матричного приемника излучения и перестраиваемого узкополосного фильтра, ширина линии пропускания которого составляет единицы нанометров.

Освещенность и коэффициент пропускания оптической системы варьируются в зависимости от точки поля исследуемого образца, поэтому для определения коэффициента отражения излучения по интенсивности, зарегистрированного матричным приемником излучения, следует выполнить предварительную калибровку установки. Это можно осуществить с помощью эталонного образца с заранее известными характеристиками. В качестве эталона может быть принята плоская пластина из материала подложки без нанесенного на нее пленочного покрытия.

Полагая, что приемник излучения обладает линейной крутизной характеристики, связь между интенсивностью в точке изображения $I_{x,y}$ и коэффициентом отражения в соответствующей ей точке измеряемого образца R для каждой длины волны λ можно определить по выражению: $I_{x,y}(\lambda) = \alpha_{x,y}(\lambda)R_{x,y}(\lambda) + I_{x,y}^0(\lambda)$.

Для нахождения параметров линейной зависимости достаточно зарегистрировать два изображения эталонной поверхности для каждой дли-

ны волны, одно из которых получают при включенном источнике излучения, а другое — при выключенном. Константа $I_{x,y}^0(\lambda)$ содержит информацию о постоянной засветке при выключенном источнике излучения. Коэффициент крутизны $\alpha_{x,y}(\lambda)$ характеристики вычисляют как

$$\alpha_{x,y}(\lambda) = \frac{I_{x,y}^e(\lambda) - I_{x,y}^0(\lambda)}{R_e(\lambda)},$$

где R_e — коэффициент отражения излучения от эталона; $I_{x,y}^e(\lambda)$ — интенсивность излучения, зарегистрированного матричным приемником при включенном источнике излучения.

В силу неравномерности освещенности измеряемого образца, разной чувствительности отдельных пикселей матричного приемника излучения и наличия загрязнений, коэффициенты $\alpha_{x,y}(\lambda)$ и $I_{x,y}^0(\lambda)$ необходимо вычислять для каждого пикселя изображения. Расчет коэффициентов для каждой используемой длины волны позволяет учесть спектральные характеристики источника и приемника излучения, пропускание излучения компонентами оптической системы на различных длинах волн, а также постоянную засветку.

После проведения калибровки измерительной установки и вычисления коэффициентов $\alpha_{x,y}(\lambda)$ и $I_{x,y}^0(\lambda)$ для каждого пикселя матричного приемника распределение интенсивности, регистрируемое матрицей при измерении образца, может быть пересчитано в распределение его коэффициента отражения по выражению

$$R_{x,y}(\lambda) = \frac{I_{x,y}(\lambda) - I_{x,y}^0(\lambda)}{\alpha_{x,y}(\lambda)}. \quad (2)$$

Экспериментальное исследование предложенных алгоритмов.

Для проверки представленных алгоритмов нахождения распределения толщины была собрана экспериментальная установка, функциональная схема которой приведена на рис. 1 [10]. Для освещения пленочного покрытия был использован широкополосный источник излучения 1. Излучение от источника после прохождения через коллимирующую линзу 2, светоделительный кубик 5 и объектив 4 отражается от исследуемого пленочного покрытия 3, а затем проходит через перестраиваемый акусто-оптический фильтр с двойным монохроматором 6, который пропускает излучение в спектральной полосе шириной 2 нм. Далее излучение фокусируется на матрице 8 с помощью объектива 7.

В экспериментальных исследованиях был использован образец (рис. 2), представляющий собой кремниевую подложку со слоем диоксида кремния толщиной 542 нм, на который нанесена пленка полиметилметакрилата (ПММА) с переменным профилем поверхности.

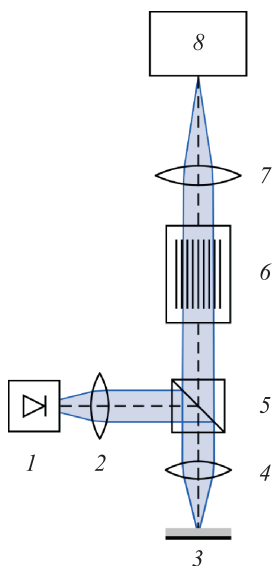


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — широкополосный источник излучения; 2 — коллимирующая линза; 3 — исследуемая пленочная структура; 4 — объектив; 5 — светоделительный кубик; 6 — акустооптический фильтр; 7 — фокусирующий объектив; 8 — матричный приемник излучения

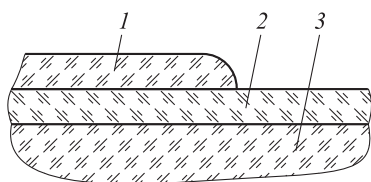


Рис. 2. Структура измеряемого образца:

1 — ПММА; 2 — диоксид кремния; 3 — кремний

Спектральные изображения пленочной структуры и эталонного образца, полученные на экспериментальной установке, приведены на рис. 3. Спектральные зависимости интенсивности излучения, регистрируемого соответствующим пикселем матричного приемника (кривая 1), которые построены для точек, отмеченных на рис. 3, показаны

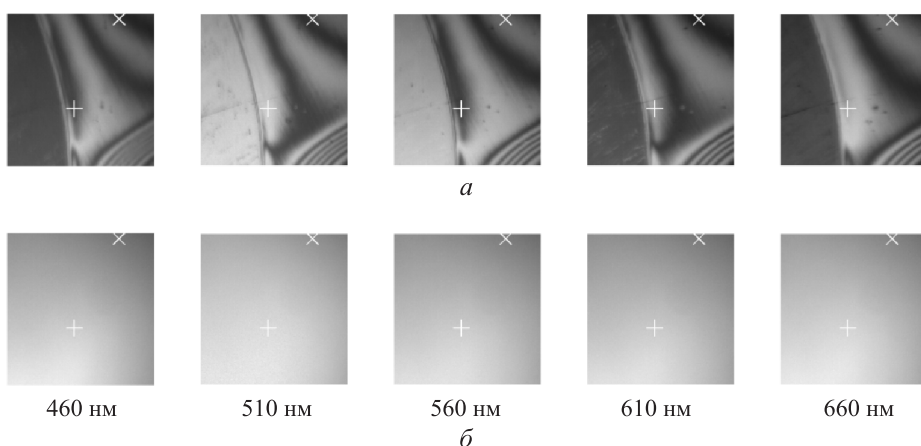


Рис. 3. Спектральные изображения исследуемой пленочной структуры (а) и подложки (б) для различных значений длины волны

на рис. 4. В процессе обработки с помощью описанного выше алгоритма нормировки на каждой длине волны вычисляют значения коэффициента отражения пленки (кривая 2). Кривая 3 представляет собой теоретическую зависимость коэффициента отражения, построенную с использованием значений толщины пленочного покрытия, найденных в результате регрессионного анализа.

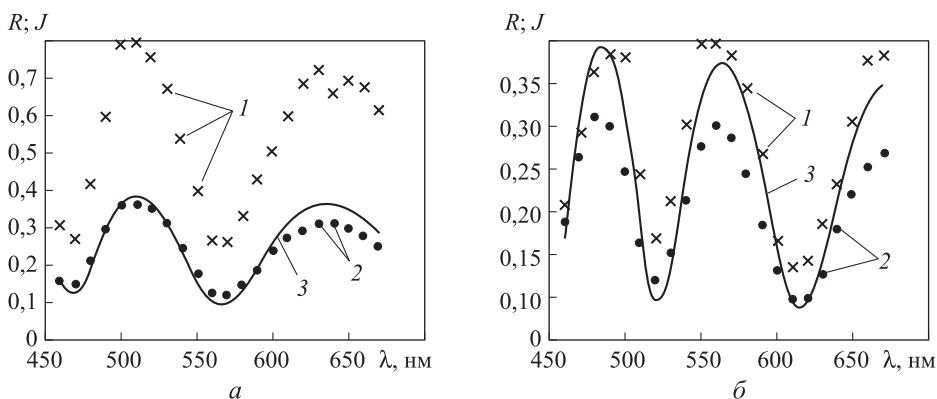


Рис. 4. Спектральные зависимости относительного значения интенсивности излучения (1), регистрируемого приемником, измеренного коэффициента отражения (2) и теоретического коэффициента отражения (3), вычисленного для найденных толщин исследуемого пленочного покрытия для точек, отмеченных знаками «+» (а) и «x» (б) на рис. 3

В процессе обработки спектральных изображений для каждой точки определяют зависимость коэффициента отражения излучения от длины волны, из которой путем проведения нелинейной регрессии находят толщину пленочного покрытия. Если полученные измерения не соответствуют используемой модели вследствие загрязнений, высокой зашумленности изображения или дефектов, то значение функции невязки будет большим. По этому признаку могут быть отфильтрованы те участки покрытия, толщина которых определена с погрешностью.

Результат измерения распределения толщин исследуемого образца приведен на рис. 5 (по осям x и y указаны значения по координатам в пикселях). Точки, значение функции невязки в которых выше выбранного эмпирически порогового значения, удалены. Следует отметить, что слои выбранной двухслойной пленочной структуры имеют близкие показатели преломления (1,49 для ПММА и 1,46 для диоксида кремния). Это приводит к погрешности определения толщины каждой структуры. Однако суммарную толщину определяют достаточно точно. В результате среднеквадратическое отклонение (СКО) для участка с однослойным покрытием из диоксида кремния SiO_2 и внешней поверхности двухслойного покрытия составляет 0,7...1,0 нм, а СКО толщины на границе раздела диоксида кремния SiO_2 и ПММА — 7...10 нм.

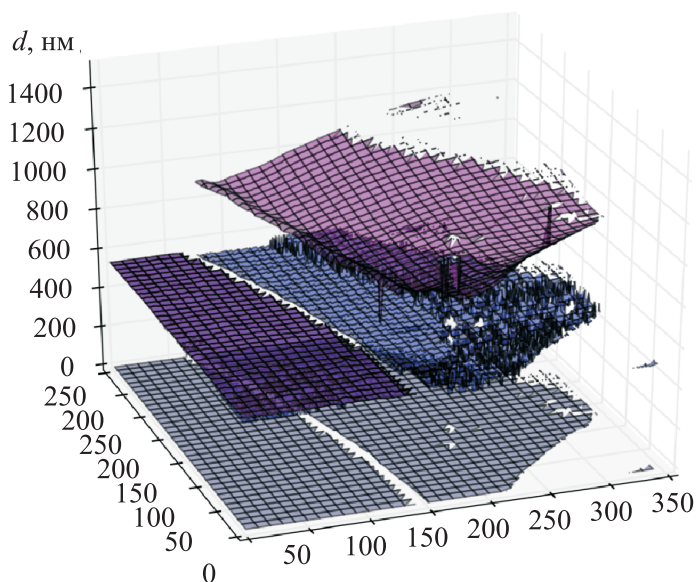


Рис. 5. Распределение толщин пленочного покрытия

Различие измеренного и полученного теоретически значений коэффициента отражения велико (см. рис. 4, б), поэтому эта точка не отображается на рис. 5, так как значение невязки для нее выше выбранного порогового значения. Отметим, что теоретическая зависимость коэффициента отражения для точек на краю поля зрения отличается от экспериментальной зависимости преимущественно по амплитуде. По мнению авторов настоящей работы, такое отличие связано со значительным отклонением угла падения излучения в этой области от нормального, что необходимо учитывать в математической модели. Однако эта гипотеза требует проведения более подробного исследования. Еще одной возможной причиной погрешностей может быть наблюдаемое взаимное смещение изображения участка образца в различных спектральных диапазонах, которое возникает вследствие хроматических аберраций оптической системы.

Заключение. Представлен метод измерения распределения толщин многослойных пленочных микроструктур с использованием оптической спектральной рефлектометрии, метод калибровки измерительной установки с помощью эталонного образца с известным коэффициентом отражения и метод фильтрации погрешностей измерения. Предложенные методы проверены экспериментально на специально созданной установке с применением микроскопа на основе перестраиваемого акустооптического фильтра. В результате экспериментальных исследований установлено следующее: СКО толщины для участка с однослойным покрытием из диоксида кремния SiO_2 и внешней поверхности двухслойного покрытия составляет $0,7 \dots 1,0$ нм, а СКО толщины на границе раздела диоксида кремния SiO_2 и ПММА — $7 \dots 10$ нм. Это объясняется близки-

ми значениями показателя преломления двух сред (1,49 для ПММА и 1,46 для диоксида кремния).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-08-01103 А.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ozaydin-Ince Gozde, Coclite Anna Maria, Gleason Karen K.* CVD of polymeric thin films: applications in sensors, biotechnology, microelectronics/organic electronics, microfluidics, MEMS, composites and membranes // *Rep. Prog. Phys.* 2012. Vol. 75. No. 1. P. 016501.
2. *Bader G., Ashrit P.V., Truong V.V.* Transmission and reflection ellipsometry of thin films and multilayer systems // *Applied Optics.* 1998. Vol. 37. No. 7. P. 1146–1151.
3. *Manifacier J.C., Gasiot J., Fillard J.P.* A simple method for the determination of the optical constants n , k and the thickness of a weakly absorbing thin film // *Journal of Physics E: Scientific Instruments.* 1976. Vol. 9. No. 11. P. 1002.
4. *Ghim Y.S., Suratkar A., Davies A.* Reflectometry-based wavelength scanning interferometry for thickness measurements of very thin wafers // *Optics Express.* 2010. Vol. 18. No. 7. P. 6522–6529.
5. *Tsepulin V.G., Perchik A.V., Tolstoguzov V.L., Karasik V.E.* Thin film thickness measurement error reduction by wavelength selection in spectrophotometry // *Journal of Physics: Conference Series.* 2015. Vol. 584.
6. *Measurement of the thickness profile of a transparent thin film deposited upon a pattern structure with an acousto-optic tunable filter / D. Kim et al.* // *Optics Letters.* 2002. Vol. 27. No. 21. P. 1893–1895.
7. *Лазерный рефлектометрический метод измерения толщины нанопленок золота на кварцевой подложке / В.А. Городничев, М.Л. Белов, А.М. Белов, С.В. Березин, Ю.В. Федотов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журнал.* 2012. № 3. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/326698.html>
8. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
9. *Bates D.M., Watts D.G.* Nonlinear Regression Analysis and its Applications. John Wiley & Sons, Inc., 1988.
10. *Перчик А.В., Толстогузов В.Л., Стасенко К.В., Цепулин В.Г.* Метод измерения распределения толщин ИТО-покрытий с помощью акустооптического видеоспектрометра // *Инженерный журнал: наука и инновации.* 2013. Вып. 9. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-9-915 URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/915.html>

REFERENCES

- [1] *Ozaydin-Ince Gozde, Coclite Anna Maria, Gleason Karen K.* CVD of polymeric thin films: applications in sensors, biotechnology, microelectronics/organic electronics, microfluidics, MEMS, composites and membranes. *Rep. Prog. Phys.*, 2012, vol. 75, no. 1, p. 016501.
- [2] *Bader G., Ashrit P.V., Truong V.V.* Transmission and reflection ellipsometry of thin films and multilayer systems. *Applied Optics*, 1998, vol. 37, no. 7, pp. 1146–1151.
- [3] *Manifacier J.C., Gasiot J., Fillard J.P.* A simple method for the determination of the optical constants n , k and the thickness of a weakly absorbing thin film. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1976, vol. 9, no. 11, p. 1002.
- [4] *Ghim Y.S., Suratkar A., Davies A.* Reflectometry-based wavelength scanning interferometry for thickness measurements of very thin wafers. *Optics Express*, 2010, vol. 18, no. 7, pp. 6522–6529.

- [5] Tsepulin V.G., Perchik A.V., Tolstoguzov V.L., Karasik V.E. Thin film thickness measurement error reduction by wavelength selection in spectrophotometry. *Journal of Physics: Conference Series*, 2015, vol. 584.
- [6] Kim D. et al. Measurement of the thickness profile of a transparent thin film deposited upon a pattern structure with an acousto-optic tunable filter. *Optics Letters*, 2002, vol. 27, no. 21, pp. 1893–1895.
- [7] Gorodnichev V.A., Belov M.L., Belov A.M., Berezin S.V., Fedotov Yu.V. Laser reflectometry method of measurement of thickness of gold nanofilms on quartz substrate. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science & Education of the Bauman MSTU. Electronic Journal], 2012, no. 3. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/en/doc/326698.html>
- [8] Born M., Wolf E. Principles of Optics. Oxford, London, Edinburgh, N.Y., Paris, Frankfurt, Pergamon Press, 1968.
- [9] Bates D.M., Watts D.G. Nonlinear Regression Analysis and its Applications. John & Wiley Sons, Inc., 1988.
- [10] Perchik A.V., Tolstoguzov V.L., Stasenko K.V., Tsepulin V.G. Spatial distribution of ITO-coating thickness measurement technique by AOTF spectrometer. *Jel-ektr. nauchno-tekh. izd. «Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovacii»* [El. Sci.-Tech. Publ. "Eng. J.: Science and Innovation"], 2013, iss. 9.
DOI: 10.18698/2308-6033-2013-9-915
Available at: <http://engjournal.ru/eng/catalog/pribor/optica/915.html>

Статья поступила в редакцию 23.12.2015

Цепулин Владимир Германович — младший научный сотрудник НОЦ «Фотоника и ИК-техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Tsepulin V.G. — Junior Research Scientist of Scientific Educational Center Photonics and IR-Technology, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Толстогузов Виктор Леонидович — младший научный сотрудник НОЦ «Фотоника и ИК-техника» (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Tolstoguzov V.L. — Junior Research Scientist of Scientific Educational Center Photonics and IR-Technology, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Карасик Валерий Ефимович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Karasik V.E. — Dr. Sci. (Eng.), Professor of Laser and Optoelectronic Systems Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Перчик Алексей Вячеславович — канд. техн. наук, младший научный сотрудник НОЦ «Фотоника и ИК-техника» (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Perchik A.V. — Cand. Sci. (Eng.), Junior Research Scientist of Scientific Educational Center Photonics and IR-Technology, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Арефьев Алексей Павлович — студент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Arefev A.P. — student of Laser and Optoelectronic Systems Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Цепулин В.Г., Толстогузов В.Л., Карасик В.Е., Перчик А.В., Арефьев А.П. Измерение распределения толщин многослойных пленочных структур методами спектральной рефлектометрии // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2016. № 3. С. 3–12. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-3-3-12

Please cite this article in English as:

Tsepulin V.G., Tolstoguzov V.L., Karasik V.E., Perchik A.V., Arefev A.P. Thickness Distribution Measurement of Multilayer Film Structures by Spectral Reflectometry Methods. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2016, no. 3, pp. 3–12. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-3-3-12