

УДК 535.2+535.3

DOI 10.31040/2222-8349-2018-0-2-10-13

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

© О.В. Мкртычев

Рассмотрены результаты экспериментов по определению показателей преломления и толщин наноразмерных слоев тонкопленочных покрытий из диоксидов кремния и титана, нанесенных на стеклянную подложку. Проведен теоретический анализ и численные эксперименты моделирования процесса взаимодействия лазерного монохроматического излучения с системой плоскопараллельных прозрачных пленок. Разработана система рекуррентных соотношений для определения показателя преломления и толщины слоев наноразмерных пленок. Результаты исследований сравниваются с результатами численного моделирования параметров системы плоскопараллельных пленок по известным методам Абеле и Скандоне–Баллерини.

Ключевые слова: плоскопараллельные системы, тонкопленочные покрытия, отражение, преломление, поглощение, рекуррентные соотношения.

Технологии тонкопленочных покрытий, обобщая многие приемы и достижения производственных технологий, являются одним из ведущих направлений интегральной электроники. Одним из достоинств этой технологии является возможность выбора материалов с оптимальными параметрами для получения требуемых характеристик пассивных элементов. В виду все большего усложнения интегральных схем и выполняемых ими функций, необходимо проводить исследования с углубленным теоретическим анализом задач определения оптических и геометрических характеристик синтезируемых пленочных покрытий. В работах [1–6] экспериментально и теоретически исследовались проблемы взаимодействия мощного импульсного излучения со стеклянными образцами, покрытыми наноразмерными пленками. В числе ряда задач, возникающих при таком взаимодействии излучения с веществом, важную роль играют задачи определения оптических и геометрических характеристик покрытий неразрушающими методами. Аналитическое рассмотрение этих задач [7–10] позволило разработать метод определения показателя преломления каждого слоя и его толщину по результатам фотометрических измерений. В данной работе описываются результаты проведенных экспериментов с целью верификации полученных соотношений.

Стеклянные образцы с нанесенными на них многослойными тонкопленочными покры-

тиями из диоксидов кремния и титана изготавливались по методике, описанной в [1]. Для проведения спектрофотометрических исследований была собрана экспериментальная установка (рис. 1).

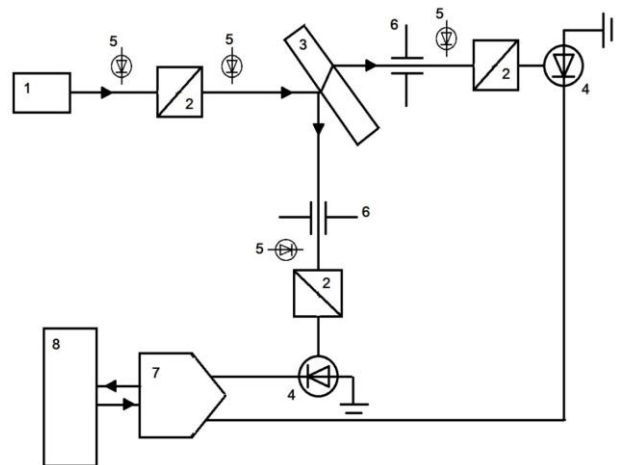


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – источник излучения, 2 – поляризаторы, 3 – образец, 4 и 5 – стационарные и переносные приемники излучения, 6 – диафрагмы, 7 – АЦП, 8 – компьютер

Были исследованы свыше двухсот образцов с различным составом и различным количеством пленок [3–5]. Излучение лазера на длине волны 632 нм из источника 1 направлялось под некоторым углом на закрепленный образец 3, проходя при этом через поляризатор 2. После прохождения через систему диафрагм и поляризаторов отраженное и преломленное излуче-

ние попадало на поверхность фотодиодов 4, показания которых через аналого-цифровой преобразователь 7 поступали для записи и обработки на компьютер 8. После этого устанавливалось новое значение угла падения излучения, и эксперимент повторялся. Угол падения менялся на установке от минимального значения в 27° до максимального значения в 78° . По результатам исследований были определены экспериментальные значения энергетических коэффициентов отражения, преломления и поглощения излучения.

Полученные экспериментальные значения энергетических коэффициентов отражения, преломления и поглощения излучения (рис. 2) послужили исходными данными для определения количества слоев в системе тонкослойных покрытий, показателей преломления и толщины каждого слоя.

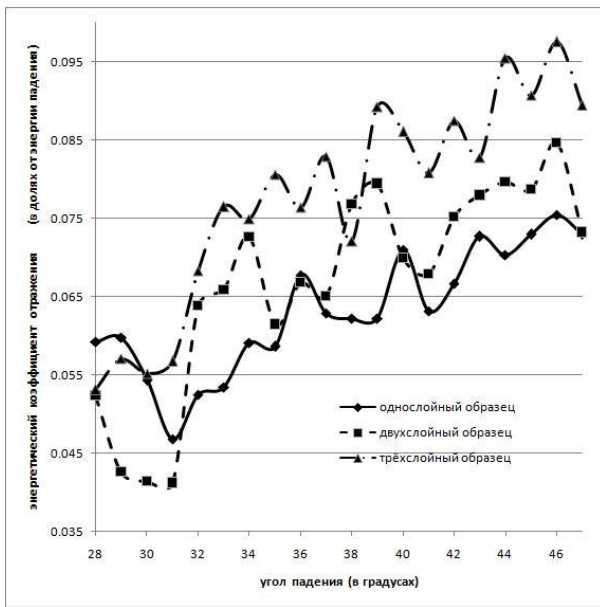


Рис. 2. Экспериментальные значения энергетических коэффициентов отражения для однослойного, двухслойного и трехслойного покрытий из оксида кремния

Энергетические коэффициенты отражения A , преломления B и поглощения C при прохождении волной через произвольное число n слоев вычислялись по рекуррентным соотношениям [7–10]:

$$A_{0-n} = a_{01} + f_1 b_{10} g_{12} d_{01} + b_{10} \sum_{i=2}^{n-1} (g_{i+1,i+2} \prod_{k=1}^{i+1} (f_k d_{k-1,k}) \prod_{j=1}^i (f'_j d_{j+1,j})),$$

$$B_{0-n} = b_{n-1,n} \prod_{i=1}^{n-1} (f_i d_{i-1,i}),$$

$$C_{0-n} = 1 - A_{0-n} - B_{0-n}.$$

Здесь a , b и c — энергетические коэффициенты отражения, преломления и поглощения излучения на границе раздела каждой смежной пары слоев в системе покрытий. Коэффициенты a и b имеют смысл соответствующих энергетических коэффициентов Френеля. Остальные обозначения [7] равны:

$$d_{i,i+1} = b_{i,i+1} - c_{i+1}, \quad g_{i,i+1} = a_{i,i+1} - c_i,$$

$$f_i = \frac{1}{1 - g_{i,i-1} g_{i,i+1}}.$$

Штрихами отмечены величины для излучения в обратном направлении.

На рис. 2 экспериментальные значения показаны точками из ромбов, квадратов и треугольников. Сплошные линии на рис. 2 представляют результат интерполяции этих данных по полученным рекуррентным соотношениям.

Решалась также и прямая задача синтеза многослойных покрытий, то есть по заданным показателям преломления и толщинам каждого слоя определялись энергетические коэффициенты отражения, преломления и поглощения излучения. Для верификации полученной системы полученные результаты сравнивались с решениями аналогичной задачи, полученными с помощью известных методов Абеле и Скандоне–Баллерини [11]. Экспериментальные и вычисленные результаты показали хорошее качественное и количественное совпадение (рис. 3).

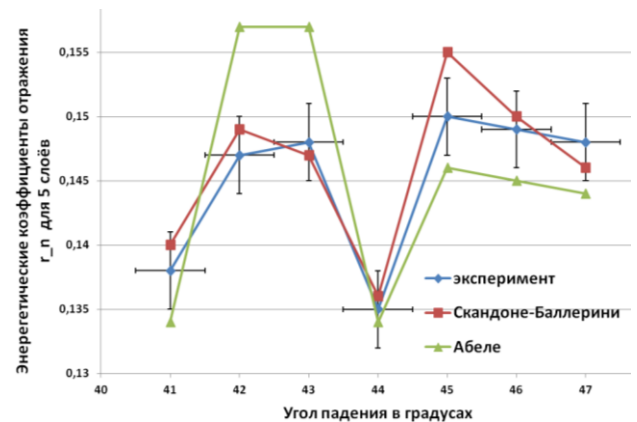


Рис. 3. Сравнение данных численного эксперимента по рекуррентным соотношениям (ромб) с данными метода Абеле (треугольники) и метода Скандоне–Баллерини (квадрат)

Ошибка сравнения между различными методами составила не более 3% для однослойных покрытий. С ростом числа слоев в системе по-

крытий ошибка возрастает. Например, для пяти слоев ошибка составляет уже в среднем около 10%.

В ходе исследований взаимодействия мощного импульсного излучения с веществом для определения некоторых параметров системы тонкослойных покрытий рассматривалась геометрическая модель распространения монохроматической поляризованной волны в линейных изотропных средах без пространственной дисперсии. В ходе проведенных экспериментов были верифицированы рекуррентные выражения для вычисления интегральных энергетических коэффициентов преломления и отражения многослойного покрытия по результатам спектрофотометрических измерений. Разработка данного метода определения оптических свойств многослойных покрытий может стать еще одним хорошим средством для неразрушающего контроля в тонкопленочных технологиях.

Литература

1. Мкртычев О.В., Шеманин В.Г. Лазерное абляционное разрушение нанопленок на поверхности стеклянных образцов // Известия Уфимского научного центра РАН. 2015. № 2. С. 5–10. URL: http://www.sciencerb.ru/vyp/2_2015/5-10.pdf (дата обращения: 12.03.2018).
2. Мкртычев О.В., Привалов В.Е., Фотиади А.Э., Шеманин В.Г. Лазерная абляция нанокomпозитов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2015. Вып. 1 (213). С. 128–135.
3. Atkarskaya A.B., Mkrtychev O.V., Privalov V.E., Shemanin V.G. Laser ablation of the glass nanocomposites // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. 2014. V. 23, Iss. 4. P. 265–270.
4. Shemanin V.G., Mkrtychev O.V. The optical strength of the glass nanocomposites at laser ablation // *Journal of Physics: Conference Series*. 2015. V. 653. No. 1. P. 012012.
5. Аткарская А.Б., Мкртычев О.В., Шеманин В.Г. Изменение показателя преломления наноразмерных пленок при модифицировании стеклянных подложек // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. № 8/2. С. 238–239.
6. Mkrtychev O.V., Privalov V.E., Fotiadi A.E., Shemanin V.G. Laser ablation studies of nanocomposites // *St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*. 2015. Iss. 1. P. 82–86.
7. Мкртычев О.В. Аналитическое исследование энергетических коэффициентов отражения и пре-

ломления света // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. 2012. № 4. С. 36–37.

8. Шеманин В.Г., Аткарская А.Б., Мкртычев О.В. Аналитическое исследование энергетических коэффициентов отражения и преломления света от многослойных плоскопараллельных систем // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2014. Т. IV, № 3. С. 29–34.

9. Мкртычев О.В. Аналитическое исследование взаимодействия световых волн с системой плоскопараллельных сред // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. № 6. С. 239–241.

10. Кадрик К.А., Мкртычев О.В. К динамике и кинематике энергетического взаимодействия с системой плоскопараллельных или концентрических сред // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. № 1. С. 238–242.

11. Эллипсометрия – метод исследования поверхности // Эллипсометрия – метод исследования физико-химических процессов на поверхности твердых тел: Труды II Всесоюзной конференции Новосибирск: Наука, 1983. 181 с.

References

1. Mkrtychev O.V., Shemanin V.G. Laser ablation degradation of nanofilms on the surface of glass specimens. *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2015, no. 2, pp. 5–10. Available at: http://www.sciencerb.ru/vyp/2_2015/5-10.pdf (accessed March 12, 2018).
2. Mkrtychev O.V., Privalov V.E., Fotiadi A.E., Shemanin V.G. Laser ablation of nanocomposites. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki*, 2015, iss. 1 (213), pp. 128–135.
3. Atkarskaya A.B., Mkrtychev O.V., Privalov V.E., Shemanin V.G. Laser ablation studies of the glass nanocomposites. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, 2014, vol. 23, iss. 4, pp. 265–270.
4. Shemanin V.G., Mkrtychev O.V. The optical strength of the glass nanocomposites at laser ablation. *Journal of Physics. Conference Series*, 2015, vol. 653, no. 1, pp. 012012.
5. Atkarskaya A.B., Mkrtychev O.V., Shemanin V.G. Changing refractive index of nanosized films under modification of glass substrates. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika. Izdanie Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 8/2, pp. 238–239.
6. Mkrtychev O.V., Privalov V.E., Fotiadi A.E., Shemanin V.G. Laser ablation studies of nanocomposites. *Journal of St. Petersburg Polytechnical University. Physics and Mathematics*. 2015, iss. 1, pp. 82–86.
7. Mkrtychev O.V. Analytical study on energetic coefficients of light reflection and refraction. *Izvestiya*

vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region, 2012, no. 4, pp. 36–37.

8. Shemanin V.G., Atkarskaya A.B., Mkrtychev O.V. Analytical study on energetic coefficients of light reflection and refraction from multilayer plane-parallel systems. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 29–34.

9. Mkrtychev O.V. Analytical study on interaction of light waves with the system of plane-parallel media. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*, 2014, no. 6, pp. 239–241.

10. Kadrik K.A., Mkrtychev O.V. On dynamics and kinematics of energetic interaction with the system of plane-parallel or concentric media. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*, 2014, no. 1, pp. 238–242.

11. Ellipsometry as a method for studying the surface. *Trudy II Vsesoyuznoy konfetsentsii "Ellipsometriya – metod issledovaniya fiziko-khimicheskikh protsessov na poverkhnosti tverdykh tel"* (Novosibirsk, 1981. A.V. Rzhakov (ed.). Novosibirsk, Nauka, 1983. 181 p.



DETERMINING OPTICAL CHARACTERISTICS OF PLANE-PARALLEL SYSTEMS USING SPECTROMETRY

© O.V. Mkrtychev

Shukhov Belgorod State Technological University, Novorossiysk Branch,
75, ulitsa Myskhakskoe shosse, 353919, Novorossiysk, Russian Federation

This article considers the experimental results on determining refractive indices and thicknesses of thin-film coatings of silicon dioxide and titanium dioxide deposited on a glass substrate. Theoretical analysis and numerical experiments have been carried out to simulate the interaction of laser monochromatic radiation with a system of plane-parallel transparent films. A system of recurrence relations has been developed to determine the refractive index and the thickness of nanosized layers. The research results are compared with those of numerical simulation of the parameters using the known Abele and Scandone-Ballerini methods.

Key words: plane-parallel systems, thin-film coatings, reflection, refraction, absorption, recurrence relations.