

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-5-36-40>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ МНОГОСЛОЙНЫХ ЗЕРКАЛ

© Андрей Алексеевич Сергиенко¹, Дмитрий Борисович Пушкин^{1*}, Павел Александрович Конотопов², Алексей Дмитриевич Черемных¹

¹ НИТУ «МИСиС», Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., д. 4; e-mail: pushkindmitriy05@gmail.com

² НИИ НПО «ЛУЧ», Россия, 142103, Московская обл., г. Подольск, ул. Железнодорожная, д. 24.

Статья поступила 31 августа 2022 г. Поступила после доработки 24 ноября 2022 г.

Принята к публикации 26 декабря 2022 г.

Тонкопленочные покрытия для оптических элементов широко применяют в различных областях промышленности. Так, просветляющие покрытия используют для экранов дисплеев, фотодетекторов, волоконных световодов, зеркальные покрытия — для телескопов, медицинской техники и др. Одна из основных задач при производстве тонкопленочных покрытий — определение показателя преломления и выбор материалов, наносимых на оптические изделия. В работе представлены результаты определения показателей преломления материалов, применяемых для изготовления многослойных зеркал с требуемыми спектральными характеристиками. В общем случае отражение света происходит на границе раздела двух материалов, например, стекла и воздуха. Диэлектрические пленки получали методом высокочастотного ионно-лучевого распыления мишени. Показано, что для достижения минимальных систематических ошибок показатель преломления пленки SiO₂ необходимо неоднократно корректировать. Полученные результаты могут быть использованы в производстве высокоточных оптических систем для различных отраслей промышленности, в особенности медицины, космического приборостроения, авиации и др.

Ключевые слова: оптические покрытия; ионно-лучевое распыление; коэффициент отражения; коэффициент пропускания; показатель преломления.

DETERMINATION OF REFRACTIVE INDICES OF MATERIALS IN MODELING MULTILAYER MIRRORS

© Andrey A. Sergienko,¹ Dmitriy B. Pushkin,^{1*} Pavel A. Konotopov,² Alexey D. Cheremnykh¹

¹ National Research Technological University “MISIS”, 4, Leninsky prosp., Moscow, 119049, Russia; e-mail: pushkindmitriy05@gmail.com

² JSC Scientific Research Institute NPO “LUCH,” 24, Zheleznodorozhnaya ul., Podolsk, Moscow obl., 142103, Russia.

Received August 31, 2022. Revised November 24, 2022. Accepted December 26, 2022.

Thin-film coatings for optical elements are widely used in various industries. Antireflection coatings are used in display screens, photodetectors, fiber optic light guides, mirror coatings are used for telescopes, medical equipment, etc. One of the main goals in the production of thin-film coatings is to determine the refractive index and the choice of materials applied to optical products. We present the results of determining the refractive indices of materials used for the manufacture of multilayer mirrors with the desired spectral characteristics. In general, light reflection occurs at the interface between two materials, for example, glass and air. Dielectric films were obtained by high-frequency ion-beam sputtering of the target. It is shown that the refractive index of the SiO₂ film must be repeatedly corrected to minimize systematic errors. The results obtained can be used in the production of high-precision optical systems for various industries, especially medicine, space instrumentation, aviation and others.

Keywords: optical coatings; ion beam sputtering; reflection coefficient; transmission coefficient; refractive index.

Введение

При производстве оптических зеркал широко используют многослойные тонкопленочные диэлектрические структуры, которые изготавливают путем нанесения на подложки в вакуумной

камере последовательности слоев с различными толщинами и показателями преломления. Современные многослойные оптические покрытия, в первую очередь покрытия для высокотехнологичных применений, могут состоять из десятков

и даже сотен слоев [1]. Для таких сложных, с большим количеством слоев покрытий, как правило, применяют оптический контроль процесса нанесения [2 – 7].

Оптические свойства пленок, полученных при разных условиях осаждения, различны. Поэтому для создания зеркал с требуемыми спектрами отражения уже на этапе проектирования необходимо моделирование будущей структуры. Модель должна включать точное определение показателей преломления тонких пленок, составляющих оптическое покрытие. При ошибочном моделировании оптических покрытий и неверном выборе показателя преломления оптическое изделие может не удовлетворять поставленным задачам [8, 9].

Цель работы — определение показателей преломления материалов, используемых для изготовления отражающего покрытия, при моделировании оптического зеркала, состоящего из многослойной структуры.

Материалы, методика, оборудование

Одно из основных требований, предъявляемых к покрытиям, — устойчивость к воздействию излучения, поэтому для формирования тонкопленочной многослойной структуры выбрали такие материалы пленок, как диоксид кремния (SiO_2) и пентоксид тантала (Ta_2O_5). Образцы получали методом реактивного ионно-лучевого распыления (ИЛР) мишени в вакуумной установке Reticle (IBSD) (рис. 1).

Установка позволяла наносить пленки на пластины диаметром до 300 мм с заданной скоростью вращения и включала:

высокочастотный трехсеточный ионный источник с индуктивно-связанной плазмой распыления, а также ионный источник ассистирования и очистки подложек;

до четырех видов мишеней для получения многослойных покрытий;

оптический контроль толщины и скорости напыления;

управление процессом осаждения.

Вакуумная откачка осуществлялась с использованием безмасляного и высоковакуумного криогенного насосов (скорость откачки — 10 000 л/с), управление — с помощью программного обеспечения Aeres.

Функционал встроенной высокоточной оптической системы для одно- или многослойных покрытий включал: двулучевое управление с четырехфазным разделенным и разомкнутым оптическим лучом, многократный длинноволновой мониторинг для определения окончания процесса, полное спектральное сканирование между слоя-



Рис. 1. Вакуумная установка Reticle (IBSD)

Fig. 1. Reticle vacuum unit (IBSD)

ми. Сканирование проводилось в диапазоне длин волн 400 – 1100 нм.

Спектральные свойства пленок определяли на спектрофотометре Agilent Cary 7000.

Технология нанесения пленок ИЛР заключается в бомбардировке мишени пучком ионов с энергией до 1,5 кэВ с последующим осаждением распыленного материала на подложку. ИЛР имеет ряд преимуществ по сравнению с нанесением пленок методом магнетронного распыления мишени. При ИЛР плазма размещается внутри источника ионов, поэтому давление в рабочей камере может поддерживаться на более низком уровне. Кроме того, метод ИЛР обеспечивает стабильность процесса при сохранении высокой скорости нанесения, образец не подвергается непосредственному воздействию ионного пучка, поэтому пленка меньше подвержена загрязнению молекулами рабочих газов. Отметим, что источник ионов обеспечивает полный и независимый контроль потока и энергии ионов. Это дает возможность получать пленки с низким уровнем рассеяния света, а также с более высокой адгезией пленки к подложке.

При получении образцов использовали мишени тантала (99,95 %) и кремния (99,999 %).

Показатели преломления полученных диэлектрических пленок определяли с помощью программы OptiChar.

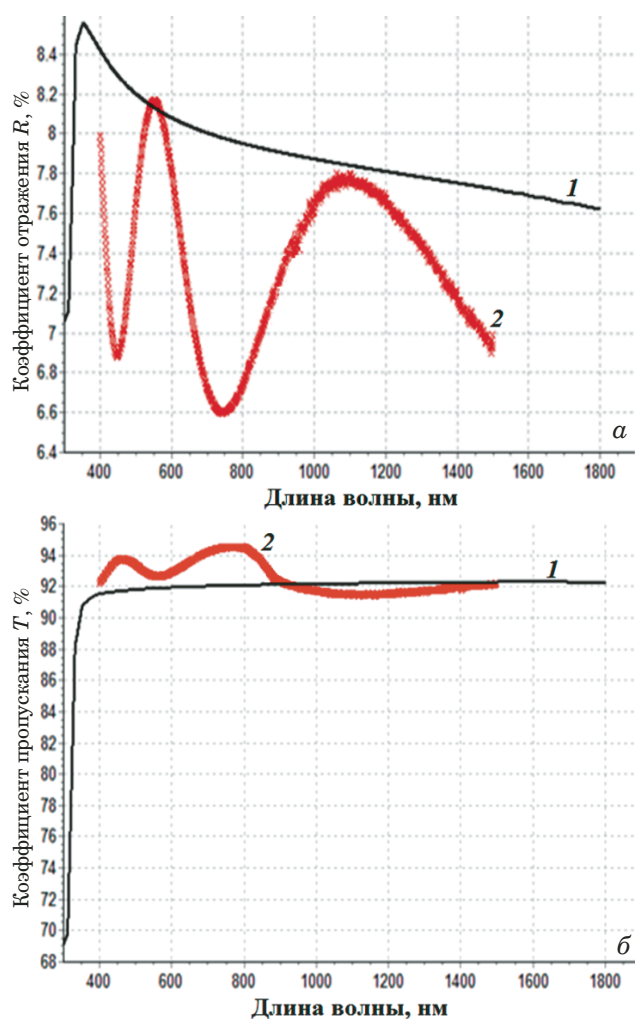


Рис. 2. Зависимости коэффициентов отражения R (а) и прозрачности (пропускания) T (б) от длины волны: 1 — непокрытая подложка из стекла марки ВК-7; 2 — пленка SiO_2

Fig. 2. Dependences of the reflection R (a) and transparency (transmission) T (b) coefficients on the wavelength: 1 — uncoated substrate made of VK-7 glass; 2 — SiO_2 film

Обсуждение результатов

На рис. 2 приведены спектральные данные пленки SiO_2 и непокрытой подложки из стекла марки ВК-7.

Используя результаты измерений коэффициентов отражения и пропускания, определяли показатель преломления диэлектрической пленки SiO_2 . На рис. 3 приведены зависимости показателя преломления n от длины волны. Видно, что расчетные значения n согласуются с литературными данными, но существенно меньше.

Заметим, что от двух поверхностей раздела стекла ($n \approx 1,51$) и воздуха отражается около 8,6 % света, падающего под углом 0° относительно нормали к поверхности [10].

Вычисленный показатель преломления пленки SiO_2 далее использовали при моделировании многослойного зеркала. Показатель преломления пленки Ta_2O_5 определяли аналогично и также с использованием подложки из стекла марки ВК-7.

Качество моделирования оценивали с помощью модели тестового зеркала с опорной длиной волны 1060 нм, состоящей из семи пар четверть-волновых слоев. После нанесения пленок и формирования оптического покрытия сравнивали расчетную и фактическую спектральные зависимости коэффициента пропускания от длины волны (рис. 4).

Выполненный сравнительный анализ с помощью программы OptiRE показал, что: 1) существуют систематические ошибки в слоях Ta_2O_5 и SiO_2 (несоответствие спектральных кривых в диапазоне длин волн 530 ± 20 нм); 2) значения показателей преломления для SiO_2 и Ta_2O_5 определены недостаточно точно (фактическая ширина высоко отражающей области уже расчетной [14, 15]).

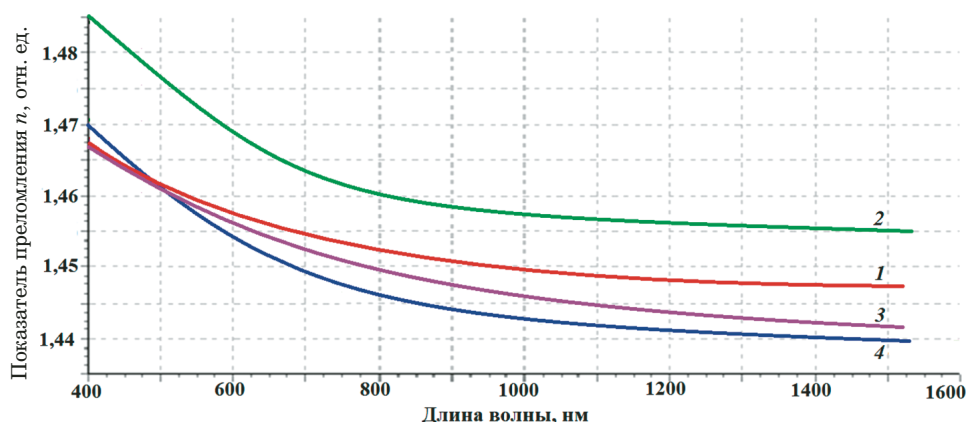


Рис. 3. Зависимости показателя преломления n пленки SiO_2 от длины волны: 1 — литературные данные [9]; 2, 3 — экспериментальные данные, полученные на одной стороне образца и с учетом второй стороны; 4 — расчетные данные, полученные с учетом второй стороны образца

Fig. 3. Dependences of the refractive index n of the SiO_2 film on the wavelength: 1 — literature data [9]; 2, 3 — experimental data obtained on the one side of the sample and with allowance for the second side of the sample; 4 — calculated data obtained taking into account the second side of the sample

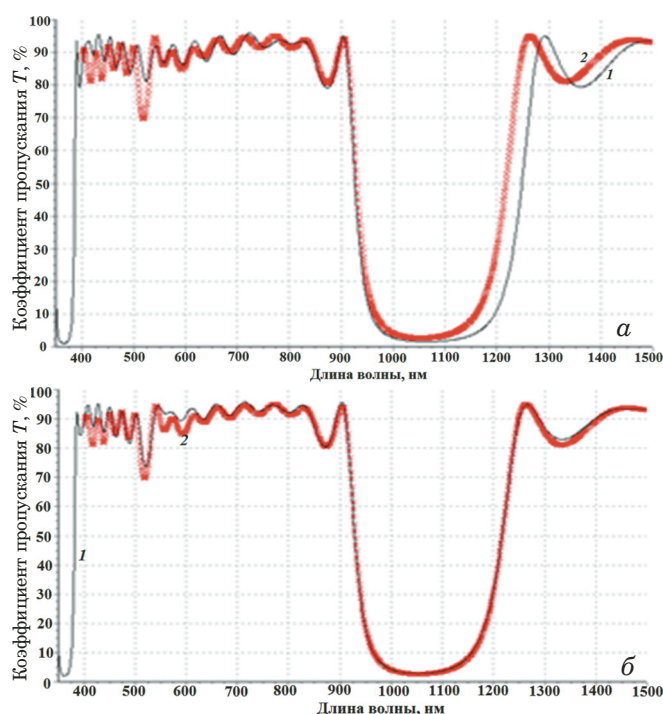


Рис. 4. Расчетная (1) и фактическая (2) зависимости коэффициента пропускания T от длины волны в модели тестового зеркала до (а) и после процедуры обратного проектирования (б)

Fig. 4. Calculated (1) and actual (2) dependences of the transmission coefficient T on the wavelength in the test mirror model before (a) and after the reverse engineering procedure (b)

Применяя обратное проектирование с тремя неизвестными параметрами [16 – 18], получили хорошее совпадение ширины высоко отражающих областей и спектральных кривых пропускания в диапазоне 530 ± 20 нм (см. рис. 4, б).

Чтобы обеспечить такое совпадение спектральных кривых оптического зеркала, при моделировании необходимо применять откорректированное значение показателя преломления пленки Ta_2O_5 . На рис. 5 представлены расчетная и скорректированная зависимости показателя преломления Ta_2O_5 .

Величины систематических ошибок в слоях тестового зеркала после корректировки показателя преломления пленки Ta_2O_5 приведены на рис. 6 (нечетные слои — Ta_2O_5 , четные — SiO_2).

Заключение

Моделирование многослойного зеркала осуществляли с использованием многослойной структуры, состоящей из чередующихся диэлектрических пленок SiO_2 и Ta_2O_5 , полученных методом реактивного ИЛР мишени. Определены спектральные зависимости показателя преломления материалов, используемых для нанесения отражающего покрытия. Требуемые спектральные

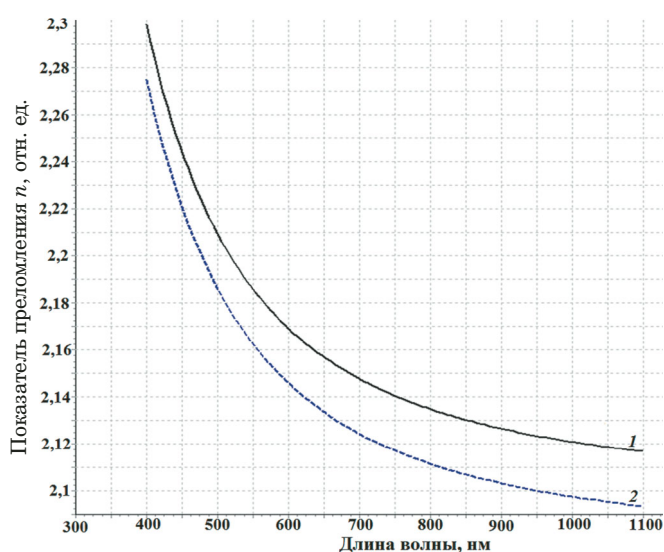


Рис. 5. Расчетная (1) и скорректированная (2) зависимости показателя преломления n пленки Ta_2O_5 от длины волны

Fig. 5. Calculated (1) and corrected (2) dependences of the refractive index n of the Ta_2O_5 film on the wavelength

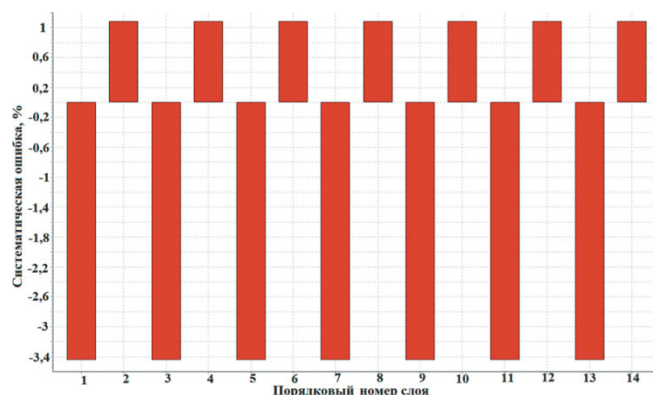


Рис. 6. Величины систематических ошибок в слоях тестового зеркала после корректировки показателя преломления пленки Ta_2O_5

Fig. 6. The values of systematic errors in the layers of the test mirror after adjusting the refractive index of the Ta_2O_5 film

характеристики зеркала обеспечивались корректировкой показателя преломления пленки Ta_2O_5 , а также установлением величины систематических ошибок в слоях SiO_2 и Ta_2O_5 , определенных из *in situ* данных (во время процесса напыления). Ошибки не превышали 1 и 3,4 % в слоях SiO_2 и Ta_2O_5 соответственно, что можно считать хорошим результатом сходимости расчетных и экспериментальных данных.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

1. **Macleod H. A.** Optical Thin Films and Coatings. — Taylor and Francis Group, 2010.

2. **Tikhonravov A., Trubetskov M., Amotchkina T.** Optical Thin Films and Coatings. — Cambridge: Woodhead, 2018.
3. **Semenov Z. V.** Indirect method research optical thickness control of multilayer coatings in a wide spectral range / Interexpo Geo-Siberia. 2018. Vol. 5. N 2. P. 179 – 191.
4. **Tikhonravov A., Trubetskov M., Kokarev M., et al.** Influence of systematic errors in spectral photometric measurements on the determination of optical thin film parameters / Optical Interference Coatings, Optical Society of America. 2001. Paper TuD2. DOI: 10.1364/OIC.2001.TuD2
5. **Burdovitsin V., Bakeev I. Karpov K., Ngon Kiki L., Oks E., Vizir A.** Characteristics of a source for oxide coating deposition by the electron-beam evaporation of dielectric materials / Plasma. 2022. Vol. 5. N 2. P. 258 – 264. DOI: 10.3390/plasma5020020
6. **Amotchkina T. V., Tikhonravov A. V., Trubetskov M. K., Yanshin S. A.** Structural properties of antireflection coatings / Optical Interference Coatings, Optical Society of America. 2007. Paper WB 5. DOI: 10.1364/OIC.2007.WB5
7. **Macleod H. A.** Turning value monitoring of narrow-band all-dielectric thin-film optical filters / Optica Acta: International Journal of Optics. 1972. N 1. P. 1 – 28.
8. **Macleod H. A.** Thin Film Optical Filters. — CRC Press, 2001.
9. **Tikhonravov A., Trubetskov M., Kozlov I., et al.** Correlated Choice of Design and Monitoring Strategy / Optical Interference Coatings, Optical Society of America. 2013. Paper WB3. DOI: 10.1364/OIC.2013.WB3
10. **Kochikov I. V., Sharapova S. A., Yagola A. G., Tikhonravov A. V.** Correlation of errors in inverse problems of optical coatings monitoring / J. Inverse Ill-Posed Probl. 2020. N 6. P. 915 – 921. DOI: 10.1515/jiip-2020-0079
11. **Baumeister P. W.** Methods of altering the characteristics of a multilayer stack / Journal of the Optical Society of America. 1962. N 10. P. 1149 – 1152.
12. **Thoeni W. P.** Deposition of optical coatings: process control and automation / Thin Solid Films. 1982. N 4. P. 385 – 397.
13. **Zorc H.** Optimum multilayer design selection in relation to production errors / Vacuum. 1987. N 1 – 2. P. 101 – 102.
14. **Isaev T. F., Tikhonravov A. V., Yagola L. G.** On the Choice of a Strategy for Broadband Optical Monitoring of the Deposition of Multilayer Coatings / Moscow University Physics Bulletin. 2021. Vol. 76. P. 36 – 41. DOI: 10.3103/S0027134921010070
15. **Zoeller A., Williams J., Hartlaub S.** Precision filter manufacture using direct optical monitoring / Proceedings of the OIC 11th Topical Meeting. — Washington DC: OSA, 2010. P. 6 – 11. DOI: 10.1364/OIC.2010.TuC8
16. **Tikhonravov A. V., Kochikov I. V., Matvienko I. A., et al.** Correlation of errors in optical coating production with broadband monitoring / Num. Methods Program. 2018. Vol. 19. P. 439 – 448. DOI: 10.26089/NumMet.v19r439
17. **Stenzel O., Wilbrandt S., Kaiser N., Fasold D.** Development of a hybrid monitoring strategy to the deposition of chirped mirrors by plasma-ion assisted electron evaporation / Proc. SPIE. 2008. N 7101. DOI: 10.1117/12.799711
18. **Semenov Z., Labuzov A., Zarubin A., Erg G.** Application of multilayer dielectric coatings for suppression of radiation of non-working orders of the spectrum in spectrometers with a diffraction grating / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2017. Vol. 83. N 1. Part II. P. 86 – 89 [in Russian].