

УДК 658.512

© А. Н. Тропин

ПРЕДПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ В ТЕХНОЛОГИИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

При изготовлении тонкопленочных оптических покрытий использование достоверного и надежного метода контроля осаждения пленок является ключевым инструментом для их успешной реализации. Выбор наилучшей стратегии контроля возможно осуществить с использованием так называемого предпроизводственного анализа. На примере структур узкополосного и коротковолнового блокирующего фильтров для инфракрасного диапазона спектра продемонстрированы возможности указанного подхода. Развитая в работе процедура для определения наиболее подходящей стратегии контроля позволит получать воспроизводимые результаты в технологических процессах вакуумного осаждения многослойных оптических покрытий.

Кл. сл.: оптика тонких пленок, многослойное тонкопленочное покрытие, спектральная система контроля, вычислительный эксперимент, предпроизводственный анализ

ВВЕДЕНИЕ

В процессе эволюции и развития вакуумных технологий нанесения многослойных оптических покрытий всегда уделялось особое внимание методам контроля толщины осаждаемых пленок [1–3]. С развитием и совершенствованием оптоэлектроники для контроля вакуумного нанесения оптических покрытий стали применяться так называемые спектровизоры — спектральные системы контроля (ВВОМ, Broad Band Optical Monitors). Одни из первых результатов использования таких систем отражены в работах [4, 5].

Оптические методы контроля процесса вакуумного получения покрытий основаны на явлении интерференции в тонких пленках. В отличие от одноволновой системы контроля, которая позволяет получать интерференционную картину на одной длине волны, спектровизор дает спектральную характеристику пропускания (или отражения) растущего слоя в широком спектральном интервале. Это обстоятельство существенным образом повышает точность и достоверность измерения толщины слоя и улучшает воспроизводимость результатов в целом [6].

В большинстве случаев из-за некоторых технологических особенностей контроль процесса осаждения на практике осуществляется не сквозным методом по одной рабочей детали, а косвенным методом по одному или нескольким контрольным образцам с использованием различных стратегий контроля [2, 7]. Так, например, имеется возможность на один контрольный образец осаждавать как по одному слою, так и по несколько чередующих-

ся слоев. Кроме этого, на один контрольный образец можно осаждавать, например, только слои с низким показателем преломления, а на другой — только с высоким [7].

На практике выбор стратегии контроля можно осуществить двумя способами: непосредственно реализовать цикл из нескольких напылений одного и того же покрытия с использованием различных стратегий контроля или провести серию вычислительных экспериментов, моделирующих реальный процесс напыления многослойного покрытия. Очевидно, что первый подход сопряжен с существенными временными и материальными затратами, в то время как вычислительный эксперимент лишен этих недостатков. В связи с этим цель настоящей работы состояла в исследовании особенностей использования спектральных систем контроля в технологических процессах вакуумного осаждения оптических покрытий, а также в развитии методов определения наиболее пригодной стратегии контроля, дающей воспроизводимые требуемые результаты для каждой конкретной структуры оптического покрытия.

Для этого в работе реализована серия вычислительных экспериментов, моделирующих процедуру контроля толщины пленки, получаемой вакуумным осаждением. Представлен анализ результатов виртуальных напылительных процессов, согласно которому для каждой исследованной структуры оптического покрытия определена наиболее подходящая стратегия контроля. Здесь под стратегией контроля понимается количество и последовательность слоев, осаждаемых на каждый контрольный образец. При этом за критерий при-

годности той или иной стратегии контроля принимаются величины возможных ошибок в толщинах слоев и соответствующие им искажения спектральных характеристик получаемых покрытий по сравнению с расчетными спектральными характеристиками.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Что моделируется

Для проведения вычислительного эксперимента в работе использовалась специально составленная программа, моделирующая реальный процесс напыления оптических покрытий и контроль толщин слоев с использованием спектральной системы IRIS 1017 с расширенным рабочим спектральным диапазоном.

Рабочая спектральная область используемой системы контроля IRIS 1017 составляет 950–2500 нм, спектральное разрешение — 12.2 нм. Система может работать как на отражение, так и на пропускание. Погрешность измерения пропускания (отражения) не более 1 % от измеряемой величины. Время измерения одного спектра от 10 до 80 мс. Специализированное программное обеспечение, поставляемое с системой контроля, позволяет загружать расчетные спектры покрытий, а также отображает текущие спектральные характеристики осаждаемых пленок на дисплее ПК [8].

В общем случае входными данными для моделирования могут служить точностные характеристики используемой спектральной системы контроля, флуктуации скорости осаждения слоев, отклонения оптических констант пленок от принятых в расчете, непосредственно стратегия контроля, а также ряд других параметров, отражающих реальный процесс вакуумного осаждения оптических покрытий [9]. Результатом проведения виртуального напыления являются величины возможных ошибок в толщинах слоев покрытия, а также спектральные характеристики покрытий с ошибками.

В работе оптические покрытия рассчитывались и изготавливались (виртуально) с использованием пленок германия (Ge) и монооксида кремния (SiO). Пленки Ge и SiO широко используются для изготовления оптических покрытий, работающих в спектральном диапазоне от 1.5 мкм до 8.0 мкм [10, 11]. Причем в работе для наиболее полного отражения реальной ситуации в расчет принималось как поглощение в пленках германия при температуре осаждения ($T = 250$ °C), так и дисперсия оптических констант пленок Ge и SiO в рабочем спектральном диапазоне системы контроля IRIS 1017.

Спектральные характеристики слоев, осаждаемых на контрольные образцы, отличаются от расчетных спектров. Это приводит к возникновению ошибок в толщинах слоев, формируемых на рабочих деталях, и, как следствие, к искажению выходных спектральных характеристик изготавливаемых оптических покрытий. Анализ результатов многочисленных реализованных на практике напылений оптических покрытий с использованием пленок Ge и SiO на установке ВУ-2М, оснащенной системой IRIS 1017, показывает, что основной причиной несовпадения спектров слоев, осаждаемых на контрольные образцы, и их расчетных характеристик являются отклонения оптических констант пленок от принимаемых в расчетах. Причинами таких отклонений являются флуктуации температуры контрольных образцов, изменения давления остаточных газов в вакуумной камере при испарении материалов, нестабильность скорости испарения материалов. Причем подобного рода отклонения носят плохо воспроизводимый характер и не могут быть учтены заранее. Применительно к используемым пленкообразующим материалам изменения температуры наиболее сильно сказываются на оптических свойствах пленок германия, который является полупроводником с достаточно сильным поглощением в рабочем спектральном диапазоне системы контроля 950–2500 нм. Изменения давления остаточного кислорода в напылительной камере сказываются на степени окисления пленок монооксида кремния, что в конечном итоге приводит к изменениям показателя преломления пленок SiO.

Процесс моделирования

Сам процесс виртуального напыления с использованием моделирующей программы выглядит следующим образом. Для предварительного расчета спектральных характеристик пленки требуемой толщины в программу заводятся данные по дисперсии показателей преломления $n(\lambda)$ и поглощения $k(\lambda)$ используемых пленок в рабочем спектральном диапазоне системы контроля. Так как оптические константы осаждаемых пленок зависят от температуры подложки, на которой они формируются, данные по $n(\lambda)$ и $k(\lambda)$ соответствуют рабочей температуре контрольных образцов в процессе напыления. Кроме этого в программу вводятся данные о структуре покрытия: количество слоев, толщина и материал каждого слоя, а также указывается стратегия контроля.

После запуска программы в окне отображения спектров (рис. 1) одновременно выводятся текущий спектр отражения (или пропускания) напыляемой пленки и расчетные спектральные характеристики этого слоя требуемой конечной толщины.

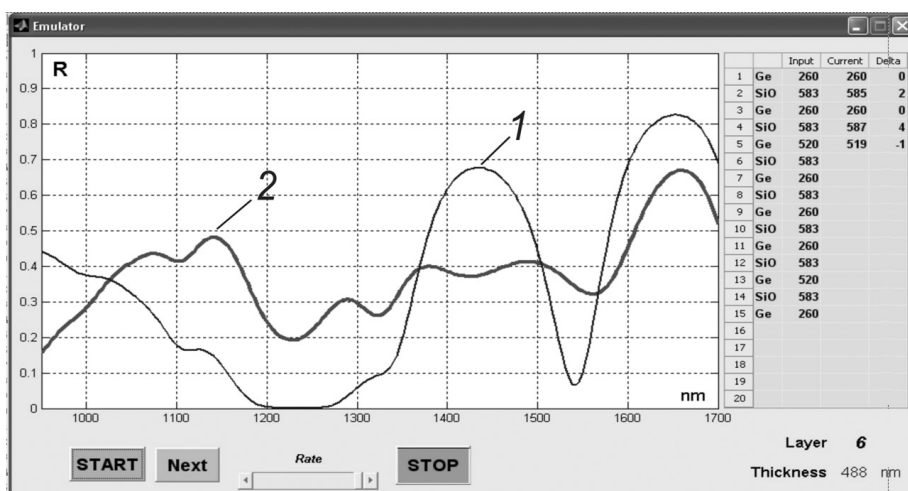


Рис. 1. Моделирование процесса контроля напыления оптического покрытия.
 1 — текущий спектр отражения растущего слоя; 2 — расчетный спектр отражения пленки требуемой толщины

Структуры покрытий узкополосного и отрезающего фильтров (2-й строкой в данных указана толщина слоя в нм)

Номер слоя	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Узкополосный фильтр	Ge 260	SiO 583	Ge 260	SiO 583	Ge 520	SiO 583	Ge 260	SiO 583	Ge 260	SiO 583	Ge 260	SiO 583	Ge 520	SiO 583	Ge 260
Отрезающий фильтр	SiO 156	Ge 88	SiO 286	Ge 38	SiO 105	Ge 64	SiO 240	Ge 128	SiO 260	Ge 103	SiO 282	Ge 145	SiO 157	Ge 139	SiO 540

Процесс виртуального напыления каждого слоя прекращается по команде оператора, как только текущая спектральная характеристика совпадает с расчетной. Степень совпадения спектров, определяемая оператором визуально, тем выше, чем ближе оптические параметры растущей пленки к расчетным значениям и чем меньше величины ошибок в предыдущих слоях на контрольном образце.

Возможные отклонения оптических констант пленок генерируются в программе автоматически случайным образом: показатели преломления слоев могут случайно уменьшаться или увеличиваться на относительную величину до 5 %, а показатели поглощения слоев могут изменяться на величину до 10 %. Фрагмент процесса виртуального напыления оптического покрытия с использованием разработанного программного обеспечения представлен на рис. 1.

Результатом виртуального напылительного процесса являются неизбежно возникающие ошибки в толщинах слоев покрытия, соответствующие различным стратегиям контроля, а также спектральные характеристики структур с этими ошибками.

В качестве рабочих структур для исследования особенностей изготовления инфракрасных опти-

ческих покрытий в работе были использованы два типа покрытий — это узкополосный интерференционный фильтр с $\lambda_{max} = 4.27$ мкм и полушириной $\Delta\lambda = 85$ нм и коротковолновый отрезающий фильтр с $\lambda_{тр} = 2.6$ мкм. Структуры покрытий на подложке из монокристаллического кремния представлены в таблице. Нумерация слоев начинается от подложки, физическая толщина слоев выражена в нм.

При моделировании процесса контроля были использованы следующие стратегии контроля: стратегия 1 — напыление всех 15 слоев покрытия на один контрольный образец; стратегия 2 — последовательное напыление по 4 слоя на один контрольный образец; стратегия 3 — последовательное напыление по 2 слоя на один контрольный образец. При этом для каждой структуры покрытий при использовании различных стратегий контроля отклонения в оптических константах каждого слоя покрытия оставались неизменными.

Результаты моделирования

Результатами моделирования процесса напыления рассматриваемых структур оптических покрытий являются ожидаемые ошибки в толщинах слоев (рис. 2) и соответствующие им спектральные характеристики покрытий (рис. 3).

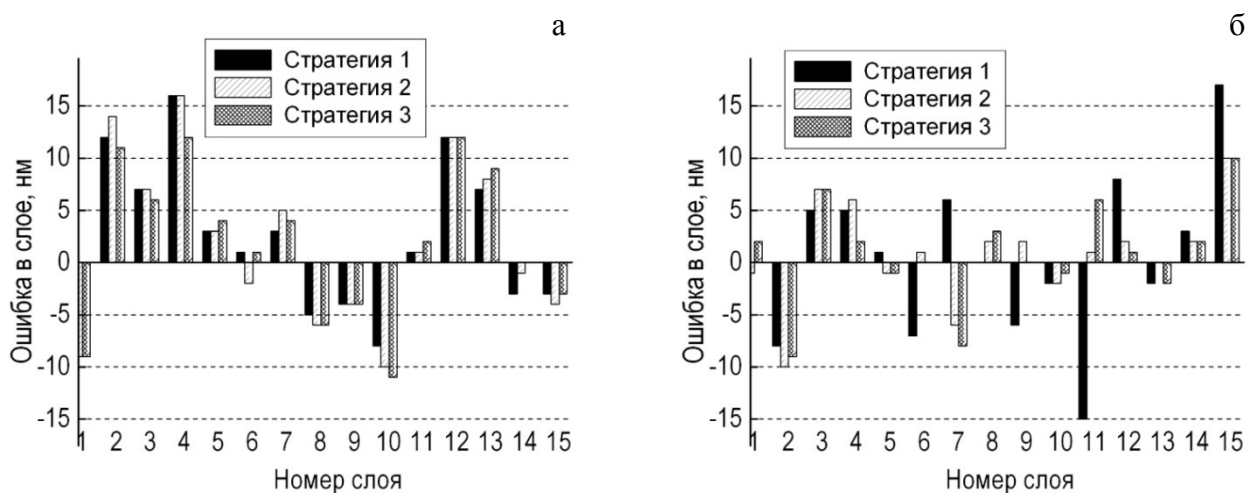


Рис. 2. Отклонения в толщинах слоев узкополосного фильтра (а) и отрезающего фильтра (б) при различных стратегиях контроля

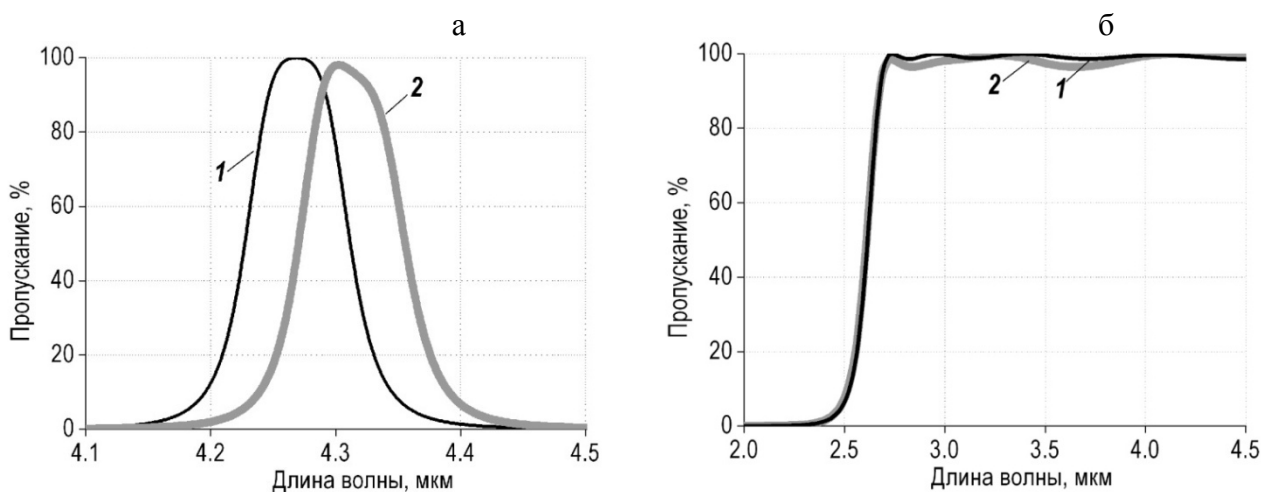


Рис. 3. Спектральные характеристики узкополосного фильтра (а) и отрезающего фильтра (б). 1 — структура без ошибок, 2 — структура с ошибками, соответствующими стратегии 3

Анализ полученных результатов показывает, что для структуры узкополосного фильтра выбор стратегии контроля не оказывает существенного влияния на ошибки в толщине слоев. Сами же величины ошибок обуславливаются только отклонениями оптических констант слоя от принимаемых в расчетах. Более того, возникающие ошибки не приводят к каким-либо существенным искажениям спектральных характеристик покрытия, а влияют только на положение λ_{\max} . Т. е. в этом случае при использовании спектральной системы контроля происходит самокомпенсация ошибок. Подобный эффект ранее обсуждался в работах [12,

13] при использовании одноволновой системы контроля.

Однако для случая со структурой отрезающего фильтра выбор стратегии контроля сказывается на величинах получаемых ошибок (рис. 2, б). При этом в зависимости от выбранной стратегии, ошибки имеют не только различные величины, но и разные знаки в одних и тех же слоях. Наибольшие ошибки в толщинах слоев наблюдаются при осаждении всех слоев на один контрольный образец. Можно предположить, что в этом случае механизм накопления ошибок превалирует над механизмом самокомпенсации. По всей видимости,

это связано с тем обстоятельством, что в структуре отрезающего фильтра имеются относительно тонкие слои, не имеющие ярко выраженных экстремумов на спектрах. Это приводит к чрезмерной ошибке в слое при отклонении его оптических постоянных от параметров, принятых в расчетах. В свою очередь ошибки в слоях, наблюдаемые при осаждении по 2 слоя на контрольный образец (стратегия 3), больше ошибок, возникающих при осаждении по 4 слоя (стратегия 2). Это происходит по причине отсутствия эффекта самокомпенсации в двухслойной системе. Тем не менее даже применение стратегии 3, дающей наибольшие ошибки в толщинах слоев, не приводит к каким-либо существенным искажениям спектральных характеристик покрытий (рис. 3, б), что свидетельствует об общей устойчивости покрытия к вариациям параметров структуры [14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исследования особенностей изготовления инфракрасных оптических покрытий с использованием спектральных систем контроля (на примере системы IRIS 1017) в работе применен подход, основанный на моделировании процесса получения покрытий на практике. С помощью специально составленной программы исследовано влияние выбора стратегии контроля на характеристики 2 типов получаемых покрытий — узкополосного фильтра и коротковолнового отрезающего фильтра. Показано, что для случая узкополосного фильтра выбор стратегии контроля не сказывается на выходных характеристиках покрытия. Для коротковолнового блокирующего покрытия наилучшие результаты дает стратегия контроля, при которой на один контрольный образец осаждается по 4 слоя.

В заключение отметим, что искажения выходных спектральных характеристик покрытий зависят не только от величины ошибок в толщинах слоев как таковых, но и от устойчивости к вариациям параметров слоев всей структуры в целом [14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Macleod H.* Monitoring of optical coating // *Appl. Opt.* 1981. Vol. 20. P. 82–89. Doi: 10.1364/AO.20.000082.
2. *Willey R.R.* Practical production of optical thin films. Wiley Optical Consultants, Charlevoix, USA, 2008. 419 p.
3. *Котликов Е.Н., Новикова Ю.А., Тропин А.Н.* Проектирование и изготовление интерференционных покрытий. СПб.: ГУАП, 2016. 288 с.

4. *Vidal B., Fornier A., Pelletier E.* Optical monitoring of nonquarterwave multilayer filters // *Appl. Opt.* 1978. Vol. 17. P. 1038–1047. Doi: 10.1364/AO.17.001038.
5. *Vidal B., Fornier A., Pelletier E.* Wideband optical monitoring of nonquarterwave multilayer filters // *Appl. Opt.* 1979. Vol. 18. P. 3851–3856. Doi: 10.1364/AO.18.003851.
6. *Ristau D., Ehlers H., Gross T., Lappschies M.* Optical broadband monitoring of conventional and ion processes // *Appl. Opt.* 2006. Vol. 45. P. 1495–1501. Doi: 10.1364/AO.45.001495.
7. *Zhupanov V.G., Klyuev E.V., Alekseev S.V., Kozlov I.V., Trubetskov M.K., Kokarev M.A., Tikhonravov A.V.* Indirect broadband optical monitoring with multiple witness substrates // *Appl. Opt.* 2009. Vol. 48. P. 2315–2320. Doi: 10.1364/AO.48.002315.
8. Проспект фирмы "ЭссентОптикс". URL: <http://www.essentoptics.com/rus/products>.
9. *Tikhonravov A.* Virtual Deposition Plant // *Proc. of SPIE.* 2005. Vol. 5870. P. 1–13. Doi: 10.1117/12.617043.
10. *Котликов Е.Н., Кузнецов Ю.А., Лавровская Н.П., Тропин А.Н.* Оптические пленкообразующие материалы для инфракрасной области спектра // *Научное приборостроение.* 2008. Т. 18, № 3. С. 32–36. URL: <http://iairas.ru/mag/2008/full3/Art3.pdf>.
11. *Котликов Е.Н., Иванов В.А., Прокашев В.Н., Тропин А.Н.* Исследование оптических констант пленок германия в средней ИК области спектра // *Оптика и спектроскопия.* 2010. Т. 108, № 6. С. 827–830.
12. *Willey R.R.* Simulation of errors in the monitoring of narrow bandpass filters // *Appl. Opt.* 2002. Vol. 41. P. 3193–3195. Doi: 10.1364/AO.41.003193.
13. *Zoller A., Boos M., Goetzelmann R., Hagedorn H., Romanov B., Viet M.* Accuracy and error compensation with direct monochromatic monitoring // *OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2013).* Paper WB.5. Doi: 10.1364/OIC.2013.WB.5.
14. *Котликов Е.Н., Иванов В.А., Моцарь Е.В., Новикова Ю.А., Тропин А.Н.* Анализ устойчивости спектральных характеристик многослойных оптических покрытий // *Оптика и спектроскопия.* 2011. Т. 111, № 3. С. 525–531.

АО "НИИ "Гириконд", Санкт-Петербург

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург

Контакты: *Тропин Алексей Николаевич*, 216@giricond.ru

Материал поступил в редакцию: 6.02.2017

PRE-PRODUCTION ANALYSIS IN THE THIN-FILM OPTICAL COATINGS TECHNOLOGY

A. N. Tropin

"NII "GIRICOND" JS Co., Saint-Petersburg, Russia
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Russia

Valid and reliable method of thickness control is a key instrument for the successful manufacture of thin film optical coatings. Determining the best control strategy may be carried out using the pre-production analysis. In this work possibilities of this approach are demonstrated on the example of structures of narrow-band and short-blocking filter for IR spectral range. Procedure development for the determination of the most appropriate control strategy will allow to obtain reproducible results in processes vacuum deposition of multilayer optical coatings.

Keywords: thin-film optics, multilayer thin-film coatings, broadband optical monitoring system, computation experiment, pre-production analysis

REFERENCES

1. Macleod H. Monitoring of optical coating. *Appl. Opt.*, 1981, vol. 20, pp. 82–89. Doi: 10.1364/AO.20.000082.
2. Willey R.R. *Practical production of optical thin films*. Willey Optical Consultants, Charlevoix, USA, 2008. 419 p.
3. Котликов Е.Н., Новикова Ю.А., Тропин А.Н. *Proektirovanie i izgotovlenie interferentsionnykh pokrytii* [Design and production of interferential coatings]. Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation Publ., 2016. 288 p. (In Russ.).
4. Vidal B., Fornier A., Pelletier E. Optical monitoring of nonquarterwave multilayer filters. *Appl. Opt.*, 1978, vol. 17, pp. 1038–1047. Doi: 10.1364/AO.17.001038.
5. Vidal B., Fornier A., Pelletier E. Wideband optical monitoring of nonquarterwave multilayer filters. *Appl. Opt.*, 1979, vol. 18, pp. 3851–3856. Doi: 10.1364/AO.18.003851.
6. Ristau D., Ehlers H., Gross T., Lappschies M. Optical broadband monitoring of conventional and ion processes. *Appl. Opt.*, 2006, vol. 45, pp. 1495–1501. Doi: 10.1364/AO.45.001495.
7. Zhupanov V.G., Klyuev E.V., Alekseev S.V., Kozlov I.V., Trubetskov M.K., Kokarev M.A., Tikhonravov A.V. Indirect broadband optical monitoring with multiple witness substrates. *Appl. Opt.*, 2009, vol. 48, pp. 2315–2320. Doi: 10.1364/AO.48.002315.
8. "EssentOptics Ltd" company advertisements. URL: <http://www.essentoptics.com/eng/products/monitoring/iris>.
9. Tikhonravov A. Virtual Deposition Plant. *Proc. of SPIE*, 2005, vol. 5870, pp. 1–13. Doi: 10.1117/12.617043.
10. Kotlikov E.N., Kuznetsov Yu.A., Lavrovskaya N.P., Tropin A.N. [The optical film-forming materials for infra-red area of the spectrum]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2008, vol. 18, no. 3, pp. 32–36. URL: <http://iairas.ru/mag/2008/full3/Art3.pdf>. (In Russ.).
11. Kotlikov E.N., Ivanov V.A., Prokashev V.N., Tropin A.N. [Study of the optical properties of germanium films in the mid-IR spectral range]. *Optika i spektroskopiya* [Opt. and Spectr.], 2010, vol. 108, no. 6, pp. 827–830. Doi: 10.1134/S0030400X10060196.
12. Willey R.R. Simulation of errors in the monitoring of narrow bandpass filters. *Appl. Opt.*, 2002, vol. 41, pp. 3193–3195. Doi: 10.1364/AO.41.003193.
13. Zoller A., Boos M., Goetzelmann R., Hagedorn H., Romanov B., Viet M. Accuracy and error compensation with direct monochromatic monitoring. *OSA Technical Digest* (online) (Optical Society of America, 2013). Paper WB.5. Doi: 10.1364/OIC.2013.WB.5.
14. Kotlikov E.N., Ivanov V.A., Mozar' E.V., Novikova Yu.A., Tropin A.N. [Analysis of stability of spectral characteristics of multilayer optical coatings]. *Optika i spektroskopiya* [Opt. and Spectr.], 2011, vol. 111, no. 3, pp. 525–531. Doi: 10.1134/S0030400X11090128.

Contacts: Tropin Aleksei Nikolaevich,
216@giricond.ru

Article received in edition: 6.02.2017