

Учет распределения уровня шума по длине волны при широкополосном контроле процесса напыления оптических покрытий

А. Н. Шаров,^{1,*} С. А. Шарапова,² А. В. Тихонравов,² А. Г. Ягола³

¹ Университет МГУ–ППИ в Шэньчжэне, факультет вычислительной математики и кибернетики КНР, 518172, провинция Гуандун, г. Шэньчжэнь, р-н Лунган, Даюньсиньчэн, ул. Гоцзидасюэюань, д. 1

² Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М. В. Ломоносова
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 4

³ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра математики
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 10.11.2023; после доработки 22.11.2023; подписана в печать 25.11.2023)

В работе приведены численные результаты симуляций процесса напыления сложного оптического покрытия с использованием широкополосного контроля этого процесса в случае, когда уровень шума в измеряемом коэффициенте пропускания имеет неравномерное распределение по длине волны. Исследовано влияние на точность контроля данных на краях измеряемого диапазона длин волн, где ошибка в коэффициенте пропускания максимальна. Показано, что при удалении части данных на краях диапазона коэффициент самокомпенсации ошибок процесса напыления почти не изменяется, в то время как средняя норма вектора ошибок толщин слоев существенно снижается. Тем самым впервые показано, что учет эффекта самокомпенсации ошибок при широкополосном контроле открывает возможность обоснованного выбора оптимального для практики спектрального диапазона оптического контроля.

PACS: 02.70.-с. УДК: 519.6.

Ключевые слова: оптические покрытия, напыление покрытий, широкополосный контроль, диапазон измерений, корреляция ошибок, самокомпенсация ошибок.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.79.2410101](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.79.2410101)

ВВЕДЕНИЕ

Оптические многослойные покрытия используются в большинстве современных оптических устройств [1–3]. Важнейшей задачей при напылении оптических покрытий является точное воспроизведение теоретически рассчитанных толщин слоев покрытия, т.е. точность контроля процесса напыления покрытия.

Сложность напыления оптического покрытия связана с тем, что скорости напыления покрытия являются неравномерными, имеются ошибки в измеренном спектре коэффициента пропускания и т.п. [2, 4]. Эти факторы приводят к ошибкам в толщинах напыляемых слоев. При этом ошибки в толщинах слоев являются коррелированными и процесс их корреляции может вызывать как негативный кумулятивный эффект накопления ошибок, так и положительный эффект самокомпенсации ошибок [5–9].

Чтобы оценить эффекты, к которым приводят ошибки в процессе напыления покрытий, необходимо проведение большого числа экспериментов [10]. Поскольку проведение реальных экспериментов занимает длительное время и при этом является дорогостоящим, проводят численные эксперименты с по-

мощью различных симуляторов процессов напыления оптических покрытий [11]. При этом обычно предполагается, что уровень шума в измеряемом коэффициенте пропускания не зависит от длины волны и является величиной постоянной, т.е. распределение уровня шума по длине волны равномерное. Однако эксперименты показывают, что уровень шума в коэффициенте пропускания существенно выше на краях диапазона длин волн, на котором измеряется спектр, что может влиять на точность контроля процесса напыления пленок. Под уровнем шума в данной работе подразумевается стандартное отклонение в задаваемой случайной ошибке измеряемого коэффициента пропускания. Цель данной работы — исследовать влияние неравномерности уровня шума в коэффициенте пропускания на получаемые спектральные характеристики покрытия. В работе используется симулятор, аналогичный «полному» симулятору в работе [12], который учитывает основные ошибки в процессе напыления оптических покрытий. При этом численные эксперименты проводятся для сложного оптического покрытия с 72 слоями, которое имеет как очень малые толщины слоев, так и большие толщины, что усложняет контроль процесса напыления.

В работе приведены численные результаты симуляций процесса напыления для случая неравномерного распределения уровня шума в измеряемом коэффициенте пропускания по длине волны. При этом численные эксперименты проведены с исполь-

* E-mail: scharov.aleksandr@physics.msu.ru

зованием всех измеряемых данных в заданном диапазоне длин волн и данных без учета данных на краях диапазона длин волн, где ошибка измерений велика. Приведено сравнение получаемых характеристик покрытия и влияние неравномерности уровня шума в коэффициенте пропускания на результаты напыления.

Структура работы следующая. В разд. 1 описывается алгоритм используемого в работе симулятора. В разд. 2 приводится вид зависимости уровня шума в измеряемом коэффициенте пропускания от длины волны. В разд. 3 описывается метод вычисления коэффициента самокомпенсации оптического покрытия. В разд. 4 приводятся численные результаты симуляций процесса напыления. Выводы приведены в заключении.

1. ОПИСАНИЕ СИМУЛЯТОРА

В данном разделе приведено описание используемого симулятора процесса напыления оптического покрытия с помощью широкополосного контроля. В работе использован симулятор, аналогичный «полному симулятору», описанному в [12].

Сразу отметим, что конкретные значения приведенных ниже параметров будут указаны в разделах 2 и 4.

Пусть $d_1^{theor}, d_2^{theor}, \dots, d_m^{theor}$ — теоретические значения толщин слоев покрытия, которое напыляется; v_{aver_j} — средняя скорость напыления j -го слоя; t_{scan} — периодичность проведения измерений; n_j — показатель преломления j -го слоя.

Схема симулятора процесса напыления оптического покрытия следующая:

1. Задаем $j := 1$, где j — номер напыляемого слоя.
2. Задаем $k := 1$, где k — счетчик времени напыления j -го слоя с интервалом t_{scan} .
3. В реальных процессах скорость напыления не является постоянной величиной и колеблется около средней величины. Поэтому вносим ошибку в среднюю скорость: $v_{jk} := v_{aver_j} + \chi^k$, где χ^k — нормально распределенная случайная ошибка.

4. Получаем толщину напыленного слоя за время $t_k = k \cdot t_{scan}$:

$$d_j(t_k) = d_j(t_{k-1}) + v_{jk} \cdot t_{scan},$$

где $d_j(t_0) = 0$.

5. Вычисляем спектр коэффициента пропускания полученного покрытия в заданном интервале диапазона длин волн: $T_j(d_1, d_2, \dots, d_j(t_k); \lambda)$, где считается, что $j-1$ слоев напылены полностью, а слой j напылен на момент времени t_k . Спектр коэффициента пропускания рассчитывается по алгоритму, описанному, например, в [10, 11].

6. В реальных экспериментах спектр коэффициента пропускания измеряется с ошибкой. Поэтому вносим ошибку в расчетный коэффициент пропускания и получаем вектор

$$T_j^{meas}(t_k; \lambda) = T_j(d_1, d_2, \dots, d_j(t_k); \lambda) + \eta^k(\lambda),$$

где $\eta^k(\lambda)$ — нормально распределенная случайная ошибка с математическим ожиданием 0 и среднеквадратичным отклонением $\sigma(\lambda)$. $\sigma(\lambda)$ и есть уровень шума в измеряемом коэффициенте пропускания покрытия. Обращаем внимание, что в данном случае уровень шума зависит от длины волны. Вид зависимости будет приведен в разделе 2.

7. При напылении оптических покрытий контроль напыления заключается в определении момента, когда необходимо прервать процесс, зная только измеренный спектр $T_j^{meas}(t_k; \lambda)$ и теоретические значения толщин покрытия $d_1^{theor}, d_2^{theor}, \dots, d_m^{theor}$. С этой целью для определения напыленной толщины слоя j на момент времени t_k решаем экстремальную задачу:

$$d_j^{est} = \operatorname{argmin}_{d \in (0, d_{max}]} \|T_j(d_1^{theor}, d_2^{theor}, \dots, d_{j-1}^{theor}, d; \lambda) - T_j^{meas}(t_k; \lambda)\|_{L_2}^2,$$

где d_{max} — ограничение на толщину слоя. В данном случае решается одномерная экстремальная задача, которая может быть реализована в режиме online.

8. Зная толщину на момент времени t_k , можно оценить время, которое требуется для напыления j -го слоя до теоретической толщины d_j^{theor} :

$$\Delta t = \frac{d_j^{theor} - d_j^{est}}{v_{aver_j}}.$$

9. В зависимости от полученного времени Δt принимается решение о продолжении напыления слоя или его остановке:

- а) Если $\Delta t < 0$, то произошло перенапыление слоя, процесс напыления j -го слоя останавливается и в качестве толщины напыленного слоя принимается значение

$$d_j = d_j(t_k).$$

Если $j < m$, то принимаем значение $j := j + 1$ и переходим на шаг 2.

- б) Если $0 \leq \Delta t < t_{scan}$, то процесс напыления продолжается в течение времени Δt и далее останавливается, т.к. за данное время не поступают новые данные о спектре покрытия. В качестве толщины напыленного слоя принимается значение

$$d_j = d_j(t_k) + v_{jk} \Delta t.$$

Если $j < m$, то принимаем значение $j := j + 1$ и переходим на шаг 2.

в) Если $\Delta t \geq t_{scan}$, то принимаем значение $k := k + 1$ и переходим на шаг 3.

В результате работы симулятора мы получаем значения толщин напыленных слоев d_i и ошибки в толщинах каждого слоя $\delta d_i = d_i - d_i^{theor}$, которые образуют вектор ошибок $\Delta = \{\delta d_1, \dots, \delta d_m\}$. Всего проводится M симуляций, т.е. мы получим M векторов ошибок.

2. УРОВЕНЬ ШУМА В ИЗМЕРЯЕМОМ КОЭФФИЦИЕНТЕ ПРОПУСКАНИЯ

Обычно при моделировании процесса напыления с широкополосным контролем предполагают, что уровень шума $\sigma(\lambda)$ в измеряемом коэффициенте пропускания имеет равномерное распределение по длине волны и $\sigma(\lambda) = \text{const}$. Однако эксперименты показывают, что уровень шума в измеряемом коэффициенте пропускания оптического покрытия выше на краях диапазона длин волн, на котором происходит контроль напыления, и ниже в середине диапазона. В работе сравниваются результаты напыления 72-слойного оптического покрытия с широкополосным контролем в диапазоне длин волн 400–1100 нм в двух случаях:

1. Уровень шума в коэффициенте пропускания $\sigma(\lambda)$ зависит от длины волны, вид зависимости представлен на рис. 1. При этом в процессе контроля напыления используется весь спектр измеряемого коэффициента пропускания.
2. Уровень шума в коэффициенте пропускания $\sigma(\lambda)$ по-прежнему имеет вид, представленный на рис. 1, однако диапазон длин волн, который учитывается при контроле напыления, сужается до 500–1000 нм.

Видим, что уровень шума в коэффициенте пропускания на левом крае диапазона длин волн составляет 2.5%, на правом — 2.3%, а в середине диапазона — от 0.4% до 0.5%. Во втором случае используются только данные в диапазоне 500–1000 нм и таким образом учитываются данные с уровнем шума в коэффициенте пропускания до 1%.

3. КОЭФФИЦИЕНТ САМОКОМПЕНСАЦИИ

При любом методе оптического контроля процессов напыления покрытий имеет место эффект корреляции ошибок в толщинах слоев [9, 10, 13]. С корреляцией ошибок связан и эффект их самокомпенсации, оценка которого описана ниже.

Пусть в результате M симуляций процесса напыления мы имеем M векторов ошибок в толщинах

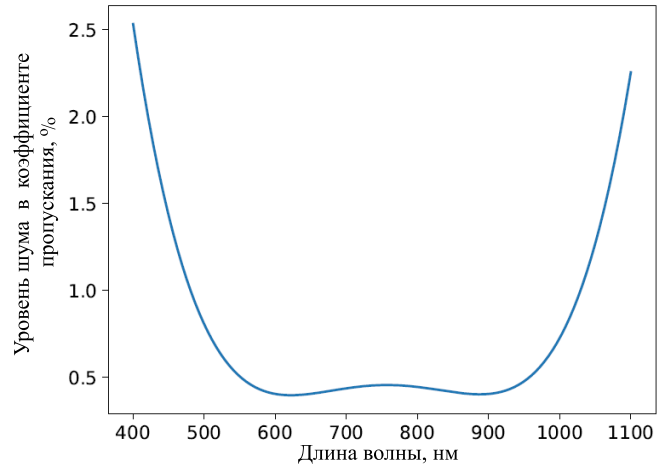


Рис. 1. Зависимость уровня шума $\sigma(\lambda)$ в измеряемом коэффициенте пропускания оптического покрытия в зависимости от длины волны λ

слоев $\Delta = \{\delta d_1, \dots, \delta d_m\}$. Данные ошибки можно рассматривать как векторы в m -мерном пространстве.

Чтобы оценить эффект самокомпенсации ошибок, будем рассчитывать коэффициент самокомпенсации в соответствии с работами [14, 15].

Введем функционал, оценивающий близость спектральной характеристики покрытия к требуемой характеристике:

$$MF(d) = \sqrt{\frac{1}{|\{\lambda\}|} \sum_{\lambda} [T(d, \lambda) - T^{target}(\lambda)]^2},$$

и его вариацию, вызванную наличием ошибок в толщинах слоев:

$$\delta MF(\Delta) = MF(d^{theor} + \Delta) - MF(d^{theor}),$$

где T^{target} — целевое значение коэффициента пропускания покрытия, $|\{\lambda\}|$ — количество длин волн.

Данный функционал используется для построения теоретического дизайна оптического покрытия, на котором достигается минимум функционала. Поэтому при любых отклонениях толщин слоев от теоретических значений вариация функционала должна быть положительной.

Тогда коэффициент самокомпенсации определяется по следующей формуле:

$$c = \frac{\delta MF(\Delta)}{E(\delta MF(\Delta))}.$$

В этой формуле в знаменателе стоит математическое ожидание вариаций функционала для векторов некоррелированных ошибок того же уровня, что векторы коррелированных ошибок, полученных в ходе вычислительных экспериментов. Если $c > 1$, то эффект самокомпенсации отсутствует. Если же $c < 1$, то при напылении оптического покрытия наблюдается эффект самокомпенсации ошибок, причем он тем выше, чем ниже значение c .

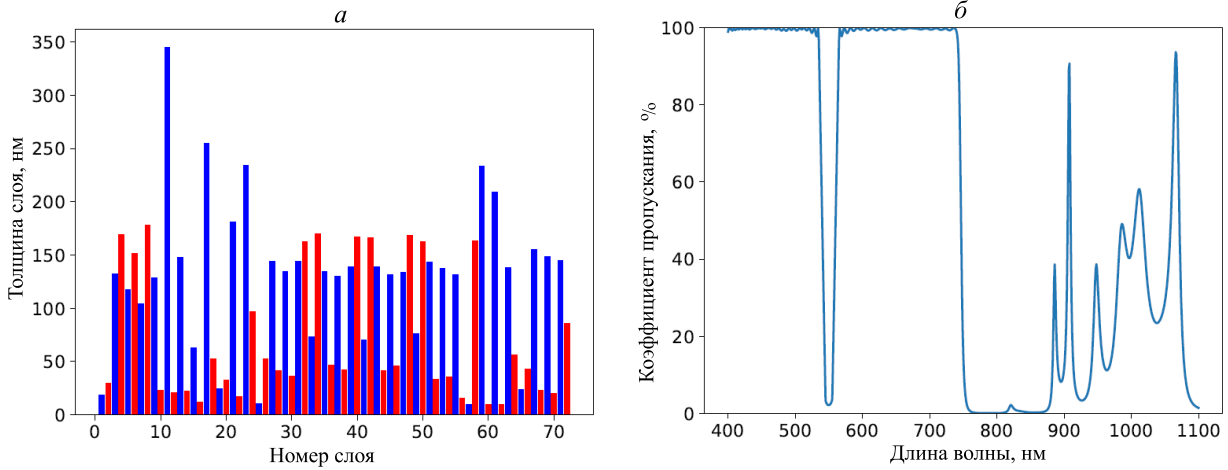


Рис. 2. *a* — Дизайн покрытия и *б* — теоретические значения коэффициента пропускания в диапазоне длин волн 400–1100 нм

4. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В данном разделе приведены результаты симуляций процесса напыления сложного оптического покрытия в двух случаях, описанных в разд. 2.

Здесь и далее под «экспериментом 1» будем подразумевать результаты симуляций при условии, что для контроля напыления используется весь измеряемый диапазон длин волн 400–1100 нм, под «экспериментом 2» — результаты симуляций при условии, что для контроля напыления используется не весь измеряемый диапазон длин волн, а только диапазон 500–1000 нм.

Дизайн оптического покрытия приведен на рис. 2, *a*. Материалом нечетных слоев является Ta₂O₅, четных — SiO₂. Покрытие состоит из 72 слоев, при этом есть большое количество тонких слоев с толщиной около 10 нм, а также толстые слои с толщиной более 200 нм. Теоретический спектр коэффициента пропускания в диапазоне длин волн 400–1100 нм приведен на рис. 2, *б*.

Для используемого в работе симулятора будем использовать следующие параметры процесса напыления:

- скорость напыления нечетных слоев $v_{aver_{2j+1}} = 0.4$ нм/с, ошибка в скорости напыления χ^k задается гауссовым нормальным распределением со средним 0 и стандартным отклонением 5% от скорости напыления;
- скорость напыления четных слоев $v_{aver_{2j}} = 0.6$ нм/с, ошибка в скорости напыления χ^k задается гауссовым нормальным распределением со средним 0 и стандартным отклонением 5% от скорости напыления;
- периодичность мониторинга напыления $t_{scan} = 2$ с.

Всего была проведена 1 000 симуляций для каждого из экспериментов. На рис. 3 приведены примеры симуляций для каждого из случаев.

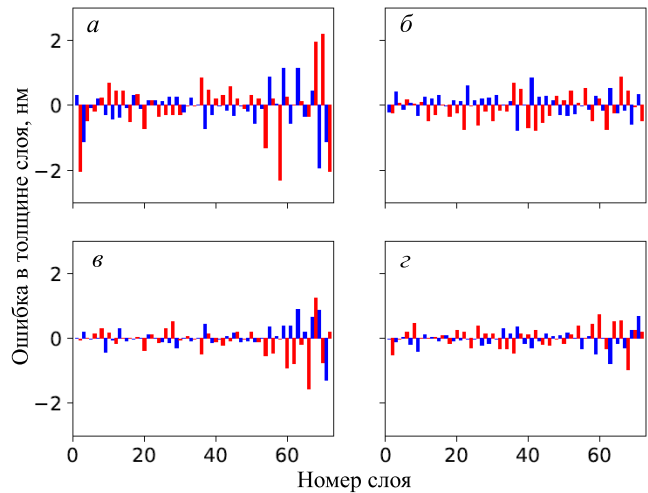


Рис. 3. Примеры векторов ошибок, полученных при симуляции процесса напыления 72-слойного оптического покрытия в эксперименте 1 (*a*, *б*), эксперименте 2 (*в*, *г*)

На рис. 4 представлены распределения норм векторов ошибок для проведенных экспериментов, а в табл. 1 — значения средней нормы вектора ошибок и среднеквадратичной ошибки в слое. Видно, что в эксперименте 2 получены значения средней нормы вектора ошибок толщин слоев и среднеквадратичной ошибки в слое существенно ниже, чем в эксперименте 1.

В табл. 2 приведены значения математического ожидания коэффициента самокомпенсации для рассматриваемых случаев. Видно, что эти значения отличаются незначительно и при этом математическое ожидание во втором случае даже несколько меньше, чем в первом, т.е. при использовании усеченного спектрального диапазона для контроля процесса напыления эффект самокомпенсации ошибок не только сохраняется, но даже оказывается более сильным, чем при использовании всех доступных данных измерений.

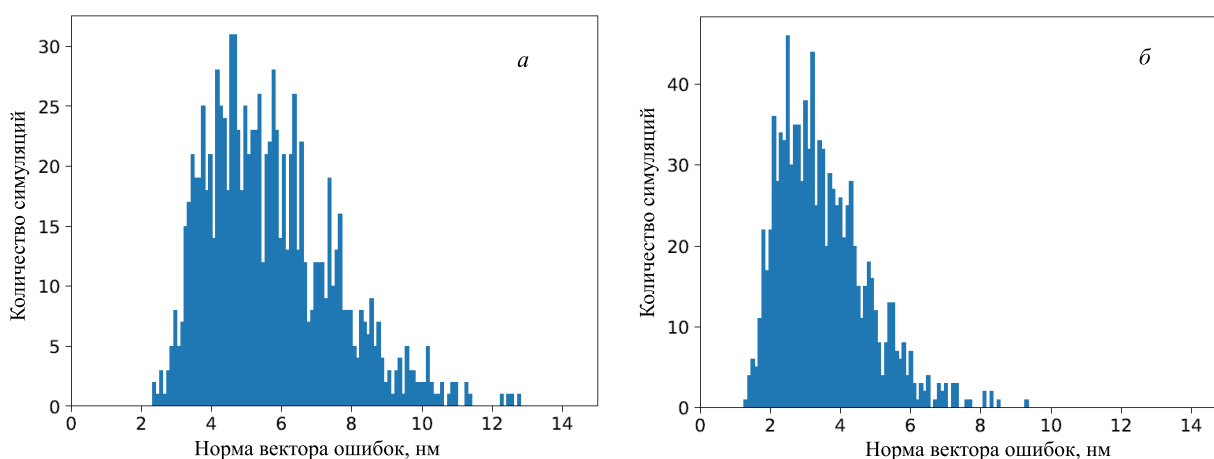


Рис. 4. Распределение норм векторов ошибок 1000 симуляций в эксперименте 1 (а), эксперименте 2 (б)

Таблица 1. Средняя норма векторов ошибок и среднеквадратичная ошибка в слое для экспериментов 1 и 2

№ эксперимента	Средняя норма вектора ошибок, нм	Среднеквадратичная ошибка в слое, нм
Эксперимент 1	5.68	0.7
Эксперимент 2	3.5	0.44

 Таблица 2. Математическое ожидание коэффициента самокомпенсации s для экспериментов 1 и 2

№ эксперимента	s
Эксперимент 1	0.2038
Эксперимент 2	0.1851

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследовано влияние неравномерного распределения по длине волны уровня шума в коэффициенте пропускания оптического покрытия на точность воспроизведения этих характеристик

при широкополосном контроле процесса напыления. Показано, что в случае неравномерного распределения шума имеет смысл учитывать данные не во всем диапазоне длин волн, в котором производятся измерения, а отсекают данные на краях диапазона, где высоки ошибки измерений. Эффект самокомпенсации ошибок при этом не ухудшается, а уровень ошибок в толщинах слоев значительно снижается.

Авторы благодарят Бориса Романова и Юрия Просовского за предоставленные данные по уровню шума при широкополосных измерениях коэффициента пропускания покрытия и за полезные консультации по вопросам широкополосного контроля процесса напыления.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 21-11-00011.

- [1] *Piegari A., Flory F.* // *Optical thin films and coatings* (Second Edition). Eds. Woodhead Publishing, UK, 2018.
- [2] *Macleod H.A.* // *Thin-Film Optical Filters*, Taylor & Francis 4th ed., 2010.
- [3] *Tikhonravov A.V.* *Design of Optical Coatings // Optical Interference coatings*. Pulker, Springer-Verlag Berlin. 2003. 81–104.
- [4] *Furman Sh., Tikhonravov A.V.* // *Basics of Optics of Multilayer Systems*. Frontiers, 1992.
- [5] *Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K., Amotchkina T.V.* // *Appl. Opt.* **45**. 7026 (2006).
- [6] *Macleod H.A.* // *Optica Acta.* **19**. 1 (1972).
- [7] *Zhupanov V., Kozlov I., Fedoseev V.* et al. // *Applied Optics.* **56**. N 4. 30 (2017).
- [8] *Bousque P., Fornier A., Kowalczyk R.* et al. // *Thin Solid Films.* **13**. 285 (1972).
- [9] *Tikhonravov A., Kochikov I., Yagola A.* // *Inverse Probl. Sci. En.* **26**. 1214 (2017).
- [10] *Tikhonravov A.V., Kochikov I.V., Yagola A.G.* // *Optics Express.* **26**. N 19. 24964 (2018).
- [11] *Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K.* // *Appl. Opt.* **44**. 6877 (2005).
- [12] *Шаров А.Н., Лукьяненко Д.В., Тихонравов А.В., Ягола А.Г.* // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* **78(2)**, 2320102 (2023). (*Sharov A.N., Lukanenko*

- D.V., Tikhonravov A.V., Yagola A.G. // Moscow Univ. Phys. Bull. 78. N 2. 135 (2023).*
- [13] *Тихонравов А.В., Кочиков И.В., Матвиенко И.А. и др. // Вычислительные методы и программирование. 19. 439 (2018).*
- [14] *Kochikov I.V., Lagutin Y.S., Lagutina A.A. et al. // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 61. N 9. 1504 (2021).*
- [15] *Tikhonravov A., Kochikov I., Sharapova S., Yagola A. // Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering. 11872, N 6. 1 (2021).*

Consideration of the Distribution of Noise Level by Wavelength in Broadband Control of the Optical Coating Deposition Process

A. N. Sharov^{1,a}, S. A. Sharapova², A. V. Tikhonravov², A. G. Yagola³

¹*Shenzhen MSU-BIT University, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics
P.R. China, 518172, Shenzhen, Guangdong Province*

²*Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*

³*Department of Mathematics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia
E-mail: ^ascharov.aleksandr@physics.msu.ru*

The paper presents numerical results of simulations of the deposition process of a complex optical coating using broadband monitoring of this process in the case when the noise level in the measured transmittance coefficient has an uneven distribution along the wavelength. The influence on the accuracy of data control at the edges of the measured wavelength range, where the error in the transmittance coefficient is maximum, is investigated. It is shown that when a part of the data is removed at the edges of the range, the self-compensation coefficient of the deposition process errors almost does not change, while the average norm of the error vector of layer thicknesses significantly decreases. Thus, it is shown for the first time that taking into account the effect of self-compensation of errors in broadband control opens up the possibility of a reasonable choice of the optimal spectral range of optical control for practice.

PACS: 02.70.-c.

Keywords: optical coatings, coating deposition, broadband monitoring, measurement range, error correlation, self-compensation of errors.

Received 10 November 2023.

English version: *Moscow University Physics Bulletin. 2024. 79, No. 1. Pp. 1–6.*

Сведения об авторах

1. Шаров Александр Николаевич — канд. физ.-мат. наук, преподаватель; тел.: (495) 939-10-33, e-mail: scharov.aleksandr@physics.msu.ru.
2. Шаропова Светлана Анатольевна — канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-54-24, e-mail: svet.sharapova@gmail.com.
3. Тихонравов Александр Владимирович — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-54-24, e-mail: tikh@srcc.msu.ru.
4. Ягола Анатолий Григорьевич — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-10-33, e-mail: yagola@physics.msu.ru.