

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

**Сравнение стратегий монохроматического контроля процесса напыления оптических покрытий**А. А. Лагутина<sup>1,2, а</sup>

<sup>1</sup> *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра математики  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*

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

Поступила в редакцию 28.05.2022, после доработки 29.08.2022, принята к публикации 30.08.2022.

Оптический контроль процесса напыления многослойных покрытий приводит к корреляции ошибок в толщинах напыляемых слоев. Этот эффект в свою очередь вызывает негативный эффект кумулятивного накопления ошибок, но в то же время может и положительно влиять на точность контроля при наличии позитивного эффекта самокомпенсации ошибок. Разработанные способы оценки степени корреляции ошибок в толщинах слоев и оценки наличия эффекта самокомпенсации, включающие в себя результаты обработки большого числа вычислительных экспериментов, открывают новые возможности для сравнения существующих стратегий контроля. На примере компьютерной симуляции процесса напыления 44-слойного горячего зеркала показано, как упомянутые оценки могут быть использованы для сравнения эффективности различных стратегий контроля.

**Ключевые слова:** оптические покрытия, монохроматический контроль, стратегии контроля, корреляция ошибок, самокомпенсация ошибок.

УДК: 519.6. PACS: 02.70.-с.

**ВВЕДЕНИЕ**

Многие современные высокоточные приборы имеют в своем составе многослойные оптические покрытия. К таким устройствам относятся смартфоны, фотоаппараты, лазеры и не только. Оптические покрытия используют в медицине, самолето- и автомобилестроении, космической астрономии [1]. Чтобы получить надежное покрытие, удовлетворяющее заданным при проектировании требованиям, в напылительных камерах осуществляют контроль толщин слоев покрытия на протяжении всего времени напыления. Существуют различные виды контроля, но самыми перспективными на сегодняшний день являются методы оптического контроля [2], позволяющие измерять с некоторой периодичностью величины сигнала, получаемого от детектора в напылительной камере и представляющие собой некоторые спектральные характеристики напыляемого оптического покрытия, например коэффициент пропускания. В данной работе речь пойдет о монохроматическом контроле. В случае такого способа контроля измерения спектральных характеристик покрытия происходят на одной длине волны. Монохроматический контроль принято делить на прямой и непрямой [3]. Прямая стратегия контроля подразумевает, что измерения сигнала проводятся на самом образце покрытия, непрямая стратегия допускает использование нескольких сменных чипов (свидетелей), на которых проводятся измерения.

Оптический контроль может приводить к корреляции ошибок в толщинах слоев [2, 4], которая в свой черед может давать два противоположных эффекта:

кумулятивный рост ошибок с увеличением номера напыляемого слоя и эффект самокомпенсации ошибок. Явление, при котором в толщинах слоев при напылении могут быть допущены большие ошибки, но при этом получившееся покрытие удовлетворяет требуемым характеристикам, получило название эффекта самокомпенсации ошибок [5]. Прямая стратегия контроля обычно приводит к сильному кумулятивному росту ошибок, и, чтобы избежать этого, часто используют непрямую стратегию контроля. Стратегия, включающая использование сменных чипов (свидетелей), может кардинально уменьшить кумулятивный эффект, но имеет свои технические сложности, в частности требует тщательной калибровки устройств оптического контроля. Описанные эффекты имеют большое практическое значение, поэтому их необходимо учитывать при подборе стратегий контроля.

Эффект самокомпенсации ошибок был открыт в 70-х годах прошлого века для прямой монохроматической стратегии контроля, при которой прекращение напыления слоя происходило в точке экстремума кривой измеряемого сигнала [5, 6], много позже было дано физическое объяснение этого явления в работе [7]. Однако такая стратегия хорошо подходит только для контроля четвертьволновых покрытий, но плохо применима к другим типам покрытий. Поэтому для них используют стратегию прекращения напыления слоя по заранее рассчитанному значению сигнала, называемому уровнем остановки [8, 9]. Для такой стратегии эффект самокомпенсации ошибок долгое время оставался неисследованным.

В работах [10, 11] удалось продемонстрировать наличие этого эффекта в случае широкополосной стратегии контроля, при которой измерения

<sup>а</sup> E-mail: lagutina.math@gmail.com

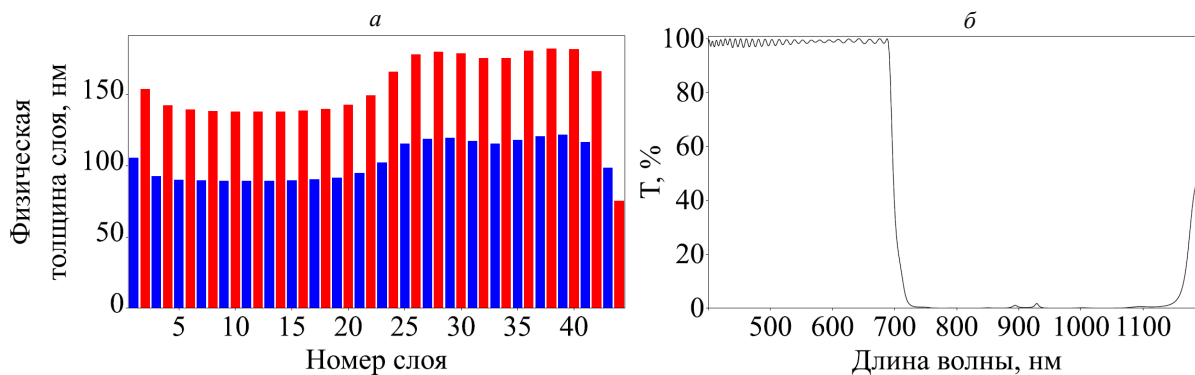


Рис. 1. Горячее зеркало НМ44: *а* — физические толщины слоев покрытия, *б* — спектральная характеристика коэффициента пропускания

спектральных характеристик оптического покрытия происходят в некотором интервале длин волн. Статистический подход к исследованию эффектов корреляции и самокомпенсации ошибок, предложенный для широкополосного контроля [12, 13] и распространенный на монохроматический [14, 15], а также введенные оценки силы указанных эффектов открывают новые возможности для сравнения различных стратегий контроля. В самое последнее время было получено подтверждение наличия эффекта самокомпенсации при монохроматическом контроле по уровню остановки на примере 36-слойного фильтра [16]. Одна из целей настоящей работы состоит в том, чтобы подтвердить, что способы оценки степени корреляции ошибок в толщинах слоев и оценки наличия эффекта самокомпенсации введены корректно и показать, что их применение физически обоснованно. Кроме того, в работе демонстрируется, как предложенные ранее оценки могут быть применены для сравнения эффективности различных стратегий контроля.

Структура данной работы следующая. В разд. 1 подробно описаны две стратегии контроля, конструкция выбранного покрытия, а также приведены параметры, используемые при симуляции процесса напыления. Разд. 2 посвящен сравнению двух стратегий по результатам полученных для них оценок.

## 1. СИМУЛЯЦИЯ ПРОЦЕССА НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

При напылении оптического покрытия важно выбрать подходящую стратегию контроля. Как уже упоминалось во введении, стратегии принято делить на прямые и стратегии со сменными чипами (свидетелями). Чтобы на практике оценить достоинства и недостатки стратегий этих двух видов, целесообразно провести серии вычислительных экспериментов с каждым из них. В качестве стратегии со сменными чипами нами рассматривалась стратегия, реализованная в одной из лучших в мире установок для массового производства покрытий компании Optogun [17]: каждые два слоя покрытия контролируются на новом свидетеле. В этом случае естественно предположить, что корреляция ошибок в толщинах слоев будет мала. Прямой контроль на самом напыляемом покрытии с использованием одной длины волны взят в качестве второй стратегии.

При такой стратегии все ошибки в толщинах всех слоев коррелированы между собой [4]. Выбранные стратегии популярны и широко используются в массовом производстве оптических покрытий [18, 19]. Их можно рассматривать как два предельных случая стратегий по степени коррелированности ошибок в толщинах слоев из всей совокупности монохроматических стратегий контроля. Такой выбор позволит наиболее ярко продемонстрировать особенности стратегий на основании введенных оценок эффектов корреляции и самокомпенсации ошибок при напылении покрытий [14, 15].

В качестве объекта исследования было взято 44-слойное покрытие, которое часто называют «горячее зеркало». Будем кратко обозначать его НМ44 (НМ означает «hot mirror»). Его конструкция аналогична рассмотренной в работе [18], где авторы исследовали цепочку проектирования–производства горячего зеркала с использованием процедуры непрямого контроля процесса напыления. Подложка покрытия состоит из боросиликатного стекла толщиной 2 мм. Использовалось стекло фирмы Schott, известное своей термической и механической стойкостью. Его показатель преломления известен с высокой точностью, что, в свою очередь, обеспечивает высокую точность калибровки измеряемого сигнала (коэффициента отражения или пропускания). Нечетные слои покрытия состоят из оксида тантала  $Ta_2O_5$ , четные — оксида кремния  $SiO_2$ . Физические толщины слоев покрытия и его целевая спектральная характеристика представлены на рис. 1.

Выбор длины волны, на которой осуществляется монохроматический контроль, является важным этапом при подборе стратегии контроля и часто основывается на критерии уменьшения кумулятивного роста ошибок в толщинах слоев. Для стратегии со сменными чипами были выбраны две длины волны, а именно: первые 22 слоя контролируются на длине волны 560 нм, остальные — на длине волны 690 нм. Важно отметить, что для этой стратегии измеряемым сигналом являлся коэффициент отражения от задней стороны подложки, то есть источник монохроматического света и источник напыляемого вещества находились по разные стороны от напыляемого покрытия. Такой подход используется в некоторых напылительных установках компании Optogun, что позволяет избежать осаждения вещества на детекторе сигнала. Прямая

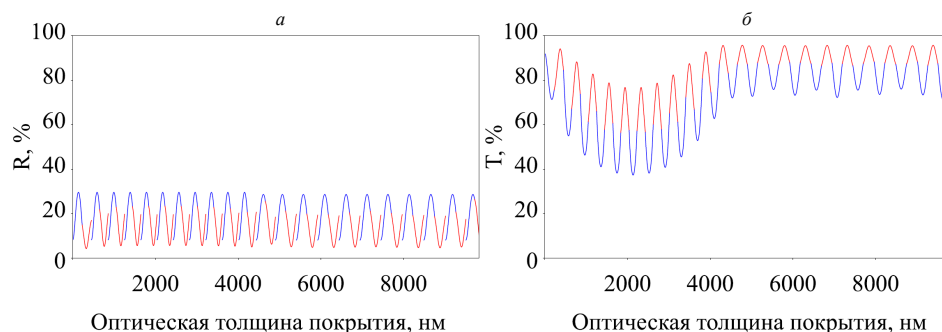


Рис. 2. Зависимость измеряемого сигнала от оптической толщины покрытия (контрольная длина волны 1000 нм) в случае стратегии со свидетелями (а) и прямой стратегии (б)

стратегия проводилась на длине волны 685 нм, в процессе напыления измерялся коэффициент пропускания с передней стороны подложки. На рис. 2 представлены зависимости измеряемого сигнала от оптической толщины покрытия для обеих стратегий. На рис. 2, а видно, что напыление каждого нечетного слоя начинается на новом свидетеле.

Для сравнения введенных стратегий проводились симуляции процесса напыления многослойного покрытия. Оценки эффектов корреляции и самокомпенсации ошибок основаны на статистическом анализе результатов большого числа таких численных экспериментов. С помощью программы-симулятора, написанной на языке Python 3 специально для компьютерного моделирования процесса напыления и исследования свойств полученных покрытий [20], было проведено по 10 тысяч экспериментов для каждой из рассматриваемых стратегий. Считалось, что монохроматическое излучение падает на покрытие под прямым углом, подложка поглощает излучение, в слоях поглощение отсутствует. Контрольный сигнал (коэффициент отражения для стратегии со свидетелями и коэффициент пропускания для стратегии с прямым контролем) измерялся каждые 2 с со стандартным гауссовым отклонением  $\sigma = 0.10\%$ . Для нечетных слоев скорость напыления составляла 0.5 нм/с с величиной среднеквадратичного гауссового отклонения  $\sigma_{rH} = 0.025$  нм/с, для четных — 0.8 нм/с и  $\sigma_{rL} = 0.08$  нм/с соответственно.

Регистрируемые в процессе напыления значения сигнала обрабатывались с помощью нелокального алгоритма анализа данных монохроматического контроля, опирающегося на физическую модель напылительного процесса и позволяющего использовать все измерения, полученные в результате напыления слоя [21]. При монохроматическом контроле напыления большую роль играет то, каким образом выбирается момент прекращения напыления слоя. Если прекращать напыление по теоретически предсказанной величине измеряемого сигнала, то это приводит к сильному росту ошибок в толщинах слоев. Поэтому мы использовали коррекцию уровня остановки напыления по квазисвингу [22], использующую информацию о максимальных и минимальных значениях сигнала при напылении каждого слоя покрытия.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИИ И САМОКОМПЕНСАЦИИ ОШИБОК

Эффекты корреляции и самокомпенсации ошибок подробно описаны в работах [14, 15]. Далее кратко представлены необходимые нам основные результаты этих работ. Предположим, что было проведено  $M$  симуляций процесса напыления какого-либо оптического покрытия. В каждой из них получается ненулевой вектор ошибок в толщинах слоев  $\Delta = \{\delta d_1, \dots, \delta d_m\}$ . По результатам  $M$  симуляций можно составить матрицу  $A = \{\Delta_1, \dots, \Delta_M\}$ , состоящую из  $M$  векторов ошибок  $\Delta$ . Ее размер  $M \times m$ , где  $m$  — число слоев покрытия. На основании этих данных рассмотрим матрицу корреляции  $\mu$ , вычисляемую по формуле:

$$\mu = \frac{1}{M} A^T \cdot A.$$

Величины  $\sigma_i, i = \overline{1, m}$ , называемые стандартными отклонениями ошибки, являются квадратными корнями собственных значений матрицы корреляции и представляют собой полуоси эллипсоида, характеризующего собой распределение ошибок в многомерном пространстве размерности  $m$ .

Степень коррелированности ошибок может быть измерена с помощью коэффициента  $\beta$ :

$$\beta = \sigma_{av} \left[ \prod_{i=1}^m \sigma_i \right]^{-\frac{1}{m}},$$

где  $\sigma_{av} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sigma_i^2}$  — среднеквадратичное значение стандартных отклонений ошибки  $\sigma_i$ .

Было показано [14], что чем больше величина коэффициента  $\beta$ , тем сильнее корреляция ошибок, допущенных при напылении покрытия.

Перейдем к сравнению двух предложенных стратегий. При проведении вычислительных экспериментов с параметрами, описанными в конце п.1, было получено 10000 векторов ошибок  $\Delta_k, k = \overline{1, 10000}$  толщинах слоев. На рис. 3, а, б представлены гистограммы значений норм векторов ошибок в случае стратегии со свидетелями и прямой стратегии соответственно. Среднее значение нормы вектора ошибок  $\mathbb{E}(\|\Delta\|)$  на рис. 3, а составляет 4.26 нм, на рис. 3, б — 6.27 нм. В обоих случаях распределение норм близко к гауссову, но при прямой

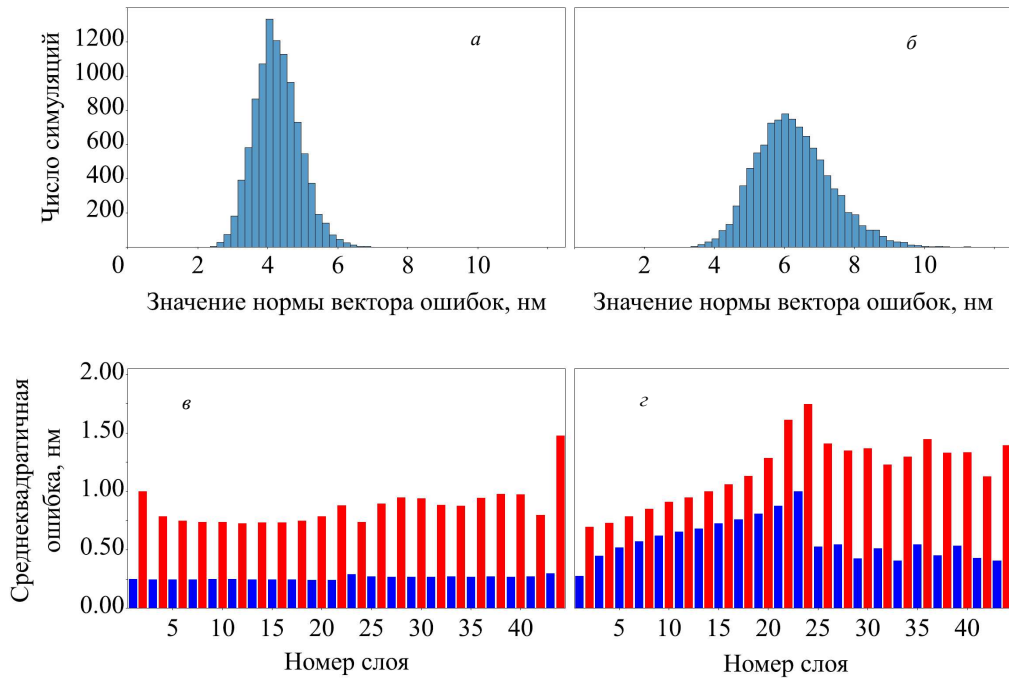


Рис. 3. Гистограмма норм векторов ошибок и среднеквадратичные ошибки в толщинах слоев: *a* и *v* — в случае стратегии со свидетелями, *b* и *z* — в случае прямой стратегии. 10000 симуляций

стратегии величины норм вектора ошибок в среднем больше, что является следствием более сильного кумулятивного эффекта накопления ошибок. На рис 3, *v, z* изображены среднеквадратичные значения ошибок по слоям по всей десяти тысячной выборке для обеих стратегий. Стратегия со сменными свидетелями демонстрирует меньшую зависимость ошибок в слоях, относящимся к разным свидетелям, в то время как при прямой стратегии четко прослеживается кумулятивный эффект накопления ошибок.

На рис. 4 приведены стандартные отклонения  $\sigma_i$ , расположенные в порядке убывания. На рисунке хорошо видно, что стандартные отклонения ошибки  $\sigma_i$  ведут себя совершенно по-разному для двух стратегий: монотонное убывание при прямой стратегии и ступенчатый вид, разграничивающий значения стандартных отклонений для четных и нечетных слоев, в случае стратегии со сменными свидетелями. В первом случае (прямая стратегия) коэффициент корреляции  $\beta$  равняется 1.78, во втором — 1.40, что соответствует предположению о большей коррелированности ошибок в случае прямого контроля.

Перейдем к оценке эффекта самокомпенсации ошибок. В работе [15] для монохроматического контроля по аналогии с широкополосным был введен фактор самокомпенсации ошибок, рассчитываемый по формуле:

$$c = \frac{\delta MF(\Delta)}{\mathbb{E}(\delta MF)}, \quad (1)$$

где  $\delta MF(\Delta) = MF(\mathbf{d}^{th} + \Delta) - MF(\mathbf{d}^{th})$  — вариация целевого функционала для вектора коррелированных ошибок,

$\mathbb{E}(\delta MF) = \frac{\sum_{i=1}^M \delta MF_i}{M}$  — среднее значение вариации целевого функционала для случайных некорре-

лированных ошибок в толщинах с тем же средним значением норм, что и в случае коррелированных ошибок (см. далее),

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

— целевой функционал, оценивающий близость между желаемой  $T^{target}(\lambda)$  и реальной  $T(\mathbf{d}, \lambda)$  спектральной характеристикой,

- $\mathbf{d}$  — вектор толщин слоев,
- $\mathbf{d}^{th}$  — вектор теоретических толщин слоев,
- $\lambda$  — длина волны,
- $L$  — количество длин волн,
- $M$  — число симуляций.

В формуле (1) сравниваются ошибки, полученные при симуляции процесса напыления со случайными абсолютными (аддитивными) ошибками, сгенерированными так, чтобы медиана норм векторов ошибок из симулятора совпадала с медианой норм векторов случайных ошибок. В соответствии с [15] при  $c < 1$  полагаем наличие эффекта самокомпенсации ошибок, при  $c > 1$  считаем, что эффекта самокомпенсации нет. Чем меньше параметр  $c$ , тем сильнее эффект самокомпенсации ошибок.

На рис. 5 изображены гистограммы значений фактора самокомпенсации ошибок для 10000 запусков процесса напыления покрытия. Среднее значение параметра  $c$  для стратегии со сменными свидетелями составляет 0.67, для стратегии с прямым контролем — 0.55. Таким образом, при использовании стратегии с прямым контролем фактор самокомпенсации меньше, что говорит о более выраженном эффекте самокомпенсации по сравнению со стратегией со сменными свидетелями.

Подытоживая сказанное, мы можем отметить, что предложенные в [14, 15] оценки эффектов корреляции и самокомпенсации соответствуют представлениям о свойствах различных методов контроля

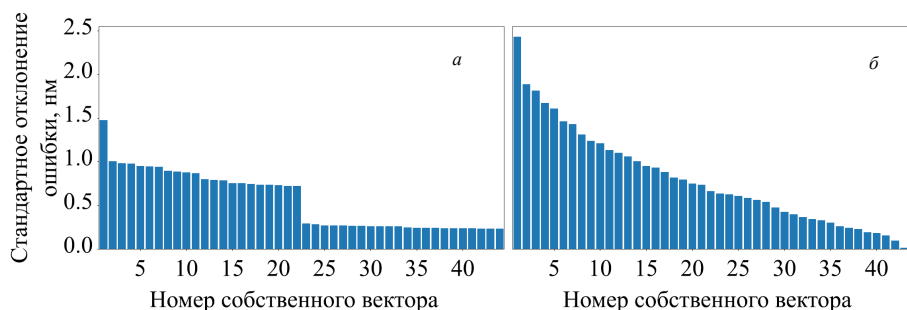


Рис. 4. Квадратные корни собственных значений матрицы корреляции, расположенные в порядке убывания, в случае стратегии со свидетелями (а) и прямой стратегии (б)

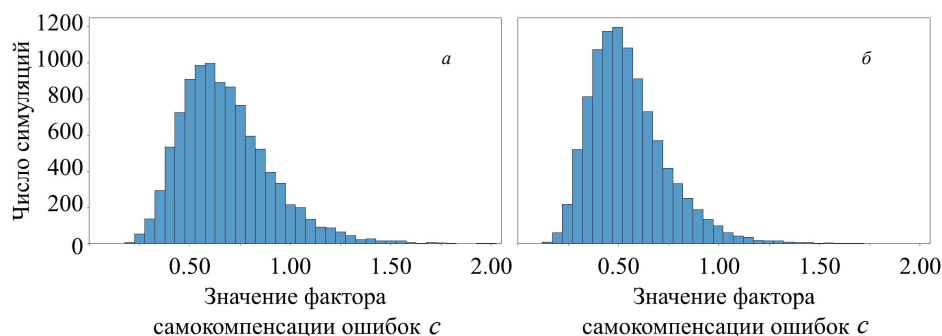


Рис. 5. Гистограмма значений параметра  $c$  в случае стратегии со свидетелями (а) и прямой стратегии (б). 10000 симуляций

напыления многослойных покрытий. Эффект корреляции ошибок при оптическом контроле тем сильнее, чем большее число слоев контролируется на одном свидетеле. При сравнении двух описанных стратегий контроля оказывается, что коэффициент корреляции  $\beta$  действительно больше при стратегии с прямым контролем. Поскольку корреляция ошибок может приводить к двум качественно противоположным эффектам: кумулятивному росту ошибок и эффекту самокомпенсации ошибок, при сравнении стратегий следует учитывать оба этих эффекта. Проведенное сравнение показывает, что прямая стратегия демонстрирует более сильный эффект самокомпенсации, но в то же время и более сильный кумулятивный эффект накопления ошибок по сравнению со стратегией со сменными чипами. Для последней наблюдается обратное: в целом меньшие ошибки при напылении, но более слабая самокомпенсация. Таким образом, обе стратегии имеют свои преимущества и недостатки. В целом проведенное исследование показывает, что широкое использование обеих рассмотренных стратегий на практике имеет ясное теоретическое обоснование.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено сравнение двух различных стратегий контроля процесса напыления оптических покрытий. Для сравнения использовались введенные ранее оценки эффектов корреляции и самокомпенсации ошибок. На примере 44-слойного горячего зеркала было показано, что использованные оценки корректны и их применение физически обоснованно. По результатам 10000 симуляций процесса напыления покрытия получены значения норм векторов ошибок

в толщинах слоев покрытия, коэффициенты корреляции и факторы самокомпенсации для стратегии со сменными чипами (свидетелями) и стратегии с прямым контролем. Показано, что при прямой стратегии контроля эффект корреляции и кумулятивный эффект накопления ошибок в слоях проявляются больше, а эффект самокомпенсации меньше по сравнению со стратегией с несколькими чипами (свидетелями). Таким образом, разработанный на основе исследований по корреляции и самокомпенсации ошибок подход открывает новые возможности для сравнения стратегий контроля процесса напыления многослойных оптических покрытий.

Автор выражает благодарность профессору А.Г. Яголе и профессору А.В. Тихонравову за постановку задачи, кроме того, автор признательна профессору А.В. Тихонравову за помощь в выборе стратегий контроля. Автор благодарит доцента Д.В. Лукьяненко за помощь в подготовке статьи к печати, а также аспиранта Ю.С. Лагутина (МГУ) за открытый доступ к программе-симулятору и обсуждение результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-11-00011).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Piegari A., Flory F.* Optical Thin Films and Coatings. 2nd edition. Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 2018.
2. *Tikhonravov A., Trubetskoy M., Amotchkina T.* Optical Thin Films and Coatings / Ed. by Piegari A., Flory F. Woodhead, Cambridge, 2nd ed., 2018. P. 65.
3. *Sullivan B., Dobrowolski J.* // Appl. Opt. 1992. **31**. P. 3821.
4. *Macleod H.A.* Thin-Film Optical Filters, 4th ed. (Taylor & Francis, 2010).

5. *Macleod H.A.* // *Optica Acta*. 1972. **19**. P. 1.
6. *Bousquet P., Fournier A., Kowalczyk R.* et al. // *Thin Solid Films*. 1972. **13**. P. 285.
7. *Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K.* // *Appl. Opt.* 2002. **41**. P. 3176.
8. *Macleod A.* // *Appl. Optics*. 1981. **20**. P. 82.
9. *Zhao F.* // *Appl. Opt.* 1985. **24**. P. 3339.
10. *Tikhonravov A., Trubetskov M., Amotchkina T.* // *Appl. Opt.* 2011. **50**. P. C111.
11. *Zhupanov V., Kozlov I., Fedoseev V.* et al. // *Appl. Opt.* 2011. **56**. P. C30.
12. *Kochikov I.V., Sharapova S.A., Yagola A.G., Tikhonravov A.V.* // *Journal of Inverse and Ill-Posed Problems*. 2020. **28**, N 6. P. 915.
13. *Tikhonravov A., Kochikov I., Matvienko I.* et al. // *Coatings*. 2019. **9**, N 12. P. 809.
14. *Тихонравов А.В., Кочиков И.В., Лагутина, А.А.* и др. // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* 2020. №6. С. 63. (*Tikhonravov A. V., Kochikov I. V., Lagutina A. A.* et al. // *Mosc. Univ. Phys. Bull.* 2020. **75**, N 6. P. 578.)
15. *Кочиков И. В., Лагутин Ю. С., Лагутина А. А.* и др. // *ЖВМиМФ.* 2021. **61** №9. С. 1528. (*Kochikov I. V., Lagutin Y. S., Lagutina A. A., et al* // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2021. **61**, N9. P. 1504.)
16. *Tikhonravov A. V., Lagutina A. A., Lagutin I. S.* et al. // *Optics Express*. 2021. **29**, N 26. P. 44275. <http://www.optorun.co.jp/en/>
17. *Zhang J., Tikhonravov A. V., Liu Y.* et al. // *Optics Express*. 2014. **22**, N 11. P. 13448.
19. *Zöller A., Boos M., Götzelmann R.* et al. // *In Optical Interference Coatings*. 2013. P. WB.5.
20. [https://github.com/LagutinMath/Optical\\_coating\\_research\\_program](https://github.com/LagutinMath/Optical_coating_research_program)
21. *Кочиков И.В., Лагутин Ю.С., Лагутина А.А.* и др. // *Вычислительные методы и программирование: Новые вычислительные технологии*. 2019. **20**. С. 471. (*Kochikov I.V., Lagutin I.S., Lagutina A.A.* et al. // *Numerical methods and programming*. 2019. **20**. P. 471.)
22. *Кочиков И.В., Лагутин Ю.С., Лагутина А.А.* и др. // *ЖВМиМФ.* 2020. **60**, №12. С. 2122. (*Kochikov I.V., Lagutin Y.S., Lagutina A.A.* et al. // *Comput. Math. Math. Phys.* 2020. **60**, N 12. P. 2056.)

### Comparison of Monochromatic Monitoring Strategies for the Deposition Process of Optical Coatings

A. A. Lagutina<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Department of Mathematics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University Moscow 119991, Russia*

<sup>2</sup>*Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*  
E-mail: [lagutina.math@gmail.com](mailto:lagutina.math@gmail.com)

Optical monitoring of the deposition process of multilayer coatings leads to correlation of errors in the thicknesses of the deposited layers. This effect, in turn, can lead to an accumulation of errors; at the same time, it can have a positive effect if there is an error self-compensation effect. Previously developed methods for estimating the degree of error correlation in layer thicknesses and assessing the self-compensation effect, which include the results of processing a large number of numerical experiments, open new possibilities for comparing existing monitoring strategies. Using a computer simulation of the deposition process of a 44-layer hot mirror as an example, it is shown how the above estimates can be used to compare the effectiveness of various monitoring strategies.

*Keywords:* optical coatings, monochromatic monitoring, monitoring strategies, error correlation, error self-compensation.

PACS: 02.70.-c.

Received 28 May 2022.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2022. **77**, No. 6. Pp. 818–824.

#### Сведения об авторе

Лагутина Алена Алексеевна — аспирант; тел.: (495) 939-10-33, e-mail: [lagutina.math@gmail.com](mailto:lagutina.math@gmail.com).