

**О выборе метода контроля процесса напыления оптических покрытий**

А. В. Тихонравов,<sup>1</sup> А. А. Лагутина,<sup>1,2</sup> Ю. С. Лагутин,<sup>1,2</sup>  
 Д. В. Лукьяненко,<sup>1,2</sup> С. А. Шарапова,<sup>1,\*</sup> А. Н. Шаров,<sup>3</sup> А. Г. Ягола<sup>1,2</sup>

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

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

<sup>3</sup> Университет МГУ-ППИ в Шэньчжэне, факультет вычислительной математики и кибернетики  
 КНР, 518172, провинция Гуандун, г. Шэньчжэнь, р-н Лунган, Даюньсиньчэн, ул. Гоцзидасюэюань, д. 1  
 (Поступила в редакцию 04.10.2023; после доработки 21.10.2023; подписана в печать 23.10.2023)

Сформулированы основные теоретические результаты по оценке силы эффекта самокомпенсации ошибок в толщинах слоев многослойных оптических покрытий, применимые при любом методе оптического контроля процесса их напыления. Показано, что учет возможного наличия сильного эффекта самокомпенсации ошибок в толщинах слоев покрытий имеет большое значение для выбора метода контроля. Проведен сравнительный анализ полученных к настоящему времени результатов по оценке силы эффекта самокомпенсации ошибок для различных типов покрытий. При этом ряд результатов получен впервые непосредственно в данной работе. Полученные результаты могут быть использованы для выбора оптимального метода контроля процесса напыления в зависимости от типа покрытия.

PACS: 02.70.-с УДК: 535.4

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

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.78.2360105](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.78.2360105)

**ВВЕДЕНИЕ**

Многослойные оптические покрытия используются практически во всех оптических и оптоэлектронных приборах. Современные методы расчета и технологии напыления в вакууме позволяют производить покрытия с десятками и сотнями слоев. На сегодняшний день основной задачей в области технологии производства различных типов покрытий является повышение точности контроля толщин их слоев в процессе напыления. При этом наиболее перспективными для использования, особенно при напылении наиболее сложных покрытий, считаются различные методы оптического контроля. Так, производство наиболее сложных телекоммуникационных фильтров с сотнями слоев в принципе возможно только при использовании оптического контроля по так называемому методу поворотной точки [1].

Возможность использования оптического контроля по поворотной точке связана с наличием очень сильного эффекта самокомпенсации ошибок в толщинах слоев напыляемых покрытий, который был обнаружен при производстве узкополосных фильтров более пятидесяти лет назад [2, 3]. К сожалению, как было показано в [4], оптический контроль по поворотной точке применим только в случае уз-

кополосных фильтров и только при дополнительном условии, что оптические толщины их слоев не произвольны, а кратны одной четверти центральной длины волны напыляемого фильтра. По этим причинам данный метод контроля имеет только узконаправленное применение.

Практически все современные покрытия имеют произвольные оптические толщины слоев. Уже в самых ранних работах, связанных с широкополосными методами оптического контроля процесса напыления, было предположено, что эффект самокомпенсации ошибок в толщинах слоев может иметь место и при их использовании [5–8]. Теоретическое объяснение наличия эффекта самокомпенсации ошибок при широкополосном оптическом контроле было дано в работе [9], а в работе [10] было экспериментально подтверждено его решающее значение при производстве поляризаторов лазерного излучения. В дальнейшем существование сильного эффекта самокомпенсации ошибок при использовании широкополосного контроля было продемонстрировано и для других типов покрытий как теоретически, так и экспериментально [11, 12].

Наличие эффекта самокомпенсации ошибок при монохроматическом контроле, отличном от метода контроля по поворотной точке, было предположено относительно недавно [13], что, как показали дальнейшие исследования [14], связано с его относительно меньшей силой, чем в случае широкополосного контроля. Однако исследования самого последнего времени показывают, что для некоторых типов по-

\* E-mail: [svet.sharapova@gmail.com](mailto:svet.sharapova@gmail.com)

крытий эффект самокомпенсации ошибок в толщинах слоев может быть весьма сильным и при монохроматическом контроле [15].

В целом полученные в последние годы результаты по эффекту самокомпенсации ошибок открывают новые возможности для выбора наиболее целесообразного метода контроля процесса напыления оптических покрытий. Задача данной работы – продемонстрировать данные возможности. Для этого в первом разделе работы мы приводим краткое описание полученных теоретических результатов и приводим пример их использования для оценки влияния ошибок процесса напыления на спектральные характеристики покрытия при различных методах оптического контроля. Во втором разделе работы проводится сравнение полученных к настоящему времени результатов по силе эффекта самокомпенсации ошибок при использовании методов монохроматического и широкополосного контроля. Целью данного сравнения является получение рекомендаций по выбору метода контроля в зависимости от типа оптического покрытия. Основные результаты работы суммируются в Заключение.

## 1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПРИМЕР ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Любой метод оптического контроля вызывает корреляцию ошибок в толщинах слоев напыляемого покрытия [16]. Это связано с тем, что ошибки в толщинах уже нанесенных слоев влияют на измеряемый контрольный сигнал (коэффициент отражения или пропускания напыляемого покрытия). Поскольку решение о прекращении нанесения очередного слоя принимается на основании этого сигнала, ошибка в его толщине оказывается связанной с ранее сделанными ошибками. Для исследования процесса корреляции ошибок был разработан статистический подход, основанный на проведении большой серии вычислительных экспериментов по моделированию процесса напыления покрытия [11]. Этот подход применим при любом методе контроля и состоит в следующем.

Обозначим  $m$  общее число слоев покрытия. Пусть  $\vec{\Delta} = \{\delta d_1, \dots, \delta d_m\}$  – вектор ошибок в толщинах слоев, полученный в одном из вычислительных экспериментов. Мы рассматриваем его как элемент в  $m$ -мерном пространстве. В ходе большого числа таких экспериментов получается набор из  $M$  векторов, где  $M$  – число много большее, чем  $m$ . Вследствие корреляции ошибок полученный набор векторов распределен в  $m$ -мерном пространстве неравномерно и имеет некоторые предпочтительные направления. Вероятностная плотность распределения этих векторов описывается многомерной гауссовой функцией [11]

$$f(\vec{\Delta}) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{m}{2}} \sqrt{\det \mu}} \exp\left(-\sum_{i=1}^m \frac{(\delta d_i)^2}{2\sigma_i^2}\right), \quad (1)$$

в которой  $\mu$  – матрица размерности  $(m \times m)$ , определяемая следующим образом через координаты векторов всего полученного набора векторов ошибок:

$$\mu_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \delta d_i^{(k)} \delta d_j^{(k)}. \quad (2)$$

Стандартные отклонения  $\sigma_i$  в формуле (1) вычисляются как квадратные корни из собственных значений матрицы  $\mu$ . Они определяют геометрию распределения векторов коррелированных ошибок в  $m$ -мерном пространстве. Поверхностями уровня для многомерной гауссовой плотности распределения являются многомерные эллипсоиды. Обозначим через  $\sigma_{av}$  среднеквадратичное значение  $\sigma_i$ :

$$\sigma_{av} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sigma_i^2}. \quad (3)$$

Можно показать, что  $\sigma_{av}$  равно среднеквадратичной норме всех векторов коррелированных ошибок, деленной на  $\sqrt{m}$ . Далее при исследовании эффекта самокомпенсации ошибок мы будем использовать функцию, оценивающую спектральные свойства покрытия, и будем сравнивать ее вариации, вызванные коррелированными и некоррелированными ошибками. Понятно, что для корректности такого сравнения уровни коррелированных и некоррелированных ошибок должны быть одинаковыми. Компоненты некоррелированных векторов ошибок будут задаваться как независимые нормально распределенные числа со среднеквадратичными значениями  $\sigma_{av}$ . При таком задании среднеквадратичная норма векторов некоррелированных ошибок будет в точности совпадать со среднеквадратичной нормой векторов коррелированных ошибок.

Прежде чем перейти к описанию оценки эффекта самокомпенсации ошибок, приведем еще и формулу для коэффициента, оценивающего степень корреляции ошибок. Этот коэффициент вводится следующим образом:

$$\beta = \frac{\sigma_{av}}{[\prod_{i=1}^m \sigma_i]^{1/m}}. \quad (4)$$

Заметим, что в случае некоррелированных ошибок все  $\sigma_i$  одинаковы и эта формула дает значение коэффициента корреляции, равное 1. В случае коррелированных ошибок поверхности уровня плотности распределения (многомерные эллипсоиды) вытянуты вдоль некоторых специфических направлений и формула (4) дает значения, большие 1. При этом чем сильнее корреляция, т.е. чем более вытянуты эллипсоиды вдоль некоторых направлений, тем больше значения коэффициента корреляции.

Обозначим  $MF$  целевую функцию, используемую при решении задачи проектирования оптического покрытия. Поскольку решение этой задачи производится путем минимизации целевой функции, на полученном решении достигается минимум

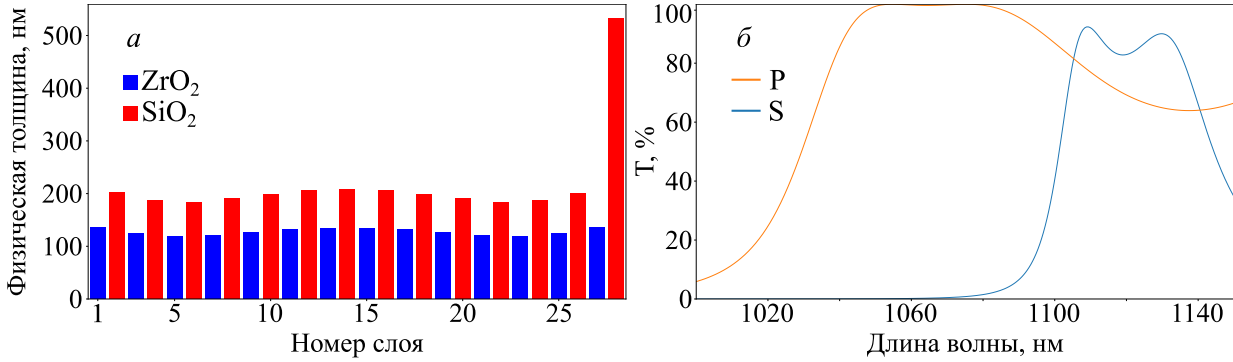


Рис. 1. Физические толщины слоев 28-слойного поляризатора (а) и его спектральные коэффициенты пропускания для s- и p-поляризованного света при угле падения  $55.6^\circ$  (б)

$MF$  и при любом типе ошибок в толщинах слоев вариации целевой функции положительны. Обозначим  $\mathbb{E}(\delta MF)$  математическое ожидание этих вариаций в случае некоррелированных векторов ошибок. Их число берется равным числу векторов коррелированных ошибок, полученных в ходе массового вычислительного эксперимента по моделированию процесса напыления с выбранным методом оптического контроля. Рассмотрим один из векторов коррелированных ошибок  $\vec{\Delta}$  и вычислим соответствующую ему вариацию целевой функции  $\delta MF(\vec{\Delta})$ . Введем коэффициент самокомпенсации следующей формулой:

$$c = \frac{\delta MF(\vec{\Delta})}{\mathbb{E}(\delta MF)}. \quad (5)$$

Мы будем говорить, что для полученного в ходе одного из экспериментов вектора коррелированных ошибок эффект самокомпенсации присутствует, если  $c > 1$ , и отсутствует, если  $c < 1$ . Математическое ожидание этого коэффициента по всему ансамблю коррелированных ошибок примем в качестве оценки силы эффекта самокомпенсации ошибок. Чем меньше матожидание  $c$ , тем сильнее эффект самокомпенсации. В дальнейшем для краткости записи оценку силы эффекта самокомпенсации будем обозначать просто как  $c$ .

Для демонстрации возможностей практического использования полученных теоретических результатов мы рассмотрим поляризатор лазерного излучения, для которого в [10] было экспериментально продемонстрировано наличие сильного эффекта самокомпенсации ошибок при использовании широкополосного оптического контроля. Оценка силы эффекта самокомпенсации для этого поляризатора в соответствии с изложенной выше теорией проводится в настоящей работе впервые.

На рис. 1 показаны физические толщины рассматриваемого поляризатора. Материалами слоев с высоким и низким показателями преломления являются ZrO<sub>2</sub> и SiO<sub>2</sub>, материалом подложки — стекло марки ВК7. На рис. 1, б приведены коэффициенты пропускания поляризатора при падении света под углом  $55.6^\circ$ .

Для оценки силы эффекта самокомпенсации в вычислительных экспериментах по моделированию процесса напыления поляризатора использовался тот же вариант широкополосного контроля, что и в работе [10]: данными измерений являлись значения коэффициента пропускания напыляемого покрытия при нормальном падении света в диапазоне длин волн от 658 до 1172 нм. Коэффициент пропускания измерялся на сетке длин волн с шагом 1 нм с периодичностью 3 с. В данные измерений на каждой длине волны вносился случайный (белый) шум с уровнем 1% в шкале измерений коэффициента пропускания от 0 до 100%. Средние скорости напыления слоев с высоким показателем преломления (ZrO<sub>2</sub>) и низким показателем преломления (SiO<sub>2</sub>) составляли соответственно 0.3 нм/с и 0.5 нм/с. Флуктуации скоростей напыления моделировались гауссовским распределением со стандартными отклонениями 0.05 нм/с (ZrO<sub>2</sub>) и 0.1 нм/с (SiO<sub>2</sub>). Кроме того, в вычислительных экспериментах задавались еще и дополнительные погрешности, связанные с неточностью времени закрытия заслонок для прерывания напыления отдельных слоев. Отклонение этого времени от точного значения моделировалось гауссовским распределением с нулевым матожиданием и стандартным отклонением 1 с.

Результаты 10 тысяч вычислительных экспериментов по напылению 28-слойного поляризатора отражены на рис. 2. Рис. 2, а показывает гистограмму значений норм векторов ошибок, полученных в этих экспериментах, а на рис. 2, б показана гистограмма значений коэффициента самокомпенсации, рассчитанного в соответствии с формулой (5).

На основании проведенных вычислительных экспериментов оценка силы эффекта самокомпенсации (матожидание коэффициента самокомпенсации на гистограмме 2, б) составляет  $c = 0.050$ . Качественно это означает, что негативное влияние коррелированных ошибок на спектральные характеристики поляризатора в 20 раз меньше, чем негативное влияние некоррелированных ошибок того же уровня. На сегодняшний день это наиболее сильное проявление эффекта самокомпенсации ошибок во всех исследованных вариантах примене-

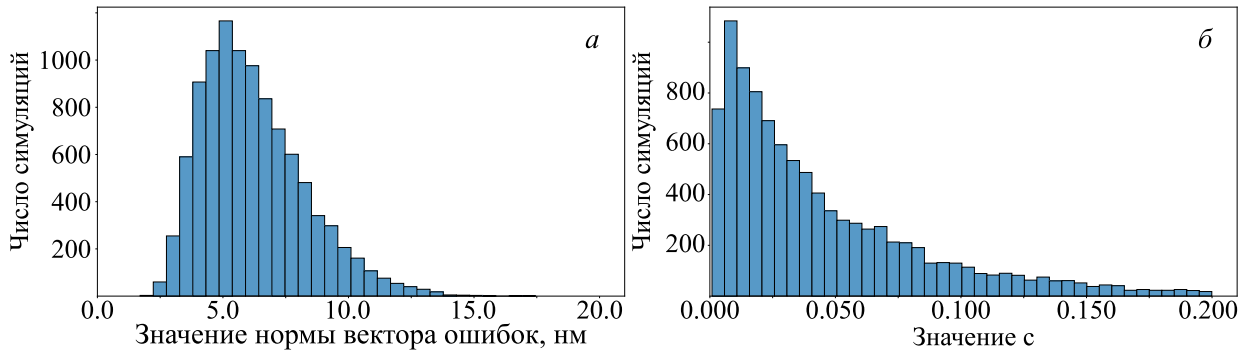


Рис. 2. Гистограммы норм векторов ошибок (*a*) и значений коэффициента самокомпенсации (*б*), полученные на основе 10 тысяч вычислительных экспериментов по моделированию напыления 28-слойного поляризатора с широкополосным оптическим контролем

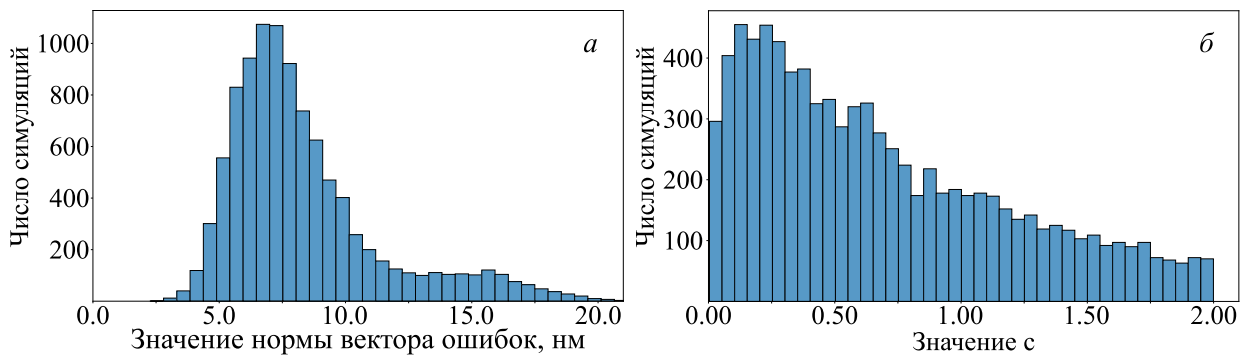


Рис. 3. Гистограммы норм векторов ошибок (*a*) и значений коэффициента самокомпенсации (*б*), полученные на основе 10 тысяч вычислительных экспериментов по моделированию напыления 28-слойного поляризатора с монохроматическим оптическим контролем

ния широкополосного и монохроматического контроля к различным типам покрытий. Спектральные характеристики получаемых в вычислительных экспериментах покрытий не приводятся, поскольку они практически неотличимы от изображенных на рис. 1, *б* характеристик.

Оценим теперь целесообразность использования монохроматического контроля при напылении рассматриваемого поляризатора. В экспериментах по моделированию с этим типом контроля использовались несколько иные параметры самого процесса напыления. Они были выбраны в соответствии с данными, приведенными в работе [13]. Средние скорости напыления слоев с высоким и низким показателями преломления были взяты равными 0.5 нм/с и 0.8 нм/с, а уровни их флуктуаций составляли соответственно 5% и 10% от средних значений. Монохроматический контроль проводился по коэффициенту пропускания напыляемого покрытия на длине волны 790 нм. Уровень шума в измеряемом коэффициенте пропускания (стандартное отклонение в гауссовском случайном распределении) был взят равным 0.1% в шкале измерений от 0 до 100%. Данные монохроматического контроля поступали на обработку каждые 2 с, т.е. в полтора раза чаще, чем в случае широкополосного контроля. Это нивелировало возможное негативное влияние более высоких скоростей напыления на точность предска-

ния времени прерывания процесса напыления слоя.

Для обработки данных монохроматического контроля и определения времени окончания напыления слоя использовался алгоритм с коррекцией данных монохроматических измерений, получивший название квазисвингового алгоритма. Его описание и доказательство высокой эффективности этого алгоритма можно найти в [15]. На рис. 3, *a* показана гистограмма значений норм векторов ошибок, построенная на основании 10 тысяч вычислительных экспериментов по напылению с монохроматическим контролем. На рис. 3, *б* показана гистограмма значений коэффициента самокомпенсации, соответствующая данному методу контроля.

Уровни ошибок в толщинах слоев в экспериментах с широкополосным и монохроматическим контролем близки, что видно по распределению норм векторов ошибок на рис. 2, *a* и 3, *a*, средние значения норм векторов ошибок в первом и во втором случаях равны 6.21 нм и 8.36 нм. Однако спектральные свойства получаемых при монохроматическом контроле покрытий в подавляющем большинстве экспериментов абсолютно неудовлетворительны. Это связано с отсутствием или же очень слабым эффектом самокомпенсации ошибок (см. рис. 3, *б*). Математическое ожидание коэффициента самокомпенсации на гистограмме 3, *б* равно 1.048, т.е. почти в 21 раз больше, чем в случае широ-

кополосного контроля процесса напыления. Таким образом, оценка силы эффекта самокомпенсации ошибок позволяет сделать однозначное заключение о преимуществе широкополосного контроля при напылении поляризаторов рассматриваемого типа.

## 2. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИЛЫ ЭФФЕКТА САМОКОМПЕНСАЦИИ ОШИБОК ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПОКРЫТИЙ И РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

С максимальной силой эффект самокомпенсации ошибок проявляет себя при напылении многослойных телекоммуникационных фильтров с использованием метода оптического контроля по поворотной точке. В [17] исследовалось несколько типов таких фильтров, при этом для 138-слойного 4-полосного фильтра была получена оценка силы эффекта самокомпенсации  $c = 0.00055$ . На сегодняшний день это минимальное найденное значение. Для фильтров с большим числом слоев значения коэффициента самокомпенсации были больше, но они также демонстрировали наличие сильнейшего эффекта самокомпенсации ошибок. Так для 206-слойного 6-полосного фильтра матожидание  $c$  равнялось 0.00109, а для 302-слойного 11-полосного фильтра — 0.006. Заметим, что даже в последнем случае негативное влияние коррелированных ошибок на спектральные свойства фильтра в 150 с лишним раз меньше, чем негативное влияние некоррелированных ошибок того же уровня. К сожалению, столь же сильный эффект самокомпенсации ошибок пока не обнаружен в случаях широкополосного и монохроматического контроля. Тем не менее, для ряда типов покрытий этот эффект является достаточно сильным и при использовании этих методов контроля.

В целом эффект самокомпенсации ошибок оказывается более сильным при широкополосном контроле, что, как отмечалось во введении, послужило причиной его более раннего обнаружения в этом случае. В предыдущем разделе рассмотрен поляризатор, для которого этот эффект является наиболее сильным. В [11] существование сильного эффекта самокомпенсации ошибок теоретически предсказано для работающих под углом  $45^\circ$  неполяризирующих отрезающих фильтров: для них получена оценка математического ожидания коэффициента самокомпенсации 0.053, что соответствует почти 20-кратному снижению погрешностей спектральных характеристик за счет корреляции ошибок. Интересно отметить, что в случае неполяризирующих фильтров, как и в случае поляризатора, проводимый при нормальном падении света широкополосный контроль «не видит» угловых спектральных характеристик. Тем не менее эффект самокомпенсации прекрасно работает.

В [12] было показано, что напыление сложного полосового фильтра с числом слоев 81 возможно бла-

годаря использованию широкополосного контроля и связанному с ним эффекту самокомпенсации ошибок. Математическое ожидание коэффициента самокомпенсации для этого фильтра равно 0.114, что соответствует 9-кратному снижению погрешностей его спектральной характеристики за счет корреляции ошибок.

Наличие эффекта самокомпенсации при монохроматическом контроле было впервые предположено на основе экспериментальных данных для отрезающих фильтров с высоким пропусканием в коротковолновой области [13]. Проведенное в [14] теоретическое исследование подтвердило наличие данного эффекта, и математическое ожидание коэффициента самокомпенсации было оценено как 0.35–0.42 в зависимости от используемого алгоритма определения времени прерывания напыления слоя. Эти значения в несколько раз выше указанных в случае широкополосного контроля. Тем не менее, поскольку даже при таких значениях  $c$  эффект был замечен экспериментально, их можно считать практически значимыми. В дальнейшем мы будем считать, что эффект самокомпенсации ошибок не имеет смысла учитывать при выборе метода контроля только в том случае, когда матожидание коэффициента  $c$  превышает 0.5.

При монохроматическом контроле существенное влияние на процесс корреляции ошибок и, соответственно, на наличие и силу эффекта их самокомпенсации оказывает выбор алгоритма определения времени прерывания слоя. Исследования самого последнего времени [15] показывают, что наилучшие результаты с точки зрения уровня ошибок и их самокомпенсации получаются при использовании упомянутого в конце предыдущего раздела квазисвингового алгоритма. При этом оказывается, что для некоторых типов покрытий эффект самокомпенсации ошибок в толщинах слоев может быть весьма сильным и при монохроматическом контроле [15]. Так, для полосовых фильтров было получено равное 0.24 значение матожидания коэффициента  $c$ , а для отрезающих фильтров с высоким пропусканием в длинноволновой области это значение оказалось равным 0.08, что уже вполне сравнимо по силе эффекта самокомпенсации с приведенными выше значениями в случае широкополосного контроля.

Наличие сильного эффекта самокомпенсации ошибок при монохроматическом контроле предсказано и для одного из наиболее сложных для производства типов покрытий — так называемых «минус-фильтров» (другое название notch filters) [18]. Сложность контроля процесса напыления этих фильтров связана с наличием в них большого числа очень тонких и очень толстых слоев. Для одной из возможных конструкций этих фильтров предсказано наличие эффекта самокомпенсации с матожиданием  $c$ , равным 0.14. Это соответствует 7-кратному снижению погрешностей его спектральной характеристики за счет корреляции ошибок.

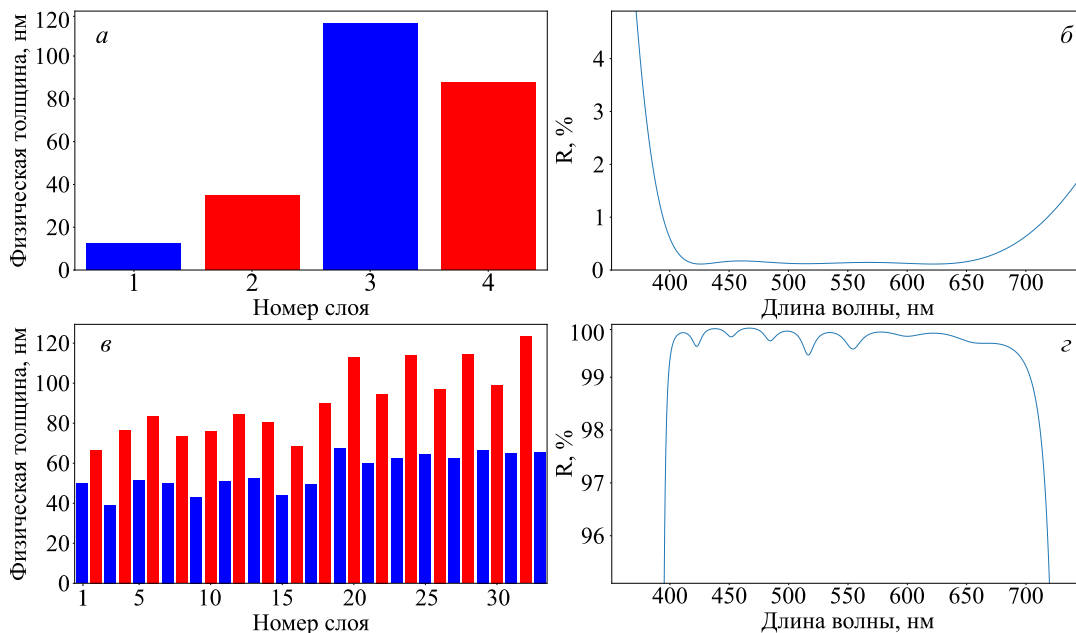


Рис. 4. Физические толщины слоев 4-слойного просветляющего покрытия (а) и 33-слойного отражающего покрытия (в) и их спектральные коэффициенты отражения (б, г)

Для большей полноты анализа силы эффекта самокомпенсации ошибок при монохроматическом контроле различных типов покрытий рассмотрим еще и широко используемые на практике просветляющие и высокоотражающие покрытия. На рис. 4, б, г представлены спектральные характеристики 4-слойного просветляющего и 33-слойного отражающего покрытий, а на рис. 4, а, в показаны толщины их слоев. В обоих случаях нечетные слои имеют высокий показатель преломления 2.35, а четные — низкий показатель преломления 1.46. Показатель преломления подложек, на которые нанесены покрытия, — 1.52.

При моделировании процессов напыления просветляющего покрытия и широкополосного зеркала использовались те же средние скорости напыления слоев с высоким и низким показателями преломления и уровни их флуктуаций, что и в предыдущем разделе. Для просветляющего покрытия контроль по коэффициенту пропускания проводился на длине волны 400 нм, а в случае зеркала контроль проводился на двух длинах волн: 615 нм для слоев 1–14 и 770 нм для слоев 15–33. Уровень шума в измеряемом коэффициенте пропускания в обоих случаях был 0.1%, а измерения проводились каждые 2 с. Для определения времени окончания напыления слоя использовался квазисвинговый алгоритм с коррекцией данных монохроматических измерений.

По результатам 10000 вычислительных экспериментов для каждого из покрытий получены следующие значения математического ожидания коэффициента самокомпенсации: 0.73 для просветляющего покрытия и 0.77 для широкополосного зеркала. В соответствии с приведенными выше рассуждениями о пороговом значении математического ожидания  $c$  для прак-

тически значимого эффекта самокомпенсации ошибок мы можем констатировать, что эффект самокомпенсации ошибок для данных покрытий при монохроматическом контроле отсутствует.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе сформулированы основные теоретические результаты по оценке силы эффекта самокомпенсации ошибок в толщинах слоев напыляемых покрытий, применимые при любом типе оптического контроля процесса напыления, и приведен пример их использования для сравнения силы этого эффекта в случаях широкополосного и монохроматического контроля. Проведен сравнительный анализ полученных к настоящему времени результатов по оценке силы эффекта самокомпенсации ошибок для различных типов покрытий. При этом ряд результатов получен впервые непосредственно в данной работе. На основе анализа имеющихся теоретических и экспериментальных данных предложено считать эффект самокомпенсации значимым в тех случаях, когда математическое ожидание коэффициента самокомпенсации  $c$  менее 0.5. Определены типы покрытий, для которых эффект самокомпенсации является наиболее сильным при широкополосном контроле и монохроматическом контроле. Полученные результаты могут быть использованы для выбора наиболее целесообразного метода контроля процесса напыления в зависимости от типа напыляемого покрытия.

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

- [1] *Tikhonravov A., Trubetskov M., Amotchkina T. // Optical Thin Films and Coatings / Ed. by A. Piegari, F. Flory. Woodhead, Cambridge, 2nd ed., 2018. P. 65.*
- [2] *Macleod H.A. // Optica Acta. 19. 1. (1972).*
- [3] *Bousquet P., Fornier A., Kowalczyk R. et al. // Thin Solid Films. 13. 285. (1972).*
- [4] *Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K. // Appl. Opt. 41. 3176. (2002).*
- [5] *Vidal B., Fornier A., Pelletier E. // Appl. Opt. 17. 1038. (1978).*
- [6] *Vidal B., Fornier A., Pelletier E. // Appl. Opt. 18. 3851. (1979).*
- [7] *Vidal B., Pelletier E. // Appl. Opt. 18. 3857. (1979).*
- [8] *Macleod H. A. // Appl. Opt. 20. 82. (1989).*
- [9] *Tikhonravov A., Kochikov I., Yagola A. // Inverse Probl. Sci. Eng. 26. 1214. (2018).*
- [10] *Zhupanov V., Kozlov I., Fedoseev V. et al. // Appl. Opt. 56. C30. (2017).*
- [11] *Tikhonravov A., Kochikov I., Sharapova S., Yagola A. // Proceedings of SPIE. 11872. 1. (2021).*
- [12] *Ji X., Zhang J., Jiao H. et al. // Optics Express. 30. 22501. (2022).*
- [13] *Zoeller A., Boos M., Hagedorn H., Romanov B. // Proceedings of SPIE. 7101. 71010G. (2008).*
- [14] *Tikhonravov A.V., Lagutina A.A., Lagutin I.S. et al. // Optics Express. 29, N 26. 44275. (2021).*
- [15] *Tikhonravov A., Lagutina A., Lagutin Iu., Yagola A. // Appl. Opt. 62 4906. (2023).*
- [16] *Macleod H.A. // Thin-Film Optical Filters, 4th ed. (Taylor & Francis, 2010).*
- [17] *Tikhonravov A., Lagutin Iu., Yagola A. // Appl. Opt. 61. 8281. (2022).*
- [18] *Tikhonravov A., Lagutin Iu., Lagutina A. et al. // Appl. Opt. 62. (2023).*

## On the choice of monitoring procedure of optical coating deposition

A. V. Tikhonravov<sup>1</sup>, A. A. Lagutina<sup>1,2</sup>, Yu. S. Lagutin<sup>1,2</sup>, D. V. Lukyanenko<sup>1,2</sup>,  
S. A. Sharapova<sup>1,a</sup>, A. N. Sharov<sup>3</sup>, A. G. Yagola<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

<sup>2</sup>Department of Mathematics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

<sup>3</sup>Shenzhen MSU-BIT University, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics  
P.R. China, 518172, Shenzhen, Guangdong Province.

E-mail: <sup>a</sup>[svet.sharapova@gmail.com](mailto:svet.sharapova@gmail.com)

Theoretical results are formulated to assess the strength of the effect of self-compensation of errors in the thicknesses of layers of multilayer optical coatings. They are applicable to any method of optical monitoring of the deposition process. It is shown that considering a possible presence of a strong error self-compensation effect is of great importance for choosing a monitoring method. A comparative analysis of the results obtained to date to assess the strength of the error self-compensation effect for various types of coatings has been carried out. Moreover, a number of results were obtained for the first time directly in this work. The results obtained can be used to select the optimal method for monitoring the deposition process depending on the type of coating.

PACS: 02.70.-c.

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

*Received 04 October 2023.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin. 2023. 78, No. 6. Pp. 783–789.*

### Сведения об авторах

1. Тихонравов Александр Владимирович — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-54-24, e-mail: [tikh@srcc.msu.ru](mailto:tikh@srcc.msu.ru).
2. Лагутина Алена Алексеевна — аспирант; тел.: (495) 939-10-33, e-mail: [lagutina.math@gmail.com](mailto:lagutina.math@gmail.com).
3. Лагутин Юрий Сергеевич — аспирант; тел.: (495) 939-10-33, e-mail: [lagutin.math@gmail.com](mailto:lagutin.math@gmail.com).
4. Лукьяненко Дмитрий Витальевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-10-33, e-mail: [lukyanenko@physics.msu.ru](mailto:lukyanenko@physics.msu.ru).
5. Шаропова Светлана Анатольевна — канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-54-24, e-mail: [svet.sharapova@gmail.com](mailto:svet.sharapova@gmail.com).
6. Шаров Александр Николаевич — канд. физ.-мат. наук, преподаватель; e-mail: [scharov.aleksandr@physics.msu.ru](mailto:scharov.aleksandr@physics.msu.ru).
7. Ягола Анатолий Григорьевич — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-10-33, e-mail: [yagola@physics.msu.ru](mailto:yagola@physics.msu.ru).