

Корреляция ошибок при монохроматическом контроле процессов напыления оптических покрытий

А. В. Тихонравов,^{1,2} И. В. Кочкин,¹ А. А. Лагутина,^{2,3}
Ю. С. Лагутин,^{2,3,а} Д. В. Лукьяненко,^{2,3,б} С. А. Шарапова,^{1,2} А. Г. Ягола³

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

² Московский центр фундаментальной и прикладной математики.
Россия, 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1.

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

Поступила в редакцию 13.10.2020, после доработки 31.10.2020, принята к публикации 03.11.2020.

В работе проведено теоретическое исследование корреляции ошибок в толщинах слоев многослойных оптических покрытий при монохроматическом контроле процессов их напыления. Для различных алгоритмов определения времен остановки напыления слоев покрытия получены оценки степени коррелированности ошибок в толщинах слоев. Показано, что параметр, введенный для оценки степени коррелированности, дает адекватное представление о корреляции ошибок при монохроматическом контроле.

Ключевые слова: оптические покрытия, напыление покрытий, оптический контроль, монохроматический контроль, корреляция ошибок.

УДК: 519.6. PACS: 02.70.-с.

ВВЕДЕНИЕ

Многослойные оптические покрытия находят широкое применение в современной жизни: они используются во встроенных камерах мобильных телефонов, практически в любых оптоэлектронных приборах, в офтальмологии и т. д. Они также являются важнейшими элементами телекоммуникационных технологий, лазерной литографии в электронике, лазерных систем в установках термоядерного синтеза и др. [1, 2]. Точность реализации рассчитанных конструкций покрытий в процессе их напыления имеет определяющее значение для создания наиболее сложных покрытий для современных приложений [3]. При этом для контроля толщин слоев покрытий наиболее широко используются различные методы оптического контроля процессов напыления [4]. Характерной особенностью всех методов оптического контроля является то, что их использование приводит к корреляции ошибок в толщинах слоев покрытий [5].

С корреляцией ошибок связан открытый почти 50 лет назад при создании узкополосных оптических фильтров эффект самокомпенсации ошибок напыления [6, 7]. Только благодаря наличию данного эффекта оказывается возможным производство современных телекоммуникационных фильтров с огромным количеством слоев [8]. Корреляция ошибок вызывает и негативный эффект кумулятивного роста уровня ошибок в толщинах напыляемых слоев с увеличением номера напыляемого слоя [9, 10].

До последнего времени не проводилось серьезного изучения процесса корреляции ошибок при различных методах оптического контроля процессов напыления покрытий. Описание этого процесса ограничивалось лишь констатацией факта его наличия [5].

Систематическое исследование началось после обнаружения очень мощного эффекта самокомпенсации ошибок при прямом широкополосном оптическом контроле производства поляризаторов излучения для лазерных систем установок термоядерного синтеза [11]. В работах [12, 13] было предложено математическое описание процесса корреляции ошибок при данном методе оптического контроля, а в [14] был введен параметр, оценивающий степень коррелированности ошибок в толщинах слоев покрытий. К сожалению, предложенная в [14] оценка применима лишь в случае прямого широкополосного оптического контроля непосредственно на напыляемом покрытии. Более общий подход к исследованию процесса корреляции ошибок был развит в работе [15], где он был применен к оценке степени коррелированности ошибок в толщинах слоев при напылении с различными современными схемами широкополосного контроля, использующими несколько чипов оптического мониторинга [16]. В настоящей работе данный подход распространяется на исследование корреляции ошибок при монохроматическом контроле процесса напыления покрытий.

Существенное отличие монохроматического контроля от широкополосного состоит в том, что при обработке данных монохроматических измерений могут использоваться различные алгоритмы коррекции этих данных, что также влияет на процесс корреляции ошибок. В разд. 1 процесс корреляции ошибок исследуется для трех принципиально различающихся алгоритмов обработки данных измерений. В разд. 2 проводятся оценки параметра, характеризующего этот процесс, и приводятся результаты дополнительных исследований, подтверждающих практическую значимость предложенной в [15] теоретической оценки. Основные выводы приводятся в Заключение.

^а E-mail: lagutin.math@gmail.com

^б E-mail: lukyanenko@physics.msu.ru

1. КОРРЕЛЯЦИИ ОШИБОК ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

В данном разделе мы рассматриваем три алгоритма определения времени остановки напыления очередного слоя покрытия по данным монохроматических измерений, проводимых в процессе напыления. При этом далее обсуждаются лишь принципиальные различия этих алгоритмов и не описываются детали их численной реализации. Подробно эти детали рассмотрены в работах [17, 18].

Обозначим $d_1^{\text{theor}}, \dots, d_m^{\text{theor}}$ теоретический набор толщин слоев многослойного покрытия с числом слоев m . Номера слоев начинаются от подложки, на которую нанесено покрытие. Мы рассматриваем монохроматический контроль по коэффициенту отражения от покрытия R , определяемому во время напыления покрытия на некоторой длине волны λ . Пусть $d_1^{\text{act}}, \dots, d_m^{\text{act}}$ — реальные толщины нанесенных слоев покрытия, которые, естественно, отличаются от теоретических значений толщин слоев. Пусть $R_j(d_1^{\text{act}}, \dots, d_{j-1}^{\text{act}}, d_j)$ — коэффициент отражения от покрытия с числом слоев j ($j \in \{1, \overline{m}\}$), где d_j — переменная толщина последнего напыляемого j -го слоя. В ходе монохроматического контроля этот коэффициент измеряется на длине волны λ через равные промежутки времени, за которые толщина слоя изменяется весьма незначительно (обычно на доли нанометра). Скорость роста толщины слоя является важным параметром напылительного процесса.

Классический алгоритм определения времени остановки напыления очередного слоя покрытия основывается на прерывании напылительного процесса в момент времени, когда измеряемый коэффициент отражения становится равным заранее рассчитанному коэффициенту отражения $R_j^{\text{theor,term}}$:

$$R_j(d_1^{\text{act}}, \dots, d_{j-1}^{\text{act}}, d_j) = R_j^{\text{theor,term}}. \quad (1)$$

Этот алгоритм называется алгоритмом контроля по уровню измеряемого сигнала [19]. При его использовании уровни остановки напыления $R_j^{\text{theor,term}}$ рассчитываются заранее до начала напыления покрытия на основании заданных теоретических значений толщин слоев d_j^{theor} .

Обозначим δd_i ошибки в толщинах ранее напыленных слоев: $\delta d_i = d_i^{\text{act}} - d_i^{\text{theor}}$, $i = 1, \dots, j-1$. Толщина очередного j -го слоя d_j также отличается от теоретически запланированной величины d_j^{theor} : $d_j = d_j^{\text{theor}} + \delta d_j$. Как следует из (1), ошибка в толщине j -го слоя δd_j оказывается связанной со всеми ранее допущенными ошибками, т.е. имеет место корреляция ошибок в толщинах напыляемых слоев вследствие использования рассматриваемого алгоритма определения времени остановки напыления очередного слоя покрытия.

Широко известно, что корреляция ошибок при использовании алгоритма контроля по уровню измеряемого сигнала приводит к сильному кумулятивному эффекту накопления ошибок в процессе напыления [5]. В связи с этим были предложены различные

алгоритмы коррекции измеренных данных, направленные на подавление этого негативного эффекта [4]. Мы рассмотрим один из них, основанный на понятии свинга измеряемого сигнала [4, 5]. При использовании базового алгоритма контроля процесса напыления по свингу [4] измеряемый сигнал корректируется на основании данных о достигнутом экстремальном уровне измеряемого сигнала в процессе напыления слоя. В результате определение времени остановки напыления очередного слоя покрытия производится не на основании выполнения условия (1), а исходя из условия

$$R_j(d_1^{\text{act}}, \dots, d_{j-1}^{\text{act}}, d_j) = R_j^{\text{act,term}}, \quad (2)$$

где скорректированный уровень остановки процесса напыления $R_j^{\text{act,term}}$ определяется по формуле

$$R_j^{\text{act,term}} = R_j^{\text{act,extr.last}} - \left(R_j^{\text{theor,extr.last}} - R_j^{\text{theor,term}} \right) \frac{A_j^{\text{act}}}{A_j^{\text{theor}}}. \quad (3)$$

Здесь $R_j^{\text{theor,extr.last}}$ — теоретически предсказанное экстремальное значение измеряемого сигнала непосредственно перед ожидаемым окончанием напыления слоя, $R_j^{\text{act,extr.last}}$ — фактически измеренное экстремальное значение сигнала, A_j^{theor} и A_j^{act} — теоретически предсказанная амплитуда и фактически измеренная амплитуда изменения сигнала во время напыления слоя (амплитуда сигнала — разница между его максимумами и минимумами).

Применение обсуждаемого алгоритма в «чистом виде» возможно в достаточно редких случаях, когда в процессе напыления слоя действительно регистрируются экстремумы измеряемого сигнала. Это оказывается возможным только для очень толстых слоев покрытий толщиной в несколько сот нанометров. В связи с этим в работе [17] был предложен алгоритм с коррекцией сигнала по квазисвингу, при котором для тонких слоев на основании всех измеренных данных вычисляются виртуальные экстремумы сигнала. Далее в настоящей работе рассматривается именно этот алгоритм.

Вопрос о корреляции ошибок при использовании алгоритмов контроля с коррекцией измеряемого сигнала до сих пор вообще не обсуждался. Однако можно предположить, что корреляция ошибок имеет место и при их использовании.

Третий из рассматриваемых в данном разделе алгоритмов был предложен в самое последнее время. Он детально описан в работе [18]. При его использовании уровень остановки процесса напыления постоянно корректируется в процессе напыления слоя на основании всех измеренных данных, накопленных к текущему моменту процесса напыления. С теоретической точки зрения предложенный в [18] алгоритм полностью исключает корреляцию ошибок в толщинах слоев и тем самым исключает и развитие негативного кумулятивного эффекта накопления ошибок. Одной из задач настоящей работы является численная проверка теоретического положения об отсутствии корреляции ошибок при использовании алгоритма работы [18].

Алгебраическое исследование процесса корреляции ошибок в частном случае прямого широкополосного оптического контроля показало, что вследствие корреляции векторы ошибок в толщинах слоев $\Delta = \{\delta d_1, \dots, \delta d_m\}$ располагаются в m -мерном пространстве преимущественно вдоль некоторых выделенных направлений [13]. Предложенный в [15] более общий подход к исследованию процесса корреляции ошибок также основан на исследовании распределения векторов ошибок в m -мерном пространстве. Ошибки в толщинах слоев покрытий определяются большим числом случайных факторов. Поэтому исследование процесса корреляции ошибок должно основываться на анализе большого числа данных об этих ошибках. Такие данные могут быть получены с помощью вычислительных экспериментов, моделирующих процесс напыления с заданным типом оптического контроля и выбранным алгоритмом обработки данных измерений.

Пусть в результате вычислительных экспериментов получен большой набор векторов ошибок с их общим числом, равным M . Вероятностная плотность распределения этих векторов в m -мерном пространстве может быть представлена многомерным Гауссовым распределением вида [15]

$$f(\Delta) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{m}{2}} \sqrt{\det \mu}} \exp\left(-\frac{1}{2} \Delta \mu^{-1} \Delta^T\right), \quad (4)$$

где μ — матрица размерности $(m \times m)$. Элементы этой матрицы определяются с помощью полученных векторов ошибок по приближенной формуле [20]

$$\mu_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \delta d_i^{(k)} \delta d_j^{(k)}, \quad (5)$$

где индекс (k) определяет компоненты k -го набора ошибок из всего набора из M векторов ошибок.

Поверхности уровня вероятностной плотности распределения $f(\Delta)$ в m -мерном пространстве представляют собой многомерные эллипсоиды, ориентация и характерные размеры которых определяются матрицей μ . Используя собственные векторы этой матрицы как координатные векторы, можно записать $f(\Delta)$ в виде

$$f(\Delta) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{m}{2}} \sqrt{\det \mu}} \exp\left(-\sum_{i=1}^m \frac{(\delta d_i)^2}{2\sigma_i^2}\right), \quad (6)$$

где стандартные отклонения σ_i в знаменателях этой формулы являются квадратными корнями собственных значений матрицы μ .

Таким образом, стандартные отклонения σ_i характеризуют размеры эллипсоида, определяющего геометрию распределения векторов ошибок в m -мерном пространстве.

Для исследования процесса корреляции ошибок с помощью только что описанного подхода были проведены серии вычислительных экспериментов по напылению с использованием всех трех рассматриваемых алгоритмов определения времени остановки напыления очередного слоя покрытия. При этом рассматривались два вида покрытий: четвертьволновое диэлектрическое зеркало с центральной длины

волны 600 нанометров и числом слоев, равным 20, и 28-слойный поляризатор лазерного излучения. Подробная информация о толщинах слоев обоих покрытий дана в работе [18]. Здесь же отметим только, что оба покрытия нанесены на подложки с показателями преломления 1.52, четные слои покрытий имеют низкий показатель преломления 1.46, а нечетные слои имеют высокие показатели преломления 2.38 в случае зеркала и 2.05 в случае поляризатора.

Во всех сериях вычислительных экспериментов проводились по 10000 симуляций процессов напыления. При этом средние скорости напыления материалов с высокими и низкими показателями преломления были равны 1 нм/с. Моделировались присутствующие на практике флюктуации этих скоростей со среднеквадратичным отклонением 0.1 нм/с. В случае зеркала монохроматические измерения проводились на длине волны 510 нм, а в случае поляризатора — на длине волны 790 нм. Интервал времени между последующими измерениями коэффициента отражения составлял 2 с. На рассчитываемый коэффициент отражения от покрытия накладывался случайный шум со среднеквадратичным значением 0.2%. Подробная информация об использовавшемся симуляторе процесса напыления приведена в работе [21].

Далее в тексте используются следующие краткие наименования трех рассматриваемых алгоритмов определения времени остановки напыления слоя: классический — алгоритм контроля по уровню измеряемого сигнала, квазисвинговый — алгоритм с коррекцией сигнала по квазисвингу, независимый — алгоритм с постоянной коррекцией уровня остановки процесса напыления из работы [18].

На рис. 1 приведены типичные примеры ошибок в толщинах слоев при использовании различных алгоритмов для двух рассматриваемых видов покрытий.

В левых частях обоих строк рисунка хорошо заметен кумулятивный эффект роста ошибок в толщинах слоев покрытий при использовании классического алгоритма контроля процесса напыления. Из рис. 1 также хорошо видно, что при использовании квазисвингового и независимого алгоритмов общий уровень ошибок заметно ниже, чем в случае использования классического алгоритма.

Гораздо более полную информацию о характере ошибок в толщинах слоев дает рассмотрение стандартных отклонений σ_i в формуле (6). Напомним, что они характеризуют размеры эллипсоида, определяющего геометрию распределения векторов ошибок в m -мерном пространстве. На рис. 2 представлены эти стандартные отклонения (полуоси эллипсоида), полученные на основании 10 000 вычислительных экспериментов для каждого из рассматриваемых алгоритмов и видов покрытий.

Из рис. 2 хорошо видно, что как в случае классического алгоритма, так и в случае квазисвингового алгоритма в m -мерном пространстве есть несколько направлений, определяющих преимущественную ориентацию векторов ошибок. Одновременно есть и направления, по отношению к которым векторы ошибок практически ортогональны. Это направления, соответствующие малым по величине соб-

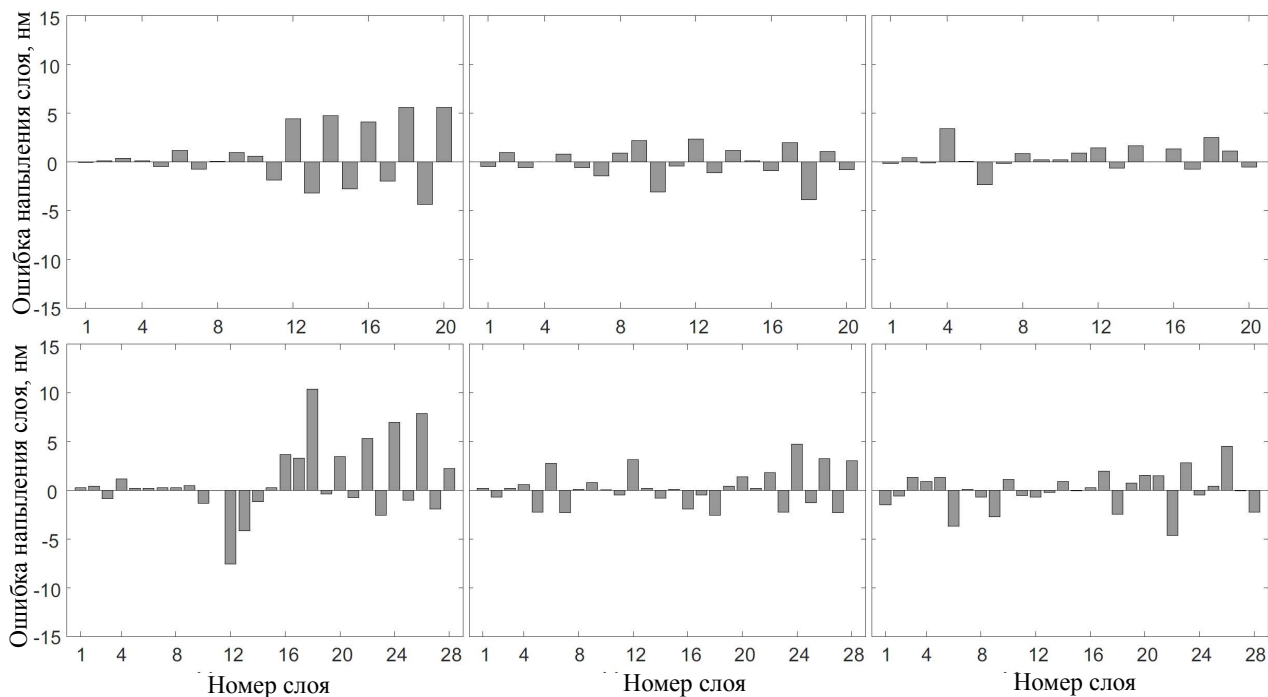


Рис. 1. Типичные ошибки в толщинах слоев при использовании различных алгоритмов для двух видов покрытий: верхняя строка — 20-слойное зеркало, нижняя строка — 28-слойный поляризатор; в строках слева направо — классический, квазисвинговый и независимый алгоритмы

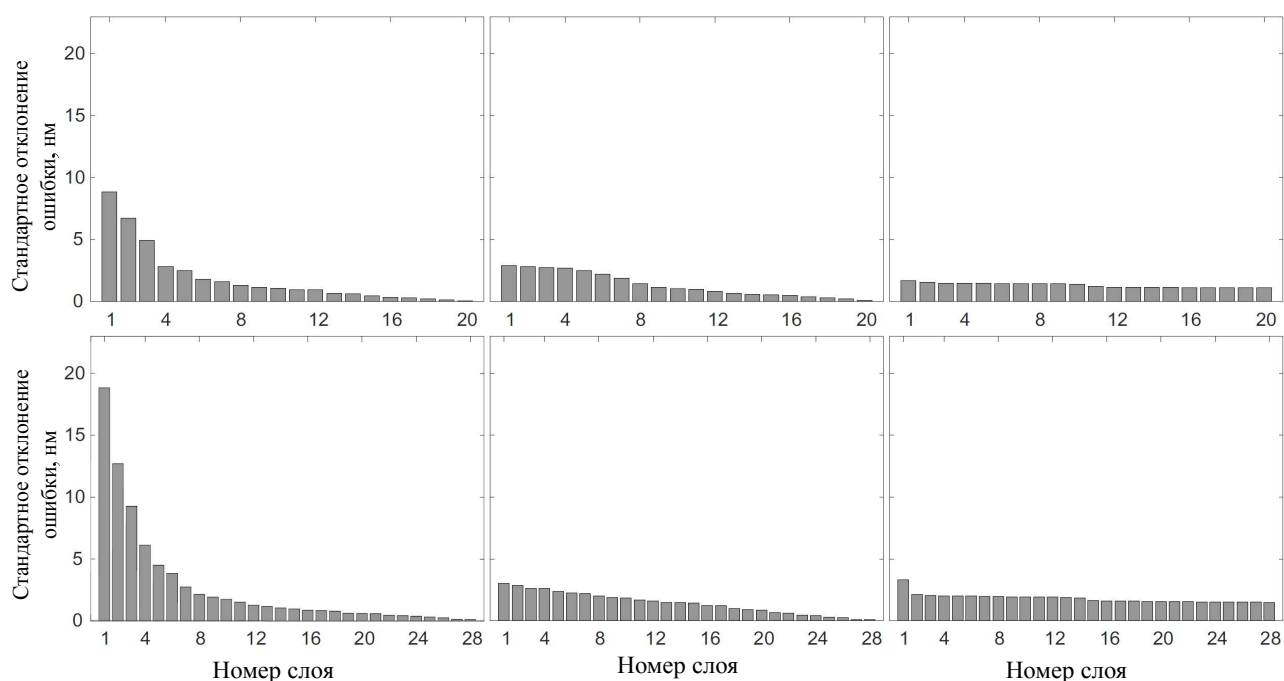


Рис. 2. Полуоси эллипсоидов, определяющих геометрию распределения векторов ошибок в m -мерном пространстве: верхняя строка — 20-слойное зеркало, нижняя строка — 28-слойный поляризатор; в строках слева направо — классический, квазисвинговый и независимый алгоритмы

ственным значениям матрицы μ (им соответствуют наименьшие полуоси эллипсоидов на рис. 2). Таким образом, при использовании обоих алгоритмов имеет место сильная корреляция ошибок в толщинах слоев покрытий. Характер ошибок в случае третьего, независимого алгоритма принципиально отличается от первых двух случаев. Детальное обсуждение результатов, полученных для независимого алгоритма, приводится в следующем разделе работы.

2. ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ КОРРЕЛИРОВАННОСТИ ОШИБОК

Обозначим σ_{av} среднеквадратичное значение стандартных отклонений σ_i :

$$\sigma_{av} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sigma_i^2}$$

и рассмотрим набор параметров $p_k = \sigma_{av}/\sigma_k$. Данные параметры могут быть интерпретированы как коэф-

Таблица. Значения σ_{\min} , σ_{\max} , σ_{av} и коэффициент β для двух видов покрытий при использовании различных алгоритмов определения времени остановки напыления слоя (классический, квазисвинг и независимый алгоритмы)

	20-слойное зеркало			28-слойный поляризатор		
	Класич.	Квазисв.	Независ.	Класич.	Квазисв.	Независ.
σ_{\min} (нм)	0.05	0.08	1.09	0.11	0.09	1.50
σ_{\max} (нм)	8.84	2.90	1.65	18.83	3.03	3.32
σ_{av} (нм)	2.96	1.62	1.30	5.01	1.66	1.85
β	3.28	1.82	1.02	4.22	1.59	1.04

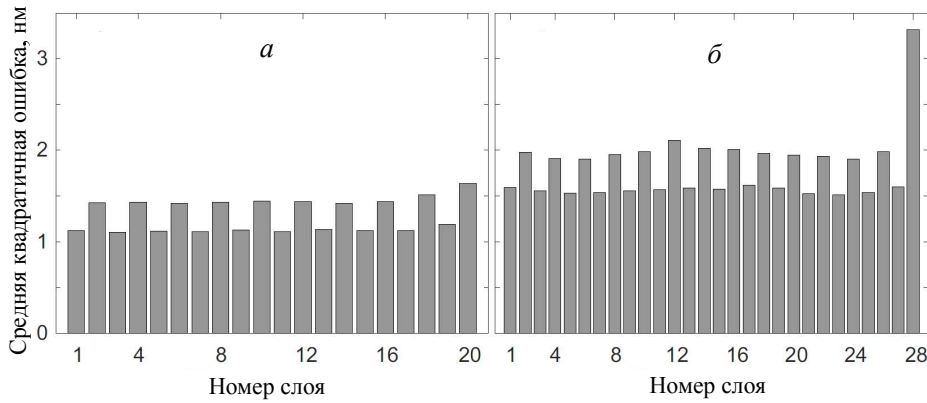


Рис. 3. Среднеквадратичные ошибки в толщинах отдельных слоев при использовании независимого алгоритма определения времени остановки напыления слоя: а — в случае 20-слойного зеркала, б — в случае 28-слойного поляризатора

коэффициенты растяжения/сжатия полуосей эллипсоида по отношению к радиусу шара, имеющего тот же объем, что и эллипсоид.

В работе [15] была предложена следующая оценка степени коррелированности ошибок в толщинах слоев покрытий:

$$\beta = \left[\prod_{i=1}^m p_i \right]^{\frac{1}{m}} = \sigma_{\text{av}} \left[\prod_{i=1}^m \sigma_i \right]^{-\frac{1}{m}}. \quad (7)$$

Приводимые далее в этом разделе результаты подтверждают практическую значимость предложенной теоретической оценки.

В таблице приведены наиболее важные параметры, характеризующие геометрию распределения векторов ошибок для всех шести серий проведенных вычислительных экспериментов (см. также рис. 2). Это — минимальное σ_{\min} и максимальное σ_{\max} значения стандартных отклонений, среднеквадратичное значение стандартных отклонений σ_{av} и определяемый по формуле (7) коэффициент β .

Приведенные в таблице данные подтверждают сделанный в разд. 1 вывод о сильной корреляции ошибок в толщинах слоев покрытий при использовании классического и квазисвингового алгоритмов. При этом в случае классического алгоритма корреляция ошибок существенно сильнее (см. значения σ_{\min} , σ_{\max} в соответствующих столбцах таблицы). В соответствии с результатами работы [15] коэффициент β тем больше, чем сильнее корреляция ошибок. Действительно, в таблице наибольшие значения этого коэффициента соответствуют классическому алгоритму определения времени остановки напыления слоя.

При использовании независимого алгоритма, исключая корреляцию ошибок в толщинах слоев,

поверхности уровня вероятностной плотности распределения векторов ошибок в m -мерном пространстве также представляют собой многомерные эллипсоиды. В случае 28-слойного поляризатора они имеют несколько более вытянутую форму, чем в случае 20-слойного зеркала (ср. значения σ_{\min} , σ_{\max} в соответствующих столбцах таблицы). Однако для обоих покрытий значения коэффициента β в случае независимого алгоритма близки к 1. Таким образом, значение $\beta = 1$ следует считать признаком отсутствия корреляции ошибок в толщинах слоев.

Причиной того, что и в случае независимого алгоритма поверхности уровня вероятностной плотности распределения векторов ошибок имеют эллипсоидальную форму, является в первую очередь разница в точности оптического контроля слоев с высоким и низким показателями преломления. Это наглядно демонстрирует рис. 3, на котором показаны среднеквадратичные ошибки в толщинах отдельных слоев при использовании независимого алгоритма определения времени остановки напыления слоя. Из этого рисунка следует, что точность контроля слоев с высоким показателем преломления (нечетные слои) в целом выше, чем точность контроля слоев с низким показателем преломления (четные слои). Это и приводит к несколько более плотной концентрации векторов ошибок вдоль ряда направлений.

В заключение данного раздела отметим еще, что в случае классического алгоритма значения σ_{av} заметно выше, чем при использовании других двух алгоритмов контроля. Это является следствием сильного кумулятивного эффекта накопления ошибок, отмеченного еще в разд. 1 при обсуждении рис. 1. Уровни ошибок при использовании независимого и квазисвингового алгоритмов согласно таблице сопоставимы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе впервые исследована корреляция ошибок в толщинах слоев при монохроматическом контроле процессов напыления многослойных оптических покрытий. Показано, что корреляция ошибок сильно зависит от выбора алгоритма, используемого для определения времени остановки напыления очередного слоя покрытия. Для оценки степени коррелированности ошибок использован подход, предложенный ранее при исследовании корреляции ошибок в системах напыления с широкополосным оптическим контролем. Показано, что параметр, введенный для оценки степени коррелированности, дает адекватное представление о корреляции ошибок в случае монохроматического контроля процесса напыления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16–11–10219).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kaiser N., Pulker H.K. Optical Interference coatings. Springer-Verlag, Berlin, 2003. P. 81.
2. Optical thin films and coatings (Second Edition). A. Piegari and F. Flory Eds. Woodhead Publishing, UK, 2018.
3. Ehlers H., Ristau D. Production strategies for high precision optical coatings. / Optical thin films and coatings. A. Piegari and F. Flory Eds., 2nd Edition, Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 2018. P. 103.
4. Tikhonravov A., Trubetskov M., Amotchkina T. Production strategies for high precision optical coatings / Optical thin films and coatings, ed. Piegari A. and Flory F. 2nd Edition, Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 2018. P. 65.
5. Macleod H.A. Thin-Film Optical Filters. 4th ed. Taylor & Francis, 2010.
6. Macleod H.A. // Optica Acta. 1972. **19**. P. 1.
7. Bousque P., Fornier A., Kowalczyk R. et al. // Thin Solid Films. 1972. **13**. P. 285.
8. Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K. // Appl. Opt. Phys. 2002. **41**, N 16. P. 3176.
9. Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K., Amotchkina T.V. // Appl. Opt. 2006. **45**. P. 7026.
10. Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K., Amotchkina T.V. // Appl. Opt. 2006. **45**. P. 7863.
11. Zhupanov V., Kozlov I., Fedoseev V. et al. // Appl. Opt. 2017. **56**. P. 30.
12. Тихонравов А.В., Кочиков И.В., Трубецков М.К. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2017. № 3. С. 55. (Tikhonravov A.V., Kochikov I.V., Trubetskov M.K. et al. // Moscow Univ. Phys. Bull. 2017. **72**, N 3. P. 274.)
13. Tikhonravov A., Kochikov I., Yagola A. // Inverse Problems of Science and Engineering. 2018. **26**. P. 1214.
14. Тихонравов А.В., Кочиков И.В., Матвиенко И.А. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2018. № 6. С. 50. (Tikhonravov A.V., Kochikov I.V., Matvienko I.A. et al. // Moscow Univ. Phys. Bull. 2018. **73**, N 6. P. 627.)
15. Kochikov I.V., Sharapova S.A., Yagola A.G., Tikhonravov A.V. // Journal of Inverse and Ill-Posed Problems. 2020.
16. Zoeller A., Hagedorn H., Weinrich W., Wirth E. // Proc. SPIE. 2011. **8168**.
17. Кочиков И.В., Лагутин Ю.С., Лагутина А.А. и др. // Вычислительные методы и программирование: Новые вычислительные технологии. 2019. **20**. С. 471.
18. Кочиков И.В., Лагутин Ю.С., Лагутина А.А. и др. // ЖВМиМФ. 2020. **60**, № 12. С. 181.
19. Macleod A. // Appl. Opt. 1981. **20**. P. 82.
20. Cramer H. Mathematical Methods of Statistics. Princeton University, Princeton, 1999.
21. Кочиков И.В., Лагутин Ю.С., Лагутина А.А. и др. // Сибирский журнал индустриальной математики. 2020. **24**, № 2. С. 93.

Correlation of Errors in Monochromatic Monitoring of Optical Coatings Deposition

A. V. Tikhonravov^{1,2}, I. V. Kochikov¹, A. A. Lagutina^{2,3}, I. S. Lagutin^{2,3,a}, D. V. Lukyanenko^{2,3,b}, S. A. Sharapova^{1,2}, A. G. Yagola³

¹Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.

²Moscow Center of Fundamental and Applied Mathematics. Moscow 119234, Russia.

³Department of Mathematics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia. E-mail: ^alagutin.math@gmail.com, ^blukyanenko@physics.msu.ru.

The paper presents a theoretical study of the correlation of errors in the thickness of layers of multilayer optical coatings produced using monochromatic monitoring of the deposition process. Estimates of the degree of error correlation in layer thicknesses are obtained for various algorithms for determining termination instants for layer depositions. It is shown that the parameter introduced to assess the degree of correlation gives an adequate idea of the error correlation in the case of monochromatic monitoring.

Keywords: optical coatings, coating deposition, optical monitoring, monochromatic monitoring, error correlation. PACS: 02.70.-c.

Received 13 October 2020.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2020. **75**, No. 6. Pp. 578–584.

Сведения об авторах

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