

Оценка эффективности упрощенного симулятора процесса напыления оптических покрытий

А. Н. Шаров,^{1,*} Д. В. Лукьяненко,¹ А. В. Тихонравов,² А. Г. Ягола¹

¹Московский государственный университет имени

М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра математики

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М. В. Ломоносова

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 4

(Поступила в редакцию 10.01.2023; после доработки 20.01.2023; принята к публикации 21.01.2023)

В работе представлено сравнение результатов симуляции процессов напыления оптических покрытий с помощью упрощенного симулятора и полного симулятора, учитывающего основные приводящие к ошибкам факторы процессов напыления и контроля толщин слоев покрытия. Для рассматриваемых симуляторов найдены распределения норм векторов ошибок в толщинах слоев покрытий, коэффициенты корреляции ошибок в толщинах слоев и коэффициенты самокомпенсации ошибок. Показано, что упрощенный симулятор позволяет получать адекватные результаты оценки процесса напыления реальных многослойных оптических покрытий и тем самым может быть использован для более быстрого моделирования большого числа покрытий с последующим анализом их устойчивости относительно производственных ошибок.

PACS: 02.70.-с. УДК: 519.6.

Ключевые слова: оптические покрытия, напыление покрытий, упрощенный симулятор, корреляция ошибок.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.78.2320102](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.78.2320102)

ВВЕДЕНИЕ

Оптические покрытия играют важную роль в современных технологиях. Они используются практически во всех оптических и оптоэлектронных устройствах. В основе изготовления оптических покрытий лежат различные процессы напыления плёнообразующих материалов в вакуумных напылительных камерах. Основными параметрами покрытия являются расчётные значения толщин его слоев, которые должны быть максимально точно воспроизведены в процессе напыления.

Любой процесс напыления оптических покрытий связан с многими факторами, вызывающими ошибки в толщинах слоев [1]. Эти факторы связаны как с самим процессом напыления, так и с методами контроля толщин слоев в процессе напыления. В настоящее время при напылении наиболее сложных типов покрытий используется широкополосный оптический контроль, в ходе которого через короткие промежутки времени измеряется спектр коэффициента пропускания напыляемого покрытия [2]. Данный метод контроля приводит к корреляции ошибок в толщинах слоев, которая, в свою очередь, может приводить как к негативному кумулятивному эффекту накопления ошибок [1, 2], так и к положительному эффекту самокомпенсации ошибок [3–5]. Поскольку эти эффекты могут быть оценены только статистически [6, 7], необходимо проводить ста-

тистический анализ влияния ошибок на спектральные характеристики оптического покрытия, для чего требуется проведение большого количества экспериментов по их напылению. Проведение многих реальных экспериментов невозможно в силу их дороговизны и длительности. Поэтому в оптике многослойных покрытий уже давно применяются вычислительные эксперименты [8, 9], весьма полно симулирующие процессы напыления и контроля толщин слоев покрытия. В дальнейшем мы будем именовать *полными* симуляторы, предназначенные для их проведения. Однако проведение необходимых для статистического анализа тысяч экспериментов нереально и с их помощью. В связи с этим в работе [10] был предложен *упрощенный* симулятор, позволяющий выполнять сотни тысяч симуляций за вполне реальное время. Целью настоящей работы является проверка адекватности получаемых с помощью упрощенного симулятора результатов и их соответствие результатам, полученным с помощью полных симуляторов.

Структура работы следующая. В разд. 1 приводится описание используемых для сравнения симуляторов: упрощенного симулятора и полного симулятора. В разд. 2 представлены формулы для оценки силы корреляции ошибок в толщинах слоев и коэффициента самокомпенсации ошибок. В разд. 3 приводятся результаты численных экспериментов на двух оптических покрытиях. Для каждого покрытия получены распределения норм векторов ошибок в толщинах слоев, коэффициенты корреляции и самокомпенсации. Выводы приведены в заключении.

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

1. ОПИСАНИЕ СИМУЛЯТОРОВ

В данном разделе приведем описание симуляторов, которые используются для моделирования процесса напыления оптических покрытий. Сразу отметим, что конкретные значения параметров случайных величин (математическое ожидание и дисперсия), используемых ниже, будут определены в разд. 3.

1.1. Упрощенный симулятор

Упрощенный симулятор основан на аналитической оценке ошибок в толщинах напыляемых слоев, при их контроле на основе критерия остановки напыления слоя по минимуму функционала невязки [10]. Алгоритм симуляции в этом случае сводится к следующему:

1. Положим $j := 1$, где j — номер напыляемого слоя. Ошибка в толщине первого слоя δd_1 определяется как $\delta d_1 = \nu^1$, где ν^1 — нормально распределенная случайная величина с нулевым математическим ожиданием и заданной дисперсией, которую в дальнейшем будем называть уровнем ошибки.
2. Переопределим $j := j + 1$.
3. Ошибка в толщине j -го слоя определяется по формуле:

$$\delta d_j = - \frac{\sum_{\{\lambda\}} \sum_{i=1}^{j-1} \left(\frac{\partial T_j}{\partial d_i} \delta d_i \right) \frac{\partial T_j}{\partial d_j}}{\sum_{\{\lambda\}} \left(\frac{\partial T_j}{\partial d_j} \right)^2},$$

где $\frac{\partial T_j}{\partial d_i}$ — частная производная коэффициента пропускания при условии, что напылено j слоев, по толщине d_i . Причем здесь все производные вычисляются для теоретических значений толщин из предположения, что они незначительно отличаются от производных по полученным в процессе напыления толщинам.

4. Вносится случайная ошибка: $\delta d_j := \delta d_j + \nu^j$, где ν^j — как и в п.1, нормально распределенная случайная величина с нулевым математическим ожиданием и заданной дисперсией (уровнем ошибок).
5. Если $j < m$, где m — число слоев напыляемого покрытия, то переходим на шаг 2.

Данный алгоритм может быть выписан в более компактной форме:

$$\delta d_j = \sum_{i=1}^{j-1} \mu_i^j \nu^i + \nu^j, \quad (1)$$

где

$$\mu_i^j = a_i^j + \sum_{k=1}^{j-i-1} a_{i+k}^j \mu_i^{i+k}, \quad a_i^j = - \frac{\sum_{\{\lambda\}} \frac{\partial T_j}{\partial d_i} \frac{\partial T_j}{\partial d_j}}{\sum_{\{\lambda\}} \left(\frac{\partial T_j}{\partial d_j} \right)^2}.$$

В силу того, что все производные могут быть вычислены до запуска симуляции и тем самым все необходимые величины известны, алгоритм не требует больших вычислительных ресурсов и может быть использован для быстрого проведения большого количества симуляций.

1.2. Полный симулятор

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

Моделирование процесса напыления заключается в следующем:

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. Т.к. скорость напыления нестабильна, то вносим ошибку в среднюю скорость: $v_{jk} := v_{averj} + \chi^k$, где χ^k — нормально распределенная случайная ошибка.

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

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

5. Вычисляем вектор 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 . Подробный метод расчета коэффициента пропускания описан, например, в [11, 12].
6. В реальности при измерении коэффициента пропускания существует ошибка измерений, поэтому вносим ошибку в вычисленный коэффициент пропускания и получаем вектор

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

где η^k — нормально распределенная случайная ошибка.

7. В реальном процессе напыления известен только вектор $T_j^{meas}(t_k; \lambda)$ и теоретические значения толщин желаемого покрытия. Наша

задача состоит в определении уже напыленной толщины и принятии решения об остановке процесса напыления слоя или продолжении напыления. Для этого решаем экстремальную задачу определения напыленной толщины слоя j на момент времени t_k :

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

где d_{max} — максимально возможное значение толщины слоя, которое задается исходя из знания теоретического дизайна. Заметим, что здесь предполагается, что предыдущие слои были напылены абсолютно точно, и тем самым требуется определение только одного неизвестного значения $d_j^{est} \equiv d_j(t_k)$.

8. Вычисляем время, необходимое для напыления j -го слоя до теоретической толщины d_j^{theor} :

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

9. Принимаем решение в зависимости от полученного времени Δt :

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

$$d_j = d_j^{est} + t_{decay},$$

где t_{decay} — время задержки затворки.

Принимаем значение $j := j + 1$ и, если $j < m$, переходим на шаг 2.

- 9.2. Если $0 \leq \Delta t < t_{scan}$, то процесс напыления продолжается в течение времени Δt и далее останавливается. В качестве толщины напыленного слоя принимается значение

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

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

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

В процессе использования описанного алгоритма мы получаем значения толщин напыленных слоев d_i . Координаты вектора ошибок в толщинах определяются как $\delta d_i = d_i - d_i^{theor}$.

В результате одной симуляции мы получаем вектор ошибок в толщинах слоев, который далее будем обозначать как $\Delta = \{\delta d_1, \dots, \delta d_m\}$.

2. КОРРЕЛЯЦИЯ ОШИБОК И КОЭФФИЦИЕНТ САМОКОМПЕНСАЦИИ

Для исследования корреляции ошибок будем использовать результаты работ [6, 7]. В данных работах считается, что векторы ошибок в толщинах слоев лежат в m -мерном пространстве, а их вероятностная плотность распределения представляется многомерным гауссовым распределением:

$$f(\Delta) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{m}{2}} \sqrt{\det(\mu)}} \cdot e^{(-\frac{1}{2}\Delta\mu^{-1}\Delta^T)}, \quad (2)$$

где μ — матрица размерности $m \times m$, компоненты которой определяются по приближенной формуле [13]:

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

где M — число проведенных симуляций, а индекс (k) соответствует полученному вектору ошибок в результате k -й симуляции.

Поверхности равного уровня $f(\Delta)$ — это многомерные эллипсоиды, причем матрица μ определяет их ориентацию и полуоси. Если определить собственные векторы и собственные значения λ_i матрицы μ , то выражение (2) можно переписать в виде:

$$f(\Delta) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{m}{2}} \sqrt{\det(\mu)}} \cdot e^{-\sum_{i=1}^m \frac{(\delta d_i)^2}{2\sigma_i^2}}, \quad (3)$$

где стандартные отклонения σ_i связаны с собственными значениями λ_i как $\sigma_i = \sqrt{\lambda_i}$.

Для исследования корреляции ошибок в толщинах слоев будем вычислять степень коррелированности ошибок [14–16]:

$$\beta = \left(\prod_{i=1}^m p_i \right)^{\frac{1}{m}} = \sigma_{av} \left(\prod_{i=1}^m \sigma_i \right)^{-\frac{1}{m}}, \quad (4)$$

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

Чем ближе значение степени коррелированности к 1, тем меньше коррелируют ошибки в толщинах слоев. Значение коэффициента $\beta = 1$ говорит об отсутствии корреляции ошибок.

Наряду со степенью коррелированности, будем рассматривать такой показатель, как коэффициент самокомпенсации, введенный, например, в работах [17, 18]. Приведем описание данного коэффициента.

Будем рассматривать функционал

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

и его вариацию

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

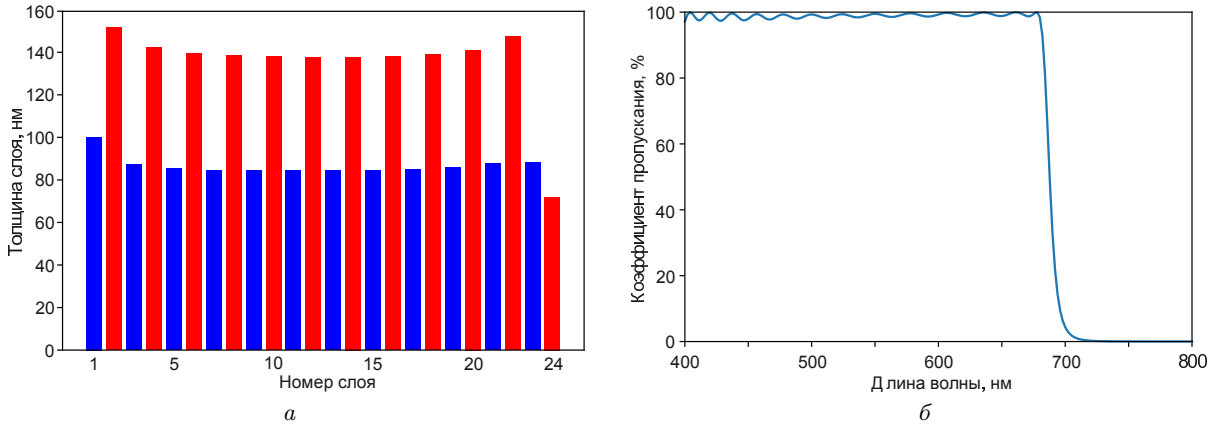


Рис. 1. 24-слойный фильтр. Дизайн покрытия (слева) и теоретические значения коэффициента пропускания в диапазоне длин волн 400–800 нм (справа)

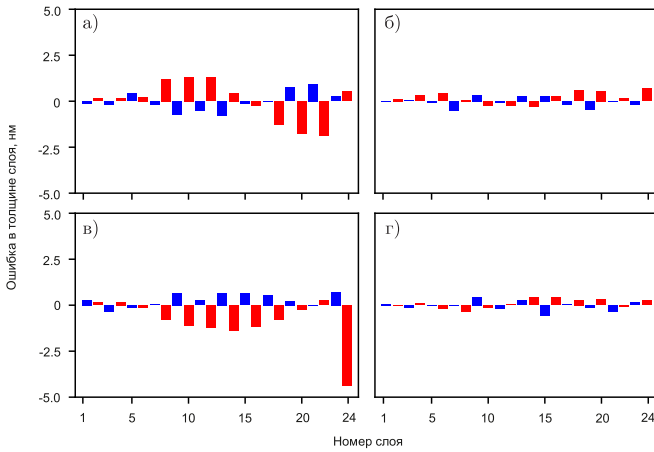


Рис. 2. Примеры четырех последовательных экспериментов по симуляции процесса напыления 24-слойного оптического покрытия с помощью упрощенного симулятора с уровнем ошибок 0.15 нм: *a* — эксперимент 1, *б* — эксперимент 2, *в* — эксперимент 3, *г* — эксперимент 4

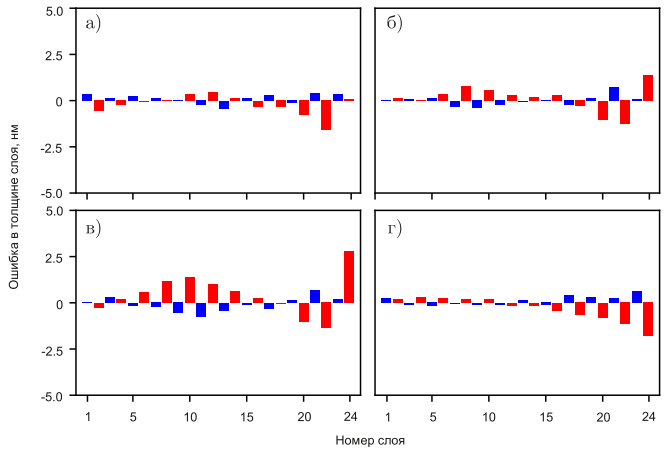


Рис. 3. Примеры четырех последовательных экспериментов по симуляции процесса напыления 24-слойного оптического покрытия с помощью полного симулятора: *a* — эксперимент 1, *б* — эксперимент 2, *в* — эксперимент 3, *г* — эксперимент 4

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

Коэффициент самокомпенсации определяется как:

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

Коэффициент самокомпенсации характеризует степень соответствия ошибок, допущенных в процессе симуляции процесса напыления, со случайными абсолютными ошибками, сгенерированных таким образом, чтобы медиана норм векторов ошибок, полученных из симулятора, совпадала с одноименной величиной для случайных ошибок.

Значение коэффициента самокомпенсации менее 1 свидетельствует о наличии эффекта самокомпенсации ошибок толщин слоев покрытия, причем чем меньше значение c , тем сильнее эффект. Если же значение $c > 1$, то эффект самокомпенсации отсутствует.

3. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Будем сравнивать результаты, полученные с помощью двух описанных выше симуляторов, на 24-слойном и 36-слойном фильтрах. Фильтры имеют слои с чередующимися показателями преломления: нечетные слои с высоким показателем преломления и четные слои с низким показателем преломления. Дизайны покрытий и теоретические значения коэффициента пропускания будут показаны ниже.

Будем считать, что мониторинг напыления проводится на длинах волн в диапазоне 400–800 нм с интервалом 2 нм. Для полного симулятора будем использовать следующие параметры процесса напыления:

- скорость напыления нечетных слоев $v_{aver_{2j+1}} = 0.24$ нм/с, ошибка в скорости напыления χ^k задается гауссовым нормальным распределением со средним 0

Таблица 1. Значения стандартных отклонений для упрощенного симулятора с уровнем ошибок 0.15 нм и полного симулятора

N	Упрощенный симулятор	Полный симулятор	N	Упрощенный симулятор	Полный симулятор
1	2.9604	2.2763	13	0.1821	0.1426
2	2.0492	1.6118	14	0.1394	0.1197
3	0.8765	0.6446	15	0.1195	0.1177
4	0.7085	0.5212	16	0.1121	0.1044
5	0.5417	0.3751	17	0.0957	0.0966
6	0.4846	0.3694	18	0.0883	0.0860
7	0.4034	0.3425	19	0.0695	0.0719
8	0.3792	0.2983	20	0.0638	0.0626
9	0.3590	0.2676	21	0.0440	0.0493
10	0.3514	0.2379	22	0.0390	0.0414
11	0.2956	0.2111	23	0.0281	0.0310
12	0.2281	0.1917	24	0.0163	0.0274

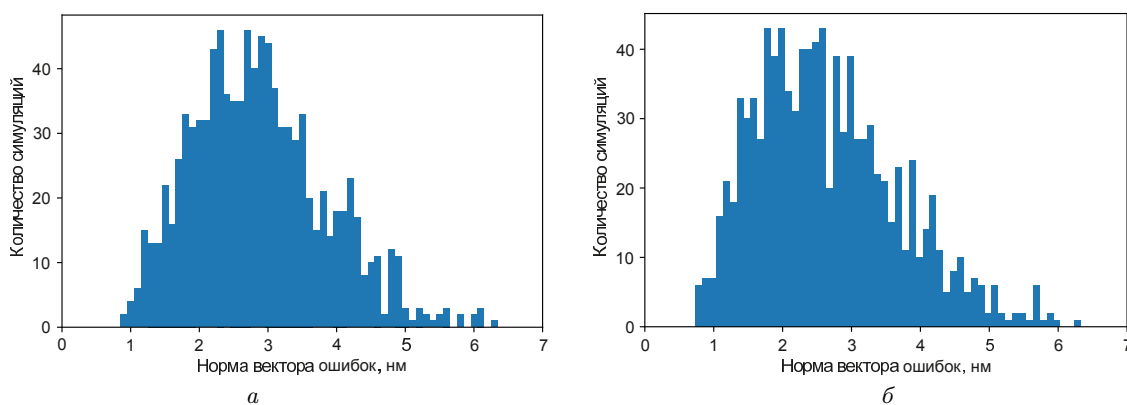


Рис. 4. Распределение норм векторов ошибок 1 000 симуляций, полученных с помощью упрощенного симулятора с уровнем ошибок 0.15 нм (слева) и полного симулятора (справа)

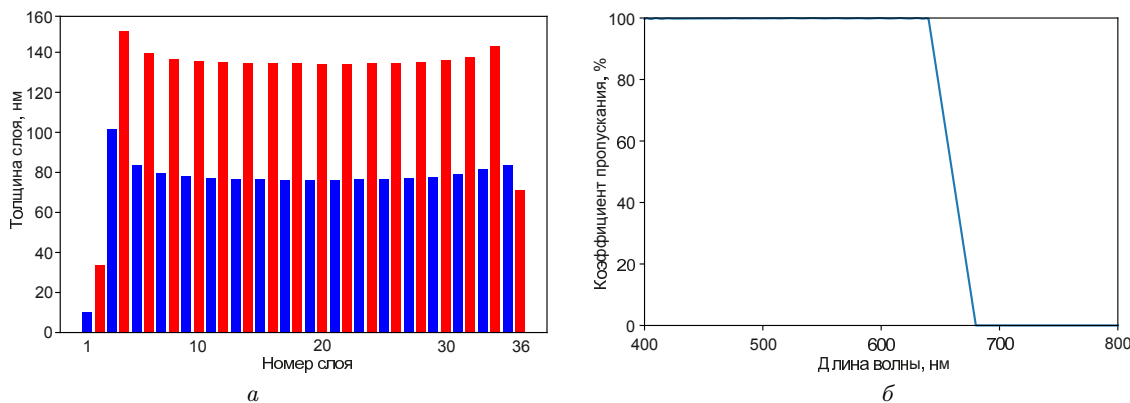


Рис. 5. 36-слойный фильтр. Дизайн покрытия (слева) и теоретические значения коэффициента пропускания в диапазоне длин волн 400-800 нм (справа)

и стандартным отклонением 5% от скорости напыления;

- скорость напыления четных слоев $v_{aver_{2j}} = 0.18$ нм/с, ошибка в скорости напыления χ^k задается гауссовым нормальным распределением со средним 0 и стандартным отклонением 10% от скорости напыления;
- время задержки затвора t_{delay} задается гус-

совым нормальным распределением со средним 0.5 с и стандартным отклонением 0.1 с;

- периодичность мониторинга напыления $t_{scan} = 3$ с.

Рассмотрим сначала результаты симуляций на 24-слойном фильтре. На рис. 1 представлен дизайн покрытия и теоретические значения коэффициента пропускания в указанном диапазоне длин волн.

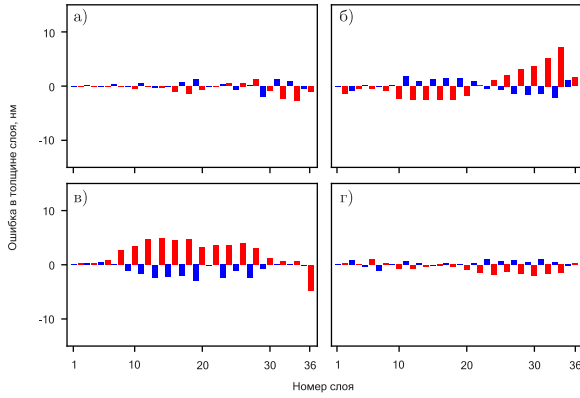


Рис. 6. Примеры четырех последовательных экспериментов по симуляции процесса напыления 36-слойного оптического покрытия с помощью упрощенного симулятора с уровнем ошибок 0.3 нм: *а* — эксперимент 1, *б* — эксперимент 2, *в* — эксперимент 3, *г* — эксперимент 4

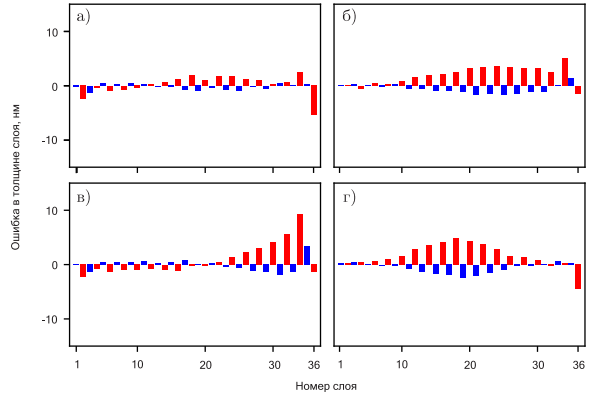


Рис. 7. Примеры четырех последовательных экспериментов по симуляции процесса напыления 36-слойного оптического покрытия с помощью полного симулятора: *а* — эксперимент 1, *б* — эксперимент 2, *в* — эксперимент 3, *г* — эксперимент 4

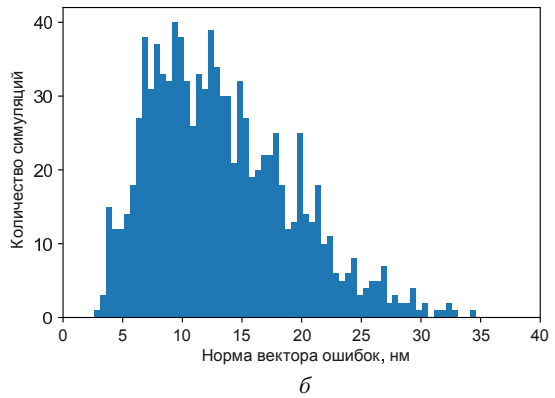
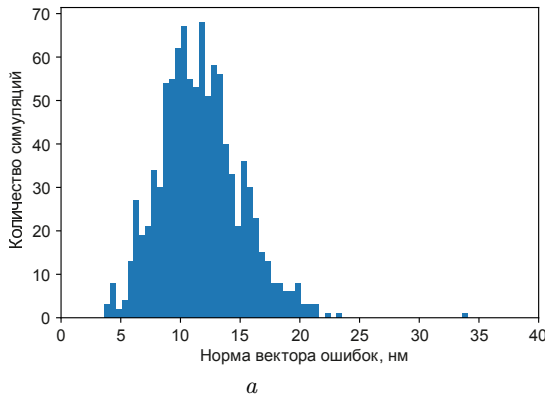


Рис. 8. Распределение норм векторов ошибок 1 000 симуляций, полученных с помощью упрощенного симулятора с уровнем ошибок 0.3 нм (слева) и полного симулятора (справа)

Всего было проведено 1 000 симуляций для каждого из симуляторов. На рис. 2 и рис. 3 приведены результаты симуляций для упрощенного симулятора, где вектор ошибок в толщинах слоев рассчитан по формуле (1), а уровень ошибок составляет 0.15 нм, и для полного симулятора, где вектор ошибок рассчитан согласно алгоритму, приведенному в разд. 1.2.

На рис. 4 представлены распределения норм векторов ошибок для полученных симуляций. Видно, что качественно распределения совпадают, а среднее значение для обоих симуляторов составляет примерно 2.5–3 нм.

В табл. 1 приведены значения стандартных отклонений σ_i , задающие плотность распределения векторов ошибок (3) и характеризующие размеры эллипсоидов. Видно, что большинство значений отличаются не более чем на 25%, а треть из них не более чем на 10%, что говорит о хорошем совпадении распределений.

Используя формулы (4) и (5), были вычислены значения степени коррелированности и коэффициента самокомпенсации для рассматриваемых симуляторов.

В табл. 2 приведены полученные значения. Видно, что значения отличаются не более чем на 10%, что говорит о хорошем совпадении оценок оптического покрытия, полученных с помощью рассмотренных симуляторов.

Таблица 2. Степень коррелированности β и коэффициент самокомпенсации c для упрощенного симулятора с уровнем ошибок 0.15 нм и полного симулятора

Симулятор	β	c
Упрощенный симулятор	3.9186	0.1276
Полный симулятор	3.5633	0.1395

Аналогичные эксперименты были проведены на 36-слойном фильтре. На рис. 5 представлен дизайн покрытия и теоретические значения коэффициента пропускания в указанном диапазоне длин волн.

Аналогично было проведено 1 000 симуляций с помощью каждого из симуляторов. На рис. 6 и рис. 7 приведены результаты симуляций для упрощенного симулятора, где вектор ошибок в толщинах слоев рассчитан по формуле (1), а уровень оши-

Таблица 3. Значения стандартных отклонений для упрощенного симулятора с уровнем ошибок 0.3 нм и полного симулятора

N	Упрощенный симулятор	Полный симулятор	N	Упрощенный симулятор	Полный симулятор
1	10.8388	10.6196	19	0.2203	0.218
2	8.6878	5.2322	20	0.1978	0.1711
3	2.6670	1.6757	21	0.1507	0.1521
4	1.9572	1.4085	22	0.1427	0.1236
5	1.4968	1.0538	23	0.1392	0.1160
6	1.1480	1.0400	24	0.1301	0.1088
7	1.0332	0.7071	25	0.1216	0.1022
8	0.8747	0.5455	26	0.1091	0.0959
9	0.8261	0.4881	27	0.0996	0.0880
10	0.7346	0.4753	28	0.0846	0.0818
11	0.7296	0.414	29	0.0726	0.0788
12	0.6695	0.3938	30	0.0637	0.0679
13	0.651	0.3555	31	0.0527	0.0617
14	0.6163	0.3394	32	0.0446	0.0592
15	0.6018	0.3126	33	0.0416	0.0480
16	0.5648	0.2986	34	0.0341	0.0455
17	0.4634	0.2688	35	0.0308	0.0342
18	0.3005	0.2524	36	0.0292	0.0324

бок составляет 0.3 нм, и для полного симулятора, где вектор ошибок рассчитан согласно алгоритму, приведенному в разд. 1.2.

На рис. 8 представлены распределения норм векторов ошибок для полученных симуляций. Видно, что качественно распределения совпадают, а среднее значение для обоих симуляторов составляет примерно 10 нм.

В табл. 3 приведены значения стандартных отклонений σ_i , задающие плотность распределения векторов ошибок (3) и характеризующие размеры эллипсоидов. Видно, что большинство значений отличаются не более чем на 35%, а половина из них не более чем на 17%, что говорит о хорошем совпадении распределений.

Таблица 4. Степень коррелированности β и коэффициент самокомпенсации c для упрощенного симулятора с уровнем ошибок 0.3 нм и полного симулятора

Симулятор	β	c
Упрощенный симулятор	8.1818	0.5095
Полный симулятор	8.4976	0.5010

В табл. 4 приведены полученные значения степени коррелированности ошибок в толщинах слоев и коэффициента самокомпенсации. Видно, что значения отличаются не более чем на 4%, что также

говорит о хорошем качестве симуляции с помощью упрощенного симулятора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы показано, что распределение норм векторов ошибок в толщинах слоев, полученных с помощью упрощенного симулятора, качественно совпадает с аналогичным распределением, полученным с помощью симулятора, существенно более полно моделирующего процессы напыления и контроля толщин слоев покрытия. При этом были получены схожие значения стандартных отклонений и близкие значения степени коррелированности ошибок в толщинах слоев и коэффициента самокомпенсации, которые отличаются не более чем на 10% для 24-слойного фильтра и не более чем на 4% для 36-слойного фильтра. Таким образом, можно сделать вывод, что упрощенный симулятор позволяет получить адекватные результаты, схожие с результатами симуляторов, приближенных к реальному процессу напыления оптических покрытий, а значит, может быть использован для симуляций процесса напыления и дальнейших статистических оценок особенностей оптических покрытий.

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

[1] *Macleod H.A.* Thin-Film Optical Filters. Taylor & Francis 4th ed., 2010.
 [2] *Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K., Amotchkina T.V.* // Appl. Opt. 2006. **45**. P. 7026.

[3] *Macleod H.A.* // Optica Acta. 1972. **19**. P. 1.
 [4] *Bousque P., Fornier A., Kowalczyk R.* et al. // Thin Solid Films. 1972. **13**. P. 285.
 [5] *Tikhonravov A., Kochikov I., Yagola A.* // Inverse

- Probl. Sci. En. 2018. **26**. P. 1214.
- [6] 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. *Mosc. Univ. Phys. Bull.* 2017. **72**, N 3. P. 274.)
- [7] Tikhonravov A.V., Kochikov I.V., Yagola A.G. // *Optics Express*. 2018. **26**. N19. P. 24964.
- [8] Zoeller A., Boos M., Hagedorn H., Romanov B.. Computer simulation of coating processes with monochromatic monitoring // *SPIE. Opt.* 2008. **7101**.
- [9] Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K. // *Appl. Opt.* 2005. **44**. P. 6877.
- [10] Тихонравов А.В., Кочиков И.В., Матвиенко И.А. и др. // *Вычислительные методы и программирование*. 2018. **19**. С. 439.
- [11] Furman Sh.A., Tikhonravov A.V. Basics of optics of multilayer systems. Edition Frontieres, Gif-sur-Yvette, 1992.
- [12] Исаев Т.Ф., Лукьяненко Д.В., Тихонравов А.В., Ягола А.Г. // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2017. **57**. №5. P. 867
- [13] Cramer H. *Mathematical Methods of Statistics*. Princeton University. Princeton. 1999.
- [14] Тихонравов А.В., Кочиков И.В., Матвиенко И.А. и др. // *Вестн. Моск. ун-та.* 2018. №.6. P. 50. (Tikhonravov A.V., Kochikov I.V., Matvienko I.A. et al. // *Mosc. 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. **28**. N6. P. 915.
- [16] Тихонравов А.В., Кочиков И.В., Лагутина А.А. и др. // *Вестн. Моск. ун-та.* 2020. №.6. P. 63. (Tikhonravov A.V., Kochikov I.V., Lagutina A.A. et al. // *Mosc. Univ. Phys. Bull.* 2020. **75**, N 6. P. 578.)
- [17] Kochikov I.V., Lagutin Y.S., Lagutina A.A. et al. // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2021. **61**. N9. P. 1504.
- [18] Tikhonravov A., Kochikov I., Sharapova S., Yagola A. // *Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering*. 2021. **11872**, N 6. P. 1.

Evaluation of the Efficiency of a Simplified Simulator of Optical Coating Deposition

A. N. Sharov^{1a}, D. V. Lukyanenko¹, A. V. Tikhonravov², A. G. Yagola¹

¹*Department of Mathematics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

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

E-mail: ^ascharov.aleksandr@physics.msu.ru

This article presents a comparison of the results of simulation of optical coating deposition using a simplified simulator and a full simulator that takes into account the main error-causing factors of coating deposition and thickness control. For the simulators under consideration, the distributions of error vector norms in coating layer thicknesses, error correlation coefficients in layer thicknesses, and error self-compensation coefficients are found. It is shown that the simplified simulator makes it possible to obtain adequate results of evaluation of the deposition of real multilayer optical coatings and thus can be used for faster simulation of a large number of coatings with the subsequent analysis of their stability with respect to production errors.

PACS: 02.70.-c.

Keywords: optical coatings, coating deposition, simplified simulator, error correlation.

Received 10 January 2023.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2023. **78**, No. 2. Pp. 135–144.

Сведения об авторах

1. Шаров Александр Николаевич — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-10-33, e-mail: scharov.aleksandr@physics.msu.ru.
2. Лукьяненко Дмитрий Витальевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-10-33, e-mail: lukyanenko@physics.msu.ru.
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.