

Новая стратегия монохроматического контроля процесса напыления оптических покрытий

А.В. Тихонравов,^{1,*} С.А. Шарапова,¹ С.К. Кирпиченко²

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Научно-исследовательский вычислительный центр
119234, Москва, ул. Колмогорова, 1, стр. 4

²OptiLayer LLC
73030, DMC Building 5, DQuaters, Dubai Internet City, Дубай, ОАЭ
(Поступила в редакцию 08.06.2026; подписана в печать 19.06.2026)

Представлена новая стратегия монохроматического контроля, ориентированная на использование современного контрольного оборудования с использованием онлайн-коррекции уровней остановки напыления слоев покрытий. Новая стратегия обеспечивает минимизацию числа переключений контрольной длины волны в процессе напыления покрытия, что является критически важным требованием для повышения качества производства покрытий. Представленный пример демонстрирует создание таблицы контроля, описывающей практическое применение новой стратегии для производства современного оптического фильтра.

PACS: 02.70.?с УДК: 519.6

Ключевые слова: тонкие пленки, оптические покрытия, монохроматический контроль, таблица контроля, оптический фильтр.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.81.2640104](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.81.2640104)

ВВЕДЕНИЕ

Оптические покрытия являются ключевыми компонентами практически всех современных оптических, оптоэлектронных и лазерных устройств. Их обычно называют тонкопленочными оптическими покрытиями, поскольку они формируются путем нанесения большого числа тонких слоев различных материалов на поверхности оптических элементов в вакуумных напылительных камерах. Проектирование и производство оптических покрытий требуют использования математических алгоритмов, основанных на решении сложных многопараметрических задач [1].

Существует несколько различных типов математических задач, связанных с проектированием и производством тонкопленочных оптических покрытий. В первую очередь это задачи проектирования покрытий, требующие выбора числа тонкопленочных слоев и толщин этих слоев, обеспечивающих требуемые спектральные свойства покрытия в проходящем или отраженном свете. Для их решения разработаны эффективные математические методы, позволяющие проектировать покрытия с многими десятками и сотнями слоев [1]. Наиболее актуальными на сегодняшний день являются задачи, связанные с реализацией теоретических конструкций покрытий в процессе их производства. К ним в первую очередь относится разработка алгоритмов, поддерживающих управление производством

с использованием специализированного оптического контрольного оборудования. В настоящее время оптические методы контроля процессов напыления являются основными при производстве наиболее сложных типов покрытий [2]. Они основаны на измерении пропускания или отражения напыляемого покрытия через короткие интервалы времени. Измерения могут проводиться на одной длине волны (монохроматический контроль) или на большой сетке длин волн (широкополосный контроль).

Данная работа связана с монохроматическим контролем процессов напыления. Современное оборудование этого типа контроля может использовать различные стратегии и алгоритмы контроля. Вкратце стратегия контроля определяет критерии, используемые для остановки напыления слоя, а алгоритм контроля направлен на прогнозирование момента остановки в соответствии с заданной стратегией. Прежде чем подробно обсуждать вопрос о выборе стратегии контроля, важно отметить специфический аспект решения возникающих при этом задач. При решении большинства задач контроля желательно уменьшить ошибки в контролируемых параметрах. В нашем случае это означает минимизацию отклонений толщин нанесенных слоев от запланированных теоретических значений. Однако основная цель при напылении покрытий состоит не в уменьшении этих ошибок, а в повышении точности аппроксимации требуемых спектральных характеристик. Оказывается, последнее не обязательно является следствием первого. При производстве с использованием оптических методов контроля может возникать эффект самокомпенсации ошибок, приводящий к тому, что спектральные характери-

* E-mail: tikh@srcc.msu.ru

стики покрытия оказываются близкими к целевым даже при больших ошибках в толщинах слоев покрытия.

Гипотеза о возможности возникновения эффекта самокомпенсации ошибок в случае монохроматического контроля была выдвинута 18 лет назад [3], но подтверждена лишь недавно в рамках разработки единого подхода к изучению эффекта самокомпенсации ошибок для всех вариантов широкополосного и монохроматического контроля [4, 5]. Положительный эффект самокомпенсации ошибок является прямым следствием корреляции ошибок толщин слоев при любой процедуре оптического контроля [1, 2]. В данной работе представлена новая стратегия монохроматического контроля производства оптических покрытий, учитывающая теоретические результаты по эффекту самокомпенсации ошибок в случае монохроматического контроля [6, 7] и ориентированная на использование алгоритмов контроля, использующих остановку процесса напыления по скорректированному уровню сигнала в момент остановки [8–11]. В разделе 1 описывается основная идея новой стратегии. В разделе 2 представлен пример генерации так называемой таблицы контроля, описывающий реализацию новой стратегии при производстве современного оптического фильтра. Заключительные выводы представлены в разделе 2.

1. СТРАТЕГИЯ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Оптические покрытия получают внутри вакуумных напылительных камер путем последовательного нанесения тонких пленочных слоев из двух или более материалов с различными показателями преломления. Чаще всего используются двухкомпонентные покрытия, состоящие из слоев с чередующимися показателями преломления. В этом случае ключевыми параметрами оптических покрытий являются толщины слоев, которые обычно варьируются от нескольких нанометров до сотен нанометров. Для современных покрытий число слоев m может достигать многих десятков и сотен.

Мы обозначаем толщины слоев покрытия как $d_1, \dots, d_m$, начиная с подложки, на которую наносится покрытие. Число слоев и их толщины определяются путем решения обратной задачи проектирования, которая сводится к минимизации целевой функции, оценивающей близость спектральной характеристики теоретически спроектированного покрытия к заданной целевой спектральной характеристике. Пример толщин слоев 44-слойного оптического фильтра и его спектрального коэффициента пропускания показан на рис. 1. Мы используем этот пример для иллюстрации предлагаемой стратегии монохроматического контроля.

В данной работе мы рассматриваем монохроматический оптический контроль в режиме пропускания.

На рис. 2 представлен пример зависимости контрольного сигнала (коэффициента пропускания) от времени в процессе нанесения одного из слоев покрытия. Сплошная кривая на этом рисунке показывает теоретически предсказанную зависимость сигнала, когда толщины всех слоев точно воспроизводятся в процессе напыления покрытия. Эта зависимость может быть рассчитана после того, как каждому слою покрытия будут присвоены определенные контрольные длины волн [1]. Таблица, определяющая контрольные длины волн для каждого слоя покрытия, называется таблицей контроля.

Первая стратегия монохроматического оптического контроля основывалась на так называемом уровне контроле [12], при котором процесс нанесения слоя останавливается, когда контрольный сигнал достигает предварительно рассчитанного уровня, называемого уровнем завершения (см. рис. 2). Было предложено выбирать контрольную длину волны для каждого слоя покрытия таким образом, чтобы уровень завершения соответствовал наиболее быстрому изменению зависимости контрольного сигнала от времени [13]. Предполагалось, что такой выбор минимизирует ошибки толщины, вызванные шумами в контрольном сигнале. Однако вскоре стало ясно, что эта стратегия контроля приводит к очень сильному кумулятивному эффекту увеличения ошибок определения толщины с увеличением числа нанесенных слоев. Из-за ошибок в толщинах ранее напыленных слоев фактический сигнал контроля значительно отличается от теоретически предсказанного. Это схематически показано на рис. 2 пунктирной кривой. По этой причине окончание напыления слоя на теоретическом уровне завершения неизбежно приводит к некорректному контролю толщины.

Разработанный в [9–11] квазисвинговый алгоритм направлен на устранение негативного эффекта роста ошибок в толщинах слоев путем алгоритмической коррекции уровня завершения напыления слоя. Эта коррекция выполняется по формуле

$$T_{term\ level}^a = T_{last\ extr}^a + (T_{term\ level}^t - T_{last\ extr}^t) \times \frac{T_{prev\ extr}^a - T_{last\ extr}^a}{T_{prev\ extr}^t - T_{last\ extr}^t}. \quad (1)$$

В этой формуле верхние индексы t и a соответствуют теоретически предсказанным и фактически измеренным значениям коэффициента пропускания. Нижние индексы $term\ level$ обозначают теоретически предсказанные и пересчитанные уровни завершения, нижние индексы $last\ extr$ и $prev\ extr$ обозначают два последних зарегистрированных экстремума коэффициента пропускания перед достижением уровнями завершения.

В процессе напыления коэффициент пропускания измеряется через короткие интервалы времени, и фактический уровень завершения пересчитывается в каждый момент измерения. Подробное описание алгоритма можно найти в приведенных выше ссылках. Важно отметить, что обсуждаемая страте-

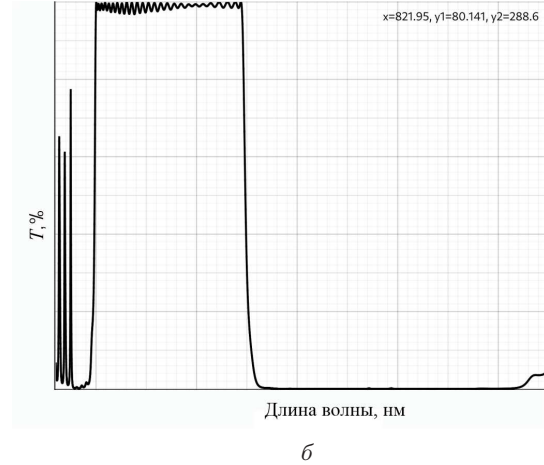
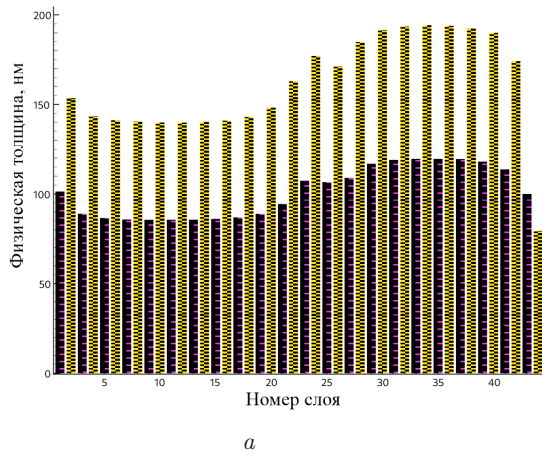


Рис. 1. Толщины слоев 44-слойного фильтра (а) и его теоретический коэффициент пропускания (б)

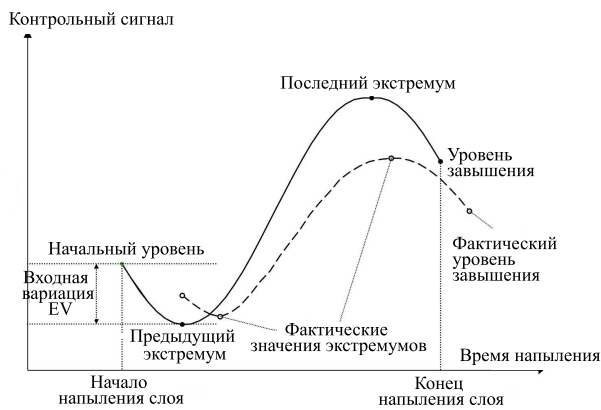


Рис. 2. Теоретический контрольный сигнал (сплошная кривая) и фактический контрольный сигнал (пунктирная кривая), подробности в тексте

гия контроля не основана на прямом определении толщины напыляемого слоя, а использует только пересчитанный уровень завершения в качестве косвенного индикатора необходимости остановки процесса напыления слоя. Тем не менее многочисленные вычислительные эксперименты доказали, что эта стратегия значительно повышает точность контроля [10, 11].

Наряду с критерием завершения напыления слоя, стратегия контроля должна также определять длины волн, на которых следует контролировать слои покрытия. Выбор контрольных длин волн основан на различных соображениях, в первую очередь связанных с поведением контрольного сигнала в начале и конце напыления слоя. Удобно рассматривать их, используя начальные и конечные значения свинга сигнала $Swing_{in}$ и $Swing_{fin}$, определяемые следующими формула-

ми:

$$Swing_{in} = \frac{T_{initial\ level} - T_{last\ extr}}{T_{prev\ extr} - T_{last\ extr}}, \quad (2)$$

$$Swing_{fin} = \frac{T_{term\ level} - T_{last\ extr}}{T_{prev\ extr} - T_{last\ extr}}.$$

Значения свинга могут варьироваться от 0 до 1. В обычно используемом на практике процентном представлении диапазон их изменения составляет от 0% до 100%.

Для надежной работы контрольной аппаратуры с коррекцией уровней завершения при задании стратегии контроля необходимо соблюдать следующие требования [14]:

$$0 < a\% \leq Swing_{in} \leq b\% < 100\%, \quad (3)$$

$$0 < c\% \leq Swing_{fin} \leq d\% < 100\%. \quad (4)$$

Данные требования означают, что контрольный сигнал не может начинаться или заканчиваться вблизи своих экстремальных значений. Они основаны на следующих соображениях. Если мы допустим, что теоретический сигнал (сплошная кривая на рис. 2) начинается или заканчивается вблизи экстремальных значений, то ошибки в толщинах ранее напыленных слоев могут изменить фактический сигнал (пунктирная кривая на рис. 2) таким образом, что он потеряет экстремальные значения, присутствующие на теоретической кривой, или, наоборот, появятся новые экстремальные значения, которых не было на этой кривой. Во всех таких ситуациях алгоритм коррекции уровня завершения не будет работать достаточно надежно.

Еще одно важное требование к выбору длин волн контроля было введено в [14]. Оно связано со значением, называемым входной вариацией сигнала и обозначаемым как EV на рис. 2. Это значение представляет собой модуль разности начального уровня сигнала и его первого экстремума во время напыления слоя. Мы требуем, чтобы

$$EV \geq e\%. \quad (5)$$

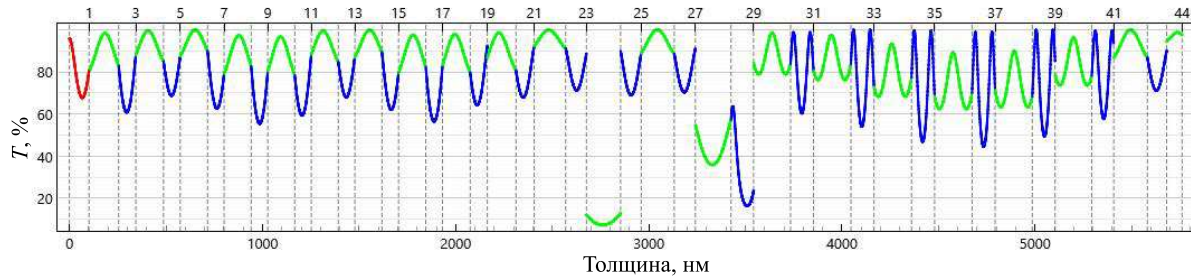


Рис. 3. Контрольный сигнал для 44-слойного фильтра: стратегия фильтрации длин волн

Выполнение этого требования гарантирует, что вариации контрольного сигнала во время нанесения слоя будут достаточно большими по сравнению с неизбежными ошибками измерения коэффициента пропускания растущего слоя.

Мы остановимся здесь в обсуждении требований, связанных с контрольным сигналом, поскольку мы уже представили наиболее важные из них, а также потому, что рассматриваемая здесь стратегия контроля может легко включать любые дополнительные требования этого типа. Перейдем к обсуждению дополнительного требования совершенно иного типа: общепринято, что при выборе стратегии контроля число переключений контрольных длин волн следует свести к минимуму, поскольку их частое переключение приводит к дополнительным производственным ошибкам [14]. Но есть и другое соображение в пользу использования минимального числа различных контрольных длин волн. Было показано, что контроль длинных последовательностей слоев на одной длине волны может обеспечить эффект самокомпенсации ошибок [7].

Подводя итог всем вышеизложенным соображениям, мы формулируем цель новой монохроматической стратегии контроля. Она состоит в создании стратегии с минимально возможным числом переключений длин волн, обеспечивающим соответствие контрольных сигналов каждого слоя требованиям (3)–(5). Для создания таблицы контроля, то есть для назначения контрольных длин волн всем слоям покрытия, мы используем идею фильтрации длин волн. Поэтому мы называем новую стратегию *стратегией фильтрации длин волн*.

Пусть $\{\lambda\}$ обозначает сетку длин волн, которая может быть использована контрольным оборудованием при производстве покрытия. Мы начинаем со слоя 1 и, используя простой перебор, выбираем из этой сетки все длины волн, для которых сигналы удовлетворяют требованиям (3)–(5). Выбранные длины волн образуют множество длин волн $\{\lambda\}_1$. На следующем шаге мы переходим к слою 2 и фильтруем $\{\lambda\}_1$ таким же образом, чтобы получить новое множество $\{\lambda\}_2$, где требования (3)–(5) выполняются для первых двух слоев. Процесс продолжается до тех пор, пока мы не достигнем слоя, где нет длины волны, удовлетворяющей сформулированным требованиям. Пусть это слой с номером $j + 1$.

Множество $\{\lambda\}_j$ не пустое, и мы должны выбрать из этого множества длину волны λ_1 , при которой будет проводиться контроль первой группы слоев покрытия. Мы выбираем длину волны с самым быстрым изменением пропускания во времени. Очевидно, это длина волны, при которой значение конечного свинга $Swing_{fin}$ близко к 50% (см. рис. 2).

После выбора первой группы слоев и соответствующей ей контрольной длины волны мы переходим к выбору второй группы слоев и соответствующей им контрольной длины волны. Процесс выбора аналогичен и снова начинается с полного набора контрольных длин волн $\{\lambda\}$. В следующем разделе демонстрируется создание таблицы контроля в соответствии с описанным алгоритмом.

2. ПРИМЕР СОЗДАНИЯ ТАБЛИЦЫ КОНТРОЛЯ

Рассмотрим 44-слойный фильтр с толщинами слоев, показанными на рис. 1, а. Нечетные и четные слои этого фильтра имеют высокий и низкий показатели преломления 2,35 и 1,45 соответственно. Показатель преломления подложки равен 1.52. Первый слой подложки имеет высокий показатель преломления. Эти данные необходимы для расчета теоретического контрольного сигнала в таблице контроля.

Для задания таблицы контроля, соответствующей стратегии фильтрации длин волн, мы зададим следующие требования к значениям EV , $Swing_{in}$ и $Swing_{fin}$. Мы требуем, чтобы $EV \geq 4\%$, а оба значения $Swing$ находились в диапазоне от 10% до 90%. Таблица контроля генерируется на сетке длин волн от 400 до 800 нм с шагом 5 нм. Описанная в разделе 2 процедура дает следующие результаты: слои 1–19 контролируются на длине волны 625 нм, слои 20–23 — 665 нм, слой 24 — 710 нм, слои 25–27 — 685 нм, слои 28–29 — 700 нм, слои 30–39 — 405 нм, слои 40–41 — 410 нм, слои 42–43 — 660 нм, а слой 44 — 430 нм. Контрольный сигнал, соответствующий этой стратегии, показан на рис. 3.

Как и ожидалось, две длинные последовательности слоев должны напыляться с контролем на одной и той же длине волны: это слои с 1 по 19 и слои с 30 по 39. В общей сложности в процессе

напыления покрытия происходит восемь переключений длин волны. Дополнительные эксперименты показывают, что ослабление требований к значениям EV , $Swing_{in}$ и $Swing_{fin}$ далее сокращает число различных длин волн, используемых в процессе напыления покрытия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы посвящаем данную работу памяти профессора Анатолия Григорьевича Яголы. Представленное здесь исследование было бы невозможно без значительного вклада А.Г. Яголы в разработку теории и математических алгоритмов специфического класса обратных математических задач, связанных с контролем производства современных оптических покрытий. Настоящая работа

представляет собой дальнейший шаг в практической реализации разработанной теории для производства наиболее сложных типов покрытий с использованием монохроматического оптического контроля. В ней предложена новая стратегия контроля, направленная на минимизацию числа переключений контрольной длины волны в процессе напыления покрытия. Отличительными особенностями этой стратегии являются исключительная вычислительная эффективность создания таблицы контроля и возможность учета множества различных критериев, связанных с надёжностью ее реализации современным контрольным оборудованием.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 26-11-00023.

- [1] Tikhonravov A.V. Optical Coatings: design, characterization, monitoring. SPIE Press, 2024.
- [2] Macleod H.A. Thin-Film Optical Filters. 4th ed. Taylor & Francis, 2010.
- [3] Zoeller A., Boos M., Hagedorn H., Romanov B. // *Proc. SPIE* **7101**, 71010G (2008).
- [4] Kochikov I.V., Sharapova S.A., Yagola A.G., Tikhonravov A.V. // *Journal of Inverse and Ill-posed Problems* **28**(6). 915 (2020).
- [5] Tikhonravov A.V., Kochikov I.V., Sharapova S.A., Yagola A.G. // *Proc. SPIE* **11872**, 1 (2021).
- [6] Tikhonravov A.V., Kochikov I.V., Lagutina A.A. et al. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* **75**, N 6, 578 (2020).
- [7] Tikhonravov A.V., Lagutina A.A., Lagutin Iu.S. et al. // *Opt. Express*. **29**. 44275 (2021).
- [8] Kochikov I.V., Lagutin I.S., Lagutina A.A. et al. // *Numer. Methods Program.* **20**, N 4. 471 (2019).
- [9] Kochikov I.V., Lagutin I.S., Lagutina A.A. et al. // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. **60**. 2056 (2020).
- [10] Tikhonravov A.V., Lagutina A.A., Lagutin I.S. et al. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* **78**. 783 (2024).
- [11] Tikhonravov A.V., Lagutina A.A., Lagutin I.S., Yagola A.G. // *Appl. Opt.* **62**. 4906 (2023).
- [12] Macleod H.A. // *Appl. Opt.* **20**. 82 (1981)
- [13] Holm C. // *Appl. Opt.* **18**. 1978 (1979)
- [14] Zideluns J., Lemarchand F., Arhilger D. et al. // *Opt. Express* **29**(21). 33398. (2021)

A New Strategy for Monochromatic Monitoring of the Optical Coating Deposition

A. V. Tikhonravov^{1,a}, S. A. Sharapova¹, S. K. Kirpichenko²

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

²OptiLayer LLC, 73030, DMC Building 5, DQuarters, Dubai Internet City, Dubai, UAE
E-mail: ^atikh@srcc.msu.ru

A new monochromatic monitoring strategy is presented, focused on the use of modern monitoring equipment with online correction of termination levels during coating-layer deposition. The new strategy minimises the number of monitoring wavelength switches during the coating deposition, which is a critically important requirement for improving the quality of coating manufacture. The presented example demonstrates the creation of a monitoring spreadsheet, describing the practical application of the new strategy to the production of a modern optical filter.

PACS: 02.70.+c

Keywords: thin films, optical coatings, monochromatic monitoring, monitoring spreadsheet, optical filter.

Received 08 June 2026.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2026. **81**, No. 4. Pp. .

Сведения об авторах

1. Тихонравов Александр Владимирович — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-23-46, e-mail: tikh@srcc.msu.ru.
2. Шарапова Светлана Анатольевна — науч. сотрудник; тел.: (495) 939-23-46, e-mail: sharapova@rcc.msu.ru.
3. Кирпиченко Сергей Кириллович — e-mail: skirpichenko@gmail.com.