

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ. ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

Широкополосный оптический контроль процесса напыления сглаживающих фильтров для телекоммуникацийА. В. Тихонравов, И. В. Кочиков,^a С. А. Шарапова*Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М. В. Ломоносова,
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 4.*

Поступила в редакцию 29.10.2018, после доработки 06.11.2018, принята к публикации 07.11.2018.

В работе исследуется возможность применения широкополосного оптического контроля при напылении сглаживающих фильтров для телекоммуникационных приложений. На основе результатов моделирования процесса напыления и детального математического анализа показывается, что точное воспроизведение требуемых спектральных характеристик фильтра оказывается возможным только благодаря присущей этому методу контроля корреляции ошибок процесса напыления и связанному с ней эффекту самокомпенсации ошибок. Обсуждается вопрос о выборе оптимального с точки зрения практики спектрального диапазона мониторинга.

Ключевые слова: тонкие пленки, оптические покрытия, оптический контроль.
УДК: 535.3. PACS: 42.79.-e, 42.86.+b.

ВВЕДЕНИЕ

Многослойные интерференционные фильтры для телекоммуникационных приложений относятся к наиболее сложным типам оптических покрытий. Число слоев узкополосных фильтров для технологий спектрального уплотнения каналов (WDM-технологий) может достигать нескольких сотен. Несмотря на это, такие фильтры успешно производит достаточно большое число компаний. Это оказывается возможным, во-первых, благодаря использованию современных технологий ионно-лучевого распыления тонкопленочных материалов (IBS — Ion Beam Sputtering) [1, 2]. Во-вторых, при производстве узкополосных WDM-фильтров может быть использован специфический метод контроля толщин слоев напыляемого покрытия — метод контроля по поворотной точке [3]. Данный метод контроля обеспечивает механизм самокомпенсации ошибок в толщинах напыляемых слоев, благодаря чему и оказывается возможным производство WDM-фильтров [3].

Сглаживающие фильтры для телекоммуникационных приложений, так называемые GFF (Gain Flattening Filters), обладают, как правило, меньшим числом слоев, чем WDM-фильтры. Однако их в состоянии производить лишь единичные компании в мире [4]. При этом как конструкция такого покрытия, так и способ контроля толщин слоев в процессе напыления являются абсолютно конфиденциальной информацией.

В работе [5] было показано, что для производства GFF необходим предельно высокий уровень точности контроля толщин индивидуальных слоев, который недостижим при использовании таких стандартных методов контроля, как контроль по времени напыления или контроль по кварцевому датчику. В работе [6] были описаны результаты успешного напыления GFF с помощью прямого монохроматического контроля процесса напыления, однако детали используемого метода не были представлены. Основываясь на результатах работы [7], о которых будет сказано далее, можно предположить, что успех в работе [6] был достигнут благодаря наличию сильного эффекта самокомпенсации ошибок в толщинах напыляемых слоев.

Работа [7] была посвящена исследованию эффекта самокомпенсации ошибок в толщинах слоев при их контроле с помощью широкополосного оптического мониторинга [8]. На основе результатов вычислительных экспериментов по моделированию процесса напыления оптических покрытий были выявлены три типа покрытий, для которых эффект самокомпенсации ошибок проявляется особенно сильно. Одним из выявленных типов являются сглаживающие фильтры для телекоммуникаций.

Данная работа посвящена более детальному исследованию вопроса о применимости широкополосного оптического контроля для производства сглаживающих фильтров. В разд. 1 приведены результаты моделирования процесса напыления фильтров для различных спектральных областей оптического контроля данного процесса. В разд. 2 проводится обсуждение полученных результатов и рассматривается вопрос о выборе наиболее перспективной с точки зрения практики спектральной области контроля. Основные выводы приведены в **Заключении**.

1. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА НАПЫЛЕНИЯ СГЛАЖИВАЮЩЕГО ФИЛЬТРА

Исследуемый в данном разделе сглаживающий фильтр имеет число слоев, равное 73. Это двухкомпонентный фильтр, состоящий из слоев с чередующимися показателями преломления 2.1 и 1.45. Оптические толщины слоев фильтра представлены на рис. 1, а. При этом слои занумерованы в направлении от подложки к внешней среде. Подложкой, на которую нанесены слои фильтра, является стекло с показателем преломления 1.52. Спектральный коэффициент пропускания фильтра показан на рис. 1, б. Рабочей областью фильтра является спектральный диапазон от 1530 нм до 1562 нм. Конструкция данного фильтра получена с помощью программы проектирования многослойных оптических покрытий OptiLayer [9].

Моделирование процесса напыления фильтра производилось также с помощью программы OptiLayer.

^a E-mail: igor@kochikov.ru

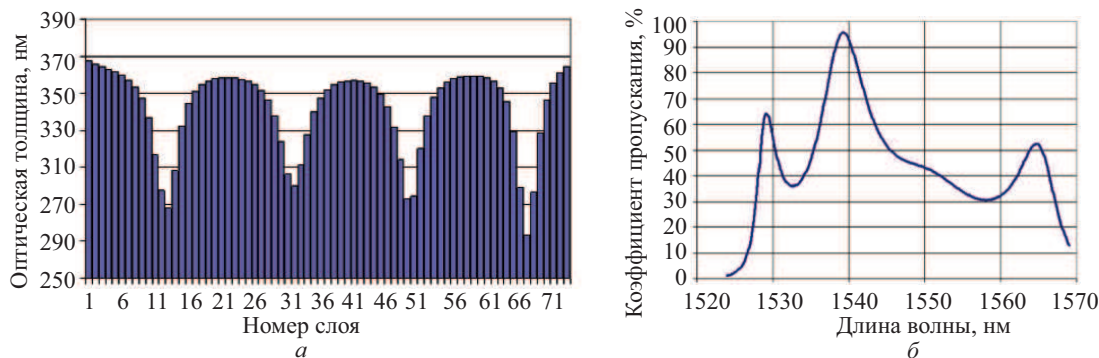


Рис. 1. Оптические толщины слоев 73-слойного сглаживающего фильтра (а) и коэффициент пропускания этого фильтра (б)

При этом моделировались характерные для процесса напыления нестабильности скоростей осаждения пленкообразующих материалов с высоким и низким показателями преломления. Средние значения этих скоростей составляли 0.4 и 0.5 нм/с соответственно. Их среднеквадратичные флуктуации составляли 0.05 нм/с. Учитывались также возможные неточности прерывания процесса напыления слоев со среднеквадратичными временными флуктуациями, равными 1 с. При моделировании широкополосного оптического контроля толщин слоев рассматривались три возможных спектральных диапазона измерений коэффициента пропускания напыляемого покрытия: 450–950 нм, 650–1150 нм и 1100–1600 нм. Во всех трех случаях спектры коэффициента пропускания считывались каждые 3 с с шагом 1 нм по спектру (т.е. во всех трех случаях считываемые массивы спектральных данных имели 501 значение коэффициента пропускания).

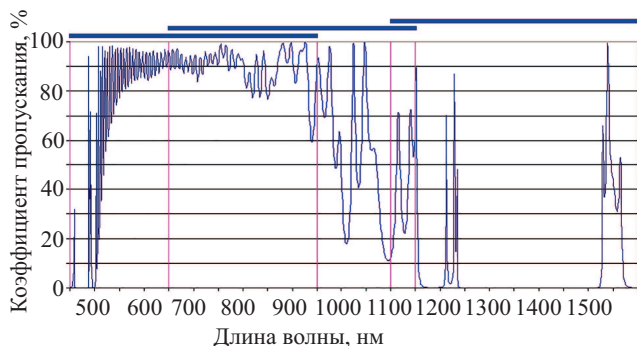


Рис. 2. Коэффициент пропускания фильтра в областях мониторинга. Полосы сверху показывают три диапазона мониторинга

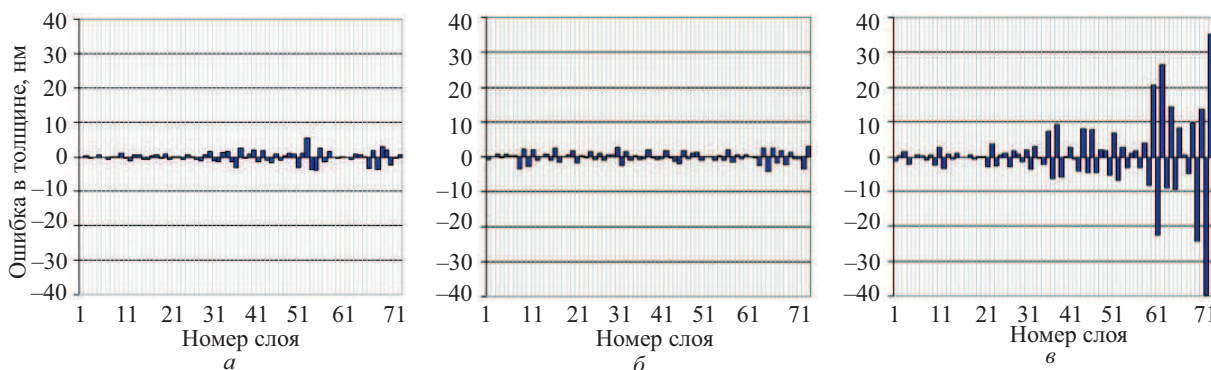


Рис. 3. Типичные ошибки в толщинах слоев при оптическом мониторинге в спектральных диапазонах 450–950 нм (а), 650–1150 нм (б) и 1100–1600 нм (в)

Рассматривавшиеся спектральные диапазоны мониторинга указаны в верхней части рис. 2, который показывает теоретически ожидаемый коэффициент пропускания фильтра в конце его напыления в широкой спектральной области от 450 до 1600 нм. Отметим, что лишь один из этих диапазонов захватывает рабочую область фильтра.

Как следует из рис. 2, спектральный коэффициент пропускания в конечный момент напыления имеет многочисленные узкие по спектру осцилляции. Конечно, в процессе напыления, когда толщина напыляемого покрытия меньше ожидаемой конечной толщины, осцилляции коэффициента пропускания имеют большую спектральную ширину. Тем не менее они могут осложнять мониторинг процесса напыления и этот вопрос будет осуждаться в следующем разделе.

На рис. 3 представлены примеры векторов ошибок в толщинах слоев, получаемых в ходе моделирования процесса напыления с мониторингом в рассматривавшихся спектральных диапазонах. Соотношение уровня ошибок для различных диапазонов на рис. 3 типично для всех модельных вычислительных экспериментов: всегда среднеквадратичный уровень ошибок (норма вектора ошибок) для диапазона 1100–1600 нм является наибольшим.

Несмотря на очень большой уровень ошибок в толщинах слоев при мониторинге в области 1100–1600 нм (рис. 3, в), отклонение спектрального коэффициента пропускания от идеальной расчетной кривой, представленной на рис. 1, б, оказывается весьма незначительным. На рис. 4 показаны коэффициенты пропускания 10 фильтров, полученных при моделировании процесса напыления с мониторингом в данной области. Представленные на рис. 4 результаты следует считать более

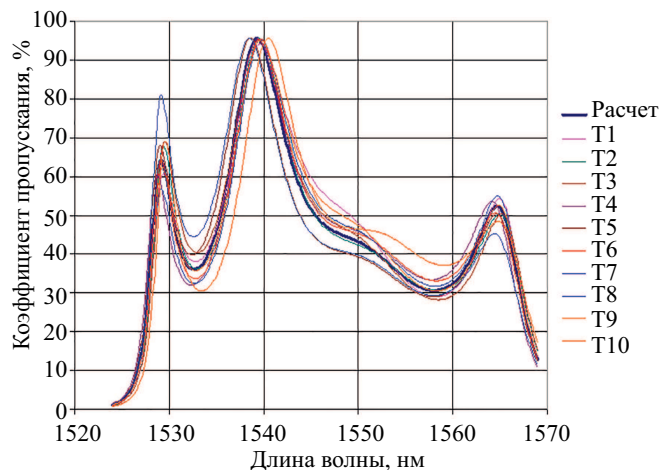


Рис. 4. Коэффициент пропускания в рабочей области для 10 вариантов моделирования

чем удовлетворительными, поскольку даже при среднеквадратичном уровне случайных ошибок в толщинах слоев порядка 1–2 нм спектральная характеристика фильтра оказывается полностью разрушенной [7].

Относительно небольшие отклонения коэффициента пропускания от расчетного (рис. 4) при очень большом уровне ошибок в толщинах слоев (в ряде экспериментов они были еще больше, чем на рис. 3, в) объясняются корреляцией ошибок при широкополосном оптическом контроле и возникающем вследствие этой корреляции эффектом самокомпенсации ошибок. Данный вопрос будет более детально рассмотрен в следующем разделе, сейчас же отметим, что при экспериментах с двумя другими областями мониторинга отклонения спектрального коэффициента пропускания от расчетного были примерно теми же, что и представленные на рис. 4.

2. КОРРЕЛЯЦИЯ ОШИБОК В ТОЛЩИНАХ СЛОЕВ И СВЯЗАННЫЙ С НЕЙ ЭФФЕКТ САМОКОМПЕНСАЦИИ ОШИБОК

Математический подход к исследованию корреляции ошибок в толщинах слоев при широкополосном оптическом контроле процесса напыления был предложен в работе [10], а затем получил дальнейшее развитие

в работах [11, 12]. В [11] была предложена оценка степени корреляции ошибок в толщинах слоев с помощью параметра α , который оказывается меньшим 1 в случае наличия корреляции этих ошибок. При этом корреляция тем сильнее, чем меньше величина α . Алгоритм вычисления параметра α , помимо задания вектора ошибок в толщинах слоев, требует только знания теоретической конструкции покрытия и спектрального диапазона, в котором проводится мониторинг [11]. Было показано, что значения $\alpha < 0.1$ соответствуют сильной корреляции ошибок.

В работе [11] была также введена оценка силы эффекта самокомпенсации ошибок с помощью параметра S , который оказывается тем больше, чем сильнее этот эффект. В данной работе мы введем оценку силы эффекта самокомпенсации S для конкретного вектора ошибок Δ . Пусть Φ — функционал, оценивающий качество аппроксимации требуемой спектральной характеристики фильтра в его рабочей спектральной области. Теоретический вектор толщин слоев покрытия (т.е. решение задачи проектирования) соответствует минимуму этого функционала.

Пусть $\{\delta d_1, \dots, \delta d_m\}$ — координаты вектора ошибок Δ , т.е. вариации теоретических значений толщин слоев (m — число слоев покрытия). Приращение функционала качества при наличии таких ошибок записывается в виде

$$\delta\Phi = \frac{1}{2} \sum_{i,k=1}^m \frac{\partial^2 \Phi}{\partial d_i \partial d_k} \delta d_i \delta d_k. \quad (1)$$

Далее будем рассматривать нормированные векторы ошибок Δ с нормой, равной 1. Пусть $\langle \delta\Phi \rangle$ — среднее значение $\delta\Phi$ на сфере радиуса 1. Возьмем некоторый конкретный вектор ошибок Δ , полученный в ходе моделирования процесса напыления. Нормируем его и обозначим полученный единичный вектор Δ_0 . Вычислим для него значение $\delta\Phi_0$ по формуле (1). Оценим силу эффекта самокомпенсации для выбранного вектора ошибок величиной

$$S = \langle \delta\Phi \rangle / \delta\Phi_0.$$

В таблице приведены значения параметров α и S для векторов ошибок, полученных в экспериментах по моделированию процесса напыления фильтра с тремя

Таблица. Параметры, характеризующие степень корреляции ошибок и силу эффекта самокомпенсации для вычислительных экспериментов с мониторингом в трех различных спектральных диапазонах

Номер эксперимента	Диапазон мониторинга, нм					
	450–950		650–1150		1100–1600	
	α	S	α	S	α	S
1	0.0244	374.9	0.102	125.9	0.00030	6996
2	0.0315	24.4	0.075	169.4	0.00030	5281
3	0.0364	40.2	0.112	30.7	0.00037	1998
4	0.0340	238.9	0.136	31.8	0.00050	1049
5	0.0285	144.4	0.089	47.7	0.00126	356
6	0.0208	218.0	0.106	99.8	0.00185	669
7	0.0408	106.6	0.087	75.9	0.00087	363
8	0.0300	48.3	0.099	20.1	0.00105	273
9	0.0284	113.7	0.083	29.8	0.00160	256
10	0.0214	32.8	0.116	58.4	0.00037	4418
Среднее	0.0296	134.2	0.100	69.0	0.00085	2166

различными диапазонами мониторинга. При этом для каждой из областей эти параметры рассчитаны по результатам десяти численных экспериментов.

Как следует из приведенных в [таблице](#) результатов, наибольшая степень коррелированности ошибок наблюдается в случае экспериментов по моделированию процесса напыления с широкополосным мониторингом в диапазоне 1100–1600 нм. В этой же серии экспериментов получаются и наибольшие значения S , т.е. наблюдается максимальный по силе эффект самокомпенсации ошибок в толщинах слоев. Именно этим и объясняются весьма незначительные вариации спектрального коэффициента пропускания фильтра, несмотря на очень высокий уровень ошибок в толщинах слоев при мониторинге в диапазоне 1100–1600 нм (см. рис. 3, в и 4). При мониторинге в двух других спектральных диапазонах значения параметра α заметно выше, а параметра S — заметно ниже, чем в случае спектрального диапазона 1100–1600 нм. Тем не менее и для двух других диапазонов мониторинга наблюдаются как сильная корреляция ошибок, так и наличие сильного эффекта самокомпенсации ошибок.

В заключение данного раздела рассмотрим вопрос о выборе наилучшего спектрального диапазона для мониторинга процесса напыления фильтра. Несмотря на то что при экспериментах с мониторингом во всех трех диапазонах отклонения спектрального коэффициента пропускания от расчетного оказываются примерно одинаковыми, самый коротковолновый из них следует исключить из рассмотрения. Это связано с тем, что даже при узкой по спектру ширине линии онлайн-спектрометра очень частые осцилляции коэффициента пропускания (рис. 2) будут приводить к значительным искажениям записываемого спектра. Из двух остающихся диапазонов более предпочтительным представляется диапазон 650–1150 нм, поскольку точность онлайн-спектрометров для этого диапазона, как правило, выше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Детально исследован вопрос о возможности применения широкополосного оптического контроля в процессе напыления сглаживающих фильтров для теле-

коммуникационных приложений. На основе развитого ранее математического подхода показывается, что создание таких фильтров оказывается возможным только благодаря корреляции ошибок в толщинах напыляемых слоев вследствие применения данного метода контроля и наличие очень сильного эффекта самокомпенсации ошибок. Полученные результаты открывают новые возможности для создания наиболее сложных технологически востребованных типов многослойных покрытий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-07-00872 а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kaiser N, Pulker H.K. Optical Interference Coatings. Springer Series in Optical Sciences. Berlin–Heidelberg: Springer–Verlag, 2003.
2. Optical Thin Films and Coatings: From Materials to Application / A. Piegari, F. Flory, Eds. Woodhead, Cambridge, 2nd ed., 2018.
3. Tikhonravov A. V., Trubetskov M. K. // Appl. Opt.. 2002. **41**. P. 3176.
4. www.iridian.com
5. Macleod H. A. // Proc. SPIE. 2000. **4094**. P. 46.
6. Mimura Y., Mizuno K., Iido Y. et al. // Furukawa Review. 2002. N 21. P. 12.
7. Tikhonravov A., Kochikov I., Yagola A. // Optics Express. 2018. **26**. P. 24964.
8. Tikhonravov A., Trubetskov M., Amotchkina T. // Optical Thin Films and Coatings / Ed. by Piegari A., Flory F. Woodhead, Cambridge, 2nd ed., 2018, pp. 65–101.
9. www.optilayer.com
10. Tikhonravov A., Kochikov I., Yagola A. // IPSE (Inverse Problems of Science and Engineering). 2018. **26**. P. 1214.
11. Тихонравов А. В., Кочиков И. В., Матвиенко И. А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2018. № 6. С. 50. (Tikhonravov A. V., Kochikov I. V., Matvienko I. A. // Moscow Univ. Phys. Bull. **73**, N 6. P. 627.)
12. Тихонравов А. В., Кочиков И. В., Матвиенко И. А. и др. // Вычислительные методы и программирование: Новые вычислительные технологии (Электронный научный журнал). 2018. **19**. С. 439.

Broad Band Optical Monitoring in the Production of Gain Flattening Filters for Telecommunication Applications

A. V. Tikhonravov, I. V. Kochikov^a, S. A. Sharapova

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

E-mail: ^aigor@kochikov.ru.

We consider the applicability of broad band optical monitoring to the production of gain flattening filters for telecommunication applications. Based on the simulation of filter deposition and on the rigorous mathematical analysis, we show that it is possible to achieve filter target characteristics due to the correlation of thickness errors and to the error self-compensation effect connected with this correlation. We also discuss the choice of a practically optimal spectral range of the monitoring procedure.

Keywords: thin films, optical coatings, optical monitoring.

PACS: 42.79.-e, 42.86.+b.

Received 29 October 2018.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2019. **74**, No. 2. Pp. 160–164.

Сведения об авторах

1. Тихонравов Александр Владимирович — доктор физ.-мат. наук, директор НИВЦ МГУ; тел.: (495) 939-54-24.
2. Кочиков Игорь Владимирович — доктор физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-23-46; e-mail: igor@kochikov.ru.
3. Шарапова Светлана Анатольевна — мл. науч. сотрудник; e-mail: svet.sharapova@gmail.com.