

МОДЕЛИРОВАНИЕ В ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

УДК 539.23 : 004.94 : 681.785.557 : 535-92

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ НЕПРЯМОГО СПЕКТРАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ТОЛЩИН СЛОЁВ МНОГОСЛОЙНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ПУТЁМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

З. В. Семенов^{1,2}, В. А. Лабусов^{1,2,3}

¹Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

²ООО «ВМК-Оптоэлектроника»,

630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

³Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

E-mail: info@vmtk.ru

Представлены результаты исследования погрешности способа непрямого контроля, основанного на измерении спектров отражения в широкой спектральной области от дополнительных контрольных подложек, путём математического моделирования. Для проведения моделирования разработано программное обеспечение Deposition Control Simulator, позволяющее оценить влияние на случайную и систематическую погрешности измерения толщины наносимого слоя параметров системы контроля: шума линейки фотодетекторов, рабочего спектрального диапазона спектрометра и погрешности его градуировки по длинам волн, дрейфа интенсивности источника излучения, а также погрешности показателя преломления наносимых материалов. Для численного решения прямой и обратной задач многослойных покрытий использовалась библиотека OptiReOpt. Приведены зависимости случайной и систематической погрешностей измерения толщины наносимого слоя от его толщины при различных значениях параметров системы контроля. Даны рекомендации по применению способа непрямого контроля в целях снижения погрешности измерения толщины наносимого слоя.

Ключевые слова: многослойные покрытия, тонкие плёнки, измерение толщины слоёв, компьютерное моделирование, способ непрямого контроля.

DOI: 10.15372/AUT20170601

Введение. В настоящее время метод контроля в широком спектральном диапазоне, основанный на измерении зависимости коэффициента отражения или пропускания покрытия от длины волны, — самый информативный, а в перспективе и самый точный метод контроля толщины слоя в процессе изготовления многослойных оптических покрытий путём их напыления [1–4]. Характеристикой качества спектрального контроля является погрешность измерения толщин слоёв покрытия, получаемая из отклонений толщин слоёв напылённого покрытия от измеренных системой контроля. Данная погрешность включает систематическую и случайную погрешности измерения толщины наносимого слоя.

Наиболее широкое распространение получил способ «прямого» контроля в широком спектральном диапазоне, базирующийся на получении спектров отражения или пропускания от контрольной подложки, на которую наносится такая же конфигурация слоёв и материалов, как и на целевое покрытие. Этот метод является наглядным, сравнительно простым, удобным и позволяет управлять процессом напыления, исходя из требуемой

спектральной характеристики покрытия. Однако он не универсален, и погрешности измерения толщин слоёв существенно зависят от спектральной задачи, которую решает целевое покрытие. Так, напыление материала очередного слоя с ростом количества нанесённых ранее слоёв может всё меньше влиять на измеряемые спектры отражения или пропускания создаваемого многослойного покрытия. Прирост толщины на одно и то же значение для разных слоёв покрытия может как существенно влиять на спектры отражения/пропускания, так и вообще не наблюдаться в спектральном диапазоне контроля. Это приводит к многократному росту погрешности измерения толщин слоёв такого покрытия.

Известен также способ «непрямого» контроля толщин слоёв в широком спектральном диапазоне по дополнительным контрольным подложкам [3], который основан на измерении спектров отражения/пропускания покрытий, получаемых на дополнительных контрольных подложках, находящихся в напылительной установке одновременно с подложками целевых покрытий. При этом толщины слоёв, нанесённых на целевые и контрольные подложки, различны (кроме текущего напыляемого слоя), что позволяет свести задачу определения толщины каждого из слоёв создаваемого покрытия к задаче контроля измерения толщины одного слоя соответствующего ему материала, нанесённого на дополнительную контрольную подложку. Согласно [4] способ непрямого контроля является более универсальным и точным, чем прямого, проводимого по наносимому целевому покрытию, поскольку в данном случае погрешность измерения не зависит от спектральных характеристик создаваемых покрытий. Минимальная же погрешность измерения толщины слоя достигается с использованием спектра отражения покрытия [3]. Способ непрямого контроля позволяет также с высокой точностью напылять слои нанометровой толщины. Для этого используют контрольную подложку с предварительно нанесённым слоем достаточной толщины, чтобы в спектре отражения появился хотя бы один локальный экстремум или точка перегиба [5].

В работе [3] апробирован способ непрямого контроля толщин слоёв оптических покрытий в спектральном диапазоне 525–1000 нм на вакуумной установке ВУ-2М. Измерение спектра отражения покрытия проводилось с помощью малогабаритного спектрометра «Колибри-2» [6] на основе линейки фотодетекторов. Схема эксперимента показана на рис. 1. Излучение источника 1 (галогенная лампа) вводится в волоконно-оптический кабель 2, изображение торца которого диаметром 6 мм формируется линзой 3 на контрольной

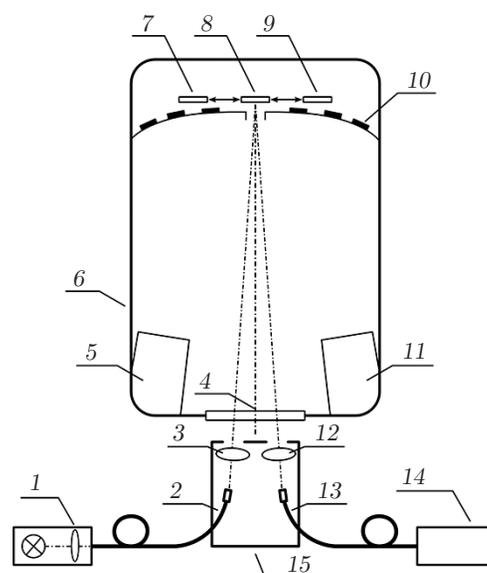


Рис. 1. Схема системы спектрального контроля

подложке 8. Отражённое от подложки излучение с помощью линзы 12 и волоконного кабеля 13 подаётся на вход спектрометра 14. Ввод и вывод излучения в вакуумную камеру 6 осуществлялся через оптическое окно 4. Линзы-ахроматы 3 и 12 и волоконно-оптические кабели 2 и 13 расположены в блоке коллиматоров 15, предназначенном для юстировки оптической системы контроля. Держатель контрольных подложек 7–9 обеспечивает их смену при проведении калибровки системы контроля и изменении материала очередного слоя. Материалы наносятся методом электронно-лучевого испарения из соответствующих водоохлаждаемых тиглей 5 и 11. Целевое покрытие наносится на рабочие подложки 10. Управление системой контроля и расчёт толщины наносимого слоя осуществлялись с помощью программного обеспечения (ПО) LayerControl [7], поддерживающего интеграцию с пакетом численного расчёта OptiLayer/OptiReOpt [8].

Было показано, что случайная погрешность измерения толщины слоя, усреднённая по диаметру 6 мм светового пятна зондирующего излучения на контрольной подложке, составляла 0,02 нм. Возможность получения столь малых случайных погрешностей стимулировала проведение дальнейших исследований погрешностей способа непрямого контроля (как случайных, так и систематических) и их зависимостей от параметров системы контроля (шума чтения линейки фотодетекторов, рабочего спектрального диапазона спектрометра, погрешностей его градуировки по длинам волн, дрейфа интенсивности источника излучения) и погрешности значений показателя преломления наносимых материалов.

Цель данной работы — исследование зависимости погрешностей способа непрямого измерения толщины слоёв системой контроля, функционирующей в режиме измерения спектров отражения в диапазоне 500–1000 нм, от параметров системы контроля и наносимых материалов, а также определение оптимальных значений этих параметров. Задача решалась путём компьютерного моделирования.

Методика и средства моделирования. Для моделирования работы системы контроля было создано программное обеспечение Deposition Control Simulator [9]. На рис. 2 представлена блок-схема программы моделирования (1–3 — входные параметры, 4 — выходной).

1. На первом этапе моделирования используются параметры дизайна покрытия, состоящего из одного слоя на подложке: толщина слоя, показатели преломления $n(\lambda)$ материалов слоя и подложки. В отличие от показателя преломления подложки, значения которого в спектральном диапазоне контроля можно измерить с достаточной точностью, значения $n(\lambda)$ наносимого слоя часто являются заниженными или завышенными относительно ожидаемых из-за нестабильности технологического процесса нанесения покрытий на современных установках. Для моделирования этой неточности в показатель преломления материала слоя вносится систематическая погрешность.

2. Затем путём решения прямой задачи многослойных покрытий рассчитывается спектр отражения заданного покрытия.

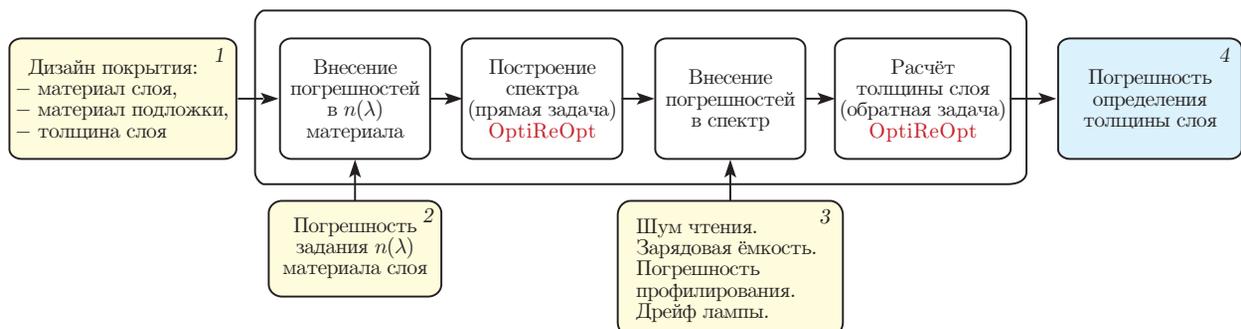


Рис. 2. Блок-схема программы моделирования работы системы контроля

3. Далее в полученный спектр вносятся искажения, обусловленные несовершенством системы контроля: в соответствии с моделью шума добавляются шум чтения линейки фотодетекторов и дробовой (квантовый) шум, погрешность градуировки спектрометра по длинам волн и дрейф интенсивности источника излучения.

4. На последнем этапе проводится решение обратной задачи многослойных покрытий — нахождение толщины слоя по спектру отражения с внесёнными искажениями. Найденная таким образом толщина слоя отличается от заданной изначально на величину погрешности определения толщины слоя, которая является выходной характеристикой моделирования.

При заданных значениях входных параметров проводятся многократные циклы моделирования, отличающиеся случайными реализациями шума. В результате получается выборка погрешностей определения толщины слоя. В приближении нормального распределения этой выборки погрешность определения толщины слоя можно разделить на две составляющие: систематическую и случайную погрешности. Под систематической погрешностью понимается отклонение среднего значения (математического ожидания) измеренной толщины слоя от реальной, а под случайной погрешностью — среднее квадратическое отклонение результатов измерений. Проводя повторные процессы моделирования, программа автоматически строит зависимости погрешностей определения толщины слоя от выбранного параметра при фиксированных значениях остальных.

Для решения прямой и обратной задач многослойных покрытий ПО Deposition Control Simulator использует библиотеку OptiReOpt так же, как и ПО LayerControl системы контроля [3], что позволяет исключить возможные различия в математических вычислениях.

В качестве материалов слоёв в моделировании были взяты диэлектрики TiO_2 и SiO_2 , которые широко применяются при создании многослойных оптических покрытий и обладают относительно высоким и низким показателями преломления соответственно. В качестве контрольных подложек использованы оптические стёкла Schott BK7 типа крон с показателем преломления $n \approx 1,52$ и Hikari LASF-01 типа флинт с $n \approx 1,8$. Дисперсионные характеристики показателя преломления $n(\lambda)$ материалов слоёв и подложек взяты из базы данных ПО OptiLayer.

Систематическая погрешность показателя преломления материала слоя учитывалась нами в виде $n'(\lambda) = n(\lambda)(1 + \Delta n/100)$, где $n(\lambda)$ — начальная зависимость показателя преломления от длины волны, а Δn — сдвиг показателя преломления в процентах.

Задаваемые параметры системы контроля. *Шум линейки фотодетекторов.* Согласно [10] шум выходного сигнала фотоячейки состоит из двух независимых источников случайного шума: шума чтения и дробового (квантового) шума. Шум выходного сигнала фотоячейки вносит случайную погрешность в спектр отражённого от контролируемого слоя излучения $I(\lambda)$, регистрируемый спектрометром. Спектр отражения этого слоя рассчитывают по формуле $R(\lambda) = I(\lambda)R_0(\lambda)/I_0(\lambda)$, где $I_0(\lambda)$ — спектр отражённого от калибровочной подложки излучения (калибровочный спектр), $R_0(\lambda)$ — спектр отражения калибровочной подложки. Случайными погрешностями $I_0(\lambda)$ и $R_0(\lambda)$ можно пренебречь, так как их значения получают путём усреднения большого количества измерений, а калибровочный спектр — перед началом работы системы контроля или в случае необходимости — в процессе работы.

Если не оговорено отдельно, то при моделировании использованы параметры линейки фотодиодов БЛПП-369, входящей в состав системы контроля [3]: количество фотоячеек 2612, зарядовая ёмкость фотоячейки 2000000 е, шум чтения 150 е.

Погрешность профилирования спектрометра. Градуировка спектрометров с линейкой фотодетекторов по длинам волн осуществляется путём сопоставления спектров линейчатых источников спектра (например, лампы полого катода) с линиями из базы данных в

ручном или автоматическом режимах. Погрешность такой градуировки называется «погрешностью профилирования» и в реальных условиях составляет не менее 0,2 шага размещения фотоячеек в линейке из-за погрешности измерения положения центра зарегистрированных линий при профилировании спектрометра [11].

Погрешность профилирования, выраженная в длинах волн ($\Delta\lambda$), зависит от количества фотоячеек в линейке и от рабочего спектрального диапазона. Так, увеличение количества фотоячеек для фиксированного спектрального диапазона или уменьшение этого диапазона с сохранением количества фотоячеек позволяет снизить погрешность, выраженную в длинах волн. Погрешность профилирования учитывалась в виде систематического сдвига спектра по длинам волн на $\Delta\lambda$.

Было проведено моделирование способа непрямого контроля толщины слоя для различных спектральных диапазонов и количества фотоячеек в линейке. Однако, поскольку оказалось, что эти характеристики влияют на результирующие погрешности преимущественно через изменение погрешности профилирования, выраженной в единицах длин волн, достаточно рассмотреть результат с изменением рабочего спектрального диапазона. Интерес к изучению влияния погрешности профилирования через изменение спектрального диапазона был вызван тем, что это изменение в современных спектрометрах, как правило, легко осуществляется путём замены дифракционной решётки.

Дрейф интенсивности источника излучения. Используемый в [3] источник излучения Ocean Optics HL-2000-FHSA с галогенной лампой имеет дрейф интенсивности не более 0,3 %/ч [12]. Напыление одного слоя занимает около 20–30 мин, а процесс нанесения всего многослойного покрытия может продолжаться до 8 ч и более. Таким образом, если калибровка системы контроля по калибровочной подложке проводится перед нанесением каждого слоя, то изменение интенсивности в спектре, вызванное дрейфом лампы, должно быть не более 0,2 %, а при однократной калибровке перед нанесением многослойного покрытия оно может достигать 2 %. Интенсивность спектра с учётом дрейфа $I'(\lambda) = I(\lambda)(1 + \Delta I/100)$, где $I(\lambda)$ — истинная интенсивность спектра, ΔI — дрейф интенсивности в процентах.

Рабочее окно моделирующей программы представлено на рис. 3. Справа даны параметры, влияющие на погрешность измерения толщины слоя, которые можно изменять. Показаны спектры отражения до и после внесения искажений (красным и чёрным цвета-

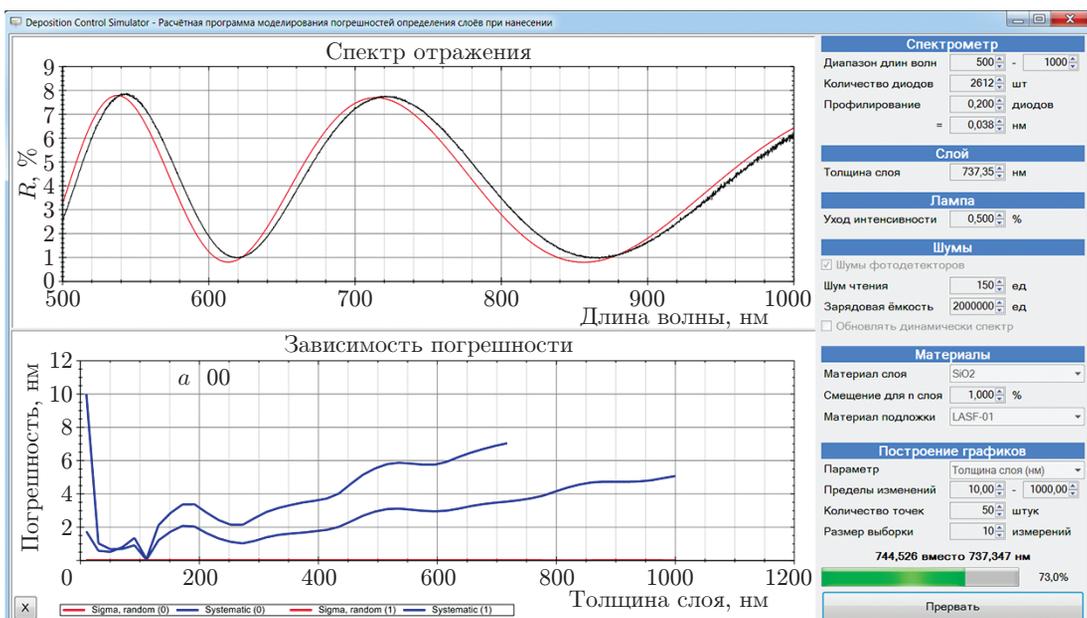


Рис. 3. Окно программного обеспечения Deposition Control Simulator

ми соответственно) и графики зависимости погрешности определения толщины слоя от заданного параметра, например толщины слоя.

Результаты моделирования и их обсуждение. Были получены результаты моделирования и рассчитаны погрешности определения толщины слоя без внесения погрешностей системы контроля для рабочего спектрального диапазона 500–1000 нм. Для слоёв толщиной 1–10000 нм общая погрешность измерения толщины слоя составила не более 10^{-3} нм для материалов SiO_2 и TiO_2 . На рис. 4 красным цветом приведена зависимость случайной погрешности σ полученных толщин слоя от его толщины для SiO_2 . Эта погрешность является недостижимо малой для существующих напылительных установок, свидетельствуя о том, что данный метод моделирования через решение прямой и обратной задач позволяет определять вклад отдельных источников погрешностей без ошибок самого моделирования.

Влияние шума линейки фотодетекторов. В соответствии с моделью шума выходного сигнала фотоячейки [10] были построены зашумлённые спектры отражения в рабочем спектральном диапазоне 500–1000 нм. Добавление шума привело к появлению случайной погрешности измерения толщины слоя σ и практически не внесло систематической. На рис. 4 показаны зависимости σ полученных толщин слоя от его толщины (1–5000 нм) при наличии шума линейки фотодетекторов для материалов SiO_2 и TiO_2 . Видно, что σ результатов измерения толщины слоя для обоих материалов практически не меняется при увеличении толщины слоя. Это позволяет сделать вывод, что в случае способа непрямого контроля можно использовать большие значения толщины слоя материала на контрольной подложке без существенного увеличения случайной погрешности измерения его толщины, вызванной шумом линейки фотодетекторов. Также видно, что для тонких слоёв (менее 30 нм) наблюдается существенный рост погрешности, связанный с отсутствием экстремумов и точек перегиба в измеряемых спектрах, что негативно влияет на точность решения обратной задачи. Данная проблема может быть решена с помощью предварительно нанесённого слоя [5].

Также из рис. 4 следует, что для слоя SiO_2 , нанесённого на стекло BK7 типа крон, погрешность измерения толщины существенно больше, чем для TiO_2 в аналогичных условиях. Этот эффект можно объяснить близостью показателей преломления материала слоя

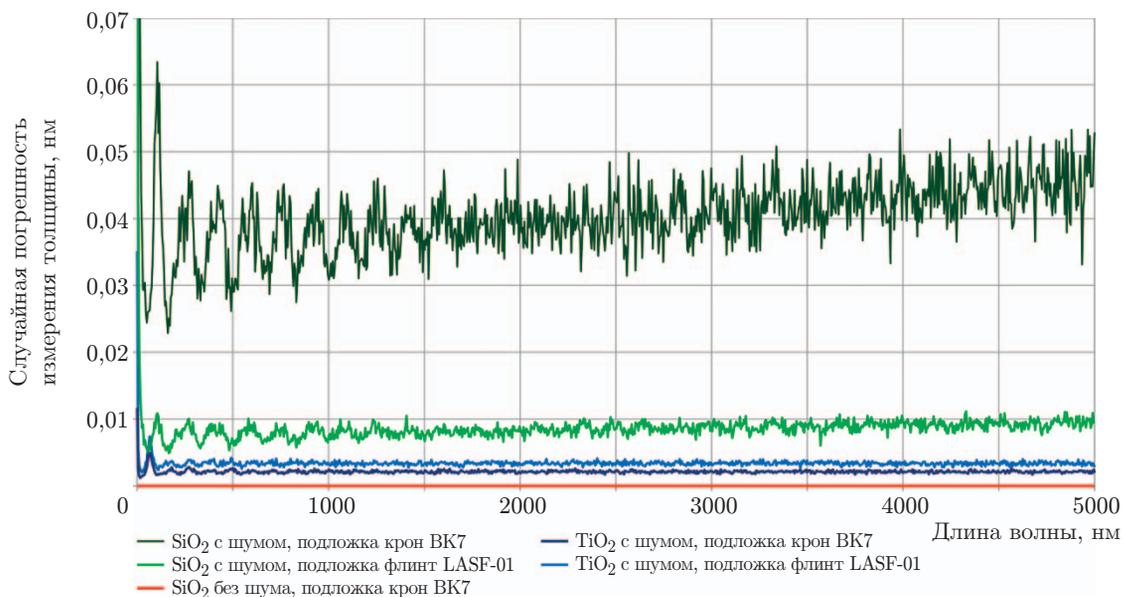


Рис. 4. Зависимости случайной погрешности измерения толщины слоя от толщины слоя

SiO_2 и подложки, что существенно снижает интенсивность отражённого излучения на границе подложка — слой. Так, для слоя SiO_2 коэффициент отражения в рабочем спектральном диапазоне может быть менее 4 %, тогда как для слоя TiO_2 он может достигать 30–35 %, что приводит к низкой интенсивности в спектре отражённого излучения и увеличению относительного уровня шума.

Для уменьшения погрешности измерения толщины слоя SiO_2 , вносимой шумом линейки фотодетекторов, использовалась подложка со сравнительно высоким показателем преломления флинт LASF-01 ($n \approx 1,8$, оптическое стекло Hikari). На рис. 4 показано, что применение такой подложки привело к уменьшению случайной погрешности для слоя SiO_2 примерно в 4 раза. Вместо контрольной подложки с высоким показателем преломления можно использовать предварительно нанесённый слой материала с высоким показателем преломления, например TiO_2 или ZnS .

Отсюда следует, что показатели преломления материала контрольной подложки или предварительно нанесённого слоя материала должны существенно отличаться от показателя преломления напыляемого материала. Тогда случайная погрешность измерения толщины слоя из материалов TiO_2 и SiO_2 , обусловленная шумом линейки фотодетекторов, не будет превышать 0,015 нм для толщин слоёв более 20 нм. Близкое значение случайной погрешности на уровне 0,02 нм получено экспериментально [3]. Такая низкая случайная погрешность измерения толщины слоя, по-видимому, обусловлена большим количеством отсчётов в зарегистрированных спектрах.

Влияние спектрального диапазона и погрешности профилирования. Моделирование проводилось для спектральных диапазонов 500–1000, 500–750 и 500–600 нм материалов TiO_2 (на подложке BK7) и SiO_2 (на подложке LASF-01) с учётом шума линейки фотодетекторов. Погрешность профилирования спектрометра выбиралась равной 0,2 от шага размещения фотоячеек. При этом погрешность профилирования, выраженная в длинах волн, для выбранных спектральных диапазонов составила 0,038, 0,019 и 0,0076 нм соответственно.

На рис. 5 представлены полученные зависимости систематической погрешности измерения толщины слоя от его толщины для разных спектральных диапазонов и материалов слоёв. При построении каждой точки графика использована выборка из 100 циклов моде-

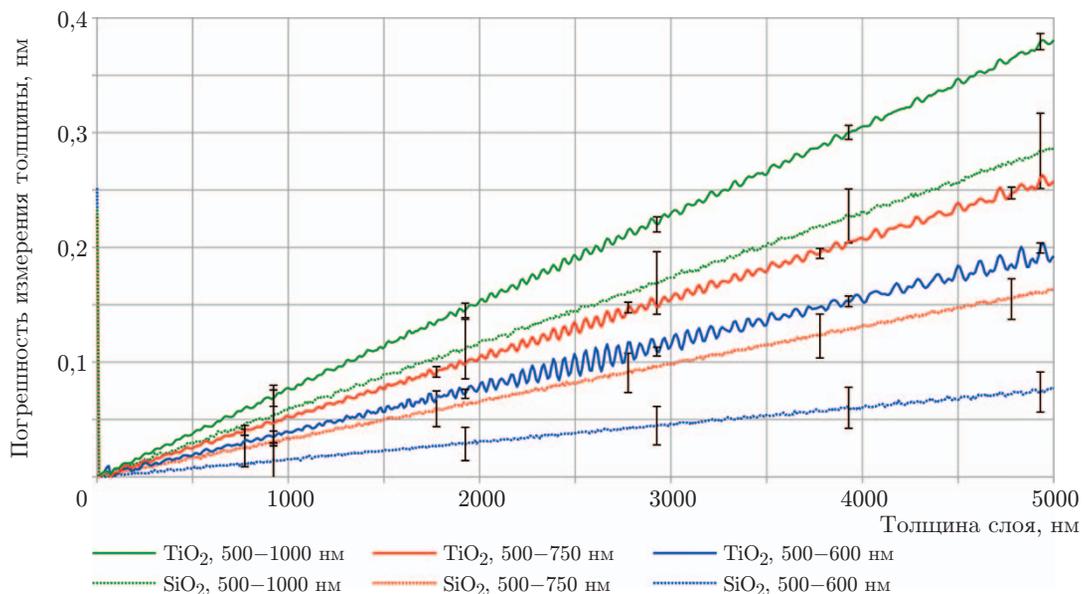


Рис. 5. Зависимости систематической погрешности от толщины слоя при разных спектральных диапазонах контроля

лирования со случайными реализациями шума линейки фотодетекторов. Случайная погрешность измерения толщины слоя дана в виде доверительных интервалов 3σ .

Видно, что погрешность измерения толщины слоя, обусловленная погрешностью профилирования, имеет преимущественно систематическую природу. Особенно это заметно для слоя из материала TiO_2 , где случайной погрешностью можно пренебречь. Видно также, что систематическая погрешность растёт линейно в зависимости от толщины слоя. Рост погрешности при увеличении толщины слоя объясняется повышением количества осцилляций в зарегистрированных спектрах отражения, при котором смещение по длинам волн, вызванное неточным профилированием, начинает играть большую роль.

Можно сделать вывод, что при способе непрямого контроля следует периодически менять контрольную подложку на новую по достижении определённой толщины слоя в зависимости от необходимой погрешности, например после 2500–3000 нм при требуемой погрешности менее 0,2 нм.

Из графиков следует, что для материалов с высоким и низким показателями преломления предпочтительно иметь более низкую погрешность профилирования, выраженную в нанометрах, нежели более широкий спектральный диапазон контроля. Следовательно, для существующей установки [3] можно предложить сократить рабочий спектральный диапазон для повышения разрешения и уменьшения погрешности профилирования, что должно привести к понижению систематической погрешности измерения толщин слоёв, обусловленной погрешностью профилирования.

Влияние дрейфа интенсивности источника излучения. Результаты моделирования различных уровней дрейфа интенсивности источника излучения для слоя SiO_2 на подложке LASF-01 представлены на рис. 6. Для слоя TiO_2 на подложке BK7 зависимость имеет аналогичный вид, но погрешности из-за большей разницы показателей преломления материала и подложки в 1,5–2 раза меньше.

Погрешность, вызванная дрейфом интенсивности, является систематической и увеличивается с уменьшением толщины слоя. Кроме величины дрейфа интенсивности существует и его направление, которое определяется знаком величины ΔI . Было получено почти полное совпадение погрешностей определения толщины, вызванных дрейфом интенсивности спектра, равных по модулю, но различных по знаку (см. рис. 6). Можно сделать вывод, что погрешность измерения толщины слоя определяется модулем значения дрейфа интенсивности источника излучения. Кроме того, обнаружено, что для тонкого слоя

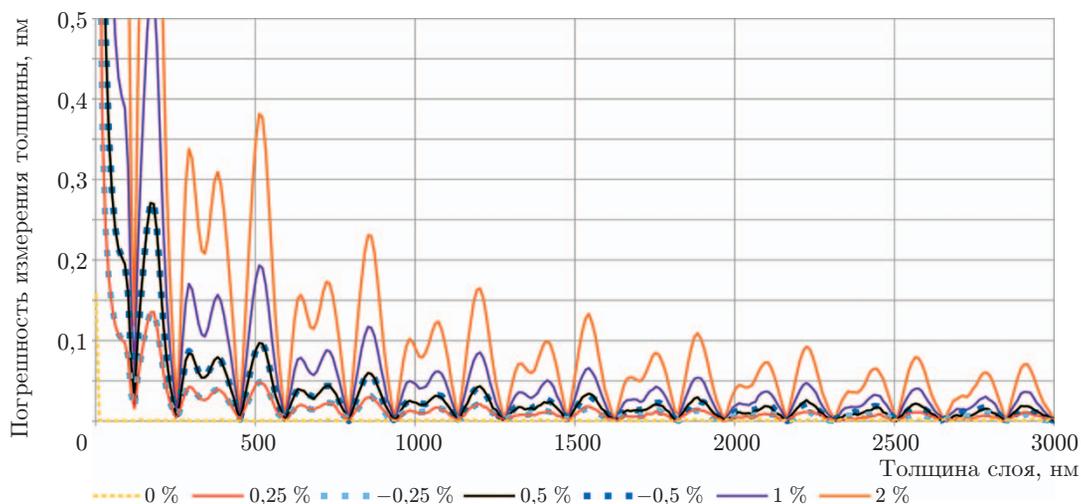


Рис. 6. Зависимости систематической погрешности измерения толщины слоя SiO_2 от его толщины при разном уровне дрейфа интенсивности спектра ΔI

(менее 30 нм) вносимая погрешность является соизмеримой с его толщиной, что неприемлемо. Если этот слой первый на контрольной подложке, то для измерения его толщины необходимо использовать контрольную подложку с предварительно нанесённым слоем [5].

Видно, что дрейф интенсивности источника излучения является важным фактором и для уменьшения его влияния следует проводить периодическую калибровку системы контроля по калибровочной подложке. Калибровка с источником Ocean Optics HL-2000-FHSA перед нанесением каждого слоя позволит снизить дрейф интенсивности спектра до 0,2 %.

Влияние погрешности показателя преломления материала слоя. В рассмотренных модельных экспериментах в качестве толщины напылённого слоя берётся его физическая толщина, которая является удобной характеристикой слоя, поскольку она не зависит от длины волны проходящего излучения. Однако в интерференционных фильтрах излучение проходит путь, определяемый не физическим расстоянием, а оптическим, и во все расчёты толщина слоя входит в виде произведения толщины на показатель преломления: $dn(\lambda)$, т. е. в виде оптической толщины. Таким образом, спектральные характеристики фильтра определяются оптической толщиной, которая зависит от длины волны проходящего излучения.

Если бы в качестве анализируемой погрешности, вызванной погрешностью показателя преломления $n(\lambda)$, использовалась погрешность измерения физической толщины, то она была бы большой и росла в зависимости от толщины слоя линейно. Однако существует известный для многослойных покрытий эффект «самокомпенсации», когда погрешность в значении показателя преломления материала слоя $n(\lambda)$ приводит к появлению погрешности в физической толщине слоя d , а оптическая толщина слоя $dn(\lambda)$ оказывается близка к расчётной. Основная причина, по которой не происходит полной компенсации, заключается в том, что показатель преломления зависит от длины волны в отличие от физической толщины, и, как результат, для всех длин волн анализируемого диапазона взаимная компенсация погрешностей невозможна. Поэтому для изучения влияния погрешности показателя преломления материала слоя на итоговую погрешность измерения толщины слоя анализировалась погрешность измерения оптической толщины.

Были проведены модельные эксперименты с различными значениями систематической погрешности в значении показателя преломления. На рис. 7 приведены зависимости

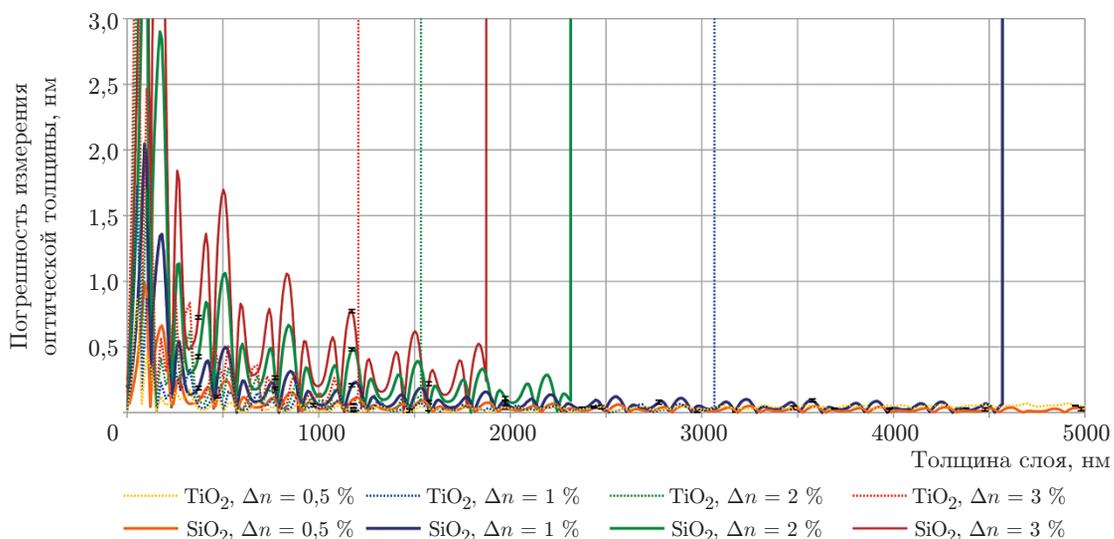


Рис. 7. Зависимости систематической погрешности измерения оптической толщины слоя от его толщины при разных погрешностях показателя преломления Δn

погрешности измерения оптической толщины слоя материалов TiO_2 (на подложке BK7) и SiO_2 (на подложке LASF-01) для различных значений Δn . Видно, что случайная погрешность, показанная на графике доверительными интервалами 3σ , пренебрежимо мала в сравнении со систематической.

Спектры отражения настолько деформировались при увеличении толщины слоя, а значит, и количества осцилляций в спектре, что алгоритмы, заложенные в решении обратной задачи, выдавали неприемлемые результаты с погрешностями в сотни нанометров. В этом случае считалось, что контроль с такой погрешностью значения $n(\lambda)$ для данной толщины невозможен. На рисунке видно, например, что для контроля толщин слоёв до 1500 нм необходимо иметь погрешность показателя преломления не более 2 %. Было замечено, что знак погрешности в значении показателя преломления практически не изменяет уровень погрешности и максимальную толщину слоя, до которой возможен контроль данными алгоритмами.

Как правило, при способе непрямого контроля измеряют спектр отражения покрытия, состоящего из одного слоя, в связи с чем кажется перспективным уточнять показатель преломления материала в ходе нанесения по измеряемым спектрам в реальном времени. Это позволит уменьшить погрешность измерения оптической толщины слоя.

Суммарное влияние рассмотренных источников погрешностей. Для примера представлен результат моделирования способа непрямого контроля системы контроля, работающей в составе напылительной установки ВУ-2М [3]. Используются параметры установки для моделирования: спектральный диапазон контроля 500–1000 нм, количество фотоячеек в линейке 2612, погрешность профилирования 0,2 от шага размещения фотоячеек, смещение интенсивности источника излучения 0,2 % (паспортный дрейф менее 0,3 %/ч [12]), зарядовая ёмкость фотоячейки 2000000 е, шум чтения 150 е. Моделирование было проведено для погрешности показателя преломления материала слоя 0 и 0,5 %. Для материала TiO_2 использовалась подложка типа крон BK7, а для SiO_2 — типа флинт LASF-01. Проанализирована погрешность измерения физических толщин слоя для толщин 1–5000 нм с шагом 10 нм. Полученные зависимости погрешностей от толщины слоя представлены на рис. 8. Систематические погрешности показаны графиками, а случайные — доверительными интервалами 3σ . Для построения каждой точки графика использована выборка из 100 циклов моделирования.

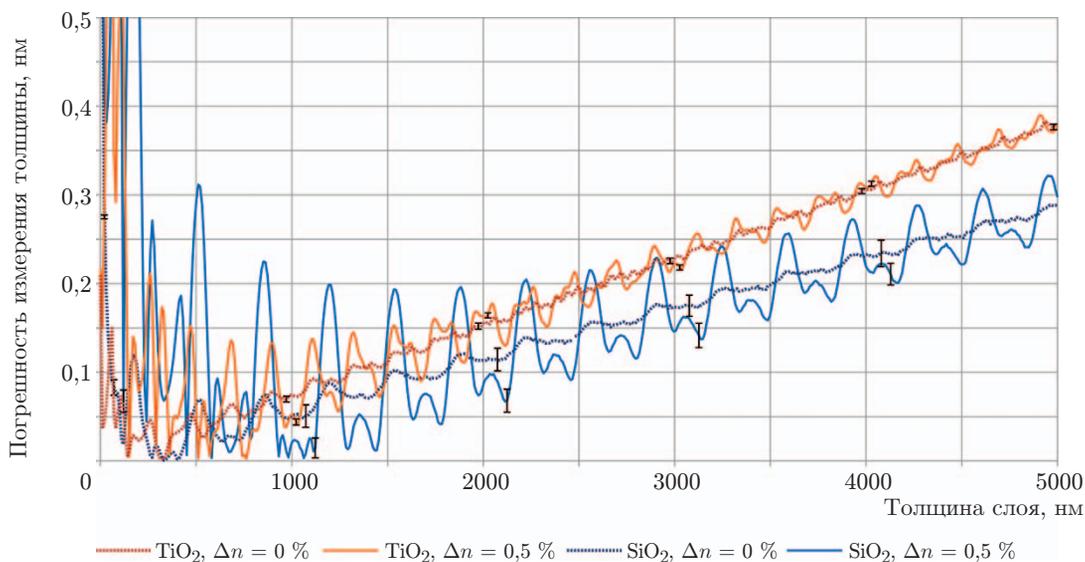


Рис. 8. Зависимости погрешностей измерения толщины слоя от толщины слоя

На рисунке видно, что погрешность показателя преломления вносит определяющий вклад в общую погрешность для толщин менее 1000–1500 нм. В данной области толщин также добавляется погрешность от дрейфа интенсивности источника излучения. При росте толщины слоя эти вклады в погрешность уменьшаются, а определяющую роль начинает играть погрешность профилирования, которая формирует зависимость, близкую к линейной (см. рис. 5).

Видно, что при погрешности показателя преломления материалов менее 0,5 % для материала TiO_2 на подложке BK7 возможно получение погрешности измерения физической толщины не более 0,2 нм при толщине контролируемого слоя 300–2400 нм, а для материала SiO_2 на подложке LASF-01 — при 800–2200 нм. При этом толщина наносимого слоя может быть меньше при использовании способа непрямого контроля и контрольных подложек с необходимой толщиной предварительно нанесённого слоя. Так, для напыления слоя TiO_2 толщиной 60 нм можно взять контрольную подложку с предварительно нанесённым слоем 1000 нм и снизить тем самым погрешность с 1,1 нм приблизительно до 0,1 нм, т. е. более чем на порядок.

Заключение. Разработанное программное обеспечение Deposition Control Simulator позволяет проводить моделирование системы непрямого контроля толщин наносимых слоёв с возможностью задания следующих параметров: шум линейки фотодетекторов, рабочий спектральный диапазон спектрометра, погрешность градуировки спектрометра по длинам волн (профилирования), дрейф интенсивности источника излучения, систематическая погрешность показателя преломления наносимых материалов.

По результатам моделирования системы контроля с помощью данного ПО можно дать следующие рекомендации для снижения погрешности измерения толщины наносимого слоя при использовании способа непрямого контроля:

1. Для каждого напыляемого материала следует выбирать такую контрольную подложку (или подложку с предварительно нанесённым слоем), чтобы значения показателей преломления материала и подложки (или предварительно нанесённого слоя на подложку) максимально различались.

2. Важно периодически менять контрольную подложку на новую по достижении определённой толщины слоя материала, например, 3000 нм на установке [3]. Это обусловлено линейно растущим с толщиной слоя влиянием погрешности профилирования.

3. Периодически (каждый час или каждый слой) необходимо калибровать систему контроля по калибровочной подложке для уменьшения систематической погрешности, вызванной дрейфом интенсивности источника излучения.

4. Для контроля тонких слоёв, которые являются первыми на контрольной подложке, рекомендуется иметь предварительно нанесённый слой материала достаточной толщины, в частности для слоёв толщиной менее 200 нм на установке [3], — около 1000 нм. Это позволит многократно сократить случайную погрешность, вызванную шумом линейки фотодетекторов, и систематические погрешности, обусловленные дрейфом интенсивности источника излучения и погрешностью показателя преломления материала слоя.

5. Для расширения диапазона контролируемых толщин и снижения погрешности их измерения желательно определять показатель преломления материала в ходе его нанесения, поскольку погрешность показателя преломления материала слоя ограничивает толщину слоя, выше которой контроль используемыми алгоритмами невозможен.

Моделирование с применением параметров системы контроля и установки [3] при погрешности показателя преломления наносимых материалов до 0,5 % показало возможность получения погрешности измерения физической толщины слоя не более 0,2 нм для материала TiO_2 на подложке BK7 при толщине контролируемого слоя 300–2400 нм и для материала SiO_2 на подложке LASF-01 при толщине 800–2200 нм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Wilbrandt S., Leitel R., Gabler D. et al.** In-situ broadband monitoring and characterization of optical coatings // Opt. Interference Coat. OSA Techn. Digest Ser. 2004. TuE6.
2. **Tikhonravov A., Trubetskov M.** Modern state of the art in design and monitoring of optical coatings // Proc. of the 52nd Annual Technical Conf. Society Vacuum Coaters. Santa Clara, USA, 2009. P. 7–11.
3. **Лабусов В. А., Семенов З. В., Зарубин И. А. и др.** Система спектрального контроля нанесения многослойных диэлектрических покрытий // Измерительная техника. 2013. № 12. С. 11–14.
4. **Zhupanov V. G., Klyuev E. V., Alekseev S. V. et al.** Indirect broadband optical monitoring with multiple witness substrates // Appl. Opt. 2009. 48, N 12. P. 2315–2320.
5. **Пат. 2527670 РФ.** Способ измерения толщин нанометровых слоев многослойного покрытия, проводимого в процессе его напыления /В. А. Лабусов, З. В. Семенов, Г. В. Эрг. Опубл. 10.09.2014, Бюл. № 25.
6. **Зарубин И. А., Гаранин В. Г., Лабусов В. А.** Применение малогабаритного спектрометра «Колибри-2» в атомно-эмиссионном анализе // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. 78, № 1-II. С. 86–89.
7. **Семенов З. В.** LayerControl: Программа для контроля толщин слоёв многослойных покрытий // Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. Опубл. 02.11.2015, № 2015661646.
8. **Amotchkina T., Trubetskov M., Tikhonravov A., Kruschwitz J.** Optical design: Advanced thin-film software techniques improve design-to-fabrication workflow // Laser Focus World. January 2015. URL: <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-51/issue-01/features/optical-design-advanced-thin-film-software-techniques-improve-design-to-fabrication-workflow.html> (дата обращения: 4.05.2017).
9. **Семенов З. В.** Deposition Control Simulator: Программа моделирования работы системы контроля // Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. Опубл. 11.03.2016, № 2016612869.
10. **Бабин С. А., Лабусов В. А.** Оценка оптимальных параметров многоэлементных твердотельных детекторов для сцинтилляционного атомно-эмиссионного спектрального анализа // Аналитика и контроль. 2014. 18, № 1. С. 40–49.
11. **Панкратов С. В., Лабусов В. А., Неклюдов О. А., Ващенко П. В.** Автоматическая градуировка спектрометров с анализаторами МАЭС по длинам волн (профилирование) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. 81, № 1-II. С. 128–134.
12. **Ocean Optics HL-2000-FHSA Specifications.** URL: <http://oceanoptics.com/product/hl-2000-family/> (дата обращения: 4.05.2017).

Поступила в редакцию 4 мая 2017 г.