

Система спектрального контроля нанесения многослойных диэлектрических покрытий

В. А. ЛАБУСОВ*, З. В. СЕМЕНОВ*, И. А. ЗАРУБИН*, М. С. САУШКИН*,
Г. В. ЭРГ**, С. И. КОВАЛЕВ**.

* Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия,
e-mail: labusov@vmk.ru

** Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

Создана система прецизионного спектрального контроля толщин слоев многослойных диэлектрических покрытий в широком спектральном диапазоне. Приведен пример использования системы для изготовления просветляющего покрытия с максимальным коэффициентом отражения 0,15 % в спектральном диапазоне 400—660 нм на вакуумной установке ВУ-2М.

Ключевые слова: многослойные диэлектрические покрытия, контроль напыления, спектрофотометрия, тонкие пленки.

A high-precision broadband monitoring system of multilayer dielectric coatings deposition has been created. An example of monitoring system application for manufacturing of antireflective coating with maximum reflectance 0,15 % in the spectral range 400—660 nm on vacuum unit VU-2M is presented.

Key words: multilayer dielectric coatings, sputtering control, spectrophotometry, thin films.

В настоящее время нанесение многослойных диэлектрических покрытий осуществляют в вакуумной или газонаполненной камере путем многократного последовательного напыления слоев из двух и более материалов с различными показателями преломления. Для получения требуемого спектра отражения (пропускания) покрытия (например, узкополосных и ступенчатых фильтров, лазерных зеркал, просветляющих покрытий в широком спектральном диапазоне и др.) часто необходимо наносить от нескольких десятков до сотни слоев с характерными толщинами от единиц до сотен нанометров, что предъявляет высокие требования к системе контроля толщины напыляемого слоя. Среди существующих методов контроля (акустических, спектральных, резонансных, магнитных и микрометрических) наиболее точные — спектрального контроля. Спектральный контроль может проводиться на одной или нескольких длинах волн и в широком спектральном диапазоне. Самым информативным, а в перспективе и самым точным, является метод контроля в широком спектральном диапазоне, основанный на измерении зависимости коэффициента отражения (пропускания) покрытия от длины волны. Существование доступных спектрометров с многоэлементными фотоприемниками дало возможность применять этот метод в промышленных установках нанесения многослойных диэлектрических покрытий [1, 2]. Однако при контроле часто принимают во внимание значения коэффициентов отражения (пропускания) только на нескольких длинах волн. Целесообразно для определения толщины слоя использовать весь зарегистрированный спектр (тысячи значений), что должно привести к снижению случайной погрешности определения толщины слоя.

Цель данной работы — ознакомить специалистов с системой контроля толщин слоев многослойных оптических покрытий в процессе их напыления, основанной на измерении зависимости коэффициента отражения от длины волны в диапазоне 525—1000 нм с последующим вычислением толщины слоя со случайной погрешностью 0,02 нм.

Система спектрального контроля. В состав системы входят спектрометр «Колибри-2» и специализированное программное обеспечение (ПО) LayerControl, поддерживающее интеграцию с пакетом численного расчета OptiLayer/OptiReOpt. Система поддерживает два метода контроля — прямой и непрямой по дополнительным контрольным подложкам.

На рис. 1 представлена схема системы спектрального контроля в составе вакуумной установки нанесения многослойных диэлектрических покрытий. В качестве источника излучения 1 использована галогенная лампа HL-2000-FHSA (производитель — Ocean Optics, дрейф менее 0,3 % в час, цветовая температура 2800 К, выходная мощность 7 Вт) с достаточно высокой интенсивностью излучения в диапазоне 400—1000 нм. Для компактности и удобства расположения элементов системы применены волоконно-оптические кабели 2, 13 с диаметром световода 1 мм. Поскольку система работает в режиме углов падения, близких к нормальным, вносимые волокном поляризационные изменения не являются значимыми. Излучение источника 1 попадает в световод 2, изображение торца которого диаметром 6 мм проецируется линзой 3 на контрольную подложку 8. Отраженное от подложки излучение собирается линзой 12 на торец световода 13 и подается на вход спектрометра 14. Линзы-ахроматы 3, 12 и торцы световодов 2, 13 расположены в блоке коллиматоров 15, обеспечивающем юстировку оптической системы контроля. Управление системой контроля и расчет толщины наносимого слоя происходит при помощи специализированного ПО LayerControl. В качестве вакуумной камеры 6 применяют модернизированную вакуумную установку ВУ-2М. Модернизация заключается, в первую очередь, в обеспечении жесткой механической связи между блоком коллиматоров 15 системы контроля и держателем контрольных подложек 7, 8, 9. Ввод и вывод излучения системы спектрального контроля осуществляется через

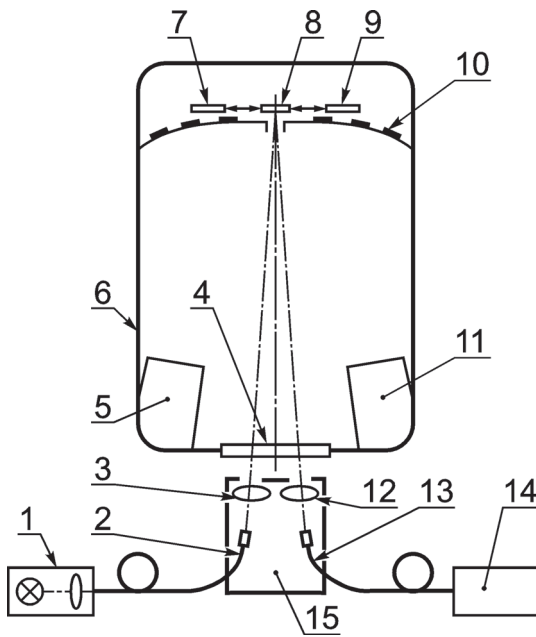


Рис. 1. Схема системы спектрального контроля:

1 — источник излучения; 2, 13 — волоконно-оптические кабели; 3, 12 — линзы; 4 — оптическое окно вакуумной камеры; 5, 11 — тигли с различными материалами; 6 — вакуумная камера; 7, 9 — контрольные подложки, скрытые от напыления; 8 — контрольная подложка, доступная для напыления; 10 — рабочие подложки, на которые наносится целевое многослойное покрытие; 14 — спектрометр «Колибри-2»; 15 — блок коллиматоров

окно 4. Материалы наносят на рабочие подложки 10 и доступную для напыления контрольную подложку 8 методом электронно-лучевого испарения из соответствующих водоохлаждаемых тиглей 5, 11 с ассистированием кислородной плазмой, получаемой при помощи плазмотрона оригинальной конструкции. Это позволяет получить плотные и стабильные пленки оксидов (SiO_2 , ZrO_2 , HfO_2 , Nb_2O_5 , TiO_2) почти стехиометрического состава. Держатель контрольных подложек 7, 8, 9 обеспечивает их смену для проведения калибровки системы контроля и при изменении материала очередного наносимого слоя.

Зависимость коэффициента отражения от длины волны можно рассчитать следующим образом:

$$R(\lambda) = R_k(\lambda) (U(\lambda) - U_T(\lambda)) / (U_k(\lambda) - U_T(\lambda)), \quad (1)$$

где $R_k(\lambda)$ — коэффициент отражения калибровочной подложки; $U(\lambda)$, $U_T(\lambda)$, $U_k(\lambda)$ — выходные сигналы спектрометра в ходе контроля, в отсутствие излучения (темновой сигнал) и при установке калибровочной подложки в область спектрального контроля, соответственно. Сигналы $U_T(\lambda)$, $U_k(\lambda)$ измеряем спектрометром системы контроля в процессе калибровки, а $R_k(\lambda)$ — предварительно на стационарном спектрометре. Обратная сторона контрольных подложек матирована, поэтому вклад отражения от второй границы подложки в $R_k(\lambda)$ существенно ослаблен.

Спектры отражения регистрируем спектрометром «Колибри-2», созданным по схеме Черни-Тернера на основе плоской дифракционной решетки и линейки фотодиодов [3]. Технические характеристики спектрометра: рабочий спектральный диапазон 525—1000 нм; разрешение 0,4 нм; дина-

мический диапазон (при однократной регистрации спектра) 10^4 ; уровень рассеянного света 0,05 %; нелинейность фотоотклика 0,5 %; фокусное расстояние 100 мм; относительное отверстие 1:6; количество фотодиодов 2580; размер фотодиода $12,5 \times 1000$ мкм; минимальное время экспозиции 8 мс; габаритные размеры $150 \times 200 \times 80$ мм; масса 3 кг.

Программное обеспечение LayerControl входит в состав системы контроля и осуществляет:

- импорт дизайна покрытия (материал и толщина слоев покрытия, порядок их расположения, а также материал подложки) из программного обеспечения OptiLayer [4];

- автоматическое разбиение дизайна покрытия в случае проведения непрямого контроля с использованием нескольких контрольных подложек. На рис. 2 представлена схема разбиения дизайна по двум контрольным подложкам;

- калибровку системы по подложке с известным $R_k(\lambda)$;

- измерение зависимости коэффициента отражения от длины волны в спектральном диапазоне контроля;

- визуализацию расчетной и экспериментальной зависимостей коэффициента отражения контрольной подложки от длины волны;

- расчет текущей толщины напыляемого слоя и визуализацию ее отклонения от проектной толщины слоя. Расчет толщины реализован через взаимодействие с библиотекой численного расчета OptiReOpt [5];

- сигнализацию оператору о завершении напыления слоя;

- визуализацию скорости напыления для контроля однородности слоя;

- возможность ручного изменения дизайна покрытия в процессе нанесения слоя;

- сохранение последовательности измеренных спектров отражения за время напыления каждого слоя покрытия для последующего анализа.

Программное обеспечение LayerControl поддерживает прямой и непрямой методы контроля. При прямом методе контроля используется одна контрольная подложка, напыление слоев на которую проводится одновременно с напылением на рабочие подложки. Многослойные покрытия на контрольной и рабочих подложках совпадают. Недостаток такого метода — существенная зависимость погрешности определения толщин слоев от спектра напыляемого покрытия. Например, при создании просветляющего покрытия в области, перекрывающей диапазон спектрального контроля, спектр отражения, начиная с некоторого слоя, практически не изменяется с утолщением слоя и не имеет выраженных экстремумов (рис. 3, а), что существенно увеличивает погрешность определения толщин напыляемых слоев.

Более универсальным является метод непрямого контроля по двум и более контрольным подложкам, на каждую из которых напыляется только один материал (см. рис. 2). При напылении каждого материала только одна контрольная подложка находится в области напыления и контроля, остальные же скрыты от осаждения материала. Спектр отражения такой контрольной подложки имеет характерный вид, близкий к гармоническому (рис. 3, б, в). Это гарантирует наличие экстремумов и их изменение в процессе напыления в области контроля. Как результат, погрешность определения толщины слоя не зависит от спектральной задачи.

Технология нанесения покрытия с применением непрямого метода контроля. Первый этап создания покрытия, соответствующего спектральной задаче — расчет дизайна



Рис. 2. Схема разбиения дизайна по двум контрольным подложкам при непрямом методе контроля напыления

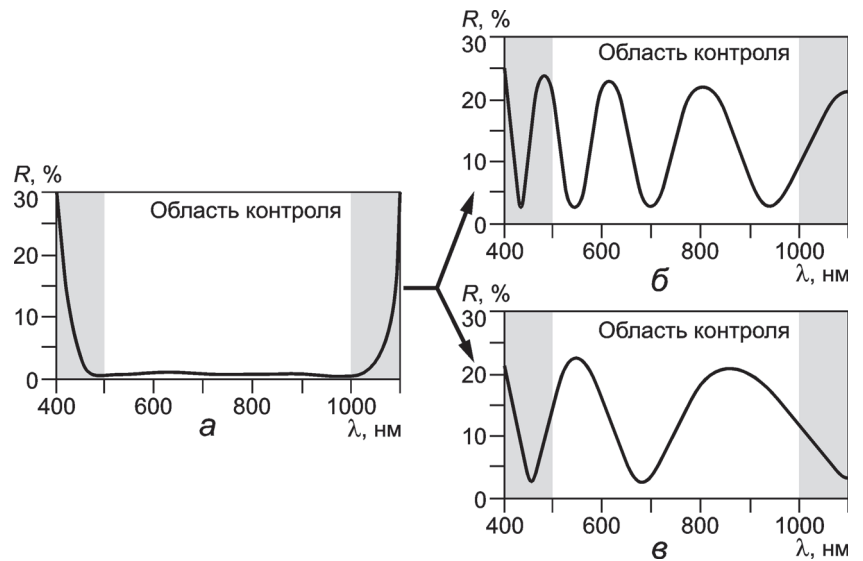


Рис. 3. Спектры отражения контрольных подложек при прямом (а) и непрямом (б, в) методах контроля напыления

покрытия для используемых материалов и подложек. Он проводится в программном пакете численного расчета OptiLayer, который кроме этого учитывает погрешности контроля и нанесения слоев и моделирует возможные спектральные отклонения в покрытии. Далее дизайн покрытия переносится в ПО спектрального контроля LayerControl. При этом он автоматически разбивается на вспомогательные дизайны покрытий для отдельных контрольных подложек под соответствующие материалы. Затем на вакуумной установке вращением держателя контрольных подложек устанавливается калибровочная подложка в область светового пятна системы контроля. Система проводит калибровку путем измерения темнового сигнала $U_t(\lambda)$ и выходного сигнала спектрометра $U_k(\lambda)$. После этого устанавливается контрольная подложка и наносится первый слой, по завершении которого меняется контрольная подложка и материал и наносится второй слой, и т. д. Коэффициент отражения $R(\lambda)$ вычисляется из выходного сигнала спектрометра $U(\lambda)$ в соответствии с (1). Нанесение покрытия контролируется в реальном времени ПО LayerControl с визуализацией спектра отражения в диапазоне контроля 525–1000 нм.

При таком способе нанесения покрытия на вакуумной установке ВУ-2М, оснащенной системой контроля, были получены следующие характеристики контроля: время измерения спектра отражения от 8 мс; время измерения толщины текущего слоя 1 с; случайная погрешность измерения (среднее квадратическое отклонение результатов измерения) толщины слоя 0,02 нм; случайная погрешность напыления слоя 1,0 нм.

Имеющаяся случайная погрешность измерения толщины слоя 0,02 нм существенно меньше размера атома водорода, что, на первый взгляд, кажется ошибкой. Однако это погрешность измерения средней толщины слоя по диаметру светового пятна 6 мм, которая получена вследствие высокой информативности регистрируемых спектров отражения, содержащих 2580 точек спектра с динамическим диапазоном 4 порядка. Таким образом, минимальное детектируемое приращение толщины наносимого слоя не превышает 0,02 нм. Значение случайной погрешности нанесения слоя в большей степени определяется конструкцией вакуумной

установки, механизмом прекращения нанесения материала, характеристиками применяемых материалов и системой ассистирования.

По значению случайной погрешности измерения толщин слоев на экспериментальной установке в ходе тестирования системы удалось обнаружить эффект «паразитного подпыления» даже при закрытых заслонках, скорость которого в некоторых случаях достигала 2 нм/мин. Подпыление устраняется при выключении электронно-лучевого испарителя по окончании напыления каждого из слоев.

Применение системы контроля. На вакуумной установке ВУ-2М, оснащенной системой спектрального контроля, были изготовлены сотни многослойных оптических покрытий: зеркала, ступенчатые спектральные фильтры, просветляющие покрытия в широком спектральном диапазоне и др., в том числе покрытия для спектральных областей, не пересекающихся со спектральным диапазоном контроля. Так, например, были изготовлены плотные зеркала для инфракрасной области 2600–3400 нм. В таких случаях основным требованием являлась прозрачность в диапазоне контроля материалов, используемых в покрытии.

В качестве примера приведем решение актуальной задачи создания просветляющего покрытия (AR-фильтра) [6]. Требуется получить коэффициент отражения $R(\lambda)$ от подложки с покрытием не более 0,3 % в спектральном диапазоне

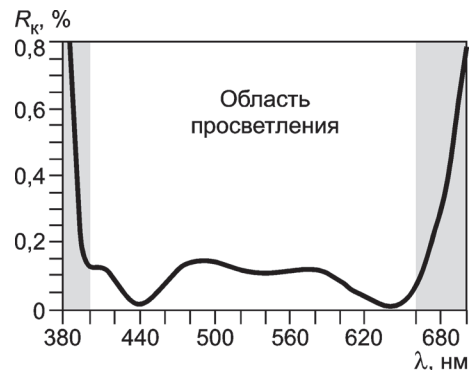


Рис. 4. Спектр отражения подложки с многослойным просветляющим покрытием

400—660 нм. Для изготовления просветляющего покрытия используем материалы TiO_2 , SiO_2 , MgF_2 . Дизайн покрытия содержит 9 слоев. На рис. 4 приведен спектр отражения подложки с многослойным покрытием для созданного просветляющего покрытия. В спектральном диапазоне 400—660 нм покрытие имеет максимальный коэффициент отражения $R(\lambda) = 0,15\%$, что близко к результатам численного расчета дизайна покрытия и с запасом удовлетворяет требованиям поставленной задачи.

Заключение. Создана система прецизионного спектрального контроля толщин слоев многослойных диэлектрических покрытий в широком спектральном диапазоне. Она основана на измерении зависимости $R(\lambda)$ в диапазоне 525—1000 нм с последующим вычислением толщины слоя в реальном времени и имеет случайную погрешность определения толщины 0,02 нм. В состав системы входят спектрометр «Колибри-2» и специализированное ПО LayerControl, поддерживающее интеграцию с пакетом численного расчета OptiLayer/OptiReOpt. Система поддерживает два метода контроля — прямой и непрямой по дополнительным контрольным подложкам. С ее применением на вакуумной установке ВУ-2М было изготовлено большое количество различных многослойных покрытий, в том числе просветляющее покрытие с максимальным коэффициентом отражения 0,15 % в спектральном диапазоне 400—660 нм.

Литература

1. Badoil B. e. a. Manufacturing of an absorbing filter controlled by a broadband optical monitoring // OSA. Opt. Express. 2008. V. 16. N 16. P. 12008—12017.
2. Wilbrandt S. e. a. In-situ broadband monitoring and characterization of optical coatings // OSA. Opt. Interference Coat. 2004.
3. Лабусов В. А. и др. Многоканальный спектрометр «Колибри-2» и его использование для одновременного определения щелочных и щелочноземельных металлов методом пламенной фотометрии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. Спец. выпуск. 2007. Т. 73. N S. С. 35—39.
4. Tikhonravov A. V., Trubetskov M. K. Computational manufacturing as a bridge between design and production // OSA. Appl. Opt. 2005. V. 44. N 32. P. 6877—6884.
5. Программный пакет «OptiLayer thin film software» [электрон. ресурс]. <http://www.optilayer.com> (дата обращения: 23.05.2013 г.).
6. Schulz U. Wideband antireflection coatings by combining interference multilayers with structured top layers // OSA. Opt. Express. 2009. V. 17. N 11. P. 8704—8708.

Дата принятия 24.09.2013 г.

ИЗМЕРЕНИЯ В ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

658.562

Достоверность результатов реализации измерительных информационных технологий

Б. Н. МАРКОВ, О. Н. МЕЛИКОВА

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
Москва, Россия, e-mail: bnmarkov@rambler.ru.

Предложена система характеристик достоверности результатов, достигаемых при реализации измерительных информационных технологий: контроля изделий, производственных процессов и систем, диагностики, распознавания образов. При этом измерительные информационные технологии рассматривают как процессы классификации объектов.

Ключевые слова: классификация объектов, ошибки 1-го и 2-го рода, характеристики достоверности.

A system of characteristics of the results validity achieved at implementation of the measuring information technologies of control of products, production processes and systems, technical diagnostics and pattern recognition is suggested. At the same time the measuring information technologies are considered as the processes of objects classification.

Key words: objects classification, first kind error, second kind error, validity characteristics.

По мере развития измерительные информационные системы приобретают черты информационных аналитических систем специализированного направления, широко используемых для решения поставленных задач методами анализа данных, машинного обучения и искусственного интеллекта (рис. 1) [1].

Признаки, характеризующие объект/процесс наблюдения (из генеральной совокупности объектов/процессов) или его

состояние (из множества возможных состояний), воспринимаются полем сенсоров, образующих систему добычи данных. Извлеченные данные подвергаются статистическому анализу, в результате приобретаются знания об объекте или процессе наблюдения и их состояниях.

Блок управления полем сенсоров активизируется по команде системы анализа данных и осуществляется сканирование объекта при помощи сенсоров в пространстве (пе-