

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПОСТОЯННЫХ ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ВО ВРЕМЯ ИХ ОСАЖДЕНИЯ В ВАКУУМЕ

© 2008 г. С.В. Андреев, канд. техн. наук; Э.С. Путилин, доктор техн. наук

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: AndreevSV@rambler.ru

Предложен метод контроля оптических постоянных и толщины слоя во время его осаждения в вакууме по измерениям коэффициентов отражения и пропускания на двух подложках с различными показателями преломления. Все четыре измеряемых сигнала, а также сигнал фоновой засветки контролируются монохромным пространственным приемником излучения. Апробация системы проводилась на пленках никеля толщиной до 80 нм.

Коды OCIS: 310.6860, 310.3840.

Поступила в редакцию 27.11.2007.

Использование оптических приборов и методов исследования в различных областях науки и техники приводит к необходимости создания многослойных диэлектрических, металлодиэлектрических систем с более жесткими требованиями к их свойствам. Это в первую очередь оптические, физико-механические, химические и другие свойства. Из оптических свойств следует упомянуть непрерывно расширяющийся спектральный диапазон работы приборов, ужесточение требований к лучевой стойкости и механической прочности покрытий, сочетание возможности отражения (пропускания) и формирования волнового фронта отраженного (прошедшего) излучения. В некоторых случаях требуется работа покрытий в сходящихся или расходящихся пучках, когда ужесточаются требования к их поляризационным свойствам.

Пленки, нанесенные на преломляющие и отражающие грани оптических элементов, позволяют формировать требуемые спектральные характеристики, которые могут быть получены благодаря уникальным свойствам тонкопленочных систем. Незначительная масса и относительная простота реализации (например, путем термического или электронно-лучевого испарения веществ в вакууме) позволяют широко применять интерференционные покрытия.

Особый интерес представляют интерференционные покрытия, включающие в себя слой металла. К этой группе покрытий относятся зеркала (как металлические, так и металлодиэлектрические), ослабляющие светофильтры для широкого спектрального диапазона, градиентные ослабители (оттенители) и металлодиэлектрические светофильтры.

Последние обладают рядом достоинств по сравнению с другими: широкая полоса гашения в нерабочей зоне спектра, относительная простота в изготовлении, возможность получения светофильтров в ультрафиолетовой области спектра. На оптические характеристики (пропускание, отражение) металлодиэлектрических покрытий влияют оптические параметры металлических слоев, которые в свою очередь зависят не только от чистоты осаждаемого материала, но и от условий формирования покрытия.

Поскольку воздействие атмосферы приводит к изменениям структуры покрытия, то для исследования динамики свойств покрытия необходимо проводить измерения в вакууме непосредственно в процессе его изготовления, что позволит отследить не только изменение параметров слоя металла по мере увеличения толщины пленки, но и последующие изменения во время повышения давления и в процессе эксплуатации. Наиболее легко реализуемы фотометрические методы контроля при нормальном падении излучения. Существуют две разновидности контроля, удовлетворяющие вышесказанному, – это измерение коэффициентов отражения и пропускания при формировании покрытия на двух подложках с различными показателями преломления и измерение коэффициентов отражения и пропускания на двух длинах волн [1].

Наиболее удовлетворительным образом рассмотрение оптических свойств тонких пленок может быть построено на основе электромагнитной теории, которая обеспечивает относительно полный и последовательный учет интерференционных и поляризационных эффектов в многослойных пленоч-

ных системах всех типов. Оптические свойства слоя полностью описываются показателем преломления $\tilde{n} = n - ik$ (где n – главный показатель преломления и k – главный показатель поглощения) и геометрической толщиной d . Предполагается, что показатель преломления n_0 среды, со стороны которой происходит падение света, является вещественной величиной. Среда, в которую свет распространяется, характеризуется комплексным показателем преломления $\tilde{n}_l = n_l - ik_l$, где n_l и k_l – главные показатели преломления и поглощения подложки соответственно. Падающий свет описывается бесконечно протяженной плоской линейно-поляризованной монохроматической волной. Для расчета оптических свойств тонких пленок наиболее приемлемым является матричный метод описания оптических свойств многослойных интерференционных систем. Матрица интерференции слоя имеет вид

$$\begin{bmatrix} \tilde{m}_{11} & i\tilde{m}_{12} \\ i\tilde{m}_{21} & \tilde{m}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\tilde{\varphi} & i(\sin\tilde{\varphi})/\tilde{n} \\ i\tilde{n}\sin\tilde{\varphi} & \cos\tilde{\varphi} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Здесь $\tilde{m}_{jk} = m_{jk} + im'_{jk}$ – комплексный элемент матрицы, $\tilde{\varphi} = \varphi - i\varphi'$ – фазовая толщина слоя, где $\varphi = 2\pi nd/\lambda$, $\varphi' = 2\pi kd/\lambda$, λ – длина волны падающего излучения.

При таком представлении матричные элементы можно записать в виде

$$\begin{aligned} m_{11} &= \cos\varphi\cosh\varphi', & m_{22} &= \cos\varphi\cosh\varphi', \\ m'_{11} &= \sin\varphi\sinh\varphi', & m'_{22} &= \sin\varphi\sinh\varphi', \\ m_{12} &= (n\sin\varphi\cosh\varphi' + k\cos\varphi\sinh\varphi')/(n^2 + k^2), \\ m'_{12} &= (k\sin\varphi\cosh\varphi' - n\cos\varphi\sinh\varphi')/(n^2 + k^2), \\ m_{21} &= n\sin\varphi\cosh\varphi' - k\cos\varphi\sinh\varphi', \\ m'_{21} &= -k\sin\varphi\cosh\varphi' - n\cos\varphi\sinh\varphi'. \end{aligned} \quad (2)$$

Поскольку в ходе измерений определяются энергетические коэффициенты отражения и пропускания, то формулы для амплитудных коэффициентов отражения и пропускания не приводятся. Энергетические коэффициенты отражения и пропускания определяются формулами

$$R = (V^2 + Z^2)/(X^2 + Y^2), \quad T = 4n_0n_l/(X^2 + Y^2), \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} V &= n_0m_{11} + m'_{21} - n_l(n_0m'_{12} + m_{22}) + k_l(n_0m_{12} - m'_{22}), \\ Z &= n_0m'_{11} - m_{21} + n_l(n_0m_{12} - m'_{22}) + k_l(n_0m'_{12} + m_{22}), \\ X &= n_0m_{11} - m'_{21} - n_l(n_0m'_{12} - m_{22}) + k_l(n_0m_{12} + m'_{22}), \\ Y &= n_0m'_{11} + m_{21} + n_l(n_0m_{12} + m'_{22}) + k_l(n_0m'_{12} - m_{22}). \end{aligned} \quad (4)$$

Поскольку при решении прямой задачи контроля на двух длинах волн необходимо учитывать различие фазовых толщин во всех матричных элементах, а на подложках с разным показателем преломления матричные элементы одинаковы и показатель преломления подложки учитывается только в конечных формулах расчета R и T , такой подход позволяет практически вдвое уменьшить время расчета. Для удобства юстировки и снятия ограничений по количеству измеряемых сигналов по качеству фотоприемника использован пространственный приемник излучения, который имеет высокую чувствительность в широкой области спектра (включая ближнюю инфракрасную). На нем фокусируются все четыре пучка (два прошедших через контрольные образцы и два отраженных от них), а также фоновая засветка. В качестве источников излучения использовались полупроводниковые лазеры EL65LM8 с мощностью излучения 2 мВт на длине волны 650 нм. Для контроля на двух длинах волн можно установить второй лазерный модуль с длиной волны излучения 940 нм. На объектив видеокамеры устанавливается узкополосный светофильтр, обладающий полушириной $\delta\lambda \approx 2$ нм, что значительно ослабляет фоновую засветку от испарителей в неиспользуемой части спектрального диапазона. Зона снимаемой для обработки области изображения для каждого источника указывается оператором с помощью ручного манипулятора (мышь). Поскольку нет необходимости обрабатывать все изображение, захватывается массив вокруг указанной области размером 10×10 точек и проводится усреднение сигнала. Оцифрованные сигналы корректируются по массиву с данными градуировки спектральной чувствительности монохромного пространственного приемника излучения. Такой подход позволяет при незначительных изменениях оптической схемы (изменение типа и расположения источников излучения) реализовывать несколько методов контроля, изменяя алгоритм расчета в программе. Определенные интенсивности отраженных и прошедших пучков пересчитываются с учетом второй поверхности, т. е. с учетом соотношений

$$R_{31} = (n_{l1} - n_0/n_{l1} + n_0)^2,$$

$$R_{32} = (n_{l2} - n_0/n_{l2} + n_0)^2,$$

где R_{31} и R_{32} – коэффициенты отражения от передней поверхности подложки (используется для калибровки схемы), $n_0 = 1$, $n_{l1} = 1,44$ (КЛ1), $n_{l2} = 2,18$ (СТФ3) – показатели преломления используемых сред;

$$T_{31} = 1 - R_{31},$$

$$T_{32} = 1 - R_{32},$$

где T_{31} и T_{32} – коэффициенты пропускания от передней поверхности подложки (используется для калибровки схемы);

$$R_{n1} = R_{31}(I_{R1} - I_0)/(I_{31} - I_{03}),$$

$$R_{n2} = R_{32}(I_{R2} - I_0)/(I_{32} - I_{03}),$$

где R_{n1} и R_{n2} – измеренные коэффициенты отражения, I_{R1} , I_{R2} , I_0 – измеренные интенсивности отраженного излучения от обеих подложек и фоновой засветки, а I_{03} , I_{31} , I_{32} – фоновый сигнал и интенсивности излучения от чистой подложки;

$$T_{n1} = T_{31}(I_{T1} - I_0)/(I_{31} - I_{03}),$$

$$T_{n2} = T_{32}(I_{T2} - I_0)/(I_{32} - I_{03}),$$

где T_{n1} и T_{n2} – измеренные коэффициенты пропускания, I_{T1} , I_{T2} , I_0 – измеренные интенсивности прошедшего излучения от обеих подложек и фоновой засветки, а I_{03} , I_{31} , I_{32} – фоновый сигнал и интенсивности излучения от чистой подложки;

$$T_1 = T_{n1}/T_{31},$$

$$T_2 = T_{n2}/T_{32},$$

где T_1 и T_2 – коэффициенты пропускания поверхности плоскопараллельных подложек с учетом отражения от второй поверхности;

$$R_1 = R_{n1} - R_{31}T_1^2,$$

$$R_2 = R_{n2} - R_{32}T_2^2,$$

где R_1 и R_2 – коэффициенты отражения от поверхности плоскопараллельных подложек с учетом второй поверхности.

Эти данные измерений отображаются на дисплее и сохраняются для последующей обработки.

Таким образом, задача сводится к определению значений параметров $n \pm \Delta n$, $k \pm \Delta k$ и $d \pm \Delta d$ при выполнении следующих условий:

$$\begin{aligned} T_1 - \Delta T_1 < T_1 < T_1 + \Delta T_1, \\ T_2 - \Delta T_2 < T_2 < T_2 + \Delta T_2, \\ R_1 - \Delta R_1 < R_1 < R_1 + \Delta R_1, \\ R_2 - \Delta R_2 < R_2 < R_2 + \Delta R_2, \end{aligned} \quad (5)$$

где ΔT_1 , ΔT_2 , ΔR_1 , ΔR_2 – погрешности измерения значений соответствующих величин.

Решая одновременно четыре системы уравнений (см. (3), (4)), получаем значения физически реали-

зуемых параметров, определяющих осаждаемый слой. Другими словами, в общем виде это есть задача минимизации определенной целевой функции. Вид этой функции выбирается из физических соображений так, чтобы в пространстве искомых параметров координаты ее минимума соответствовали решению. Из-за невозможности получения аналитических решений для всех параметров отражающей системы, состоящей из однородного изотропного слоя, находящегося на изотопной подложке, рассмотрим возможный алгоритм поиска решения с помощью численных методов.

Итак, мы имеем три неизвестных (n , k , d) и четыре системы зависящих от них уравнений. При этом имеются измеренные величины T_1 , T_2 , R_1 , R_2 , удовлетворяющие неравенствам (5). Поскольку система может иметь несколько решений, введем дополнительные условия, накладывающие определенные ограничения на диапазон решений. Во-первых, введем диапазон, в котором ожидается нахождение n и k , а во-вторых, примем условие, что d возрастает от измерения к измерению, начиная с нуля и далее с некоторым конечным приращением.

Можно использовать следующие численные методы:

- 1) метод Ньютона,
- 2) метод простой итерации,
- 3) метод спуска.

В данном случае наиболее подходящим будет метод Ньютона. Он оптимально находит решения системы неоднородных трансцендентных уравнений, если известны начальные значения искомых параметров, и дает высокую точность решений.

Рассмотрим еще один способ определения параметров n , k , d . Суть метода сводится к последовательному подбору их значений с учетом условий (5). В целях оптимизации расчета введем изменение приращения шага аргументов функции. По результатам решения прямой задачи определяем максимальное и минимальное значения параметров слоя, т. е. $n + \Delta n$, $k + \Delta k$ и $d + \Delta d$ и $n - \Delta n$, $k - \Delta k$ и $d - \Delta d$. Однако этот способ имеет низкую скорость поиска решения.

В нашем случае наиболее эффективным будет разделение процессов расчета и определения искомых параметров во времени, поскольку имеется достаточно времени при подготовке вакуумной камеры к осаждению. К тому же данные расчета можно сохранить и использовать неоднократно. Для процесса поиска необходимого решения можно заранее рассчитать все значения T_1 , T_2 , R_1 , R_2 в возможном диапазоне изменения n , k , d , организовав массив искомых параметров с адресацией, прямо связанной со значениями измеряемых парамет-

ров. Это, конечно, приведет к излишним расчетам, но освободит время при контроле осаждения. При таком подходе реализуется высокая скорость поиска необходимого решения при хранении больших объемов информации.

Программа написана на языке программирования высокого уровня C++ [3] и представляет собой два окна, на одно из которых выводится изображение с видеокамеры, подключенной к компьютеру, а на другое – данные, полученные после обработки этого видеоизображения.

В начальной точке программы инициализируется COM-библиотека AVStreamServer.dll. Для инициализации ей передается адрес окна, на которое будет выводиться видеопоток; разрешение, с которым плате видеообработки следует захватывать изображение; глубина цвета (YUV, RGB и пр.) или яркости для черно-белых видеокамер. Библиотека также поддерживает создание коллекции устройств (в данном случае видеокамер). При наличии дополнительных видеокамер существует возможность их выбора.

Программа разбита на несколько модулей dll (dynamic linked library), которые динамически подключаются к ней. При этом реализация выбранного алгоритма входит в отдельный модуль, отвечающий за расчет данных. На вход этого модуля поступают данные видеоизображения, а выходные данные сразу же отображаются. Второй модуль – это библиотека, в которой осуществляются все настройки и формируется видеопоток. Существенное достоинство подобных библиотек состоит в том, что применение кода, находящегося в них, возможно при использовании любого языка программирования, от Бейсика до Паскаля.

Разбиение программы на подобную структуру идеологически может быть обусловлено более рациональным и совершенным, с точки зрения

быстродействия, взаимным влиянием компонентов. Вместе с тем, с точки зрения алгоритма, это гарантирует его взаимозаменяемость.

Программное обеспечение позволяет визуально контролировать точность юстировки оптической системы, проводить запись потока данных прямых измерений, графически отображать изменение коэффициентов отражения и пропускания и контролировать параметры слоя. Для упрощения контроля толщины слоев диэлектрика отображается знак первой производной коэффициента пропускания и контролируется число прошедших экстремумов.

Рассматриваемая система контроля осаждения определяет показатель преломления, главный показатель поглощения и толщину тонких металлических пленок (т. е. частично прозрачных) в процессе осаждения по измерениям коэффициентов отражения и пропускания слоя на двух подложках с различными показателями преломления. Апробация системы проводилась на тонких пленках никеля толщиной до 80 нм. При использовании видеокамеры с 10-битным АЦП погрешность определения толщины слоя не превышает 4% во всем исследуемом диапазоне толщин, а показателя преломления и главного показателя поглощения – 5%.

В программе также может задаваться алгоритм управления заслонками испарителей. Коды команд передаются на параллельный порт. Для расширения возможностей управления вакуумной установкой была разработана отдельная плата выходов, обеспечивающая гальваническую развязку параллельного порта компьютера от вакуумной установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Андреев С.В., Карасев Н.Н., Путилин Э.С., Шакин А.О.* Автоматизация фотометрического контроля толщины осаждаемых слоев // Изв. вузов. Электроника. 2003. № 6. С. 85–90.