

УДК 53.082.53

doi: 10.18698/0536-1044-2019-4-18-27

Анализ неразрушающих методов измерения и контроля толщины тонких пленок

А.Е. Шупенев, Н.С. Панкова, И.С. Коршунов, А.Г. Григорьянц

МГТУ им. Н.Э. Баумана

An Analysis of Non-Destructive Methods for Thin Film Thickness Measurement

A.E. Shupenev, N.S. Pankova, I.S. Korshunov, A.G. Grigoryants

Bauman Moscow State Technical University

Толщина тонких пленок определяет их уникальные свойства, благодаря которым они нашли широкое распространение в электронной и оптической отраслях промышленности. Для измерения толщины пленок в диапазоне 1 нм...1 мкм в процессе их нанесения или в готовом изделии важно использовать неразрушающие методы ее контроля. Проведен анализ наиболее применяемых методов неразрушающего контроля и измерения толщины тонких пленок как с возможностью *in situ* контроля технологического процесса, так и для испытания готовых образцов. Рассмотрены теоретические и практические особенности методов дифракции быстрых электронов, использования пьезоэлектрического эффекта, интерферометрического и гравиметрического методов исследования толщины тонких пленок. Приведенные результаты могут быть использованы для выбора оптимального метода получения тонких пленок при выполнении исследовательских и прикладных задач.

Ключевые слова: толщина тонких пленок, методы *in situ*, дифракция быстрых электронов, многолучевая интерферометрия, гравиметрический метод

The thickness of thin films determines the films' unique properties, due to which they are widely used in optics and electronics. To measure the thickness of films in the range of 1 nm — 1 μm during film deposition or on a finished product, it is important that non-destructive measurement methods should be used. An analysis of the most commonly used non-destructive methods for measuring and controlling the thickness of thin films is performed, with a possibility of *in situ* control of the technological process as well as for testing of finished products. This work describes theoretical and practical considerations of using reflection high-energy electron diffraction, piezoelectricity, interferometry and gravimetric methods for thin film thickness measurements. The results of the study can be used for selecting an optimal method of obtaining thin films when conducting theoretical and applied research.

Keywords: thin film thickness, *in situ* methods, reflection high-energy electron diffraction, multiple-beam interferometry, gravimetric method

Толщина тонких пленок (ТП) определяет их уникальные свойства, благодаря которым они получили широкое распространение в промышленности.

Методы *in situ* позволяют контролировать и измерять характеристики осаждаемых слоев

непосредственно при проведении технологического процесса, благодаря чему они обладают следующими достоинствами. Во-первых, эти методы дают возможность отслеживать влияние режимов осаждения на толщину ТП и, соответственно, регулировать их для дости-

жения необходимого результата [1]. Во-вторых, контроль ограничен по времени длительностью процесса напыления. В-третьих, такие методы исключают влияние человеческого фактора (например, случайного повреждения или загрязнения ТП при извлечении из рабочей камеры) на достоверность результатов измерения. В-четвертых, методы *in-situ* имеют неразрушающий характер.

В отличие от методов *in situ* контроль толщины *ex situ* может носить как неразрушающий, так и разрушающий характер. Главным преимуществом первого над вторым является возможность дальнейшего использования ТП по назначению. Поэтому предпочтение отдается измерениям неразрушающего характера. Следует иметь в виду, что один и тот же метод для ТП разного типа может быть как разрушающим, так и неразрушающим.

Цель работы — анализ теоретических и практических особенностей наиболее применяемых методов неразрушающего контроля и измерения толщины тонких пленок, получаемых методами физического осаждения в вакууме.

Дифракция быстрых электронов на отражение. В научной литературе встречаются различные термины, используемые для обозначения этого метода: «дифракция быстрых электронов (ДБЭ)» [2–4], «дифракция быстрых электронов на отражение (ДБЭО)» [4–7], «дифракция отраженных быстрых электронов (ДОБЭ)» [8] и «дифракция быстрых отраженных электронов (ДБОЭ)» [9]. Перечисленные названия соответствуют аббревиатуре RHEED (Reflection High Energy Electron Diffraction), если под ними подразумевают дифракционный метод исследования поверхности посредством ее облучения быстрыми электронами под скользящими углами. В этих условиях электроны отражаются от поверхностного слоя, и рассеянные частицы регистрируются с той же стороны, с которой падает зондирующий пучок [8].

Это замечание представляется важным, так как в некоторых литературных источниках термин «ДБЭ» четко отделен от остальных трех, поскольку подразумевает совершенно другой метод, основанный на прохождении лучей сквозь исследуемый объект [8, 10].

Метод ДБЭО традиционно применяют в сверхвысоковакуумных установках для выра-

щивания различных структур (особенно полупроводниковых [7]), например, в модулях для молекулярно-лучевой эпитаксии и импульсного лазерного осаждения PLD (Pulsed Laser Deposition) [5, 6]. С помощью ДБЭО в реальном времени отслеживают следующие данные о процессе роста ТП: изменение кристаллической структуры растущей пленки (по дифракционной картине), шероховатость растущей поверхности (по яркости рефлексов), скорость роста ТП (по осцилляциям интенсивности рефлексов) и толщину выращиваемого слоя (на атомном уровне) [6].

Информацию о структуре и перечисленных параметрах получают из анализа дифракционной картины (рис. 1), наблюдаемой на флуоресцентном экране при падении на него дифрагированных электронов [4].

Регистрация дифракционных изображений происходит с помощью видеокамеры, видеосигнал с которой обрабатывает ЭВМ [7].

Метод определения толщины ТП с использованием ДБЭО основан на осцилляционном характере изменения интенсивности отраженного луча (рефлекса ДБЭО) [3]. Осцилляции соответствуют периодическому изменению плотности ступеней, образующихся при случайном соединении относительно слабо подвижных атомов. Интенсивность отраженного электронного пучка максимальна в случае гладкой поверхности (минимальная плотность ступеней) и минимальна при половинном заполнении поверхности (максимальная плотность ступеней). Таким образом, интенсивность рефлексов ДБЭО осциллирует в процессе роста ТП с осаждением каждого очередного монослоя (МС) [9, 6].

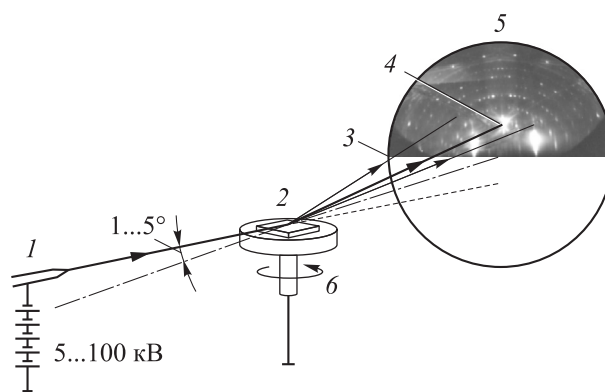


Рис. 1. Схема аппаратуры ДБЭО:
1 — электронная пушка; 2 — образец; 3 — граница тени;
4 — зеркальный рефлекс; 5 — флуоресцентный экран;
6 — держатель образца с азимутальным вращением

В качестве примера контроля толщины ТП с использованием этого метода можно привести наблюдение осцилляций интенсивности дифракционного пучка на картине ДБЭО в процессе роста GaAs с кристаллографической ориентацией (100) путем молекулярно-лучевой эпитаксии [4].

Достоинства метода: проведение измерений *in situ*, точность измерения толщины ТП до 1 МС, контроль большого количества параметров (высокая информативность) [6].

Недостатки метода: невозможность использования системы ДБЭО в течение всего процесса роста ТП (так как она способна создать избыточные водяные пары и другие загрязнения, приводящие к различным дефектам) [9], негативное воздействие на процессы роста ТП высокоэнергетического электронного пучка (внесение морфологических и структурных изменений в области его падения), необходимость реализации слоевого роста [5].

Радиочастотный метод. Для точного контроля толщины ТП в процессе их осаждения достаточно широко применяют радиочастотный метод. Этот метод реализуют с помощью кварцевого резонансного датчика, представляющего собой кристалл кварца, собственная частота колебаний которого определяется выражением

$$f_0 = \frac{N}{d_q},$$

где $N = 1,67 \cdot 10^6$ Гц·мм; d_q — толщина кристалла.

Эта частота (обычно $f_0 \sim 5 \dots 10$ МГц) стабильна при фиксированной температуре до тех пор, пока масса кристалла остается постоянной. Если кварцевый датчик поместить рядом с подложкой, то напыляемый материал увеличит массу кварца на величину Δm и уменьшит его резонансную частоту на величину

$$\Delta f = \frac{Kf_0^2 \Delta m}{\rho_q N A} = \frac{K N \Delta m}{\rho_q d_q^2 A}, \quad (1)$$

где K — константа, обычно близкая к единице, зависящая от распределения напыленного материала по площади A кристалла; ρ_q — плотность кварца, $\rho_q = 2,65$ г/см³; A — площадь поверхности кристалла кварца, покрытой электродами, применяемыми для возбуждения колебаний.

Таким образом, зафиксировав изменение резонансной частоты кварцевого датчика, по

формуле (1) можно определить приращение массы Δm , соответствующее массе осажденного на подложку материала. Далее, зная плотность ТП и площадь, на которую она осаждается, легко определить ее толщину.

При использовании выражения (1) для определения толщины напыленной пленки следует принять во внимание следующие факторы:

- линейная зависимость между Δf и Δm выполняется, если ТП имеет толщину намного меньшую, чем у кристалла кварца;
- различное количество напыленного материала на датчике и подложке требует введения поправочного коэффициента, который рассчитывается исходя из геометрии системы;
- необходимо убедиться, что коэффициент прилипания напыляемых атомов или молекул равен единице для данной температуры подложки;
- собственная частота кварца зависит от температуры, поэтому важно, чтобы последняя оставалась постоянной.

Если перечисленные факторы учтены, то точность определения толщины ТП может доходить до долей МС. Обычно чувствительность кварцевого резонатора $\Delta m / \Delta f = 10^{-10}$ г/Гц. Следовательно, если взять прибор, позволяющий определять сдвиг частоты на 20 Гц, то можно измерить приращение массы примерно 10^{-9} г/см² или 0,01...0,1 нм толщины ТП.

Достоинства метода: простота, широкий диапазон измерения толщины ТП (10... 10 000 нм), высокая точность измерения (до долей МС, благодаря чему этот метод используют при приготовлении эталонных образцов, применяемых для измерения толщины ТП), универсальность по составу, количеству слоев и электропроводности пленок (ТП могут быть диэлектрическими, полупроводниковыми и проводящими), возможность измерения скорости осаждения ТП.

Недостатки метода: высокая чувствительность кристалла кварца к изменению температуры (вследствие этого возникает необходимость поддерживать ее постоянной, для чего приходится охлаждать кристалл от выделяемого при напылении тепла, как правило, с помощью водоохлаждаемых держателей), сложность определения удельной плотности напыляемых ТП, необходимость периодического травливания напыленного слоя с кварцевых пластин (каждые 2...4 мкм) [4, 6, 10–14].

Дополнительную информацию о принципе работы кварцевого датчика, его параметрах, достоинствах и недостатках можно получить в справочнике [15].

Перечислены далеко не все методы, которые можно применять для контроля толщины *in situ*. Например, не рассмотрен резистивный метод, базирующийся на том, что по мере утолщения пленки в процессе роста ее сопротивление уменьшается [1, 13, 15], а также рентгеновские методы и методы оптического контроля (на просвет и отражение).

Методы интерферометрии. Несмотря на то что методы измерения толщины ТП, основанные на явлении интерференции, появились очень давно, их продолжают широко использовать.

Одним из главных преимуществ методов такого типа является простота интерпретации выходных данных, получаемых в виде интерференционных полос (или в некоторых случаях колец), с помощью которых определяют толщину ТП. В самом простом случае для возникновения интерференции нужны два луча, один из которых будет запаздывать по фазе (вследствие разности хода) [14]. В рассматриваемых далее методах задействованы преимущественно лучи, отраженные от пленки и подложки.

Многочувствительная интерферометрия. В зависимости от типа интерференционных полос различают два метода многочувствительной интерферометрии для измерения толщины ТП.

Первый метод, основанный на измерении полос Физо (полос равной толщины), получил название метода Толанского в честь этого ученого, внесшего большой вклад в технику многочувствительной интерферометрии [16].

Принцип метода состоит в том, что исследуемому образцу отводится роль одной из пластин интерферометра, а роль другой выполняет тщательно отполированная стеклянная или кварцевая пластинка, посеребренная с одной стороны (рис. 2). Оптическая толщина образованного таким путем интерферометра зависит от рельефа пластин, поэтому создаваемая интерференционная картина будет отражать характер этого рельефа.

Схема прибора для получения полос Физо приведена на рис. 2 [16]. С его помощью можно наблюдать в микроскоп полосы равной толщины, возникающие при рассмотрении в монохро-

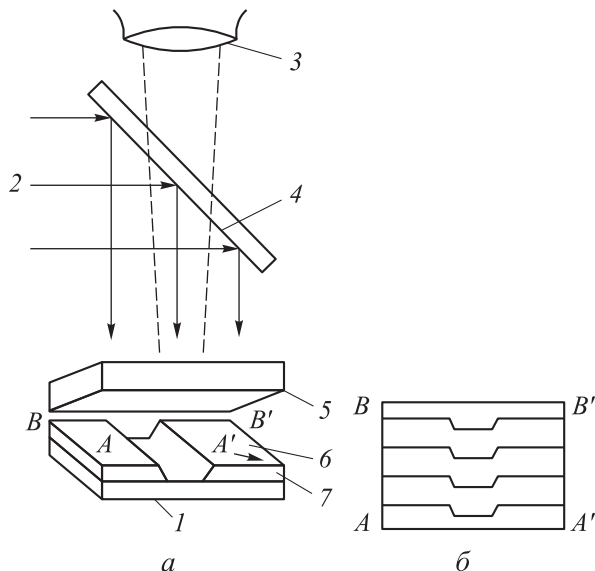


Рис. 2. Схема прибора для получения полос Физо (а) и интерферограммы, построенные с его помощью (б):

- 1 — подложка; 2 — коллимированный монохроматический свет; 3 — объектив микроскопа, глаз или система формирования изображения;
- 4 — полупросеребренное зеркало; 5 — частично прозрачное сильно отражающее покрытие на плоской отражающей пластине (пластина Физо); 6 — напыленное непрозрачное сильно отражающее покрытие; 7 — пленка с каналом

матическом свете двух поверхностей $A'-A$ и $B-B'$, расположенных под углом друг к другу [1].

Перед тем как проводить измерения, на образце необходимо создать так называемую ступеньку — резкую боковую границу пленки на подложке, — изображенную на рис. 2 в виде канала. Для этого маскируют небольшой участок подложки при осаждении ТП или химически удаляют часть осажденного слоя [1]. Если же пленка изначально не сплошная, то данный этап пропускают.

Чтобы реализовать возможности многочувствительной интерферометрии, требуется достаточно большое число производных лучей, эффективно участвующих в образовании интерференционной картины. Для этого необходима высокая отражательная способность R исследуемой поверхности. Однако в подавляющем большинстве случаев это требование не выполняется, и приходится прибегать к искусственному увеличению R .

Практически это достигается серебрением поверхности исследуемого образца [17] (рис. 3), например, путем осаждения. При этом рельеф ступеньки сохраняется с высокой точностью. Также благодаря нанесению дополнительного слоя можно избежать неопределенных скачков

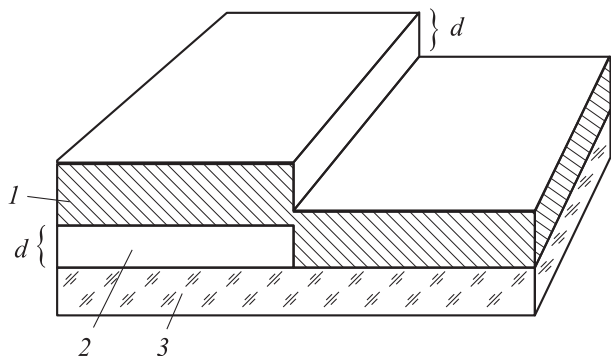


Рис. 3. Схема нанесения дополнительного слоя:
1 — дополнительный слой; 2 — слой толщиной d ;
3 — подложка

фаз на поверхности пленки и непокрытой части подложки [18].

Пример интерферограммы, полученной с помощью описанного прибора, приведен на рис. 2. Чередующиеся светлые и темные полосы с шагом L на поверхности как пленки, так и подложки смещаются относительно друг друга у их границы на значение l . С помощью градуированного микроскопа измеряют l и L , а затем вычисляют толщину ТП по формуле [1]

$$d_{\text{п}} = \frac{1}{2} \lambda_{\text{с}} \left(\frac{l}{L} \right),$$

где $\lambda_{\text{с}}$ — длина волны монохроматического света.

Этим методом можно определить толщину пленок от 3 до 2000 нм с точностью ± 3 нм. Аккуратное измерение позволяет повысить точность до ± 1 нм [16].

Достоинства метода: простота конструкции прибора для получения полос Физо, возможность измерения ТП любого типа (как хорошо отражающих, так и прозрачных), широкий диапазон измерения толщины пленок (3...2000 нм) [16], высокая точность измерения (1...3 нм) [16].

Недостатки метода: необходимость ступеньки и напыленного отражающего покрытия, снижение точности измерения вследствие искажения контура ступеньки напыленным отражающим покрытием и высокого поглощения металлического покрытия из Al или Ag (для борьбы с последним явлением используют многослойные диэлектрические покрытия с большим коэффициентом отражения и малым поглощением [19, 20]), обеспечение удобной регулировки угла наклона пластины для контроля расстояния между полосами Физо [16], повы-

шенные требования к качеству пленки и подложки (они должны быть строго плоскими и очень гладкими) [16].

Второй метод многолучевой интерферометрии получил название полос равного хроматического порядка или ФЕСО (Фико). Если преимущество метода полос Физо состоит в его простоте, то в случае полос Фико можно отметить более высокую точность, особенно при измерении толщины очень тонких пленок.

Коллимированный белый свет падает под прямым углом на две параллельные пластины. Отраженный свет фокусируется на входную щель спектрографа, причем изображение канала в пленке должно быть перпендикулярным входной щели. Так как полосы возникают при определенных значениях отношения t/λ (t — расстояние между пластинами; λ — длина волны), их можно наблюдать, варьируя длину волны с помощью спектрографа. Если каждый раз фотографировать появившиеся полосы (они будут соответствовать целым значениям $N = 2t/\lambda$) и регистрировать соответствующую длину волны, то можно составить интерферограмму.

Толщину ТП определяют по выражению

$$d_{\text{п}} = \frac{(\lambda'_1 - \lambda_1) \lambda_0}{2(\lambda_1 - \lambda_0)},$$

где λ'_1 — длина волны, которой канал глубиной $d_{\text{п}}$ вызывает смещение полосы порядка N_1 ; λ_1 и λ_0 — длина волны, которой соответствует порядок полосы N_1 и $N_1 + 1$ на интерферограмме.

С помощью этого метода можно измерить толщину ТП от 1 до 2000 нм с точностью $\pm 0,2$ нм [16].

Достоинства метода: высокая чувствительность, возможность измерения ТП любого типа (как хорошо отражающих, так и прозрачных), широкий диапазон измерения толщины ТП (1...2000 нм), высокая точность измерения (0,2 нм) [16].

Недостатки метода: большая трудоемкость, необходимость ступеньки и напыленного отражающего покрытия, снижение точности измерения вследствие искажения контура ступеньки напыленным отражающим покрытием и высокого поглощения металлического покрытия (Al или Ag).

Двухлучевой интерферометр (микроинтерферометр Линника). Помимо многолучевой

интерферометрии используют и двухлучевую. Принципиальная схема наиболее распространенного двухлучевого интерферометра (микроинтерферометра Линника) показана на рис. 4 [21].

Свет от источника S , пройдя через конденсор C , попадает на наклонную плоскопараллельную светоделительную (полупрозрачную) пластину AB . Часть светового пучка проходит через эту пластину, отражается от эталонного зеркала M_2 , возвращается к пластине, отражается от нее и распространяется вдоль оси системы. Другая часть светового пучка, отразившись от пластины AB , попадает на исследуемый объект M_1 , отражается от него и также распространяется вдоль оси системы. Эти лучи интерферируют в фокальной плоскости окуляра O . Разность хода увеличивается от центра поля зрения к его краям и последовательно проходит через значения $0, \lambda/2, \lambda, 3\lambda/2, 2\lambda$ и т. д. Там, где разность хода $\Delta = m\lambda$ (m — целое число), наблюдаются светлые полосы, там, где $\Delta = (2m+1)\lambda/2$, — темные.

Наличие неровностей на поверхности образца, приводящих к появлению дополнительной разности хода, вызывает искривление интерференционных полос. При высоте ступени $\lambda/2$ разность хода лучей в двух ветвях интерферометра изменяется на λ , и интерференционная картина смещается на одну полосу. Наименьшая высота неровности, которая может быть обнаружена и измерена с помощью выпускаемых российской промышленно-

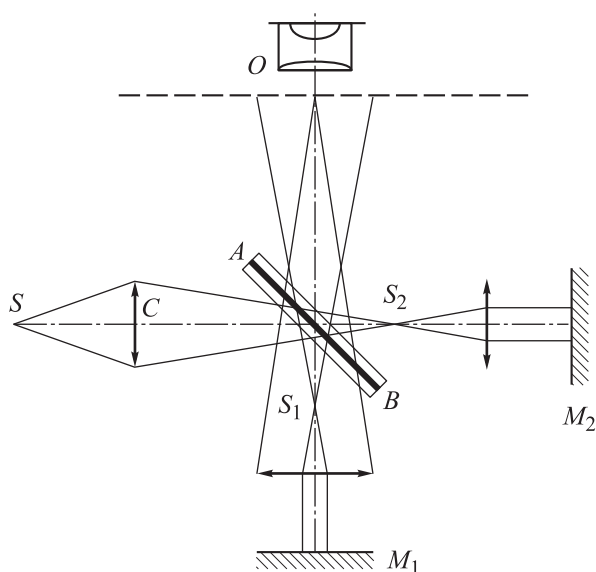


Рис. 4. Оптическая схема двухлучевого интерферометра

стью двухлучевых интерференционных микроскопов (МИИ-4, МИИ-10), соответствует изгибу полосы $0,1$ интервала между полосами, для белого света ($\lambda = 0,55$ мкм) она составляет $0,1 \cdot 0,55/2 = 0,03$ мкм.

Порядок измерения толщины ТП следующий. На поверхности слоя делают царапину острым предметом до подложки или иным способом изготавливают четкую ступеньку, равную толщине ТП. При наблюдении в интерференционный микроскоп в области ступеньки интерференционные линии будут искривляться. Если измерить значение, на которое смещается линия, и расстояние между интерференционными полосами, то искомую толщину можно определить по выражению

$$d_{\text{п}} = \frac{\Delta x}{x} \frac{\lambda_{\text{в.с}}}{2},$$

где Δx — сдвиг центральной полосы, отн. ед.; x — расстояние между соседними интерференционными полосами, отн. ед.; $\lambda_{\text{в.с}}$ — длина волны середины видимого спектра.

Следует отметить, что, как и в многолучевой интерферометрии, данным методом можно измерять только непрозрачные пленки. Если пленка прозрачная, то на слой и подложку в районе ступеньки осаждают непрозрачную, хорошо отражающую металлическую пленку, например алюминиевую. Для уменьшения вносимой погрешности ее толщина должна быть много меньше, чем у измеряемой пленки [10, 22].

Возможный диапазон толщин ТП, который можно измерить двухлучевыми микроинтерферометрами, довольно узкий. Например, микроскоп МИИ-4 позволяет определять толщины пленок от $0,03$ до $1,00$ мкм, а микроскоп МИИ-11 — от 5 нм до 1 мкм [21].

Примером применения рассматриваемого метода является контроль толщины пленок CdTe:Ag [23] и ZnO [19] с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4.

Достоинства метода: удобство измерения, наличие серийного производства интерференционных микроскопов, широкий диапазон измерения толщины ТП (5 нм... 1 мкм), возможность измерения различных параметров (например, шероховатости или неровности поверхности), а также толщины ТП как в белом, так и в монохроматическом свете [22].

Недостатки метода: существенная зависимость качества интерференционных полос от соотношения между коэффициентами отраже-

ния и пропускания полупрозрачной пластинки, разделяющей лучи [20], жесткие требования к помещению, в котором установлен интерференционный микроскоп [22], ограниченный срок службы большинства интерференционных приставок вследствие повреждения посеребрённых отражающих поверхностей при контакте с образцом [14].

Гравиметрический метод (метод микровзвешивания). Одним из самых старых методов определения толщины ТП является взвешивание подложки до и после нанесения слоя [16]. Получив таким образом приращение массы Δm , можно вычислить среднюю толщину пленки по формуле

$$d_{\text{п.ср}} = \frac{\Delta m}{F_{\text{п}} \rho_{\text{м}}}, \quad (2)$$

где $F_{\text{п}}$ — площадь пленки на подложке; $\rho_{\text{м}}$ — удельная масса нанесенного слоя (плотность вещества).

Как видно из формулы (2), на точность определения толщины ТП влияет не только чувствительность весов, но и достоверность, с которой известны параметры $\rho_{\text{м}}$ и $F_{\text{п}}$ [1]. При расчете плотность напыленного слоя принимают равной плотности массивного материала, что в действительности может быть совсем не так [18].

Кроме того, плотность ТП непостоянна, так как зависит от условий технологических режимов (остаточного давления, загрязнений молекулами газа и т. д.) [1]. Неточное определение площади $F_{\text{п}}$ также вносит свою долю погрешности в рассчитываемую толщину ТП. Однако если с надлежащим увеличением спроектировать покрытую слоем подложку на экран, то можно с высокой точностью получить значение $F_{\text{п}}$ [18].

Помимо изложенного необходимо учитывать влияние на точность взвешивания соот-

ношения масс подложки и пленки. Например, если у подложки масса значительно больше, чем у слоя, то использование высокочувствительных весов не даст необходимого результата.

Достоинства метода: простота, широкий диапазон измерения толщин ТП (нижний предел — от нескольких десятых долей нанометра, верхнего предела нет) [16], точность измерения толщины ТП меньше 0,1 нм — до 1 % [16], возможность измерения толщины ТП любого типа.

Недостатки метода: получаемая толщина ТП является средней по площади (т. е. не учитывается неравномерность пленки по толщине), возможность неточности в определении толщины ТП вследствие несоответствия расчетной плотности напыляемого слоя действительному значению, жесткие требования к подложке (она должна иметь простую форму, а ее поверхность — быть в хорошем состоянии) [1], зависимость точности рассчитываемой толщины от чувствительности аппаратуры.

Выводы

1. Неразрушающие методы контроля и измерения толщины ТП необходимо применять как на этапах проведения поисковых исследовательских работ, так и в условиях организованного производства.

2. При решении поисковых исследовательских задач, связанных с получением особо тонких пленок, наиболее информативен метод дифракции быстрых электронов на отражение, позволяющий *in situ* оценить толщину и структурные особенности пленок в процессе их роста.

3. Большинство методов неразрушающего контроля основаны на интерференционных эффектах, поэтому при выборе метода контроля толщины ТП необходимо учитывать оптические свойства, гладкость, твердость и другие характеристики подложек.

Литература

- [1] Минайчев В.Е. *Нанесение пленок в вакууме*. Москва, Высшая школа, 1989. 110 с.
- [2] Калюжный С.В. *Словарь нанотехнологических и связанных с нанотехнологиями терминов*. Москва, Физматлит, 2010. 528 с.
- [3] Лучинин В.В., Таиров Ю.М., ред. *Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, приборы*. Москва, Физматлит, 2006. 552 с.
- [4] Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А., Зотов А.В., Катаяма М. *Введение в физику поверхности*. Москва, Наука, 2005. 499 с.

- [5] Асеев А.Л., ред. *Нанотехнологии в полупроводниковой электронике*. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2004. 368 с.
- [6] Филатов Д.О., Исаков М.А., Круглова М.В. *Фотоэлектрические свойства наноструктур GeSi/Si*. Нижний Новгород, ННГУ, 2010. 118 с.
- [7] Гурьянов Г.М., Демидов В.Н., Корнеева Н.П., Петров В.Н., Самсоненко Ю.Б., Цырлин Г.Э. Система регистрации и анализа картин дифракции быстрых электронов на отражение. *Журнал технической физики*, 1997, т. 67, № 8, с. 111–116.
- [8] Braun W. *Applied RHEED: reflection high-energy electron diffraction during crystal growth*. Springer Science & Business Media, 1999, т. 154, 217 с.
- [9] *Рост GaAs методом МПЭ. Реконструкция поверхности, дифракция быстрых отраженных электронов, осцилляции ДБОЭ*. Санкт-Петербург, СПбАУ РАН, 2010. 26 с.
- [10] Cady W.G. *Piezoelectricity. Vol. 2: An Introduction to the Theory and Applications of Electromechanical Phenomena in Crystals*. New York, Dover Publications, 2018. 432 p.
- [11] Janshoff A., Galla H.J., Steinem C. Piezoelectric mass-sensing devices as biosensors – an alternative to optical biosensors? *Angewandte Chemie International Edition*, 2000, vol. 39, no. 22, pp. 4004–4032.
- [12] Fredriksson C., Kihlman S., Rodahl M., Kasemo B. The piezoelectric quartz crystal mass and dissipation sensor: a means of studying cell adhesion. *Langmuir*, 1998, vol. 14, no. 2, pp. 248–251.
- [13] Snow E.S., Campbell P.M. AFM fabrication of sub-10-nanometer metal-oxide devices with in situ control of electrical properties. *Science*, 1995, vol. 270, no. 5242, pp. 1639–1641, doi: 10.1126/science.270.5242.1639
- [14] Frey H. *Handbook of thin film technology*. Berlin, Springer, 2015, pp. 5–12.
- [15] Майссел Л., Глэнг Р., ред. *Технология тонких пленок (справочник)*. Москва, Советское радио, 1977. 768 с.
- [16] Розенберг Г.В. Многолучевая интерферометрия и интерференционные светофильтры. Ч. II. *Успехи физических наук*, 1952, т. XLVII, вып. 2, с. 173–257.
- [17] Метфессель С. *Тонкие пленки, их изготовление и измерение*. Москва, Ленинград, Госэнергоиздат, 1963. 272 с.
- [18] Зимин С.П. *Измерение параметров пленочных структур*. Ярославль, Яросл. гос. ун-т, 2004. 36 с.
- [19] Розенберг Г.В. Многолучевая интерферометрия и интерференционные светофильтры. Ч. I. *Успехи физических наук*, 1952, т. XLVII, вып. 1, с. 3–50.
- [20] Тодуа П.А. Метрология в нанотехнологии. *Российские нанотехнологии: обзоры*, 2007, т. 2, № 1–2, с. 61–69.
- [21] Волков А.В., Саноян А.Г., Бородин С.А., Агафонов А.Н. *Оборудование и методы контроля микрорельефа дифракционных оптических элементов*. Самара, Изд-во СГАУ, 2007. 80 с.
- [22] Рахимов Н.Р., Ушаков О.К. *Оптоэлектронные датчики на основе АФН-эффекта*. Новосибирск, СГГА, 2010. 218 с.
- [23] Жерихин А.Н., Худобенко А.И., Вильямс Р.Т., Вилкинсон Д., Усер К.Б., Хионг Г., Воронов В.В. Лазерное напыление пленок ZnO на кремниевые и сапфировые подложки. *Современные лазерно-информационные и лазерные технологии. Сб. тр. ИПЛИТ РАН*, Москва, Интерконтакт Наука, 2005. 304 с.

References

- [1] Minaychev V.E. *Naneseniye plenok v vakuume* [Film deposition in vacuum]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1989. 110 p.
- [2] Kalyuzhnyy S.V. *Slovar' nanotekhnologicheskikh i svyazannykh s nanotekhnologiyami terminov* [Glossary of nanotechnology and nanotechnology-related terms]. Moscow, Fizmatlit publ., 2010. 528 p.
- [3] *Nanotekhnologiya: fizika, protsessy, diagnostika, pribory* [Nanotechnology: physics, processes, diagnostics, devices]. Ed. Luchinin V.V., Tairov Yu.M. Moscow, Fizmatlit publ., 2006. 552 p.

- [4] Oura K., Lifshits V.G., Saranin A.A., Zotov A.V., Katayama M. *Vvedeniye v fiziku poverkhnosti* [Introduction to surface physics]. Moscow, Nauka publ., 2005. 499 p.
- [5] *Nanotekhnologii v poluprovodnikovoy elektronike* [Nanotechnology in semiconductor electronics]. Ed. Aseyev A.L. Novosibirsk, Publishing House SB RAS publ., 2004. 368 p.
- [6] Filatov D.O., Isakov M.A., Kruglova M.V. *Fotoelektricheskiye svoystva nanostruktur GeSi/Si* [Photoelectric properties of GeSi/Si nanostructures]. Nizhniy Novgorod, Lobachevsky University publ., 2010. 118 p.
- [7] Gur'yanov G.M., Demidov V.N., Korneyeva N.P., Petrov V.N., Samsonenko Yu.B., Tsyrlin G.E. System for registration and analysis of fast electron reflection diffraction patterns. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 1997, vol. 67, no. 8, pp. 111–116 (in Russ.).
- [8] Braun W. *Applied RHEED: reflection high-energy electron diffraction during crystal growth*. Springer Science & Business Media, 1999, vol. 154, 217 p.
- [9] *Rost GaAs metodom MP-E. Rekonstruktsiya poverkhnosti, difraktsiya bystrykh otrazhennykh elektronov, ostsillyatsii DBOE* [GaAs growth by the MBE method. Surface reconstruction, diffraction of fast reflected electrons, DBOE oscillations]. Sankt-Petersburg, SPbAU publ., 2010. 26 p.
- [10] Cady W.G. *Piezoelectricity. Vol. 2: An Introduction to the Theory and Applications of Electromechanical Phenomena in Crystals*. New York, Dover Publications, 2018. 432 p.
- [11] Janshoff A., Galla H.J., Steinem C. Piezoelectric mass-sensing devices as biosensors – an alternative to optical biosensors? *Angewandte Chemie International Edition*, 2000, vol. 39, no. 22, pp. 4004–4032.
- [12] Fredriksson C., Kihlman S., Rodahl M., Kasemo B. The piezoelectric quartz crystal mass and dissipation sensor: a means of studying cell adhesion. *Langmuir*, 1998, vol. 14, no. 2, pp. 248–251.
- [13] Snow E.S., Campbell P.M. AFM fabrication of sub-10-nanometer metal-oxide devices with in situ control of electrical properties. *Science*, 1995, vol. 270, no. 5242, pp. 1639–1641, doi: 10.1126/science.270.5242.1639
- [14] Frey H. *Handbook of thin film technology*. Berlin, Springer, 2015, pp. 5–12.
- [15] *Handbook of Thin Film Technology*. Ed. Meissel L., Glang R. New York, McGraw-Hill, 1970. (Russ. ed.: *Tekhnologiya tonkikh plenok (spravochnik)*. Ed. Mayssel L., Gleng R. Moscow, Sovetskoye radio publ., 1977. 768 p.).
- [16] Rozenberg G.V. Multibeam interferometry and interference light filters. Part II. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1952, vol. XLVII, is. 2, pp. 173–257.
- [17] Metfessel' S. *Tonkiye plenki, ikh izgotovleniye i izmereniye* [Thin films, their manufacture and measurement]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat publ., 1963. 272 p.
- [18] Zimin S.P. *Izmereniye parametrov plenochnykh struktur* [Measurement of film structure parameters]. Yaroslavl, YSU publ., 2004. 36 p.
- [19] Rozenbnrg G.V. Multibeam interferometry and interference light filters. Part I. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1952, vol. XLVII, is. 1, pp. 3–50.
- [20] Todua P.A. Metrology in nanotechnology. *Nanotechnologies in Russia*, 2007, vol. 2, no. 1–2, pp. 61–69 (in Russ.).
- [21] Volkov A.V., Sanoyan A.G., Borodin S.A., Agafonov A.N. *Oborudovaniye i metody kontrolya mikrorel'yefa difraktsionnykh opticheskikh elementov* [Equipment and methods for monitoring the microrelief of diffractive optical elements]. Samara, Samara University publ., 2007. 80 p.
- [22] Rakhimov N.R., Ushakov O.K. *Optoelektronnyye datchiki na osnove AFN-effekta* [Optoelectronic sensors based on the AFN-effect]. Novosibirsk, SGUGIT publ., 2010. 218 p.
- [23] Zherikhin A.N., Khudobenko A.I., Vill'yams R.T., Vilkinson D., User K.B., Khiong G., Voronov V.V. Laser deposition of ZnO films on silicon and sapphire substrates. *Sovremennyye lazerno-informatsionnyye i lazernyye tekhnologii. Sbornik trudov. IPLIT RAN* [Modern laser information and laser technologies. Collection of papers. IPLIT RAS]. Moscow, Interkontakt Nauka publ., 2005. 304 p.

Информация об авторах

ШУПЕНЕВ Александр Евгеньевич — кандидат технических наук, ассистент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: ash@bmstu.ru).

ПАНКОВА Наталия Сергеевна — инженер, НУК МТ. МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: pankova.nataliya2014@yandex.ru).

КОРШУНОВ Иван Сергеевич — аспирант кафедры «Лазерные технологии в машиностроении». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: korshunovivan@gmail.com).

ГРИГОРЬЯНЦ Александр Григорьевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Лазерные технологии в машиностроении». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: mt12@bmstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Шупенев А.Е., Панкова Н.С., Коршунов И.С., Григорьянц А.Г. Анализ неразрушающих методов измерения и контроля толщины тонких пленок. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 4, с. 18–27, doi: 10.18698/0536-1044-2019-4-18-27

Please cite this article in English as:

Shupenev A.E., Pankova N.S., Korshunov I.S., Grigoryants A.G. An Analysis of Non-Destructive Methods for Thin Film Thickness Measurement. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 4, pp. 18–27, doi: 10.18698/0536-1044-2019-4-18-27

Information about the authors

SHUPENEV Aleksandr Evgenievich — Candidate of Science (Eng.), Teaching Assistant, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: ash@bmstu.ru).

PANKOVA Nataliya Sergeevna — Engineer, Research and Training Centre for Mechanical Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: pankova.nataliya2014@yandex.ru).

KORSHUNOV Ivan Sergeevich — Postgraduate, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: korshunovivan@gmail.com).

GRIGORYANTS Aleksandr Grigorievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: mt12@bmstu.ru).