

05;07;12

## ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНОК НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 0.154 нм

© А.М.Баранов, И.Ф.Михайлов

Толщина пленки во многих случаях является одним из основных параметров, определяющих ее функциональные свойства. В качестве примера можно привести интерференционные покрытия в оптике, функциональные слои в микроэлектронике, тонкопленочные конденсаторы и др.

Наиболее широко распространенными методами определения толщины пленок являются оптические методы, основанные на интерференции света. В данных методах о толщине пленки судят по экстремумам, наблюдаемым при отражении света от пленки.

Коэффициент отражения света  $R$  от системы пленка-подложка зависит от угла падения луча ( $\Theta$ ), длины волны ( $\lambda$ ) и толщины пленки ( $d$ ). Поэтому регистрируя любую из зависимостей  $R = f(\Theta)$ ,  $R = f(\lambda)$  или  $R = f(d)$ , можно определить  $d$ . В общем все методы определения толщины можно разделить на две группы. К первой относятся методы, с помощью которых определяют толщину после окончания процесса осаждения пленки (например, из зависимостей  $R = f(\Theta)$ ,  $R = f(\lambda)$  [1,2]). Способ определения  $d$  из зависимости  $R = f(d)$  относится ко второй группе, так называемых *in situ* методов контроля толщины. Примером данного способа является лазерная интерферометрия [3]. Однако если необходимо измерять толщину сверхтонких пленок ( $d < 50$  нм), то лазерная интерферометрия становится неприменима (так как в данном способе используется длина волны света из видимого диапазона). Поэтому при толщинах пленок  $d < 50$  нм используют эллипсометрию и кварцевое микровзвешивание. Однако в этих методах толщину покрытия измеряют не прямым способом, а на основе расчета. Поэтому в некоторых случаях (например, когда плотность материала точно неизвестна или изменяется с толщиной, а также при сильном поглощении света в пленке) определение  $d$  затруднено.

В данной работе предлагается для определения толщины пленки в процессе ее роста проводить измерения коэффициента отражения на длине волны  $\lambda = 0.154$  нм. Выбор длины волны из рентгеновского диапазона сделан по следующей причине. Волны длиной  $\lambda < 0.3$  нм слабо поглощают-

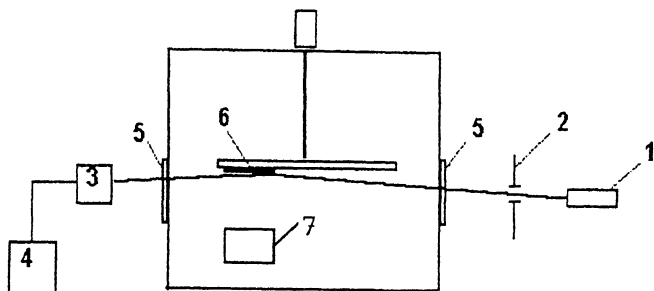


Рис. 1. Схема вакуумной камеры с системой контроля толщины в процессе роста пленки на подложке.

ся практически всеми элементами периодической системы. Это позволяет разместить рентгеновскую трубку и детектор излучения вне рабочей камеры.

Схема вакуумной камеры с устройством контроля толщины приведена на рис. 1. Измерительная система состоит из рентгеновской трубки с медным анодом (1), коллимирующей системы (2) и детектора (3), соединенного с компьютером (4). Рентгеновский луч входит в вакуумную камеру и выходит из нее через бериллиевые окна (5). Угол падения рентгеновского луча на подложку  $\Theta = 0.9^\circ$ . Время измерения  $\tau = 0.5$  с. В качестве подложки использовались пластины кремния (6). В работе были исследованы углеродные пленки, полученные магнетронным распылением графитовой мишени в Ag (7).

На рис. 2 показана экспериментальная зависимость интенсивности отраженного сигнала ( $I$ ) от времени проведения процесса осаждения ( $t$ ) углеродной пленки. Из рис. 2 видно, что зависимость  $I = f(t)$  осциллирует по мере роста пленки. Период осцилляций ( $d$ ) и угол падения рентгеновского луча ( $\theta$ ) связаны уравнением Вульфа-Брэгга, в котором в общем случае необходимо учитывать преломление лучей при вхождении в пленку из вакуума.

Коэффициент преломления материала в рентгеновском диапазоне длин волн имеет вид  $n = 1 - \delta - i\beta$ , где  $\delta$  и  $\beta$  — вещественные величины, описывающие поляризуемость и поглощение [4]. Значение  $\delta$  в рентгеновском диапазоне пропорционально плотности вещества.

При выполнении  $\beta \ll \delta$  уравнение Вульфа-Брэгга будет иметь вид [5]:

$$m\lambda = 2d \left[ 1 - \frac{\delta}{\sin^2 \Theta} \right] \sin \Theta, \quad (1)$$

где  $m$  — порядок интерференционного максимума.

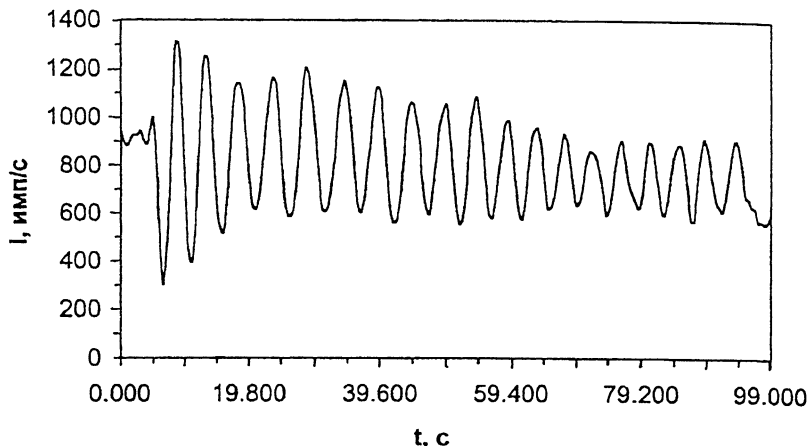


Рис. 2. Зависимость интенсивности отраженного ( $I$ ) сигнала от времени проведения процесса осаждения ( $t$ ) углеродной пленки на кремниевую пластину.

Значения  $\delta$  для элементов периодической системы на длине  $0.154 \text{ нм}$  хорошо известны [5]. Однако для легких веществ (с плотностью  $\rho < 2.5 \text{ г/см}^3$ ), вследствие малости значений  $\delta$ , множитель в квадратных скобках в выражении (1) не будет сильно влиять на значение  $d$ . В частности, для графита  $\delta = 7.27 \cdot 10^{-6}$ ,  $\beta = 1.16 \cdot 10^{-8}$  и при  $\theta = 0.9^\circ$  в выражении (1) множитель в квадратных скобках отличается от единицы менее чем на 3% и в первом приближении его можно опустить. Тогда из выражения (1) получим, что осцилляции на зависимости  $I = f(t)$  будут повторяться при увеличении толщины пленки на  $4.9 \text{ нм}$ .

Из выражения (1) следует, что увеличение угла падения  $\Theta$  приводит к увеличению частоты следования осцилляций на зависимости  $I = f(t)$  при тех же условиях осаждения (например, при  $\Theta = 2^\circ$  период осцилляций будет равен  $2.2 \text{ нм}$ ). Однако коэффициент отражения резко падает с увеличением  $\Theta$  ( $R \sim 1/\sin^4 \Theta$ ). Это не позволяет получить достаточную для регистрации отраженного луча интенсивность при углах, больших  $2-3^\circ$ . Снизу значение  $\Theta$  ограничено областью углов полного внешнего отражения ( $\cong 0.15-0.5^\circ$ ).

Основное преимущество данного способа измерения толщины заключается в том, что это прямой способ измерения толщины. Это позволяет судить о протекании процесса осаждения и о толщине растущей пленки непосредственно на экране монитора в процессе ее роста. Согласно выражению (1), толщина выращенной углеродной пленки составляет  $d_{\text{max}} = 95.5 \text{ нм}$ . Скорость роста углеродной пленки равна

приблизительно 1 нм/с. При этом поскольку осцилляции повторяются через равные промежутки времени, то можно заключить, что процесс осаждения проходил равномерно. В общем, даже без сложной математической обработки можно с высокой точностью (приблизительно через 1.2 нм) контролировать прирост толщины пленки, взяв в качестве реперных точек точки экстремумов (которые следуют через 2.45 нм) и точки перегиба, расположенные между экстремумами. При этом если  $\delta_{\text{пл}} < \delta_{\text{подл}}$ , то первый экстремум на зависимости  $I = f(t)$  будет минимум, а если  $\delta_{\text{пл}} > \delta_{\text{подл}}$  — максимум. Кроме того, использование длины волны, сравнимой с межатомным расстоянием, позволяет измерять толщины пленок, начиная с нескольких ангстрем. А так как  $\beta \ll \delta$  и  $n \cong 1$ , то из зависимости  $I = f(t)$  мы находим  $d$ , а не произведение  $n \cdot d$ , как в методе лазерной интерферометрии.

Из зависимости  $I = f(t)$  видно, что по мере роста пленки амплитуда осцилляций уменьшается, в то время как среднее значение отраженного сигнала остается приблизительно постоянным. По нашему мнению, это является следствием увеличения шероховатости поверхности растущей углеродной пленки, что приводит к уменьшению коэффициента отражения от поверхности, а следовательно, уменьшению амплитуды осцилляций.

В заключение отметим, что данный метод применим не только при проведении процессов роста пленок, но и при их травлении, поскольку необходимыми условиями наблюдения осцилляций являются изменение толщины пленки  $d$  и различие значений  $\delta$  пленки и подложки.

#### Список литературы

- [1] *Mikhailov I.F., Borisova S.S., Fomina L.P., Babenko I.N.* // Proc. SPIE. 1995. V. 2453. P. 186–215.
- [2] *Кондрашов В.Е.* Оптика фотокатодов. М.: Наука, 1976. 208 с.
- [3] *Ивановский Г.Ф., Петров В.И.* // Ионно-плазменная обработка материалов. М.: Радио и связь, 1986. 232 с.
- [4] *Зеркальная рентгеновская оптика.* Л.: Машиностроение, 1989. 463 с.
- [5] *Spiller E.* // Soft X-ray Optics. Washington. SPIE Optical Engineering Pres. 1994. P. 279.

Поступило в Редакцию  
26 июля 1996 г.