РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

АВТОМЕТРИЯ

№ 1 1997

УДК 535.39

А. М. Коструба, О. Г. Влох

(Львов, Украина)

К АНАЛИЗУ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Предлагается методика определения оптимальных условий эллипсометрического эксперимента (угла падения, иммерсионной среды, толщины пленки). В качестве примера рассмотрена система высокопоглощающая пленка на прозрачной подложке. Показано, что для данной системы измерения с использованием иммерсионной среды при оптимальном выборе условий эксперимента обеспечивают значительно высшую точность определения искомых параметров, чем измерения с варьируемым углом падения.

Вопросу определения оптимальных условий эллипсометрического эксперимента для исследования различных поверхностных структур посвящен ряд работ [1—4]. В этих работах основное внимание уделялось модели тонкая прозрачная пленка — поглощающая подложка. Почти не исследована данная проблема для системы поглощающая пленка на прозрачной подложке.

При определении трех и более параметров системы для надежного решения обратной задачи эллипсометрии количество измеренных эллипсометрических параметров Δ_i, Ψ_i должно быть больше количества неизвестных параметров системы. Поэтому для получения дополнительной экспериментальной информации необходимо создавать несколько измерительных ситуаций, каждой из которых будет соответствовать пара эллипсометрических углов Δ, Ψ. Данные ситуации могут создаваться за счет вариации одного или сразу нескольких из следующих параметров: φ — угол падения; λ — длина волны падающего света; N — показатель преломления внешней среды; d — толщина пленки.

В данной работе предлагается метод, позволяющий для конкретной модели поверхности выбрать оптимальный способ создания измерительных ситуаций, а также конкретные величины варьируемых параметров для каждой ситуации с целью минимизации ошибок измеряемых параметров системы.

Хорошо известны [4] методы анализа чувствительности эллипсометрических параметров Δ и Ψ к свойствам системы, которые осуществляются путем исследования зависимости первых производных $\partial\Delta/\partial p_k$ и $\partial\Psi/\partial p_k$ (где p_k — исследуемый параметр системы) от условий эксперимента. Однако они позволяют найти оптимальные условия для измерения только одного параметра. Кроме того, область максимальной чувствительности параметров Δ, Ψ не всегда совпадает с областью максимальной точности измерений [5]. Мы предлагаем метод, позволяющий найти оптимальные по точности условия эксперимента для одновременного определения сразу всех параметров поглощающей пленки: показателя преломления n^1, показателя поглощения k^1 и толщины d.

В работе [6] показано, что для каждой пары эллипсометрических углов Δ, Ψ точным решением обратной задачи эллипсометрии является множество точек пространства n^1, k^1, d, лежащих на пространственной спирали. Данная кривая начинается возле плоскости n^1, k^1 при больших n^1, k^1 и с увеличением d асимптотически приближается к оси, перпендикулярной плоскости n^1, k^1 в

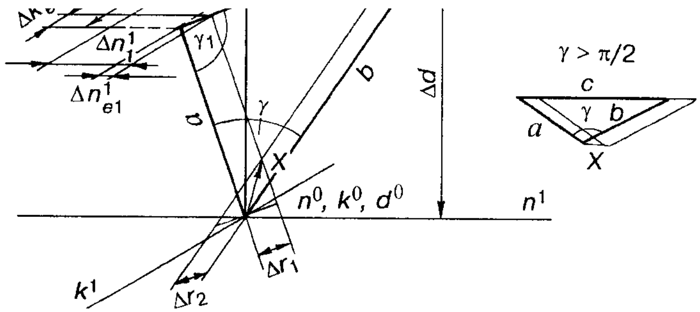

Рис. 1. Определение угла пересечения γ пространственных кривых $\rho = \mathrm{tg}\Psi e^{i\Delta} = \mathrm{const}$:
a, b — отрезки касательных к кривым в точке пересечения n^0, k^0, d^0

точке $n_{\text{эф}}$, $k_{\text{эф}}$. Таким образом, для каждого значения толщины пленки d существуют такие значения показателей преломления n^1 и поглощения k^1 пленки, для которых эллипсометрические параметры Δ и Ψ системы остаются неизменными, т. е. для всех точек кривой выполняется условие $\rho = \mathrm{tg}\Psi e^{i\Delta} = \mathrm{const}$.

Для полного решения обратной задачи, нахождения истинных параметров пленки необходимо определить координаты точки пересечения кривых, соответствующих различным измерительным ситуациям и различным парам углов Δ, Ψ. Очевидно, что точность получаемых результатов зависит от величины угла пересечения кривых, а также от величины смещения $\Delta r = [(\Delta n_e^1)^2 + (\Delta k_e^1)^2]^{1/2}$ пространственной кривой из-за неточности измерения углов Δ и Ψ.

Для определения угла пересечения обратимся к рис. 1. Здесь изображена система координат, оси которой параллельны осям пространства искомых параметров n^1, k^1, d, а начало находится в точке пересечения n^0, k^0, d^0 двух кривых, соответствующих различным измерительным ситуациям. Выберем некоторую малую величину изменения толщины пленки Δd, в пределах которой отрезок пространственной кривой $\rho = \mathrm{const}$ можно заменить отрезком прямой. Тогда, исходя из условия постоянства величины ρ для двух измерительных ситуаций, можно записать равенство

$$\left.\frac{\partial \rho_i}{\partial d}\right|_{d^0} \Delta d = -\left.\frac{\partial \rho_i}{\partial N^1}\right|_{d^0+\Delta d} \Delta N_i^1, \tag{1}$$

где $N^1 = n^1 - jk^1$ — комплексный показатель преломления пленки; $i = 1, 2$ — номер измерительной ситуации. Переходя от комплексных величин к действительным, каждое из двух комплексных уравнений можно заменить двумя равенствами:

$$\begin{gathered}\left.\frac{\partial \Delta_i}{\partial d}\right|_{d^0} \Delta d = -\left.\frac{\partial \Delta_i}{\partial n}\right|_{d^0+\Delta d} \Delta n_i^1 + \left.\frac{\partial \Delta_i}{\partial k}\right|_{d^0+\Delta d} \Delta k_i^1,\\ \left.\frac{\partial \Psi_i}{\partial d}\right|_{d^0} \Delta d = -\left.\frac{\partial \Psi_i}{\partial n}\right|_{d^0+\Delta d} \Delta n_i^1 + \left.\frac{\partial \Psi_i}{\partial k}\right|_{d^0+\Delta d} \Delta k_i^1.\end{gathered} \tag{2}$$

Примем для частных производных следующие обозначения:

$$\left.\frac{\partial \Delta_i}{\partial d}\right|_{d^0} = A_i, \qquad \left.\frac{\partial \Delta_i}{\partial n}\right|_{d^0+\Delta d} = B_i, \qquad \left.\frac{\partial \Delta_i}{\partial k}\right|_{d^0+\Delta d} = C_i,$$

$$\frac{\partial \Psi_i}{\partial d}\Big|_{d^0} = D_i, \qquad \frac{\partial \Psi_i}{\partial n}\Big|_{d^0 + \Delta d} = E_i, \qquad \frac{\partial \Psi_i}{\partial k}\Big|_{d^0 + \Delta d} = F_i.$$

Тогда для изменений Δn_i^1, Δk_i^1, которые обеспечивают постоянство величин ρ_1, ρ_2 при изменении толщины пленки на величину Δd (см. рис. 1), можно записать:

$$\Delta n_i^1 = \Delta d \frac{C_i D_i - A_i F_i}{B_i F_i - C_i E_i}, \qquad \Delta k_i^1 = \Delta d \frac{A_i E_i - B_i D_i}{B_i F_i - C_i E_i}. \tag{3}$$

Угол между отрезками a, b пространственных кривых, соответствующих различным экспериментальным ситуациям, находится из стандартного соотношения [7]:

$$\cos\gamma = \frac{\Delta n_1^1 \Delta n_2^1 + \Delta k_1^1 \Delta k_2^1 + \Delta d^2}{[(\Delta n_1^1)^2 + (\Delta k_1^1)^2 + (\Delta d)^2]^{1/2}[(\Delta n_2^1)^2 + (\Delta k_2^1)^2 + (\Delta d)^2]^{1/2}}. \tag{4}$$

Примем, что величина вариации Δd настолько мала, что для частных производных справедливо соотношение $\partial\rho/\partial p\,\big|_{d^0} = \partial\rho/\partial p\,\big|_{d^0+\Delta d}$. В этом случае можно также принять, что при вариациях величины ρ, которые обусловлены неточностью измерения эллипсометрических углов Δ, Ψ, отрезки кривых a, b в пределах $d^0 \div d^0 + \Delta d$ смещаются параллельно самим себе. Для этих величин вариаций $\Delta\rho$ (две измерительные ситуации) можно записать:

$$\Delta\rho_{ie} = \frac{\partial \rho_i}{\partial N}\Big|_{d^0} \Delta N_{ie}^1, \tag{5}$$

где ΔN_{ie}^1 — изменения комплексных показателей преломления пленки, вызванные ошибками эксперимента, $i = 1, 2$. Уравнения (5) для действительных величин принимают следующий вид:

$$\delta\Delta_{ie} = \frac{\partial \Delta_i}{\partial n}\Big|_{d^0} \Delta n_{ie}^1 + \frac{\partial \Delta_i}{\partial k}\Big|_{d^0} \Delta k_{ie}^1, \qquad \delta\Psi_{ie} = \frac{\partial \Psi_i}{\partial n}\Big|_{d^0} \Delta n_{ie}^1 + \frac{\partial \Psi_i}{\partial k}\Big|_{d^0} \Delta k_{ie}^1. \tag{6}$$

Используя приведенные выше обозначения, для составляющих смещений $\Delta r_i^2 = (\Delta n_{ie}^1)^2 + (\Delta k_{ie}^1)^2$ отрезков a, b в плоскости n, k можно записать:

$$\Delta n_{ie}^1 = \frac{F_i\delta\Delta_{ie} - C_i\delta\Psi_{ie}}{B_i F_i - C_i E_i}, \qquad \Delta k_{ie}^1 = \frac{B_i\delta\Psi_{ie} - E_i\delta\Delta_{ie}}{B_i F_i - C_i E_i}. \tag{7}$$

В [2, 7] показано, что минимальные изменения эллипсометрических углов Δ, Ψ, которые могут быть зафиксированы эллипсометром в конкретной измерительной ситуации, определяются выражениями: $\delta\Delta = KR/r_p r_s$, $\delta\Psi = K/R$, где $R^2 = |r_p|^2 + |r_s|^2$; r_p, r_s — амплитудные коэффициенты отражения для волн p- и s-поляризации; K — коэффициент чувствительности системы.

На рис. 1 представлен случай наименее удачной комбинации ошибок $\delta\Psi$, $\delta\Delta$, когда смещения Δr_1, Δr_2 лежат в плоскости, определяемой отрезками a, b, и имеют противоположные направления. Тогда смещение точки пересечения кривых $X = (\Delta n_1^2 + \Delta k_1^2 + \Delta d^2)$ будет максимальным:

$$X_m = \frac{1}{\sin\gamma}\left[h_1^2 + h_2^2 \pm 2h_1 h_2 \cos\gamma\right]^{1/2}, \tag{8}$$

где $h_{1,2} = \Delta r_{1,2}\sin\gamma_{1,2}$ (см. рис. 1). Верхний индекс в (8) соответствует случаю $\gamma \le \pi/2$ и нижний — $\gamma > \pi/2$. В принципе возможен случай более удачный, когда смещения $\Delta r_{1,2}$ перпендикулярны плоскости ab, одинаковы и противоположны по направлению. Тогда ошибки $\delta\Delta, \delta\Psi$ не приводят к изменению результата. Поэтому логично было бы исследовать случай $X = X_m/2$. Условно величину $X_m/2$ можно назвать среднеквадратичной суммарной ошибкой определения искомых параметров.

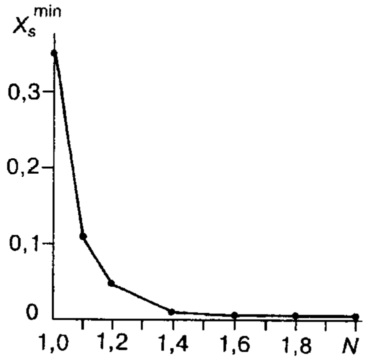

Рис. 2. Зависимость минимальной величины среднеквадратичной ошибки X на каждой из топограмм от показателя преломления иммерсионной среды N

Нами проведен расчет топограмм величины среднеквадратичной ошибки $X = X_m/2$ для длины волны 0,6328 мкм, коэффициента чувствительности $K = 0{,}002$ и системы пленка ($n^1 = 2{,}65$; $k^1 = 1{,}25$; $d = 500$ Å) — подложка ($n_0 = 1{,}5$; $k_0 = 0$) в координатах: ось абсцисс соответствует измерительной ситуации с показателем преломления внешней среды $N = 1{,}0$ и изменяющимся вдоль оси углом падения, для оси ординат такая же ситуация, но показатель преломления внешней среды изменяется от графика к графику.

На рис. 2 представлена зависимость минимальной величины ошибки X на каждой из топограмм от показателя преломления внешней среды (иммерсионная жидкость). Для данной модели поверхности использование иммерсионной жидкости с показателем преломления $N > 1{,}4$ дает возможность проводить измерения с максимальной точностью. Измерения традиционным способом (при различных углах падения) позволяют достичь лишь 2,5 % от максимальной точности измерений с применением иммерсионной жидкости.

Данный анализ позволяет также найти отдельно ошибку определения толщины пленки $\Delta d_п$ и суммарную ошибку $[(\Delta n^1)^2 + (\Delta k^1)^2]^{1/2}$:

$$\Delta d_п = \Delta d(\Delta r_1 + \Delta r_2)/c, \qquad [(\Delta n^1)^2 + (\Delta k^1)^2]^{1/2} = (X^2 - \Delta d_п^2)^{1/2},$$

где $c = (a^2 + b^2 - 2ab\cos\gamma)^{1/2}$.

Таким образом, предложенный анализ дает возможность определить оптимальные условия эксперимента для нахождения трех параметров поглощающей пленки с минимальными ошибками. Расчеты по приведенной схеме целесообразно проводить перед каждой серией экспериментов с принципиально отличающимися системами, материалами пленки и подложки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Свиташев К. К., Семененко А. И., Семененко Л. В. и др.** О точности и чувствительности метода эллипсометрии. I. Точность метода // Оптика и спектроскопия. 1972. **33**, № 4. С. 742.
2. **Свиташев К. К., Семененко А. И., Семененко Л. В. и др.** О точности и чувствительности метода эллипсометрии. II. Чувствительность метода // Оптика и спектроскопия. 1977. **42**, № 6. С. 1142.
3. **Масловский В. К., Рыбалка А. И., Шкляревский И. Н.** Оптимальные условия в эллипсометрии прозрачных пленок на поглощающей подложке // Оптика и спектроскопия. 1976. **41**, № 4. С. 637.
4. **Бендере Р. Б., Калтыня Р. П., Фелтыньш И. А., Фрейвалде И. Р.** Математический анализ некоторых условий эллипсометрического эксперимента // Эллипсометрия: теория, методы, приложения. Новосибирск: Наука, 1987.
5. **Борщаговский Е. Г., Гецко О. М.** Выбор оптимальных условий для эллипсометрических измерений // Оптика и спектроскопия. 1991. **70**, № 5. С. 1144.
6. **Свиташева С. Н.** Точное решение обратной задачи эллипсометрии для поглощающих пленок // ДАН СССР. 1991. **318**, № 5. С. 1154.
7. **Основы** эллипсометрии /Под ред. А. В. Ржанова. Новосибирск: Наука, 1979.

Поступила в редакцию 13 ноября 1996 г.