

## ОПТИМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ В ЭЛЛИПСОМЕТРИИ ПРОЗРАЧНЫХ ПЛЕНОК НА ПОГЛОЩАЮЩЕЙ ПОДЛОЖКЕ

В. К. Милославский, А. И. Рыбалка и И. Н. Шкляревский

Анализируется точность эллипсометрического метода определения толщины и показателя преломления тонкой прозрачной пленки в зависимости от оптических постоянных поглощающей подложки и угла падения света.

В настоящее время все большее распространение получают эллипсометрические методы определения оптических параметров тонких слоев на разнообразных поглощающих поверхностях. Эти методы обладают высокой чувствительностью и позволяют обнаружить и исследовать слои диэлектриков и полупроводников малой толщины. Задача сводится к определению параметров отраженного от образца эллиптически поляризованного света: разности фаз  $\Delta$  и азимута поляризации  $\psi$ . Обе величины зависят от  $n$ ,  $l$ ,  $n_1$ ,  $k_1$ ,  $\lambda$  и  $\varphi$  и при известных оптических постоянных подложки  $n_1$  и  $k_1$ , длины волны  $\lambda$  и угле падения  $\varphi$  дают возможность найти толщину слоя  $l$  и его показатель преломления  $n$ .

В работах [1, 2] развит графический метод одновременного определения  $n$  и  $l$  по измеренным значениям  $\Delta$  и  $\psi$  при заданном угле падения. Ясно, что чувствительность метода зависит от соотношения между оптическими постоянными пленки и подложки. Исследования такой зависимости представляют интерес, так как они могут указать на наиболее благоприятные для эллипсометрии соотношения между константами пленки и подложки и наиболее удобные (из-за дисперсии констант) области спектра для измерения параметров пленки.

### Основные соотношения

Известно, что разность фаз  $\Delta = \delta_p - \delta_s$  и азимут поляризации  $\psi$  отраженной волны связаны с оптическими постоянными пленки и подложки и толщиной пленки соотношением

$$\operatorname{tg} \psi \exp i\Delta = \frac{r_{1p} + r_{2p} \exp(-2i\alpha)}{1 + r_{1p}r_{2p} \exp(-2i\alpha)} \frac{2 + r_{1s}r_{2s} \exp(-2i\alpha)}{r_{1s} + r_{2s} \exp(-2i\alpha)}, \quad (1)$$

где  $r_{1p,s}$  и  $r_{2p,s}$  — комплексные амплитуды отраженной волны для границ раздела воздух—пленка и пленка—подложка соответственно для  $s$ - и  $p$ -компонент, а

$$\alpha = \frac{2\pi l}{\lambda} \sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi}. \quad (2)$$

Разделение действительной и мнимой частей дает выражение для  $\rho = \operatorname{tg}^2 \psi$  и  $\Delta$  [1, 2]

$$\rho = \frac{X_1^2 + Y_1^2}{X_2^2 + Y_2^2}, \quad (3a)$$

$$\operatorname{tg} \Delta = \frac{X_1 Y_2 + X_2 Y_1}{X_1 X_2 + Y_1 Y_2}. \quad (3b)$$

Явный вид зависящих от  $n$ ,  $l$ ,  $n_1$ ,  $k_1$ ,  $\lambda$  и  $\varphi$  величин  $X_{1,2}$  и  $Y_{1,2}$  приведен в работе [3].

Для очень малых толщин экспонента в (1) может быть представлена в виде  $(1 - 2i\alpha)$ , что позволяет найти разность  $\Delta - \Delta_0$  и  $\rho - \rho_0$  в явной форме ( $\rho_0 = \text{tg}^2 \psi_0$ ,  $\Delta_0$  и  $\psi_0$  — разность фаз и азимут поляризации для свободной от пленки поглощающей подложки)

$$\Delta - \Delta_0 = Al \{ \gamma [\varepsilon_1^4 - \varepsilon - 2\varepsilon_1'(\varepsilon - 1)] + \varepsilon_1^2 [\varepsilon(1 + \gamma) + \gamma^2(\varepsilon + \gamma)] - \varepsilon_1' [(\varepsilon_1^2 - \varepsilon)(1 + \gamma^2) + (\varepsilon_1^2 + 1)(\varepsilon + \gamma)\gamma] \}, \quad (4a)$$

$$\rho - \rho_0 = 2Al\varepsilon_1'' [\varepsilon_1^2(\gamma\varepsilon - 1) + \gamma(\varepsilon + 1)(2\varepsilon_1' - \gamma) - \varepsilon(1 + \gamma)]. \quad (4б)$$

Здесь введены следующие обозначения:  $\gamma = \cos^2 \varphi$ ,  $\varepsilon = n^2$ ,  $\varepsilon_1' = n_1^2 - k_1^2$ ,  $\varepsilon_1'' = 2n_1k_1$ ,  $\varepsilon_1 = n_1^2 + k_1^2$  и

$$A = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \frac{\sqrt{\gamma}(1 - \gamma)}{[(\varepsilon_1'\gamma - 1)^2 + \varepsilon_1''^2\gamma^2][(\varepsilon_1' - \gamma)^2 + \varepsilon_1''^2]}.$$

Формулы (4a), (4б) выведены в приближении  $\varepsilon_1 \gg \sin^2 \varphi$ , хорошо выполняющемся для большинства металлов и полупроводников. Они являются уточненным вариантом известных формул Друде [4]. По сравнению с [5] они содержат большее число слагаемых и лучше согласуются с (3a), (3б) при  $l < 50 \text{ \AA}$ .

Пользуясь соотношениями (3a)(3б) или (4a)(4б), можно рассчитать ошибки в определении  $n$  и  $l$ . Последние задаются ошибками экспериментально определяемых величин  $\rho$  и  $\Delta$ . Так как  $n$  и  $l$  в приведенных формулах заданы в виде неявных функций, абсолютные ошибки  $\delta n$  и  $\delta l$  могут быть вычислены по формулам

$$\delta n = \frac{C_p^l \delta \Delta + C_\Delta^l \delta \rho}{|C_p^l C_\Delta^n - C_p^n C_\Delta^l|}, \quad (5a)$$

$$\delta l = \frac{C_\Delta^n \delta \rho + C_p^n \delta \Delta}{|C_p^l C_\Delta^n - C_p^n C_\Delta^l|}, \quad (5б)$$

где  $\delta \rho$  и  $\delta \Delta$  — экспериментально определяемые абсолютные ошибки при измерении  $\rho$  и  $\Delta$ ,  $C_\alpha^i = \partial \alpha / \partial i$  ( $\alpha = \rho, \Delta$ ;  $i = l, n$ ).

В графическом методе [1, 2] величины  $n$  и  $l$  определяются по точкам пересечения кривых  $\Delta_1 = \Delta(n, l)$  и  $\rho_1 = \rho(n, l)$ , где  $\Delta_1$  и  $\rho_1$  ( $\text{tg}^2 \psi_1 = \rho_1$ ) — полученные на опыте величины. Наклон касательных к кривым  $\Delta_1 = \Delta(n, l)$  и  $\rho_1 = \rho(n, l)$  в точках пересечения задается величинами  $k_\Delta = -C_\Delta^l / C_\Delta^n$  и  $k_\rho = -C_p^l / C_p^n$  ( $k_\Delta$  и  $k_\rho$  — тангенсы углов наклона). Следовательно, после подстановки в (5a) (5б) имеем

$$\delta l = \frac{C_\Delta^n \delta \rho + C_p^n \delta \Delta}{|k_\Delta - k_\rho| C_p^n C_\Delta^n}, \quad (6a)$$

$$\delta n = \frac{C_p^l \delta \Delta + C_\Delta^l \delta \rho}{|k_\Delta - k_\rho| C_p^l C_\Delta^l}. \quad (6б)$$

Из (6a)(6б) следует, что ошибки  $\delta l$  и  $\delta n$  тем меньше, чем больше величина  $|k_\Delta - k_\rho|$ . Этим обстоятельством определяется выбор углов падения при применении графического метода: наиболее благоприятный угол падения соответствует наибольшему значению разности  $|k_\Delta - k_\rho|$ .

### Результаты расчета и их обсуждение

Соотношения (3) и (4) были использованы для расчета  $\rho$  и  $\Delta$  для различных комбинаций прозрачная пленка — поглощающая подложка. Расчет был проведен на ЭВМ М-222, программа составлена на языке «Алгол-60» для  $\lambda = 5500 \text{ \AA}$  и  $l = 50 \text{ \AA}$  в диапазоне углов падения  $45-90^\circ$ , обычно

используемом в эллипсометрии. В качестве поглощающих подложек были выбраны вещества с различным соотношением  $n_1$  и  $k_1$ .

На рис. 1 и 2 приведены результаты расчета  $\rho(\varphi)$  и  $\Delta(\varphi)$  соответственно для серебра с  $n_1 = 0.13$  и  $k_1 = 3.36$  [6] и сурьмы с  $n_1 = 2.3$  и  $k_1 = 4.6$  [7]. Из рисунков следует, что с увеличением  $n$  растет  $\Delta$  во всем диапазоне углов  $\varphi$ ;

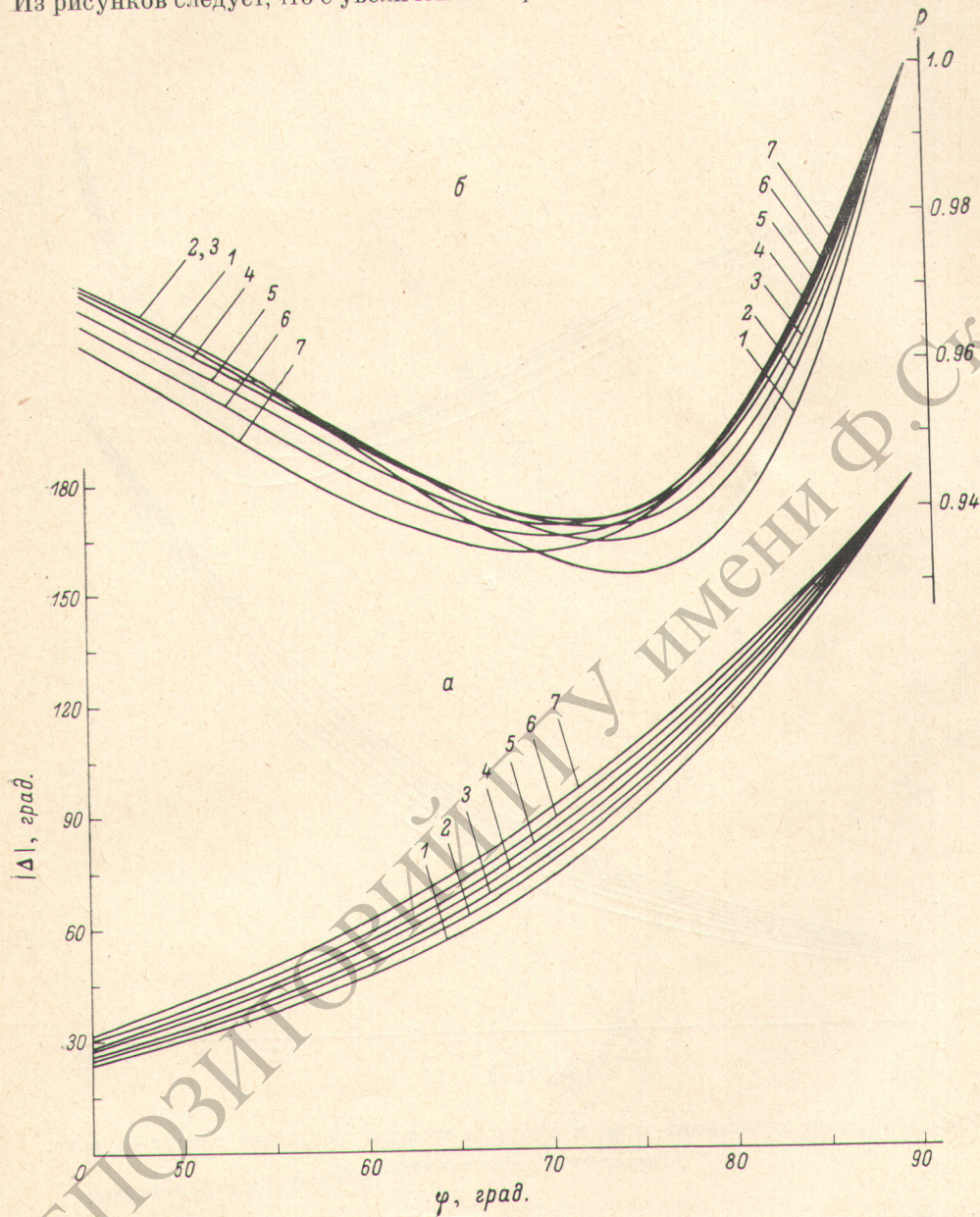


Рис. 1. Угловые зависимости  $\Delta$  (а) и  $\rho$  (б) для системы прозрачная пленка—серебро.

Кривые 1—7 соответствуют пленкам с  $l=50 \text{ \AA}$  и  $n=1.0, 1.25, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5$ .

увеличение  $n$  влечет за собой уменьшение производной  $C_{\Delta}^n$  и увеличение  $C_{\Delta}^l$ , как это следует из (4а). Наибольшие значения  $C_{\Delta}^n$  и  $C_{\Delta}^l$  приобретают при угле, близком к главному углу  $\varphi_0$ , для которого  $\Delta_0(\varphi_0) = \pi/2$ . Укажем также на слабую зависимость  $\Delta - \Delta_0$  от материала подложки: при резком различии оптических постоянных серебра и сурьмы максимальные величины  $\Delta - \Delta_0$  для этих подложек отличаются мало. С другой стороны, зависимость  $\rho(\varphi)$  и разность  $\rho - \rho_0$  существенно зависят от соотношения  $n, n_1$  и  $k_1$ . Для металлических подложек, свободных от пленок,

наблюдается минимум  $\rho_0(\varphi)$  при  $\varphi_0$ , положение и величина которого определяется соотношением  $n_1$  и  $k_1$ . Наличие пленки сказывается на смещении минимума в сторону меньших углов, тем большим, чем больше  $n$ ; возникает пересечение кривых  $\rho(\varphi)$  и  $\rho_0(\varphi)$  при угле  $\varphi_1$ , для которого  $C_\rho^l = 0$ .

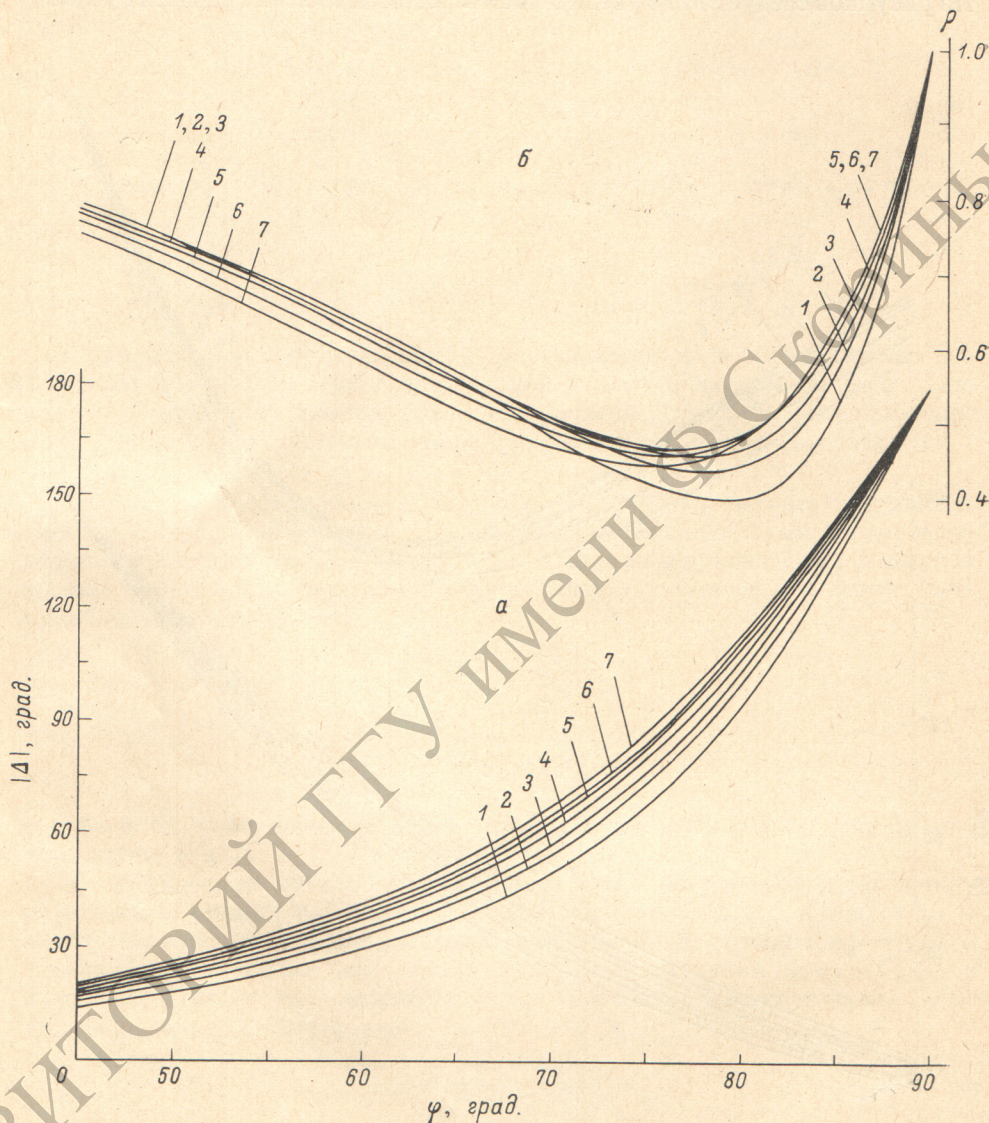


Рис. 2. Угловые зависимости  $\Delta$  (а) и  $\rho$  (б) для системы прозрачная пленка—сурьма. Обозначения те же, что и на рис. 1.

Величина  $\varphi_1$  растет с ростом  $n$ , в первом приближении значение  $\varphi_1$  задается соотношением  $\gamma_\varepsilon = 1$  (4б).

В отличие от разности  $\Delta - \Delta_0$  величина  $\rho - \rho_0$  более чувствительна к соотношению  $n_1$  и  $k_1$ . Максимальное значение разности  $\rho - \rho_0$  для пленки с  $n = 3.5$  на сурьме в 6 раз выше, чем для той же пленки на серебре. Это приводит к определенным трудностям в одновременном определении  $n$  и  $l$  по измеренным  $\Delta$  и  $\varphi$ . Из-за низких значений  $C_\rho^n$  и  $C_\rho^l$  на высокоотражающей поверхности ошибки  $\delta n$  и  $\delta l$  значительно возрастают. Если, однако, величина  $n$  известна, для определения  $l$  можно воспользоваться измерением только одного параметра  $\Delta$ : ошибка  $\delta l$  мало зависит от констант металлической поверхности, так как  $\delta l = |C_\Delta^l|^{-1} \delta \Delta$ . При исследовании

пленок на высокоотражающих поверхностях ( $n_1 \ll k_1$ ) следует существенно снизить ошибку в определении  $\psi$ , прибегая, например, к многократным отражениям [8, 9]. Заслуживает внимания метод [10], в котором  $\Delta$  и  $\rho$  определяются при нескольких углах падения.

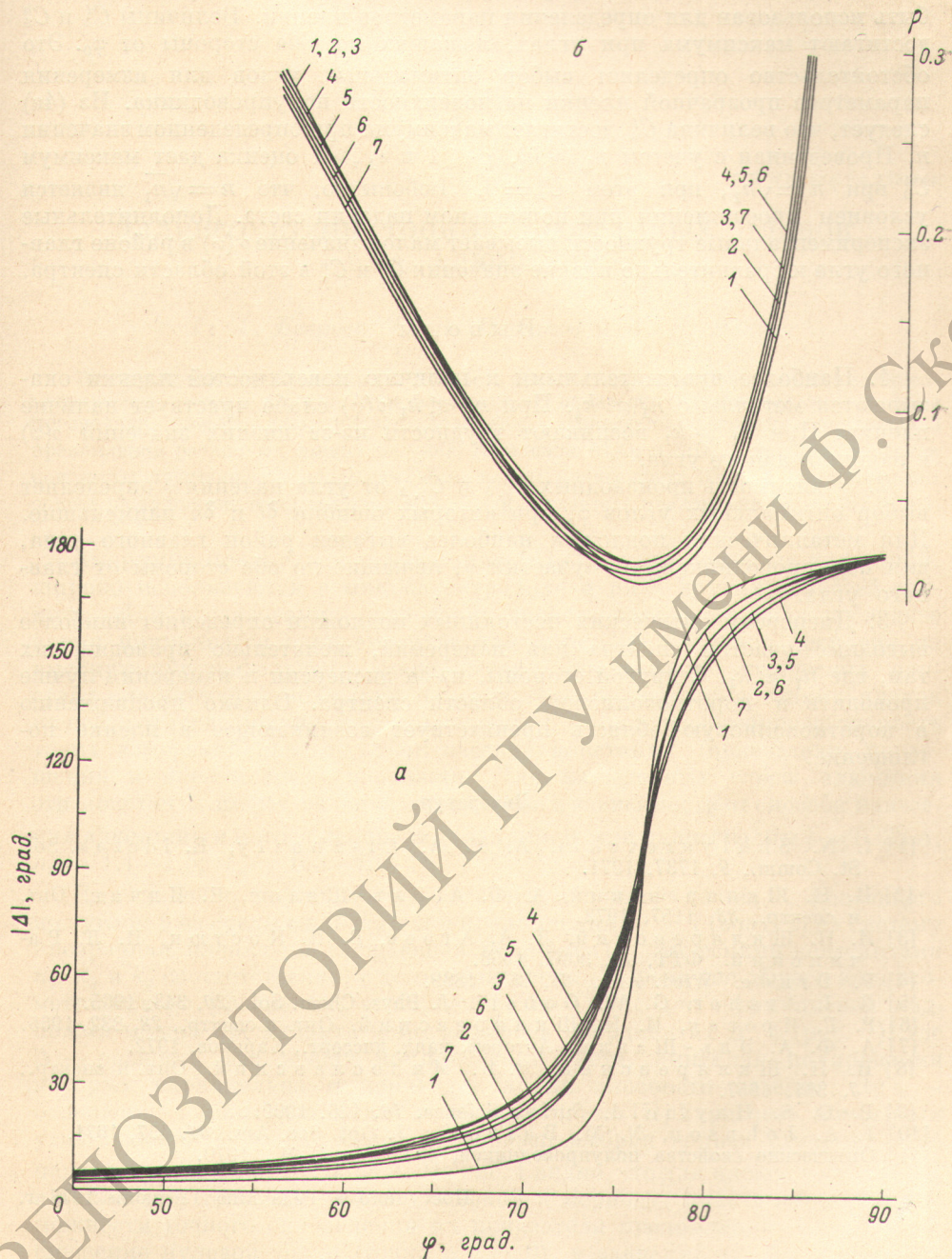


Рис. 3. Угловые зависимости  $\Delta$  (а) и  $\rho$  (б) для системы прозрачная пленка—арсенид галлия.

Обозначения те же, что и на рис. 1.

Качественно иные зависимости для  $\Delta(\varphi)$  и  $\rho(\varphi)$  имеют место для слабопоглощающих подложек. На рис. 3 приведены результаты расчета для подложки из GaAs и  $n_1 = 4.12$  и  $k_1 = 0.313$  [11]. Свободная от пленки поверхность имеет глубокий минимум  $\rho_0(\varphi)$  и точку перегиба кривой  $\Delta_0(\varphi)$  при  $\varphi_0 = 76^\circ 30'$ . Наличие пленки приводит к размытию ступеньки  $\Delta(\varphi)$

и некоторому повышению минимума  $\rho(\varphi)$  при  $\varphi > \varphi_0$ . Характерной чертой семейства кривых  $\Delta(\varphi)$  для различных  $n$  является существование общей точки пересечения при  $\varphi \approx \varphi_0$ , отсутствующей на металлической подложке. Так как в этой точке  $C_{\Delta}^i$  и  $C_{\Delta}^n$  равны нулю, главный угол не может быть использован для определения параметров пленки. Величины  $C_{\Delta}^i$  и  $C_{\Delta}^n$  достигают максимума при углах, лежащих по обе стороны от  $\varphi_0$ . Это обстоятельство определяет выбор оптимальных углов для измерения параметров прозрачной пленки на поверхности полупроводника. Из (4а) следует, что величина  $C_{\Delta}^i$  достигает максимума при определенном значении  $n$ . Проведенная с учетом  $n_1 \gg k_1$ ,  $\gamma \ll 1$  и  $\varepsilon_1 \gg 1$  оценка дает максимум  $C_{\Delta}^i$  при  $n = \sqrt{n_1}$ , при этом  $C_{\Delta}^n = 0$ . Любопытно, что  $n = \sqrt{n_1}$  является условием просветления при нормальном падении света. Дополнительные экспериментальные трудности вызывает малое значение  $\rho(\varphi)$  в районе главного угла и сравнительно низкие значения  $C_{\rho}^i$  и  $C_{\rho}^n$  в этой области спектра.

### В ы в о д ы

1. Наиболее чувствительными к наличию поверхностей пленки оказываются металлы с  $n_1 \simeq k_1$ . При  $n_1 \ll k_1$   $\rho(\varphi)$  слабо чувствует наличие пленки. При  $n_1 \gg k_1$  возникают трудности из-за низких значений  $\rho(\varphi)$  в районе главного угла.

2. Зависимость производных  $C_{\rho, \Delta}^i$  и  $C_{\rho, \Delta}^n$  от угла падения  $\varphi$  определяет выбор оптимальных углов  $\varphi$ , при которых ошибки  $\delta l$  и  $\delta n$  наименьшие. Для металлических подложек наиболее выгоден район главного угла, для полупроводниковых — участки  $\varphi$ , лежащие по обе стороны от главного угла.

3. Дисперсия оптических постоянных подложки определяет наиболее выгодные участки спектра для измерений, желательно проводить их там, где  $n_1 \approx k_1$ . С другой стороны, из-за дисперсии  $n$  измерения лучше проводить в коротковолновой области спектра. Однако продвижению в коротковолновую область препятствует возникающее в пленке поглощение.

### Л и т е р а т у р а

- [1] I. N. Shklyarevskii, A. F. A. El-Shazly, E. Idczak. Sol. St. Comm., 9, 1737, 1971.
- [2] И. Н. Шкляревский, А. Ф. А. Эль-Шазли, Е. Идчак. Опт. и спектр., 33, 1157, 1972.
- [3] И. Н. Шкляревский, Л. А. Агеев, В. П. Костюк, И. Л. Рачинский. ФТТ, 10, 3097, 1968.
- [4] P. Drude. Wied. Ann., 36, 865, 1889.
- [5] R. I. Archer, G. W. Gobeli. J. Phys. Chem. Sol., 26, 343, 1965.
- [6] Р. Г. Яровая, И. Н. Шкляревский. Опт. и спектр., 28, 832, 1965.
- [7] А. Ф. А. Эль-Шазли. Автореф. канд. диссерт., Харьков, 1972.
- [8] И. Н. Шкляревский, В. К. Милославский. Опт. и спектр., 3, 361, 1957.
- [9] P. C. S. Hayward. Surface Science, 16, 126, 1969.
- [10] J. A. Johnson, N. M. Bashara. J. Opt. Soc. Am., 61, 457, 1971.
- [11] Оптические свойства полупроводников, 463. «Мир», М., 1970.

Поступило в Редакцию 12 июня 1973 г.