

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОПТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЛОЕВ, НАХОДЯЩИХСЯ НА ПРОЗРАЧНЫХ ПОДЛОЖКАХ

М. В. Курик и А. Х. Рожко

Исследован метод определения оптической плотности слоя, находящегося на подложке, прозрачной в области поглощения слоя, который основан на вычислении выражения $(R-R')/T$, где R и R' — экспериментально определяемые величины отражения со стороны слоя и со стороны подложки соответственно, T — пропускание слоя. Это позволяет исключить влияние интерференции на вычисление оптической плотности. Проведен анализ возможных ошибок данного метода при различных способах измерения.

Осцилляции спектров отражения и пропускания тонких слоев делают задачу определения коэффициента поглощения трудной и громоздкой. В литературе предлагался ряд методов определения коэффициента поглощения тонких слоев [1-3], однако не приводилось детального исследования точности применяемых методов. Между тем известно, что при определении оптической плотности кристаллов методами, предложенными в [4], относительная ошибка определения оптической плотности полупроводниковых материалов существенно зависит от величины последней [5, 6]. Такая же ситуация должна иметь место и в случае тонких пленок.

В настоящей работе рассматривается один из методов определения коэффициента поглощения слоя на прозрачной подложке, позволяющий исключить при расчете интерференцию, связанную с многократным отражением от граничных областей слоя.

Выражение для коэффициентов пропускания и отражения оптически однородных слоев на непоглощающей подложке можно представить в виде [7]

$$T = \frac{[(1 - R_{12})(1 - R_{23}) - 4\sqrt{R_{12}R_{23}} \sin \delta_{12} \sin \delta_{23}] e^{-kd}}{1 + 2\sqrt{R_{12}R_{23}} e^{-kd} \cos\left(\frac{4\pi n_2 d}{\lambda} - \delta_{12} + \delta_{23}\right) + R_{12}R_{23} e^{-2kd}}, \quad (1)$$

$$R = \frac{R_{12} + 2\sqrt{R_{12}R_{23}} e^{-kd} \cos\left(\frac{4\pi n_2 d}{\lambda} - \delta_{12} + \delta_{23}\right) + R_{23} e^{-2kd}}{1 + 2\sqrt{R_{12}R_{23}} e^{-kd} \cos\left(\frac{4\pi n_2 d}{\lambda} - \delta_{12} + \delta_{23}\right) + R_{12}R_{23} e^{-2kd}}, \quad (2)$$

$$R' = \frac{R_{23} + 2\sqrt{R_{12}R_{23}} e^{-kd} \cos\left(\frac{4\pi n_2 d}{\lambda} - \delta_{23} + \delta_{12}\right) + R_{12} e^{-2kd}}{1 + 2\sqrt{R_{12}R_{23}} e^{-kd} \cos\left(\frac{4\pi n_2 d}{\lambda} - \delta_{23} + \delta_{12}\right) + R_{12}R_{23} e^{-2kd}}, \quad (3)$$

где R — отражение со стороны слоя, R' — отражение со стороны подложки, n_2 — показатель преломления слоя, k — коэффициент поглощения слоя $k = \frac{4\pi\kappa}{\lambda}$, d — толщина слоя,

$$\operatorname{tg} \delta_{ij} = \frac{2n_j \kappa_i}{(n_i + \kappa_i)^2 - n_j^2}, \quad R_{ij} = \frac{(n_i - n_j)^2 + \kappa_i^2}{(n_i + n_j)^2 + \kappa_i^2}, \quad (4)$$

κ — мнимая часть комплексного показателя преломления. Индексы 1, 2, 3 — обозначают среды: вакуум, слой и подложку соответственно.

В случае слабопоглощающего слоя, пренебрегая членами $4\sqrt{R_{12}R_{23}} \times \sin \delta_{12} \sin \delta_{23}$, $|\delta_{12} + \delta_{23}|$ по сравнению с $(1 - R_{12})(1 - R_{23})$, $4\pi n_2 d / \lambda$, соответственно из уравнений (1)–(3) можно получить

$$\frac{R - R'}{T} = \frac{(R_{12} - R_{23})(1 - e^{-2kd})}{(1 - R_{12})(1 - R_{23})e^{-kd}} \quad (5)$$

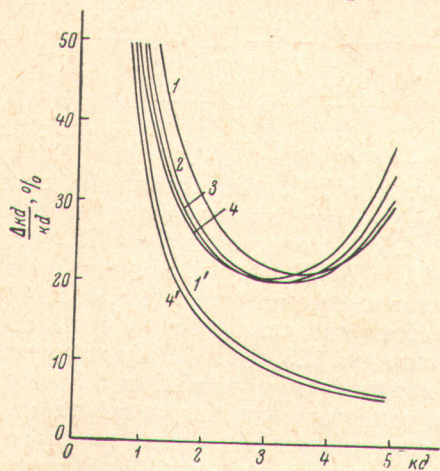


Рис. 1. Ошибка определения оптической плотности для различных значений T , R и R' .

Кривые 1–4 — для $\Delta T = 0.005 \times (1 + T)$, $\Delta R = \Delta R' = 0.015$, $n_2 = 1.5$ и $n_3 = 2.5, 3.0, 3.5$ и 4.0 соответственно. Кривые 1' и 4' — для $\Delta R_1 = \Delta R_2 = 0.015$ и $\Delta(T/R) = \Delta(T/R') = 0.015$, $n_2 = 2.5$ и 4.0 соответственно.

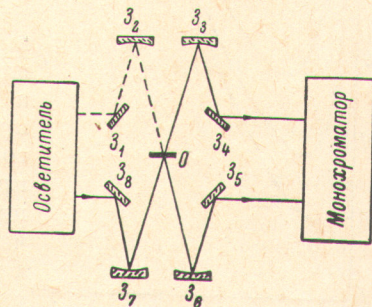


Рис. 2. Схема приставки для спектрофотометра UR-10 для измерения T/R или T/R' .

Такая комбинация R , R' и T позволяет исключить влияние интерференции на определение оптической плотности слоя.

Из соотношения (5) получаем

$$kd = \ln \left[\frac{(1 - R_{12})(1 - R_{23})(R - R')}{2T(R_{12} - R_{23})} + \frac{\sqrt{(1 - R_{12})^2(1 - R_{23})^2(R - R')^2 + 4T^2(R_{12} - R_{23})^2}}{2T(R_{12} - R_{23})} \right] \quad (6)$$

где $R_{ij} = (n_i - n_j)^2 / (n_i + n_j)^2$.

Таким образом, зная n_i , n_j и измерив экспериментально R , R' и T , можно с помощью соотношения (6) вычислить коэффициент поглощения.

Относительная ошибка определения оптической плотности при таком способе вычислений определяется выражением

$$\frac{\Delta(kd)}{kd} = \frac{1}{kd} \left[\left| \frac{\partial(kd)}{\partial R_{12}} \right| \Delta R_{12} + \left| \frac{\partial(kd)}{\partial R_{23}} \right| \Delta R_{23} + \left| \frac{\partial(kd)}{\partial R} \right| \Delta R + \left| \frac{\partial(kd)}{\partial R'} \right| \Delta R' + \left| \frac{\partial(kd)}{\partial T} \right| \Delta T \right] \quad (7)$$

Примем, как и в [8], что $\Delta T = 0.005(1 + T)$, одновременно положим, что $\Delta R_{12} = \Delta R_{23} = \Delta R = \Delta R' = 0.015$.

Используя эти параметры, можно вычислить $\Delta(kd)/kd$ из (7). Результаты расчета представлены на рис. 1. Кривые 1–4 отвечают слою с показателем преломления 2.5, 3.0, 3.5 и 4.0 соответственно, а показатель преломления подложки $n_3 = 1.5$. Как видно из рис. 1, ошибка в определении kd не может быть меньше, чем 20% для принятых постоянных и минимальна при $kd \sim 3$.

Ошибку определения kd можно значительно уменьшить, если пользоваться двухлучевым методом измерений. В качестве примера выбран метод измерения на спектрофотометре UR-10. Использование приставки для измерения спектров отражения [9] с несколько измененной оптической схемой позволяет непосредственно измерять T/R или T/R' , что достигается перекрытием одного из оптических путей осветителя и соответствующей установкой образца (рис. 2) при выполнении условия $R, R' > T$. Если это условие не выполняется, тогда необходимо применение нейтраль-

ного ослабителя интенсивности света, либо производить измерение R/T , R'/T (рис. 2, штриховая линия).¹

В этом случае коэффициент поглощения вычисляется по формуле (6), а относительная ошибка будет определяться выражением

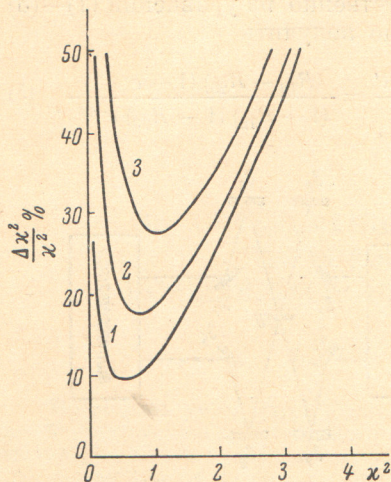


Рис. 3. Относительная ошибка $\Delta x^2/x^2$ как функция x^2 .

Кривые 1—3 получены для $n_2=2,5$, 3,0 и 3,5 соответственно. $\Delta C/C=0,015$ и $n_3=1,5$.

ставки, когда оба оптические пути осветителя не перекрыты, может быть измерено отношение $R'/R=C$. Используя (4), получим

$$x^2 = [2(1-C)]^{-1} [C\alpha - \beta + \sqrt{(C\alpha - \beta)^2 - 4(1-C)(C\gamma - q)}], \quad (9)$$

где

$$\alpha = (n_2 - 1)^2 + (n_2 + n_3)^2, \quad \beta = (n_2 + 1)^2 + (n_2 - n_3)^2, \quad \gamma = (n_2 - 1)^2 (n_2 + n_3)^2, \\ q = (n_2 + 1)^2 (n_2 - n_3)^2.$$

Относительная ошибка $\Delta x^2/x^2$ как функция x^2 представлена на рис. 3. Отметим, что выражения (1)–(3) и все из них вытекающие получены без учета отражательных потерь на границе подложка—воздух. Такой учет можно сделать, если использовать подложки в виде клина (угол наклона $1-2^\circ$) [12]. В таком случае экспериментально определяемые величины R' и T необходимо домножить на $(1-V)^{-2}$ и $(1-V)^{-1}$ соответственно, где V определяется $V=(n_3-1)^2/(n_3+1)^2$.

В заключение авторы выражают благодарность М. П. Лисице, всем участникам семинара оптического отдела Института полупроводников АН УССР за полезные замечания.

Литература

- [1] Н. А. Власенко. Уч. зап. ХГУ, тр. физ. отд., 7, 321, 1958.
- [2] R. P. Howson. J. Opt. Soc. Am. 55, 272, 1965.
- [3] P. O. Nilsson. Appl. Optics, 7, 435, 1968.
- [4] М. П. Лисица. ДАН СССР, 111, 803, 1956.
- [5] О. В. Вакуленко. Укр. физ. ж., 9, 676, 1964.
- [6] М. В. Курик. Опт. и спектр., 19, 964, 1965.
- [7] Г. В. Розенберг. Оптика тонкослойных покрытий. М., 1958.
- [8] F. Oswald. Optik, B16, 529, 1959.
- [9] М. Я. Валах. Автореф. канд. дисс., Киев, 1968.
- [10] Заводское описание UR-10.
- [11] Т. П. Кравец, Х. Л. Песькина, И. Н. Прибыткова. Изв. АН СССР, сер. физ., 12, 504, 1948.
- [12] С. Метфессель. Тонкие пленки, их измерения и свойства. М.—Л., 1963.

Поступило в Редакцию 9 декабря 1971 г.

¹ Описанный метод измерения отношения R/T или T/R может быть легко реализован на отечественных спектрофотометрах ИКС-14А, ИКС-16, ИКС-22 и других, путем применения двух приставок, выпускаемых промышленностью ИПО-22.