

НОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДИСПЕРСИИ ТОНКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОЕВ

И. Н. Шкляревский и А. Ф. А. Эль Шази

Предложена интерференционная методика определения дисперсии показателя преломления прозрачных диэлектрических слоев оптической толщины $d < \lambda_0/4$. Показатели преломления и толщина диэлектрического слоя рассчитываются по измеренной спектральной зависимости коэффициента отражения от системы диэлектрический слой—металлическая подложка. Определена дисперсия слоев сернистого цинка толщиной 35—50 нм в видимой области спектра.

Введение

Обычно показатели преломления и толщины осажденных на прозрачную подложку диэлектрических слоев рассчитываются по измеренным экстремальным значениям коэффициентов пропускания или отражения и соответствующим им длинам волн. В предыдущей работе [1] была описана модификация интерференционного метода измерения дисперсии показателей преломления и толщины прозрачных диэлектрических слоев. Для иллюстрации метода была измерена дисперсия слоев сернистого цинка толщиной 150—300 нм в видимой области спектра.

Однако чтобы понять, как при различных условиях вакуумного осаждения формируется структура диэлектрического слоя, необходимо знать его характеристики и, в частности, показатели преломления при меньших толщинах. Такие измерения можно провести, если заменить стеклянную подложку металлической.

Оптическая толщина слоя d_0 , при которой коэффициент отражения диэлектрического слоя, осажденного на металлическую подложку, минимален, определяется соотношением [2, 3]

$$d_0 = tn_1 = \frac{\delta}{\pi} \frac{\lambda_0}{4}, \quad (1)$$

где t и n_1 — толщина и показатель преломления слоя, λ_0 — длина волны, соответствующая R_{\min} , а δ — скачок фазы, возникающий при отражении света на границе слой—металл

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{2n_1 k_2}{n_1^2 - n_2^2 - k_2^2}. \quad (2)$$

Здесь n_2 и k_2 — показатели преломления и поглощения металла.

Коэффициент отражения R_{\min} системы слой—металл в минимуме выражается формулой, которую легко получить из выражения (8) работы [4], положив в ней $\gamma=0$, что соответствует $d_0 = \delta/\pi \lambda_0$. Тогда

$$R_{\min} = \frac{(n_1^2 + n_0^2)(n_1^2 + n_2^2 + k_2^2) - 4n_0 n_2 n_1^2 -}{(n_1^2 + n_0^2)(n_1^2 + n_2^2 + k_2^2) + 4n_0 n_2 n_1^2 -} \\ - \frac{(n_1^2 - n_0^2) \sqrt{(n_1^2 + n_2^2 + k_2^2)^2 - 4n_1^2 n_2^2}}{(n_1^2 - n_0^2) \sqrt{(n_1^2 + n_2^2 + k_2^2)^2 - 4n_1^2 n_2^2}}. \quad (3)$$

Обычно $n_0=1$ — показатель преломления воздуха. Если построить зависимость (3), изменяя показатель преломления слоя n_1 в разумных пределах, и пересечь ее экспериментально измеренным значением R_{\min} , то можно найти значение n_1 -слоя для данной длины волны λ_0 . Рассчитав затем по (2) значение δ , с помощью выражения (1) находим толщину слоя t .

Методика расчета дисперсии показателя преломления

Расчет дисперсии показателя преломления прозрачного слоя толщиной $tn_1 = \frac{\delta \lambda_0}{\pi \cdot 4}$ аналогичен описанному ранее [1].

Коэффициент отражения R от осажденного на металле прозрачного слоя выражается следующей формулой:

$$R = \frac{a + 2b \cos \gamma n_1 - 4c \sin \gamma n_1}{d + 2b \cos \gamma n_1 - 4c \sin \gamma n_1}, \quad (4)$$

где

$$a = (n_1 - n_0)^2 [(n_2 + n_1)^2 + k_2^2] + (n_1 + n_0)^2 [(n_2 - n_1)^2 + k_2^2],$$

$$b = (n_1^2 - n_0^2)(n_2^2 + k_2^2 - n_1^2), \quad c = n_1 k_2 (n_1^2 - n_0^2),$$

$$d = (n_1 + n_0)^2 [(n_2 + n_1)^2 + k_2^2] + (n_1 - n_0)^2 [(n_2 - n_1)^2 + k_2^2] \quad \text{и} \quad \gamma = \frac{4\pi t}{\lambda}.$$

Зная толщину слоя t и оптические постоянные металла n_2 и k_2 , можно по формуле (4) рассчитать целый ряд зависимостей $R=f(n_1)$ для различных длин волн. При этом показатели преломления n_1 слоя нужно изменять, как и в случае $R_{\min}=f(n_1)$ в разумных пределах. Пересечение построенных таким образом кривых экспериментально измеренными значениями R позволяет определить искомые величины показателей преломления слоя.

Измерения и расчеты

Не всякая металлическая подложка может быть использована для наших целей. Так, например, если слой сернистого цинга толщиной

$$d_0 = \frac{\delta \lambda_0}{\pi \cdot 4} \quad \text{при} \quad \lambda_0 \approx 550 \text{ нм}$$

осадить на хром [2], коэффициент отражения от такого образца будет близок к нулю примерно во всей видимой области спектра и определить R_{\min} и соответствующую ему длину волны λ_0 не представляется возможным. Второй крайний случай — серебряная подложка [3]. Здесь наблюдается незначительное уменьшение R по сравнению с R серебра, практически одинаковое во всей видимой области спектра и снова определение R_{\min} и λ_0 невозможно.

Резко выраженная интерференционная картина наблюдается при осаждении сернистого цинка на сурьму. При быстром осаждении сурьмы в вакууме порядка $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. образуются зеркальные слои, оптические свойства которых остаются постоянными в течение длительного времени, более чем достаточного для проведения соответствующих измерений.

Одновременно осаждались пять зеркал. Два из них использовались для измерения оптических постоянных n_2 и k_2 [5], на половину каждого из трех других зеркал наносился сернистый цинк, вторые половины этих зеркал экранировались. Перемещая специальный

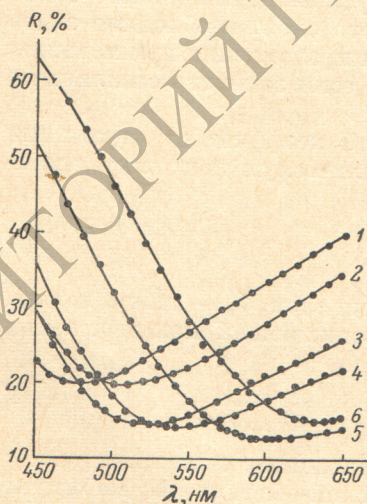


Рис. 1. Спектральная зависимость $R=f(\lambda)$ покрытий сернистый цинк—сурьма.

Кривые 1—6 соответствуют толщинам сернистого цинка 34,9, 38, 38,8, 41,3, 47,9, 53 нм.

на половину каждого из трех других зеркал наносился сернистый цинк, вторые половины этих зеркал экранировались. Перемещая специальный

экран, расположенный непосредственно перед сурьмяными покрытиями, мы получали в идентичных условиях три образца с различной толщиной слоев сернистого цинка. Условия испарения сернистого цинка были такие же, как и в [1]. Одновременно наносился контрольный толстый слой сернистого цинка на стекло; его показатели преломления не отличались от приведенных в [1].

Измерение коэффициентов отражения покрытий сернистый цинк—сурьма производилось относительно сурьмы (вторая половина образца)

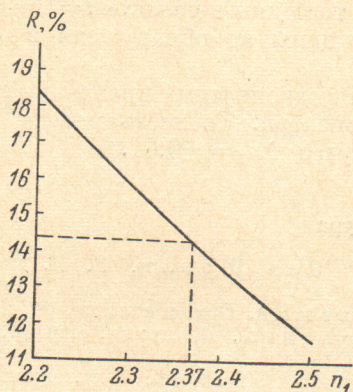


Рис. 2. Определение показателя преломления сернистого цинка по рассчитанной зависимости $R_{\min}=f(n_1)$ для $\lambda_0=520$ нм.

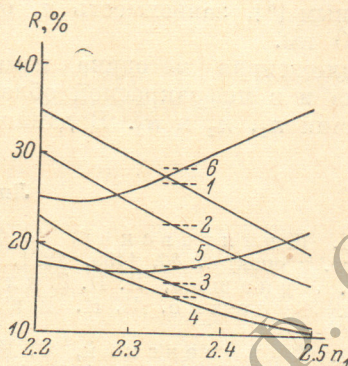


Рис. 3. Рассчитанная зависимость $R=f(n_1)$ для $\lambda=550$ нм.

Кривые 1—6 соответствуют тем же толщинам слоев, что и на рис. 1. Штриховые линии — значения R , взятые из рис. 1.

на спектрофотометре СФ-4, снабженном специальной приставкой в спектральной области 450—650 нм. Коэффициенты отражения сурьмы рассчитывались по измеренным значениям оптических постоянных n_2 и k_2 . Характерные кривые $R=f(\lambda)$ приведены на рис. 1. После определения для R_{\min} каждой из них значения λ_0 , строились зависимости $R_{\min}=f(n_1)$. Естественно, в каждом случае величины n_2 и k_2 сурьмы соответствовали своему значению длины волны λ_0 . На рис. 2 приведена такая зависимость для покрытия с $\lambda_0=520$ нм (кривая 3 на рис. 1). По измеренному значению R_{\min} (14.4%) находился показатель преломления n_1 (2.37). Далее, описанным выше образом, с помощью формул (2) и (1) рассчитывались толщины t слоев сернистого цинка.

Показатели преломления для других длин волн находились при помощи формулы (4). По известным значениям n_0 , n_2 , k_2 , t и λ на электронно-вычислительной машине рассчитывались зависимости $R=f(n_1)$ в спектральном диапазоне 450—650 нм для ряда длин волн через каждые 20 нм. Такие зависимости для шести слоев приведены на рис. 3 для $\lambda=550$ нм. Каждая из этих кривых пересечена экспериментально найденным значением R , взятым из рис. 1; по точке пересечения определялись искомые значения n_1 . Подобным образом выглядят аналогичные зависимости и для других длин волн.

В исследованном диапазоне толщин 35—50 нм показатели преломления слоев сернистого цинка не зависят от толщины слоя. Более того, дисперсионная кривая $n_1=f(\lambda)$, построенная по найденным здесь n_1 , совпадает с соответствующей кривой работы [1], где толщина слоев сернистого цинка лежала в пределах 150—300 нм. Усредненные значения n_1 сернистого цинка приведены в таблице.

λ , нм	n_1
450	2.45
475	2.41
500	2.39
525	2.37
550	2.35
575	2.34
600	2.33
625	2.32
650	2.31

Слой сернистого цинка, описанные кривыми 1, 2, 6 и 3, 4, 5 рис. 1 соответственно осаждались на сурьмяные покрытия, оптические постоянные которых отличались на 10—15% (различная степень чистоты исходной сурьмы). Это повлекло за собой соответствующее различие в зависимостях $R=f(\lambda)$ этих двух групп образцов, не влияя, естественно, на значения n_1 .

Таким образом, учитывая результат [1], можно утверждать, что показатели преломления осажденных в одинаковых условиях слоев сернистого цинка не обнаруживают зависимости от толщины в области $t=35-300$ нм. По данным [6], зависимость n_1 от толщины не обнаружена в области 120—600 нм.

Предложенная методика измерения дисперсии прозрачных слоев пригодна и в инфракрасной области спектра. Точность метода зависит от величин n_1 , n_2 и k_2 . В данном случае $\Delta n_1 = \pm 0.01$.

Литература

- [1] И. Н. Шкляревский, А. Ф. А. Эль Шазли, Г. В. Лысова. *Опт. и спектр.*, 30, 1135, 1971.
- [2] Е. А. Лупашко, И. Н. Шкляревский. *Опт. и спектр.*, 16, 517, 1964.
- [3] Е. А. Лупашко, И. Н. Шкляревский. *Ж. прикл. спектр.*, 11, 754, 1969.
- [4] И. Н. Шкляревский, О. И. Шкляревский. *Опт. и спектр.*, 27, 657, 1969.
- [5] И. Н. Шкляревский, В. К. Милославский. *Опт. и спектр.*, 3, 361, 1957.
- [6] J. F. Hall, W. F. Ferguson. *J. Opt. Soc. Am.*, 45, 74, 1955.

Поступило в Редакцию 28 ноября 1970 г