

ОБ ОДНОМ ВАРИАНТЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОСТОЯННЫХ МЕТАЛЛА МЕТОДОМ ОТРАЖЕНИЯ

В. Б. Знаменский

1. Обычно для определения оптических постоянных поглощающих пленок по методу отражения проводятся измерения при наклонном падении света на исследуемую поверхность [1]. Исключением являются вариант, развитый Фабр [2], и способ Кравца [3], в которых измерения осуществляются при нормальном или близком к нормальному падению света. Первый вариант основан на построении двух огибающих серий максимумов и минимумов коэффициентов отражения от переменной толщины исследуемого поглощающего тонкого слоя. Этот вариант был применен в основном для далекой ультрафиолетовой области спектра, где отражательная способность слоев незначительна, и поэтому возможен ряд сделанных допущений при выводе формул. В варианте Кравца рабочие формулы связывают оптические постоянные металла с коэффициентами отражения от границ двух систем толстослойный диэлектрик—металл. Показатели преломления диэлектрических сред, на которых находится исследуемый металл, различны и полагаются известными.

В настоящей работе описывается один из вариантов определения оптических постоянных по методу отражения, основанный на измерениях экстремальных значений коэффициентов отражения от систем покрытий при падении на них света по нормали. Не касаясь методики измерений отражательной способности покрытий при нормальном падении на них света [4], рассмотрим возможность определения оптических постоянных n и k металла и показателей преломления различных диэлектрических пленок по экстремальным значениям отражения от систем воздух—прозрачная диэлектрическая пленка переменной толщины—металл.

2. Экстремальные значения отражения от одной из таких систем могут быть описаны следующими выражениями [5]:

$$R_1 = \frac{(n_1^2 + 1)(n_1^2 + n^2 + k^2) - 4n_1^2 n - (n_1^2 - 1)\sqrt{(n_1^2 + n^2 + k^2)^2 - 4n_1^2 n^2}}{(n_1^2 + 1)(n_1^2 + n^2 + k^2) + 4n_1^2 n - (n_1^2 - 1)\sqrt{(n_1^2 + n^2 + k^2)^2 - 4n_1^2 n^2}}, \quad (1)$$

$$R_2 = \frac{(n_1^2 + 1)(n_1^2 + n^2 + k^2) - 4n_1^2 n + (n_1^2 - 1)\sqrt{(n_1^2 + n^2 + k^2)^2 - 4n_1^2 n^2}}{(n_1^2 + 1)(n_1^2 + n^2 + k^2) + 4n_1^2 n + (n_1^2 - 1)\sqrt{(n_1^2 + n^2 + k^2)^2 - 4n_1^2 n^2}}. \quad (2)$$

Минимальному значению коэффициента отражения R_1 соответствует оптическая толщина диэлектрического слоя $t_{\min} n_1 = \left(2m + \frac{\Delta}{\pi}\right) \frac{\lambda}{4}$, а максимальному значению

$R_2 - t_{\max} n_1 = \left(2m + 1 + \frac{\Delta}{\pi}\right) \frac{\lambda}{4}$, где n_1 — показатель преломления диэлектрической пленки; $m = 0, 1, 2, \dots$; λ — длина волны света; Δ — сдвиг фазы световой волны на границе диэлектрик—металл, определяемый как

$$\operatorname{tg} \Delta = \frac{2n_1 k}{n_1^2 - n^2 - k^2}. \quad (3)$$

Из выражений (1) и (2) можно получить

$$n_1^2 + n^2 + k^2 = 2 \frac{A_1 n_1^2}{n_1^2 + 1} n, \quad (4)$$

где $A_1 = \frac{1 + R_1}{1 - R_1} + \frac{1 + R_2}{1 - R_2}$.

Подстановка (4) в выражения (1) и (2) приводит к

$$\sqrt{R_1} = \frac{2n_1 \sqrt{A_1^2 n_1^2 - (n_1^2 + 1)^2} - (n_1^4 - 1)^2}{2A_1 n_1^2 + (n_1^2 + 1)^2} \quad (5)$$

$$\sqrt{R_2} = \frac{2n_1 \sqrt{A_1^2 n_1^2 - (n_1^2 + 1)^2} + (n_1^4 - 1)^2}{2A_1 n_1^2 + (n_1^2 + 1)^2}. \quad (6)$$

Используя (5) и (6), легко заметить, что показатель преломления n_1 диэлектрической пленки, находящейся на поверхности металла, определяется в виде

$$n_1 = \sqrt{\frac{(1 - \sqrt{R_1})(1 + \sqrt{R_2})}{(1 + \sqrt{R_1})(1 - \sqrt{R_2})}}. \quad (7)$$

Заметим, что для случая прозрачной диэлектрической пленки, находящейся на непоглощающей подложке (стекло и т. п.), выражение для показателя преломления пленки n_2 имеет вид

$$n_2 = \sqrt{\frac{(1 + \sqrt{R_{01}})(1 + \sqrt{R_{02}})}{(1 - \sqrt{R_{01}})(1 - \sqrt{R_{02}})}},$$

подобный (7), где R_{01} и R_{02} — экстремальные значения отражения.

Таким образом, одна рассматриваемая система воздух—непоглощающая диэлектрическая пленка переменной толщины—металл не дает возможности определить оптические постоянные n и k металла.

Значения оптических постоянных металла могут быть оценены, когда дополнительно известны или экстремальные значения отражения R'_1 и R'_2 от второй подобной системы, показатель преломления диэлектрической пленки у которой n_1 , или же коэффициент отражения R_3 от чистого металлического слоя.

Для двух подобных рассматриваемых систем значения оптических постоянных n и k определяются следующими выражениями:

$$n = \frac{1}{2} \frac{n_1^2 - (n'_1)^2}{\frac{A_1 n_1^2}{n_1^2 + 1} - \frac{A'_1 (n'_1)^2}{(n'_1)^2 + 1}}, \quad (8)$$

$$k = \sqrt{2 \frac{A_1 n_1^2}{n_1^2 + 1} n - n^2 - n_1^2}, \quad (9)$$

вытекающими из (4) и подобного ему соотношения, записанного для значений R'_1 и R'_2 второй системы. Здесь n'_1 рассчитывается по формуле (7) для измеренных величин R'_1 и R'_2 .

Определяя оптические постоянные металла и показатели преломления диэлектрических пленок из выражений (7)–(9), можно вычислить как сдвиг фазы Δ на границе диэлектрик—металл [выражение (3)], так и толщины диэлектрических пленок в местах минимального и максимального значений отражения.

Для последнего случая $t_{\min} = \frac{\Delta}{\pi} \frac{\lambda}{4n_1}$ и $t_{\max} = t_{\min} + \frac{\lambda}{4}$.

Отметим, что если толщины диэлектрических пленок бесконечно возрастают, то значения R_1 , R_2 и R'_1 , R'_2 приближаются к средним значениям $R_{\text{ср.}} = \sqrt{R_1 R_2}$ и $R'_{\text{ср.}} = \sqrt{R'_1 R'_2}$ [6]. В этом предельном случае при условии, что показатели преломления таких диэлектрических сред известны, описываемый вариант переходит в вариант Кравца.

Если помимо измеренных экстремальных значений отражения от системы воздух—диэлектрическая пленка переменной толщины—металл известен и коэффициент отражения от металлического слоя

$$R_3 = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}, \quad (10)$$

то из выражений (4) и (10) следует

$$n = \frac{1}{2} \frac{n_1^2 - 1}{\frac{A_1 n_1^2}{n_1^2 + 1} - \frac{1 + R_3}{1 - R_3}}, \quad (11)$$

$$k = \sqrt{\frac{R_3 (n+1)^2 - (n-1)^2}{1 - R_3}}. \quad (12)$$

Здесь n_1 — показатель преломления диэлектрической пленки, нанесенной на металл, определяется согласно (7).

Эта разновидность рассматриваемого варианта определения показателя преломления диэлектрической пленки и оптических постоянных металла особенно удобна, когда возникает необходимость их определения без контактирования покрытий с внешней средой. В этом случае измерения коэффициентов отражения R_1 и R_2 могут быть проведены непосредственно в процессе испарения на заранее нанесенный на подложку слой металла, имеющий коэффициент отражения R_3 , одной диэлектрической пленки до оптической толщины, близкой к $\lambda/4$ (R_1) с последующим ее наращиванием до толщины $\sim \lambda/2$ (R_2).

3. На электронно-вычислительной машине были проведены расчеты погрешностей определения оптических постоянных различными вариантами в зависимости от предельно допустимых ошибок в измерениях коэффициентов отражения.

Результаты расчетов показали, что для получения, например, значений $n=0.82$, $k=5.99$ (алюминий, $\lambda=546.1$ нм [7]) с погрешностью соответственно 3.5 и 0.1% необходимо измерять значения коэффициентов отражения с относительными ошибками,

не превышающими 0.35% для рассмотренного варианта и не более 0.15% для описанной выше разновидности этого варианта и способа Кравца. В случае, когда ошибка в измерениях коэффициентов отражения в рассмотренном варианте увеличивается до 14%, погрешность определения n и k возрастает почти пропорционально в исследованном интервале ошибок измерения до 100 и 3.2% соответственно. Вместе с тем резко увеличиваются и относительные ошибки в вычислениях $n_1=2.2$ и $n'_1=1.35$ от 1 до 37 и 15% для n_1 и n'_1 .

Если же учесть, что значения показателей преломления диэлектрических пленок, нанесенных, например, вакуумным способом, существенно зависят от условий эксперимента, а использование их литературных значений приводит к ошибкам в определении оптических постоянных, то преимущества их определения по рассматриваемому варианту очевидны.

Литература

- [1] А. В. Соколов. Оптические свойства металлов. ГИФМЛ, М., 1961.
- [2] D. Fabre, I. Romand. J. Phys. Rad., 21, 101, 1960; 22, 324, 1961.
- [3] Т. П. Кравец. Изв. АН СССР, сер. физ., 12, 504, 1948; Н. Н. Прибыткова. Опт. и спектр., 2, 623, 1957.
- [4] В. Б. Знаменский. Авт. свид. № 135256. Бюлл. изобр. № 2, 1961. Опт.-механ. промыш., 1971.
- [5] И. Н. Шкляревский, О. И. Шкляревский. Опт. и спектр., 27, 654, 1969.
- [6] Е. А. Несмелов. Канд. дисс., Минск, 1970.
- [7] Физика тонких пленок, т. 2, под ред. Г. Хасса и Р. Туна. Изд. «Мир», М., 1967.

Поступило в Редакцию 16 февраля 1971 г.

УДК 539.194

ФОТОХРОМИЗМ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В. Ф. Манджиков, А. П. Дармалян, В. А. Барачевский и Ю. Н. Герулайтис

В данном сообщении описывается новое явление — двухфотонное возбуждение спиропиранов излучением рубинового лазера, приводящее к фотохромным превращениям в молекуле.

О безызлучательной деградации (распаде) возбужденного состояния при многофотонном возбуждении органических соединений впервые сообщили авторы работы [1].

Изменение спектра поглощения бензольного раствора одного из спиропиранов (рис. 1), происходящее при облучении ультрафиолетовым светом, сопровождается появлением синей окраски. Такая же окраска появляется при воздействии на раствор излучения рубинового лазера, несмотря на отсутствие в спектре исходной формы спиропирана полосы поглощения в видимой области спектра (рис. 1). Аналогичные изменения окраски наблюдались для ряда спиропиранов, растворенных в этаноле и полиметилметакрилате. Возникающая окраска растворов исчезает спонтанно. Исчезновение окраски ускоряется при нагревании раствора или при облучении светом в видимой области спектра.

Исследования проводились на установке, состоящей из рубинового лазера, системы регистрации излучения лазера и изменения пропускания растворов при $\lambda=632$ нм (ОКГ-13). Выходная энергия лазера в режиме модулированной добротности составляла 0.4 дж, в режиме свободной генерации — 4 дж. Длительность импульса генерации равнялась $3 \cdot 10^{-8}$ и $3 \cdot 10^{-4}$ сек. соответственно. Для устранения влияния ультрафиолетового излучения импульсных ламп лазера на фотохромный материал на выходе рубинового лазера помещался фильтр ЖС-10.

При воздействии сфокусированного в центр кюветы длиной 40 мм излучения рубинового лазера на бесцветный раствор спиропирана появляется окрашенный шнур либо по всей длине кюветы (в режиме модулированной добротности), либо длиной 8–10 мм (в режиме свободной генерации). В фокусе наблюдается вспучивание шнура. Время спонтанного исчезновения окраски составляет в жидких растворах приблизительно 10 сек., в полиметилметакрилате — несколько минут.

Установлена квадратичная зависимость максимального изменения оптической плотности раствора (D) при $\lambda=632$ нм от интенсивности излучения рубинового лазера. График зависимости D от I^2 для одного из исследованных спиропиранов приведен на рис. 2.