

СПЕКТРОФОТОМЕТРИЯ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СТЕКЛЯННЫХ ПЛАСТИН¹

С. С. Михеев, А. Б. Сотский, Н. И. Стаськов

(Учреждение образования «Могилевский государственный университет имени А. А. Кулешова»,
кафедра общей физики)

Получены строгие аналитические выражения отражательной и пропускательной способностей плоскопараллельного слоя, толщина которого много больше длины волны света. С их использованием определены спектральные характеристики стеклянной подложки, используемой для наноразмерных полупроводниковых слоев. Измерения выполнены с использованием спектрофотометра PHOTON RT и спектроэллипсометра ES-2.

В большинстве случаев наноразмерные планарные оптические структуры наносятся на стеклянные плоскопараллельные подложки, толщина которых $d \gg \lambda$, где λ – длина волны света. В такой ситуации необходимым условием корректного экспериментального определения характеристик структур является предварительное задание дисперсионных характеристик подложки.

Существующие программные обеспечения для обработки экспериментальных данных по оптическому зондированию слоев структур обычно основываются на модели когерентного, либо частично когерентного света. При использовании частично когерентного источника света малых размеров отражательная, либо пропускательная способности структуры могут быть рассчитаны по формуле

$$\bar{F}(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} K(\lambda - \lambda') F(\lambda') d\lambda', \quad (1)$$

где $K(\lambda - \lambda')$ – аппаратная функция монохроматора, $F(\lambda')$ – энергетические коэффициенты отражения, либо прохождения света, найденные в когерентном приближении [1]. Однако непосредственное использование (1) при решении обратных оптических задач сталкивается с серьезными вычислительными проблемами. Для их преодоления необходима аналитическая оценка интеграла (1), которая не требует детального знания функции $K(\lambda - \lambda')$.

В литературе известны подобные эвристические формулы, полученные суммированием лучевых рядов с использованием теории графов [2; 3]. Однако, поскольку они получены вне рамок волновой теории света, границы их применимости не вполне ясны, а в ряде случаев, например, при исследовании сильно поглощающих слоев, они приводят к физически не приемлемым результатам. Таким образом, представляет интерес непосредственная асимптотическая оценка интеграла (1) при условии $d \gg \lambda$.

Для ее получения мы использовали разложения функций $F(\lambda)$ в ряды, содержащие медленно и быстро осциллирующие члены. Члены первого типа допускают аналитическое интегрирование, а члены второго типа дают пренебрежимо малый вклад в интеграл (1). В результате получается искомая оценка. Формулы для отражательной (R) и пропускательной (T) способностей однородной подложки конечной толщины имеют вид

$$R = \frac{|r_{21}|^2 [1 + |\exp(-i\sigma_1 k_0 d)|^4 (1 - 2\operatorname{Re}(r_{21}^2))]^2}{1 - |r_{21} \exp(-i\sigma_1 k_0 d)|^4}, \quad T = \frac{|\exp(-i\sigma_1 k_0 d)(1 - r_{21}^2)|^2}{1 - |r_{21} \exp(-i\sigma_1 k_0 d)|^4}, \quad (2)$$

где $k_0 = 2\pi\lambda^{-1}$, $\varepsilon_1 = (n - ik)^2$ – диэлектрическая проницаемость подложки, $\sigma_1 = \sqrt{\varepsilon_1 - \sin^2 \theta}$, θ – угол падения света,

$$r_{21} = \left(1 - \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1 \cos \theta}\right) \left(1 + \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1 \cos \theta}\right)^{-1}, \quad r_{12} = \left(1 - \frac{\sigma_1}{\cos \theta}\right) \left(1 + \frac{\sigma_1}{\cos \theta}\right)^{-1}$$

для волн p- и s-поляризации, соответственно. Заметим, что в (2) отсутствует какая-либо информация о трудно контролируемой функции $K(\lambda - \lambda')$.

На эллипсометре ES-2 при углах падения 55° (рис. 16, кривая 1) в области от 380 нм до 700 нм были измерены спектры $tg\psi(\lambda)$ стеклянной подложки ($d = 2.14$ мм), которая используется при нанесении пленок оксидов металлов. При расчете кривой 2 (рис. 16) по формулам (2) использованы зависимости 2 и

¹ Работа выполнена в рамках задания 1.3.03 ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника».

3 из рис. 1а, найденные в результате решения обратной задачи спектрофотометрии с использованием (2). При этом учитывалось, что $tg\psi = (R_p R_s^{-1})^{0.5}$.

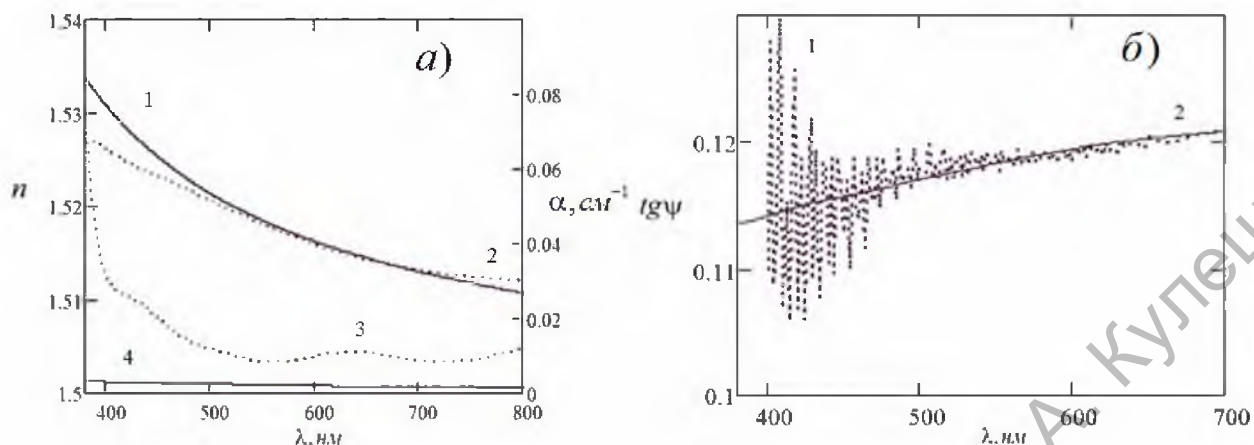


Рисунок 1а. Спектры показателей преломления (1, 2) и коэффициентов поглощения (3, 4) стеклянной подложки (2, 3) и стекла К8 (1, 4).

Рисунок 1б. Измеренный (1) и рассчитанный (2) спектры $tg\psi(\lambda)$

Сложный вид кривой 1 на рис. 1б объясняется влиянием отражения света от второй поверхности стеклянной подложки при обработке спектров с использованием когерентного приближения в программном обеспечении ES 2. На спектрофотометре PHOTON RT при углах падения 8° (1, 2) и 40° (3, 4) (рис. 2) в области от 380 нм до 700 нм были измерены спектры $R(\lambda)$ и $T(\lambda)$ подложки в s- (1, 4) и p- (2, 3) поляризованном свете. Кривые 5–8 рассчитаны на основании (2).

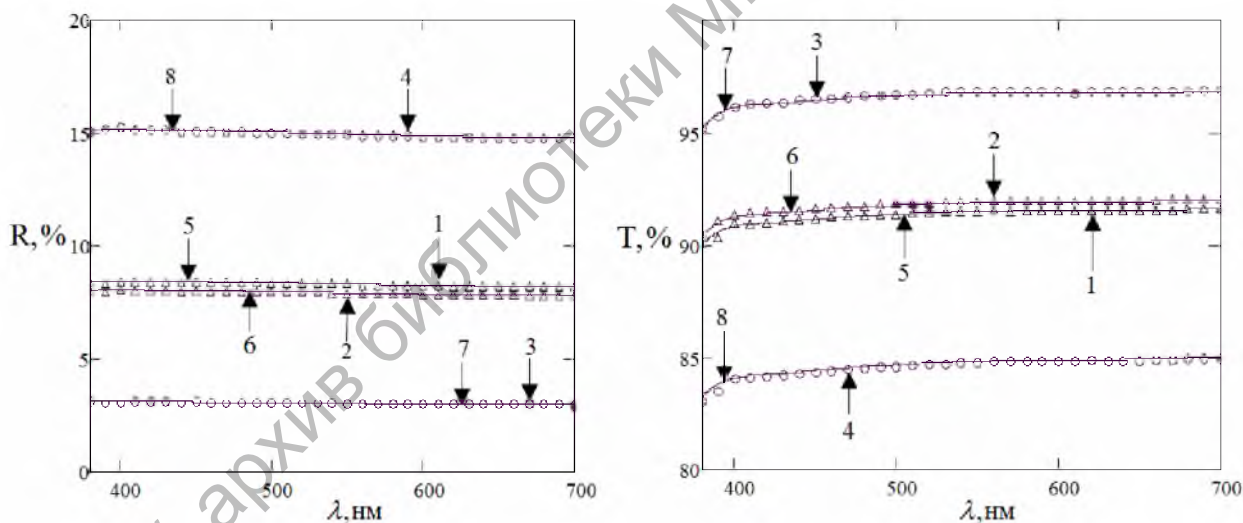


Рисунок 2. Измеренные (1 – 4) и рассчитанные (5 – 8) спектры $R(\lambda)$ и $T(\lambda)$ при угле падения 8° (1, 2) и 40° (3, 4)

Литература

1. Разработка программного обеспечения для расчета спектров отражения и пропускания интерференционных покрытий на подложках конечной толщины : Отчет по НИР / Могилев. гос. университет; рук. Н. И. Стаськов. – Могилев, 2011. – 71 с. – № ГР 20113127 от 09.09.2011.
2. Vriens, L. Optical constants of absorbing thin solid films on a substrate / L. Vriens, W. Rippens // Applied Optics/ – 1983. – V. 22. – № 24. – P. 4105–4110.
3. González-Lea, J.-M. Influence of substrate absorption on the optical and geometrical characterization of thin dielectric films / J.-M. González-Lea, R. Prieto-Alcón, J.-A. Angel, D. A. Minkov, and E. Márquez // Appl. Opt. – 2002. – Vol. 41, No. 34, P. 7300–7308.