

МОДЕЛЬ ЛОРЕНТЦ-ЛОРЕНЦА В СПЕКТРОФОТОМЕТРИИ  
НЕОДНОРОДНОГО СЛОЯ

Л. И. СОТСКАЯ, \*К. Н. КРИВЕЦКИЙ,  
\*\*А. Б. СОТСКИЙ, А. В. ХОМЧЕНКО

Государственное учреждение высшего профессионального образования  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

\*ООО «ЭССЕНТОПТИКС»

Учреждение образования

\*\*«МОГИЛЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

им. А. А. Кулешова»

Могилев, Минск, Беларусь

Актуальной проблемой, возникающей при изготовлении тонких пленок методом напыления, является неразрушающий контроль их плотности  $f(y)$ , удельной рефракции  $r(\lambda)$  и распределения показателя преломления  $n(\lambda, y)$ . В докладе рассматриваются вопросы восстановления указанных характеристик путем обработки экспериментальных спектров отражательной способности пленки для волн  $s$  и  $p$  поляризации.

Мы используем метод наименьших квадратов с целевыми функциями

$$F(p_1, \dots, p_l) = \sum_{\alpha=s,p} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left[ (R_{\alpha}^{(e)})_{ij} - R_{i\alpha}(\lambda_j, p_1, \dots, p_l) \right]^2,$$

где  $i$  – номер угла падения света  $\theta_i$ ;  $j$  – номер длины волны излучения;  $(R_{s,p}^{(e)})_{ij}$  – экспериментальные данные для энергетических коэффициентов отражения волн  $s$  и  $p$  поляризации;  $p_i$  – искомые параметры, описывающие зависимости  $f(y)$ ,  $r(\lambda)$ ,  $n(\lambda, y)$ .

Соответствующие им теоретические функции  $R_{is,p}(\lambda_j, p_1, \dots, p_l)$  рассчитываются с помощью рекуррентных соотношений. Величины  $p_i$  – искомые параметры, описывающие зависимости  $f(y)$ ,  $r(\lambda)$ ,  $n(\lambda, y)$ .

Известно, что для успешного решения обратной оптической задачи требуется как можно более простая и в то же время адекватная физической ситуации модель эксперимента. Этими свойствами обладает модель Лорентц-Лоренца

$$n(\lambda, y) = \sqrt{[1 + 2r(\lambda)f(y)][1 - r(\lambda)f(y)]^{-1}},$$

$$r(\lambda) = \sum_{i=1}^{nm+1} [r_i(\lambda - \bar{\lambda})(B - \bar{\lambda})^{-1}]^{i-1}, \quad f(y) = 1 + \sum_{i=1}^{lp} f_i[\eta^i + (-1)^{i+1}(i+1)^{-1}],$$

где  $nm$  и  $lp$  – максимальные степени интерполяционных полиномов;  $\bar{\lambda} = 0.5(A + B)$ ,  $A$  и  $B$  – границы экспериментального диапазона длин волн;  $\eta = yp_1^{-1}$ ;  $p_1$  – толщина пленки;  $p_i = r_{i-1}$  при  $i = \overline{2nm+2}$ ;  $p_i = f_{i-nm-2}$  при  $i = \overline{nm+3, l}$ ;  $l = nm + lp + 2$ . Исследование ряда пленок показало, что

корректное решение обратной оптической задачи обычно достигается при  $nm=6$ ,  $lp \leq 10$ . Таким образом, в рамках принятой модели  $l \leq 18$ , что обеспечивает устойчивость решения.

На рис. 1 представлены данные, полученные при исследовании пленки  $ZrO_2$  с ориентировочной толщиной  $p_1 \approx 500nm$ , нанесенной методом электронно-лучевого напыления на подложку из стекла К8. Измерения  $(R_{s,p}^{(e)})_{ij}$  выполнены с использованием спектрофотометра Photon RT при  $N=4$  ( $\theta_1 = 30^\circ$ ,  $\theta_2 = 40^\circ$ ,  $\theta_3 = 50^\circ$ ,  $\theta_4 = 60^\circ$ ),  $A = 402,02nm$ .

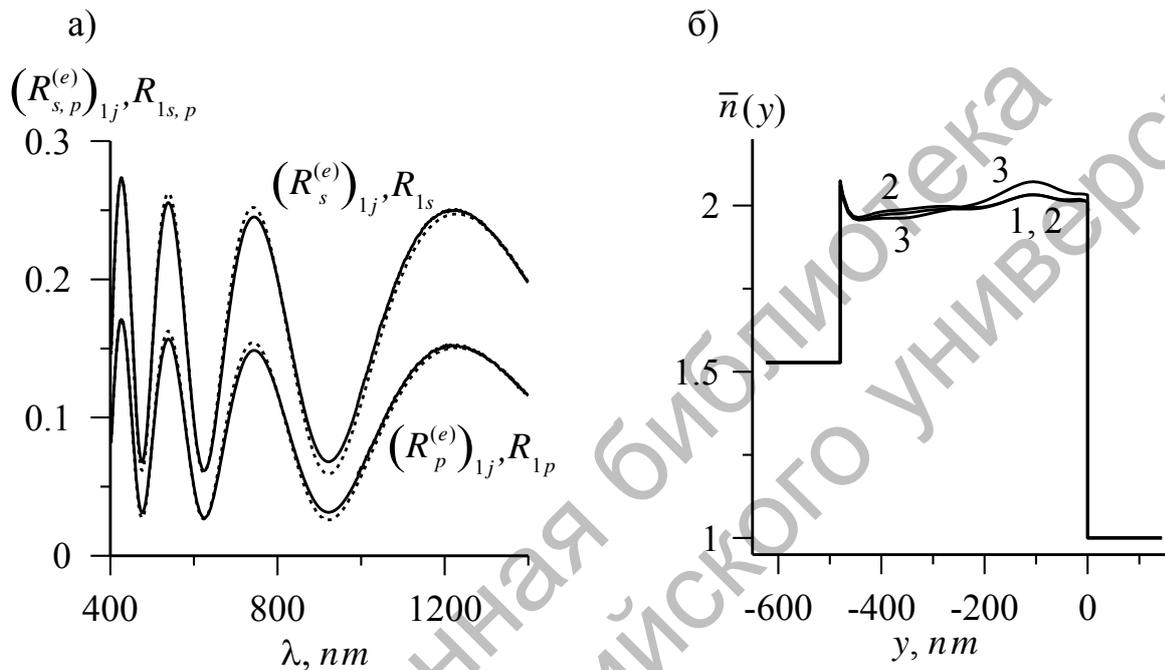


Рис. 1. Результаты расчетов и экспериментальных исследований: а – спектры отражательной способности пленки  $ZrO_2$ : сплошные кривые – эксперимент  $(R_{s,p}^{(e)})_{ij}$  и теория  $R_{1s,p}$  при  $l=17$  ( $lp=9$ ); штриховые кривые – теория при  $l=8$  ( $f(y) \equiv 1$ ); б – усредненный по спектрам профиль показателя преломления пленки, восстановленный при  $B=1400nm$ ,  $M=500$  (кривая 1),  $B=1200nm$ ,  $M=400$  (2) и  $B=1000nm$ ,  $M=300$  (3)

Расхождение сплошных и штриховых кривых на рис. 1, а свидетельствует о заметной неоднородности материала пленки. Этот вывод подтверждается рассмотрением рис. 1, б. Из рис. 1, б можно сделать вывод о снижении точности решения обратной оптической задачи при сужении экспериментального диапазона длин волн.

Корректность изложенного подхода проверена нами путем сопоставления экспериментальных (измеренных методом волноводной спектроскопии) и теоретических (рассчитанных по восстановленной функции  $n(\lambda, y)$ ) значений постоянных распространения волноводных мод пленки.