

УДК 535.31; 621.372

К ПРОБЛЕМЕ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПЕКТРОФОТОМЕТРИИ  
НЕОДНОРОДНОГО СЛОЯ

С. О. ПАРАШКОВ, \* К. Н. КРИВЕЦКИЙ, А. Б. СОТСКИЙ, И. С. ДЗЕН,  
\*\* Л. И. СОТСКАЯ

УО «МОГИЛЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. А. А. Кулешова»

\* ООО «ЭССЕНТОПТИКС»

\*\* ГУ ВПО «БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Могилев, Минск, Беларусь

Актуальной проблемой, возникающей при создании тонких пленок, является неразрушающий контроль неоднородности их свойств по толщине. Один из распространенных методов оптической диагностики таких пленок – спектрофотометрия. В работах А. В. Тихонравова с соавторами разработан метод восстановления профиля показателя преломления пленок  $n(y)$  путем измерения и обработки спектра их отражательной способности  $R(\lambda)$  при нормальном падении света на поверхность пленки. Однако для повышения точности определения  $n(y)$  представляет интерес решение обратной оптической задачи по обработке функции  $R(\lambda)$  в случае наклонного падения поляризованного света на пленку, которое и рассматривается в настоящей работе.

Авторы используют метод наименьших квадратов с целевыми функциями

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

$$F_{sp}(p_1, \dots, p_l) = F_s(p_1, \dots, p_l) + F_p(p_1, \dots, p_l),$$

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. Функции  $R_{is,p}(\lambda_j, p_1, \dots, p_l)$  рассчитываются в когерентном приближении с помощью известных рекуррентных соотношений. Величины  $p_i$  – подлежащие определению толщина пленки ( $i=1$ ) и параметры, описывающие зависимости  $n(\lambda, y)$ ,  $k(\lambda, y)$  где ( $k(\lambda, y)$  - показатель поглощения пленки). Данные параметры представляют собой коэффициенты разложений

$$n(\lambda, y) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m n_{ij} L_i(\lambda) Y_j(y), \quad k(\lambda, y) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m k_{ij} L_i(\lambda) Y_j(y),$$

где  $L_i(\lambda)$  и  $Y_j(y)$  – полиномы Лагранжа степеней  $n$ , и  $m$ , нули которых совпадают с нулями полиномов Чебышева степеней  $n+1$  и  $m+1$ , заданных

на экспериментальном промежутке длин волн и в пределах толщины пленки  $-p(1) \leq y \leq 0$ . Таким образом  $l = 2(n+1)(m+1) + 1$ .

Ниже представлены результаты обработки экспериментальных спектров  $R_{s,p}^{(e)}(\lambda)$  для пленки  $ZrO_2$  толщиной около 150 нм, напыленной на подложку из стекла К8. Измерения выполнены на автоматизированном спектрофотометре Photon RT при  $N=4$  ( $\theta_1 = 30^\circ$ ,  $\theta_2 = 40^\circ$ ,  $\theta_3 = 50^\circ$ ,  $\theta_4 = 60^\circ$ ) в диапазоне длин волн  $400\text{нм} \leq \lambda \leq 880\text{нм}$  с шагом  $\Delta\lambda = 2\text{нм}$ . Результаты расчетов соответствуют  $n=12$  и различным значениям  $m$ . Они получены путем минимизации целевой функции  $F_{sp}(p_1, \dots, p_l)$  градиентным методом в приближении отсутствия поглощения в пленке ( $k(\lambda, y) = k_{ij} = 0, l = (n+1)(m+1) + 1$ ). Зависимости  $n(\lambda)$  и  $k(\lambda)$  для подложки брались из известных дисперсионных таблиц.

На рис.1 представлены экспериментальные и расчетные спектры энергетических коэффициентов отражения.

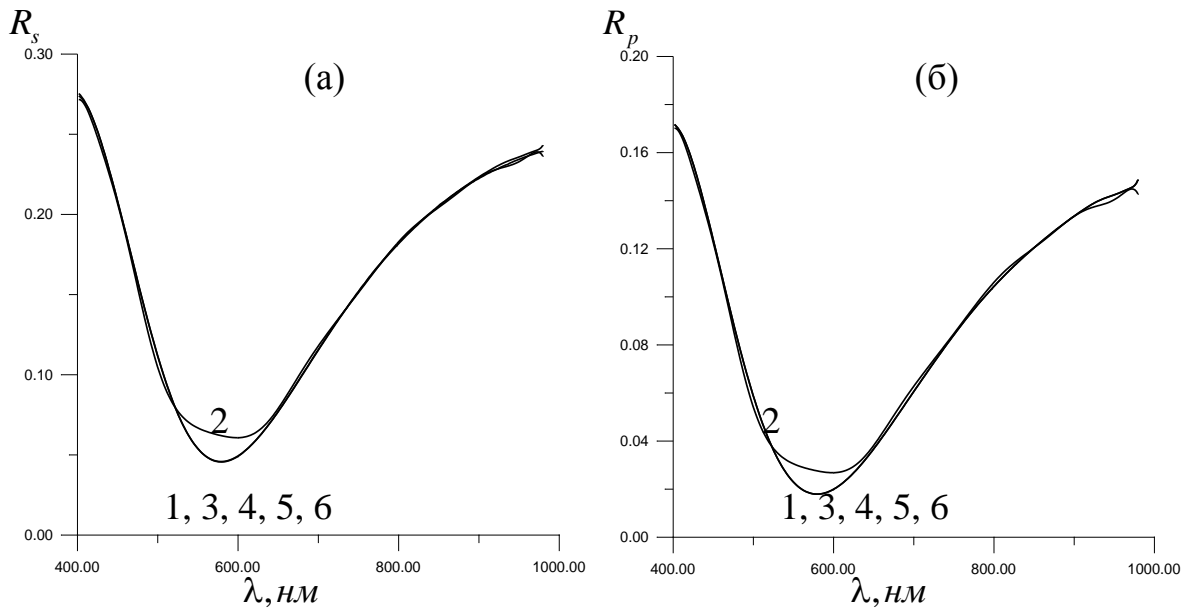


Рис. 1. Спектры отражательной способности пленки  $ZrO_2$  для волн s – (а) и p – (б) поляризации при  $\theta_1 = 30^\circ$ . Кривые 1 -  $R_{s,p}^{(e)}(\lambda)$ , 2 -  $R_{0s,p}(\lambda)$ , 3, 4, 5, 6 -  $R_{1,2,3,4s,p}(\lambda)$

Как видно из рис. 1, зависимости  $R_{s,p}^{(e)}(\lambda)$  и  $R_{is,p}(\lambda)$  при  $i=1,2,3,4$  практически совпадают. Однако зависимости 2, рассчитанные в рамках модели однородной пленки, существенно отклоняются от эксперимента, что указывает на неоднородность пленки.

На рис. 2 приведены результаты восстановления профиля показателя преломления пленки  $n(y)$  по длине волны  $\lambda = 400\text{нм}$ .

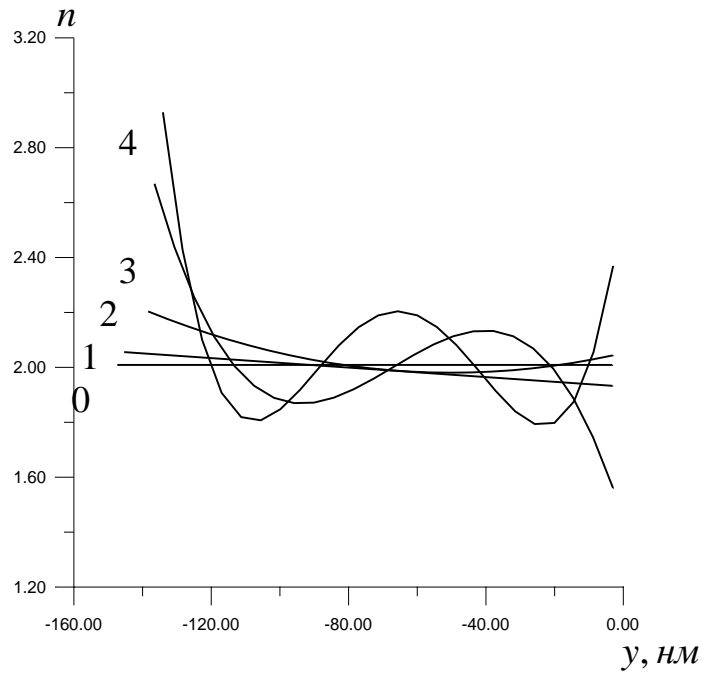


Рис. 2. Восстановление профиля показателя преломления пленки  $n(y)$  при различных порядках интерполяционного полинома  $Y_j(y)$ . Номера кривых совпадают с порядком полинома  $j$

Согласно рис. 2, результат восстановления  $n(y)$  получился неоднозначным. В такой ситуации оптимальное значение  $j$  может быть выбрано в соответствии с критерием минимума целевой функции. Этот критерий иллюстрируется табл. 1.

Табл. 1. Зависимость целевой функции и восстановленной толщины пленки от порядка интерполяционного полинома  $m$

$m$	$F_{sp}$	$-P_1, \text{нм}$
0	$6,20 \cdot 10^{-2}$	150,3
1	$1,21 \cdot 10^{-3}$	148,4
2	$5,31 \cdot 10^{-4}$	141,2
3	$5,79 \cdot 10^{-4}$	139,4
4	$1,92 \cdot 10^{-3}$	136,8

Согласно табл. 1 оптимальный порядок  $m = 2$ . Эффективность рассмотренного критерия подтверждена в вычислительных экспериментах по восстановлению функций  $n(\lambda, y)$  для различных пленок.