

## О ВЫБОРЕ УГЛОВОГО ДИАПАЗОНА ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ТОНКИХ ПЛЕНОК С ПОМОЩЬЮ ПРИЗМЫ СВЯЗИ

А. Б. Сотский<sup>1</sup>, L. M. Steingart<sup>2</sup>, С. О. Парашков<sup>1</sup>, Л. И. Сотская<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Могилевский государственный университет  
им. А. А. Кулешова, Могилев, Беларусь

<sup>2</sup>Metricon Corporation, Pennington, New Jersey, USA

<sup>3</sup>Белорусско-Российский университет, Могилев, Беларусь

E-mail: ab\_sotsky@mail.ru

При оптическом контроле параметров тонких пленок распространен метод, основанный на анализе угловой зависимости энергетического коэффициента отражения лазерного пучка от призмы связи. В нем используется явление нарушенного полного внутреннего отражения света, что позволяет обеспечить значительную длину взаимодействия излучения с исследуемой пленкой, и, как следствие, более высокую точность определения показателя преломления  $n$ , показателя поглощения  $k$  и толщины пленки  $d$  по сравнению с эллипсометрией. Соответствующие измерения могут быть выполнены на автоматизированной установке “Model 2010/M Prism Coupler” [1].

Для обработки указанных измерений эффективен метод наименьших квадратов. В нем осуществляется минимизация целевой функции

$$I(p_i) = \sum_{j=1}^m [\varphi_j - f_j(p_i)]^2 \frac{1}{2}, \quad (1)$$

где  $\varphi_j$  - экспериментальные данные для коэффициента отражения пучка от призмы связи при  $m$  углах падения,  $f_j(p_i)$  - теоретическая модель коэффициента отражения, зависящая от параметров  $p_i$  ( $p_1 = d$ ,  $p_2 = g$ ,  $p_3 = n$ ,  $p_4 = k$ , где  $g$  - толщина буферного слоя между призмой связи и пленкой). Однако практика показывает, что на восстанавливаемые значения  $p_i$  существенно влияет угловой диапазон измерений ( $a, b$ ) (указанный диапазон мы относим к переменной  $\beta$ , равной безразмерной проекции волнового вектора оси падающего пучка на основание призмы связи). Отмеченная особенность связана с приближенным характером модели  $f_j(p_i)$  и неизбежными ошибками измерения величин  $\varphi_j$ , равными  $\delta\varphi_j$ .

Для выбора оптимального диапазона измерений ( $a, b$ ) предлагается критерий, основанный на идее минимизации влияния ошибок  $\delta\varphi_j$  на решение обратной задачи. В нем используется неравенство

$|\delta p_i| \leq \max |\delta \varphi_j| \cdot E_i$ , где  $E_i = \sum_{j=1}^m \left| \sum_{k=1}^4 M_{ik}^{-1} \frac{\partial f_j}{\partial p_k} \right|$ ,  $M_{ik}^{-1}$  – матрица, обратная

матрице ошибок

$$M_{ik} = \sum_{j=1}^m \left\{ \frac{\partial^2 f_j}{\partial p_i \partial p_k} [\varphi_j - f_j(p_i)] - \frac{\partial f_j}{\partial p_i} \frac{\partial f_j}{\partial p_k} \right\},$$

вычисляемой после минимизации (1). Суть критерия состоит в том, что в качестве решения обратной задачи принимается то значение  $p_i$ , при котором коэффициент  $E_i$  достигает минимума за счет выбора оптимального диапазона  $(a, b)$ . Экспериментальное исследование ряда пленок показало, что каждому из параметров  $p_i$  соответствует свой оптимальный диапазон  $(a, b)$ .

Критерий иллюстрируется таблицей. В ней представлены результаты восстановления параметров пленки  $SiO_x$ , напыленной на кремниевую подложку. В эксперименте использована длина световой волны 632.8 нм. Угловой диапазон измерений охарактеризован параметром  $\Delta\beta = b - a$ . Центр этого диапазона  $0.5(b + a) = 1.454397$  соответствует резонансному возбуждению основной вытекающей моды

Таблица

$\Delta\beta$	поляризация	$d$ , нм	$n$	$k \cdot 10^4$
0.370	s	3027.45	1.45816	-0.45
	p	3027.90	1.45861	10.9
0.170	s	3015.26	1.45796	2.81
	p	3015.23	1.45893	3.68
0.025	s	2989.02	1.45807	2.35
	p	2083.54	1.45908	2.44

Из табл. видно, что восстановленные параметры существенно зависят от  $\Delta\beta$ . При широком диапазоне  $\Delta\beta = 0.37$  коэффициент  $k$  получился отрицательным, что противоречит физическому смыслу. Значения  $\Delta\beta = 0.17$  и  $\Delta\beta = 0.025$  являются оптимальными для восстановления толщины пленки и ее комплексного показателя преломления, соответственно. Некоторое расхождение восстановленных значений  $n$  для волн s и p поляризации свидетельствует об анизотропии пленки.

1. Metricon Corporation: <http://www.metricon.com>.