

С. О. ПАРАШКОВ, А. Б. СОТСКИЙ, * Л. И. СОТСКАЯ

Учреждение образования
«МОГИЛЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. А.А. Кулешова»*Государственное учреждение высшего профессионального образования
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Могилев, Беларусь

Метод рефлектометрии, основанный на обработке углового спектра энергетического коэффициента отражения светового пучка от подложки с наноразмерным слоем, может составить успешную конкуренцию эллипсометрии, будучи более простым в реализации. В настоящей работе обсуждаются актуальные вопросы чувствительности данного метода.

Путем сведения волновых уравнений к интегральным уравнениям получены следующие аналитические выражения

$$R_p = \frac{\sigma_+ \varepsilon_- - \sigma_- \varepsilon_+ + i[\beta^2 \varepsilon_- \varepsilon_+ \int_{-\infty}^{\infty} \Delta(1/\varepsilon) dy + \sigma_- \sigma_+ \int_{-\infty}^{\infty} \Delta(\varepsilon) dy]}{\sigma_+ \varepsilon_- + \sigma_- \varepsilon_+ - i[\beta^2 \varepsilon_- \varepsilon_+ \int_{-\infty}^{\infty} \Delta(1/\varepsilon) dy - \sigma_- \sigma_+ \int_{-\infty}^{\infty} \Delta(\varepsilon) dy]} + O\left[\left(\frac{d}{\lambda}\right)^2\right], \quad (1)$$

$$R_s = [\sigma_+ - \sigma_- - ik_0^2 \int_{-\infty}^{\infty} \Delta(\varepsilon) dy][\sigma_+ + \sigma_- + ik_0^2 \int_{-\infty}^{\infty} \Delta(\varepsilon) dy]^{-1} + O[(d/\lambda)^2], \quad (2)$$

где R_p и R_s – амплитудные коэффициенты отражения волн p и s поляризации от структуры, в которой ось Oy указывает направление неоднородности, ε_+ и ε_- – диэлектрические проницаемости области, из которой падает излучение и подложки, $\sigma_{\pm} = k_0 \sqrt{\varepsilon_{\pm} - \beta^2}$, $k_0 = 2\pi/\lambda$, $\beta = \sin \theta$, θ – угол падения, d – толщина наноразмерного слоя. Интегрирование в (1), (2) осуществляется по области наноразмерного слоя:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Delta(\varepsilon) dy = \begin{cases} \varepsilon(y) - \varepsilon_+ & (y > \bar{y}) \\ \varepsilon(y) - \varepsilon_- & (y < \bar{y}) \end{cases}, \quad \int_{-\infty}^{\infty} \Delta(1/\varepsilon) dy = \begin{cases} 1/\varepsilon(y) - 1/\varepsilon_+ & (y > \bar{y}) \\ 1/\varepsilon(y) - 1/\varepsilon_- & (y < \bar{y}) \end{cases},$$

где \bar{y} – некоторая координата внутри слоя. Как видно из (1), (2), регистрируемые функции $|R_{p,s}(\theta)|^2$ зависят от d/λ квадратично, если среды в структуре диэлектрические и линейно, если одна из этих сред является металлом. Очевидно, что в последнем случае чувствительность измерений параметров наноразмерных слоев будет выше, а ошибки восстановления показателя преломления n и толщины слоя d – ниже.

Представленные соображения иллюстрируют рис.1, 2 и табл. 1. Расчеты выполнены при $\lambda = 0,6328 \mu m$ для окисных слоев на кремниевой и

алюминиевой подложках. Обратная задача решена методом наименьших квадратов, при этом в качестве «экспериментальных» использованы зависимости, приведенные на рис.1 и аналогичные им, полученные в результате строгого расчета функций $|R_{p,s}(\theta)|^2$. Погрешности измерений рассматривались как ошибки округления при оптимальном детектировании мощности отраженного света 8-ми разрядным АЦП.

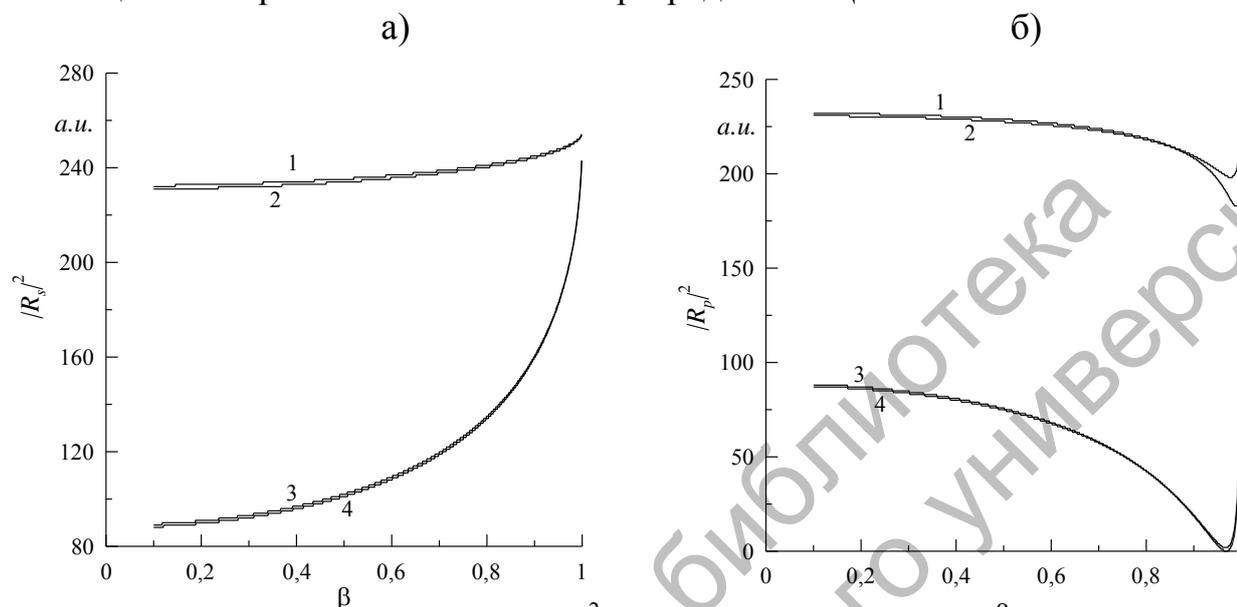


Рис. 1. Зависимости $|R_{p,s}(\theta)|^2$ для волн p (а) и s (б) поляризации при отражении света от пленки Al_2O_3 на поверхности Al (1, 2) и пленки SiO_2 на поверхности Si (3, 4). Кривые 1, 3 – $d = 1 \mu m$; 2, 4 – $d = 0,01 \mu m$

Табл. 1. Погрешности решения обратной задачи

Пленка	Исходные значения		Восстановленные			
			s		p	
	n	$d (\mu m)$	n	$d (\mu m)$	n	$d (\mu m)$
SiO_2	1,460	$1 \cdot 10^{-3}$	1,004	$4,98 \cdot 10^{-3}$	3,208	$1,30 \cdot 10^{-3}$
	1,460	$1 \cdot 10^{-2}$	1,457	$1,03 \cdot 10^{-2}$	1,394	$1,11 \cdot 10^{-2}$
Al_2O_3	1,652	$1 \cdot 10^{-3}$	1,749	$7,94 \cdot 10^{-4}$	1,466	$1,18 \cdot 10^{-3}$
	1,652	$1 \cdot 10^{-2}$	1,814	$7,46 \cdot 10^{-3}$	1,639	$1,02 \cdot 10^{-2}$

В соответствии с табл. 1, толщина наноразмерной пленки восстанавливается с меньшей относительной погрешностью, чем ее показатель преломления, причем при исследовании окисла на поверхности полупроводника предпочтительны волны s поляризации, а в случае окислов на поверхности металлов – волны p поляризации.