

И.У. Примак, А.В. Хомченко, Н.И. Казаченко  
ГУВПО «Белорусско-Российский университет», Могилев, Беларусь

## РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ СЛОЕВ НА КРЕМНИЕВОЙ ПОДЛОЖКЕ

### Введение

Оптические методы контроля параметров тонких пленок представляют практический интерес в технологии нанесения тонкопленочных структур различного функционального назначения в опто- и микроэлектронике. Традиционно для этого используется эллипсометрия [1], в [2] продемонстрирована высокая чувствительность методов рефлектометрии к вариациям параметров металлических слоев.

В настоящем сообщении рассмотрены особенности и пределы применимости методов спектральной и угловой рефлектометрии для контроля параметров тонкопленочных структур. Указанные методы основаны на регистрации угловой зависимости коэффициента отражения светового пучка  $R(\theta)$  при его отражения от поверхности исследуемой структуры.

### 1. Исследование характеристик наноразмерных слоев металла

Принципиальная схема установки для измерения угловой зависимости  $R(\theta)$  приведена на рисунке 1.

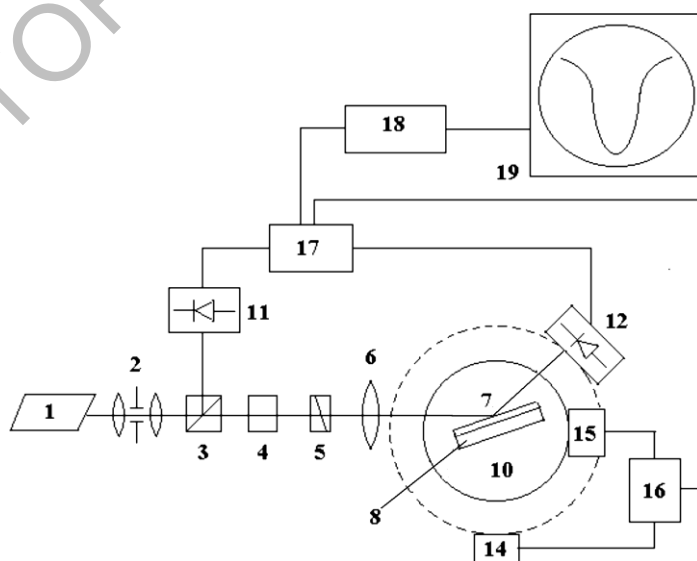


Рисунок 1 – Схема установки для измерения угловой зависимости коэффициента отражения лазерного пучка: 1 – источник излучения, 2 – коллиматор, 3 – делитель пучка, 4 – аттенюатор, 5 – поляризатор, 6 – линза, 7 – тонкопленочная структура на подложке 8, 10 – поворотный столик, 11 и 12 – фотоприемники, 14 и 15 – шаговые двигатели, 16 – блок синхронного управления шаговыми двигателями, 17 – блок сравнения каналов, 18 – АЦП, 19 – компьютер

Представленные на рисунке 2 зависимости коэффициента отражения излучения пучка He-Ne лазера ТМ-поляризации, измеренные при его отражении от осажденных методом термического напыления на подложку слоев алюминия различной толщины, иллюстрируют эффективность предлагаемого подхода.

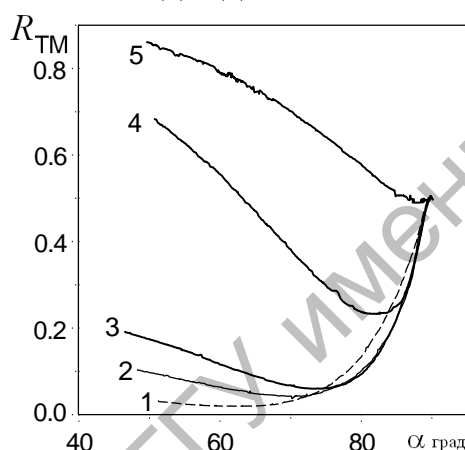


Рисунок 2 – Зависимость  $R(\gamma)$  для пленки алюминия толщиной 2, 3, 5, 18 и 26 нм (кривая 1, 2, 3, 4 и 5, соответственно)

Следует отметить, что данная техника позволяет контролировать и состояние поверхности металлического слоя.

## 2. Контроль параметров диэлектрических слоев на кремниевой подложке

Развитие нанотехнологий стимулирует исследования по разработке методов неразрушающего многопараметрического определения

свойств тонкопленочных структур, которые нередко являются неоднородными и их диэлектрическая проницаемость описывается некоторой функцией, например, структуры Si-SO<sub>2</sub>, которые широко используются в микроэлектронике. Наиболее простыми и достаточно эффективными методами измерения параметров пленки SO<sub>2</sub> являются рефлектометрические методы, основанные на измерении коэффициента отражения света от исследуемой структуры при различных углах падения (см. рис. 1) и последующей оценке параметров с использованием метода наименьших квадратов путем минимизации суммы квадратов невязок

$$S(\mathbf{z}) = \sum_{i=1}^n \left( R_i^e - R(\gamma_i, \mathbf{z}) \right)^2,$$

где  $R_i^e$  – измеренное значение коэффициента отражения при угле падения света  $\gamma_i$ , отсчитанном от нормали к поверхности слоистой структуры ( $i = \overline{1, n}$ ),  $R(\gamma_i, \mathbf{z})$  – рассчитанное значение коэффициента отражения на основе предполагаемой модели диэлектрической проницаемости структуры,  $\mathbf{z} = (z_1, z_2, \dots, z_l)$  – комплекс неизвестных параметров структуры, которые необходимо оценить,  $n$  – количество углов, при которых производится измерение. Результаты численного моделирования отражения света от данной структуры с учетом погрешностей регистрации коэффициента отражения ( $\delta R \sim 0,005$ ) и решения обратной задачи определения параметров пленки SiO<sub>2</sub> представлены в таблице 1. Результаты показывают, что восстановление параметров слоев может быть достаточно точным при  $d > 50$  нм.

Более высокой чувствительности и точности определения указанных параметров можно достигнуть при использовании так называемой призмной схемы измерения (призма, приведенная в контакт с исследуемой структурой), что подтверждают результаты численного моделирования отражения света от призмы, приведенной в контакт со структурой Si-SO<sub>2</sub>. В качестве буферного слоя использован иммерсионный слой, толщина которого определялась методом наименьших квадратов с погрешностью менее 5%.

Таблица 1

Параметры пленки SiO <sub>2</sub>		Параметры пленки, определенные на основе обработки $\bar{\lambda}_i(\bar{\lambda}_i)$	
$\varepsilon$	$d$ , мкм	$\varepsilon$	$d$ , мкм
2.122	0.05	2.106	0.0502
2.122	0.10	2.114	0.1002
2.122	0.15	2.1211	0.1504
2.122	0.20	2.1116	0.201
2.122	0.25	2.1446	0.248
2.122	0.30	2.1399	0.298
2.122	0.35	2.1156	0.351
2.122	0.40	2.1183	0.401

Аналогичные исследования отражения света от призмы с металлическим (Au) слоем показали, что восстановление параметров слоя SiO<sub>2</sub> эффективно при его толщинах больших 0,05 мкм. Погрешности восстановления менее 6 % достигаются при оптимальной толщине слоя Au ~ 0,03 мкм.

### 3. Анализ свойств многослойных структур

При контроле параметров МДП структур на основе спектральной рефлектометрии установлено, что данная задача становится некорректной в практически важном диапазоне толщин слоев и это не позволяет адекватно определять параметры структуры. В этой связи рассмотрим возможности регуляризации обратной задачи. При восстановлении параметров структуры Si-SiO<sub>2</sub>-Au сформулируем регуляризующий функционал  $S$  некорректной обратной задачи, который представляет собой сумму функционала невязки и стабилизирующего функционала с неизвестным параметром  $\alpha$  :

$$S = S_0 + \alpha P, \quad S_0(\mathbf{z}) = \sum_{i=1}^n \left( R_i^e - R(\lambda_i, \mathbf{z}) \right)^2, \quad (1)$$

$$P = |\mathbf{z} - \mathbf{z}^0|, \quad \mathbf{z} = (z_j), \quad \mathbf{z}^0 = (z_j^0), \quad j = 1, \overline{16}.$$

Здесь  $S = S(\mathbf{z})$ ,  $i$  – номер длины волны излучения,  $R_i^e$  – экспериментальные значения коэффициентов отражения для нормированного значения длины волны  $\bar{\lambda}_i = \lambda_i / \lambda_n$ , ( $\lambda_n$  – некоторая нормирующая длина волны),  $R(\bar{\lambda}_i, \mathbf{z})$  – рассчитанные значения коэффициента отражения для длины волны  $\bar{\lambda}_i$ ,  $z_1 = d / \lambda_n$ ,  $z_2 = n_0$ ,  $z_3 = \bar{A}$ ,  $z_4 = \bar{B}$ ,  $z_5 = d_M / \lambda_n$ ,

$$z_6 = A_1, z_7 = A_2, \quad z_8 = \varphi_1, z_9 = \varphi_2, \quad z_{10} = \varepsilon_\infty, z_{11} = \bar{\lambda}_p, \quad z_{12} = \gamma_p, z_{13} = \bar{\lambda}_1, \\ z_{14} = \gamma, z_{15} = \lambda, z_{16} = \gamma - \text{безразмерные параметры, } z_j^0 - \text{начальные при}$$

ближения указанных параметров ( $j = \overline{1,16}$ ).

При этом, модели зависимости диэлектрической проницаемости слоя диэлектрика толщиной  $d$  и слоя металла толщиной  $d_M$  от нормированной длины волны  $\bar{\lambda} = \lambda / \lambda_n$  имеет вид

$$n^2 = (n_0 + \bar{A} / \bar{\lambda}^2 + \bar{B} / \bar{\lambda}^4)^2,$$

и

$$\varepsilon_{\lambda} = \varepsilon - \frac{1}{\bar{\lambda}_p^2 (1 / \bar{\lambda}^2 + i / \gamma_p \bar{\lambda})} + \sum_{k=1}^2 \frac{\bar{A}_k}{\bar{\lambda}_k} \left[ \frac{e^{i\varphi_k}}{1 / \bar{\lambda}_k - 1 / \bar{\lambda} - i / \gamma_k} + \frac{e^{-i\varphi_k}}{1 / \bar{\lambda}_k + 1 / \bar{\lambda} + i / \gamma_k} \right],$$

где  $n_0, \bar{A} = A / \lambda_n, \bar{B} = B / \lambda_n, \bar{\lambda} = \lambda / \lambda_n, \bar{\lambda}_k = \lambda_k / \lambda_n, \bar{\lambda}_p = \lambda_p / \lambda_n, \gamma_p = \gamma_p / \lambda_n, \bar{\gamma}_k = \gamma_k / \lambda_n$  – безразмерные величины.

Для слоев SiO<sub>2</sub> и Au значения указанных параметров были соответственно равны:  $n_0 = 1.447, A = 3.74 \cdot 10^4, B = -3 \cdot 10^6$  и  $\varepsilon_\infty = 1.53, \lambda_p = 145 \text{ nm}, \gamma_p = 17000 \text{ nm}, A_1 = 0.94, \varphi_1 = -\pi/4, \lambda_1 = 468 \text{ nm}, \gamma_1 = 2300 \text{ nm}, A_2 = 1.36, \varphi_2 = -\pi/4, \lambda_2 = 331 \text{ nm}, \gamma_2 = 940 \text{ nm}$ . Определение вектора параметров  $\mathbf{z}$  было выполнено путем минимизации функционала (1). При этом эти параметры для конкретных структур будут определяться с погрешностями, обусловленными погрешностями регистрации коэффициента отражения, а также использованием стабилизирующего функционала  $\Delta_j = \Delta_j^c + \Delta_j^s, j = \overline{1,16}$ . Оценка систематических погрешностей, обусловленных использованием стабилизирующего функционала при  $\alpha \ll 1$

$$\Delta_j^s = -\alpha \frac{\partial z_j}{\partial \alpha} = -\alpha \sum_{k=1}^{16} (M_{kj})^{-1} \left[ \frac{z_j^1 - z_j^0}{\lambda_k} \right], \quad j = \overline{1,16} \quad (2)$$

показала, что точность формул (2) выше при приближении решения  $\bar{\mathbf{z}}$  к точному решению, при этом случайные погрешности можно определить как

$$\Delta_j^s = \sum_{k=1}^{16} (M_{kj})^{-1} \left[ \sum_{i=1}^n \Delta R_i \frac{\partial R}{\partial z_k} (\bar{\lambda}_i, \mathbf{z}) \right], \quad j = \overline{1,16},$$

где  $\Delta R_i$  – погрешности регистрации коэффициента отражения для заданной длины волны  $\lambda_i$ ;  $\mathbf{z} = (z_j)$  – решение задачи минимизации функ-

ционала (1) при заданном значении  $\alpha$ ,  $\delta_{kj}$  – символ Кронекера,  $(M_{kj})^{-1}$  – обратная матрица для матрицы  $M$

$$M_{kj} = \sum_{k=1}^{16} \left[ \sum_{i=1}^n \frac{\partial R}{\partial z_k}(\lambda, \mathbf{z}) \frac{\partial R}{\partial z_j}(\lambda, \mathbf{z}) + \alpha \delta_{kj} \right]$$

Отметим, что модуль погрешности  $\Delta_j^s (j = \overline{1,16})$  с уменьшением  $\alpha$  монотонно возрастает и достигает максимума при  $\alpha = 0$ . В тоже время, модуль  $\Delta_j^c (j = \overline{1,16})$  зависит от  $\alpha$  немонотонно. Данные величины достигают минимумов при нескольких значениях  $\alpha$ . Очевидно, имеет смысл выбирать оптимальное значение  $\alpha_{opt}$  среди этих значений (исключая случай  $\alpha = 0$  так как в этом случае получим максимум случайной погрешности). При этом, поиск оптимального  $\alpha_{opt}$  можно выполнить анализируя величину  $|\Delta^c| \cdot |\alpha \partial \mathbf{z} / \partial \alpha|$ , где  $\Delta^c = (\Delta_j^c) (j = \overline{1,16})$ .

На основе исследования отражения света от структуры Si - SiO<sub>2</sub> - Au (толщина SiO<sub>2</sub> – 100 нм, Au – 30 нм) в диапазоне длин волн от 300 нм до 800 нм по описанной процедуре определено оптимальное  $\lg \alpha_{opt} = -1,04$  и восстановлены зависимости показателя преломления  $n(\bar{\lambda})$  слоя SiO<sub>2</sub> для  $\alpha_{opt}$  и диэлектрической проницаемости  $\varepsilon(\bar{\lambda}) = \varepsilon'(\bar{\lambda}) + i\varepsilon''(\bar{\lambda})$  слоя золота (рисунок 3).

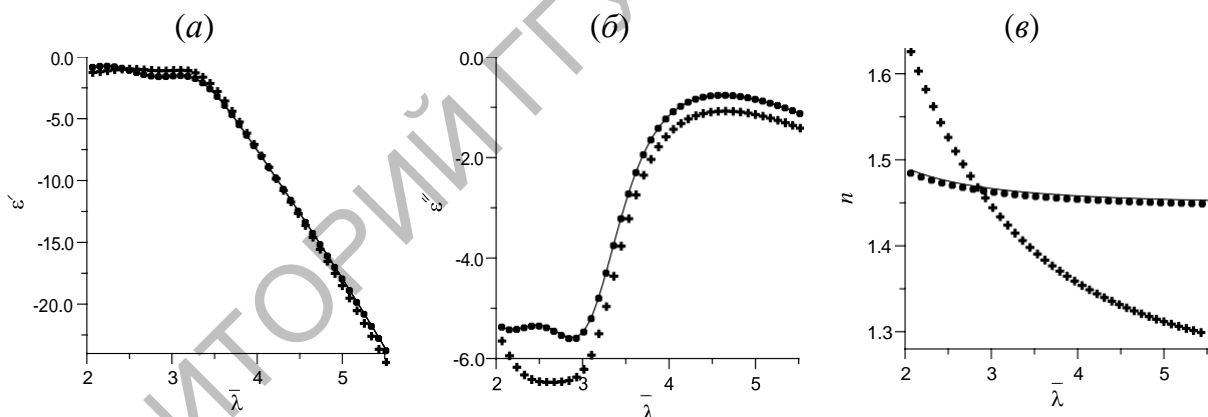


Рисунок 3 – Спектральные зависимости действительной (а) и мнимой (б) частей диэлектрической проницаемости слоя золота и показателя преломления слоя SiO<sub>2</sub> толщиной 100 нм (в)

На рисунке 3,а представлены результаты восстановления зависимости показателя преломления  $n(\bar{\lambda})$  слоя SiO<sub>2</sub> для  $\alpha_{opt}$ , а на рисунках 3,б и 3,в – диэлектрической проницаемости  $\varepsilon(\bar{\lambda}) = \varepsilon'(\bar{\lambda}) + i\varepsilon''(\bar{\lambda})$  слоя Au, где точные зависимости представлены непрерывными кривыми, восстановленные значения для  $\alpha_{opt}$  (+) и  $\alpha = 0$  (•) – дискретными точка-

ми. Анализ представленных результатов показывает, что регуляризация снижает погрешность восстановления параметров многослойной структуры более чем в три раза.

### **Заключение**

Таким образом, методы оптической рефлектометрии применимы для контроля и измерения параметров тонкопленочных структур, используемых в оптике и микроэлектронике и позволяют корректно определять толщину и диэлектрическую проницаемость металлических, диэлектрических слоев и многослойных МДП структур, осажденных на кремниевую подложку.

### **Литература**

1. Ржанов, А.В. Основы эллипсометрии / А.В. Ржанов. – Новосибирск: СО Наука, 1979.
2. Рефлектометрические методы исследования наноразмерных металлических слоев на подложке / А.В. Хомченко [и др.] // Известия РАН, серия физическая. 2016. – Т. 80, №4. – С. 477–480.