

УДК 535.32: 621.378

## КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР МЕТОДАМИ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ И ВОЛНОВОДНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

*И. У. ПРИМАК, А. В. ХОМЧЕНКО, А. Е. ДРАНИЦА, Н. И. КАЗАЧЕНКО*

ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет»

Могилев, Беларусь

UDC 535.32: 621.378

## PARAMETER TESTING OF THIN-FILM STRUCTURE BY REFLECTOMETRY AND WAVEGUIDE SPECTROSCOPY TECHNIQUES

*I. U. PRIMAK, A. V. KHOMCHENKO, A. E. DRANICA, N. I. KASACHENKO*

### Аннотация

Рассмотрены особенности и пределы применимости методов измерения параметров тонкопленочных структур, основанных на регистрации угловой зависимости коэффициента отражения светового пучка в схеме призмного возбуждения волноводных мод или его отражения от поверхности исследуемой структуры.

### Ключевые слова:

волноводная спектроскопия, рефлектометрия, контроль параметров тонкопленочной структуры.

### Abstract

The waveguide and reflectometry techniques for measuring of the absorption coefficient, refractive index and thickness of dielectric and metal thin-film structures are discussed.

### Key words:

waveguide spectroscopy, reflectometry, parameter testing of thin-film structure.

Оптические методы контроля параметров тонких пленок представляют практический интерес в технологии нанесения тонкопленочных структур различного функционального назначения. Традиционно для этого используется эллипсометрия [1]. В работах [2–5] продемонстрирована высокая чувствительность методов рефлектометрии и волноводной спектроскопии к вариациям параметров тонкопленочных структур.

В настоящей работе рассмотрены особенности и пределы применимости методов волноводной спектроскопии и угловой рефлектометрии для контроля параметров тонкопленочных структур. Указанные методы основаны на регистрации угловой зависимости коэффициента отражения светового пучка  $R(\gamma)$  в схеме призмного возбуждения волноводных, выте-

кающих, плазмонных мод или его отражения от поверхности исследуемой структуры. При возбуждении волноводных мод в традиционной схеме, параметры которой приведены в [5], соответствующая зависимость  $R(\gamma)$  для  $\lambda=633$  нм представлена на рис. 1 (кривая 1). Аналогичное распределение регистрируется при возбуждении вытекающих мод в неволноводной тонкопленочной структуре (рис. 1, кривые 2, 3). Комплексная постоянная распространения возбуждаемых оптических мод зависит от оптических и геометрических параметров тонкопленочной структуры, что при соответствующей обработке [2] зарегистрированной зависимости  $R(\gamma)$  позволяет определить их параметры. Структуры (рис. 1–3) были получены в ходе одного технологического цикла. Параметры аморфной пленки  $\text{SiO}_x$  на различных подложках, измеренные в случае волноводных и вытекающих мод, приведены в табл. 1.

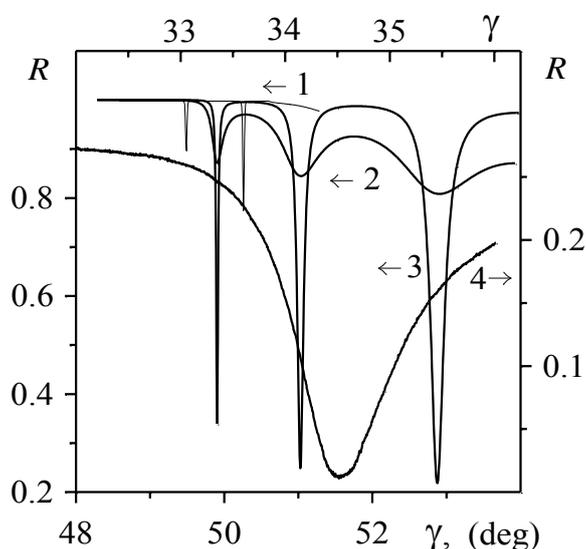


Рис. 1. Угловая зависимость коэффициента отражения светового пучка при возбуждении оптических мод в тонкопленочной структуре  $\text{SiO}_x$  на подложке из кварцевого стекла (1), пленке  $\text{SiO}_x$  на подложке из стекла К8 (2) и кремния (3), пленке алюминия на подложке из стекла (4)

Погрешность измерения не превышает  $1 \times 10^{-4}$  для показателя преломления  $n$  и  $\sim 3\%$  – для коэффициента поглощения  $k$  и толщины  $d$ .

Табл. 1. Параметры пленки  $\text{SiO}_x$  на различных подложках

Структура	$n$	$k, \times 10^{-5}$	$d$ (мкм)
$\text{SiO}_x/\text{SiO}_2$	1,47095	3,39	2,51
$\text{SiO}_x/\text{Si}$	1,47091	3,34	2,53

Одним из методов контроля параметров металлических слоев является ПЭВ-спектроскопия, также основанная на регистрации и обработке

угловой зависимости  $R(\gamma)$  при призмном возбуждении плазмонных мод (рис. 1, кривая 4). Благодаря локализации в окрестности поверхности металла ПЭВ крайне чувствительны к состоянию границы раздела, а также к наличию слоев, осажденных на поверхность металлической пленки. В работе представлены результаты измерения для пленок из алюминия и золота. Показано, что для пленок металла толщиной в диапазоне от 5 нм до 0,2 мкм, предлагаемый подход достаточно эффективен (погрешности восстановления параметров не превышают 10 %). При измерении параметров металлических пленок возможно отказаться от использования призмы связи в установке для волноводной спектроскопии. Принципиальная схема установки для измерения распределения  $R(\alpha)$  приведена на рис. 2. Реализуемый в таком случае метод угловой оптической рефлектометрии, основанный на измерении коэффициента отражения света от исследуемой структуры, позволяет определить параметры (комплексный показатель преломления  $n = x_2 + ix_3$  и толщина  $x_1$ ) металлической пленки путем минимизации целевой функции  $I = \sum_{j=1}^n [f(x_i, \gamma_j) - R(\gamma_j)]^2$ , где  $f(x_i, \gamma_j)$  – рассчитанные значения параметров на основе используемой модели. Представленные на рис. 3 угловые 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.

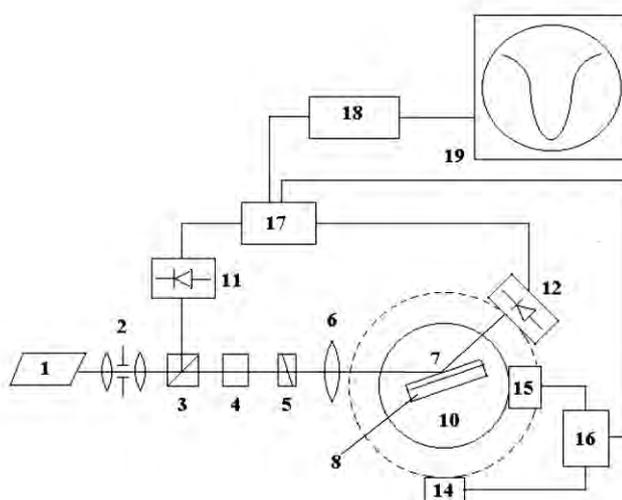


Рис. 2. Схема установки для измерения угловой зависимости коэффициента отражения лазерного пучка: 1 – источник излучения; 2 – коллиматор; 3 – делитель пучка; 4 – аттенюатор; 5 – поляризатор; 6 – линза; 7 – тонкопленочная структура на подложке 8; 10 – поворотный столик; 11 и 12 – фотоприемники; 14 и 15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

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

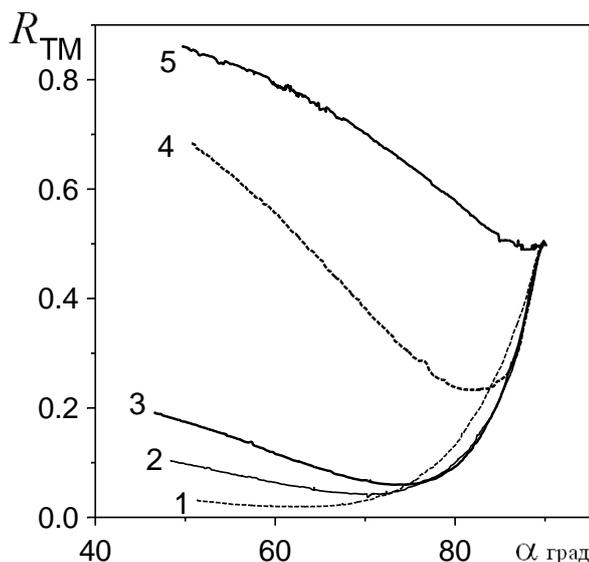


Рис. 3. Зависимость  $R(\gamma)$  для пленки алюминия толщиной 2, 3, 5, 18 и 26 нм (кривая 1, 2, 3, 4 и 5 соответственно)

Метод угловой рефлектометрии представляет также интерес для определения параметров наноразмерных диэлектрических структур. Он основан на многоугловом измерении коэффициента отражения света от исследуемой структуры и последующей оценке необходимых параметров с помощью метода наименьших квадратов (МНК) при минимизации суммы квадратов невязок:

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

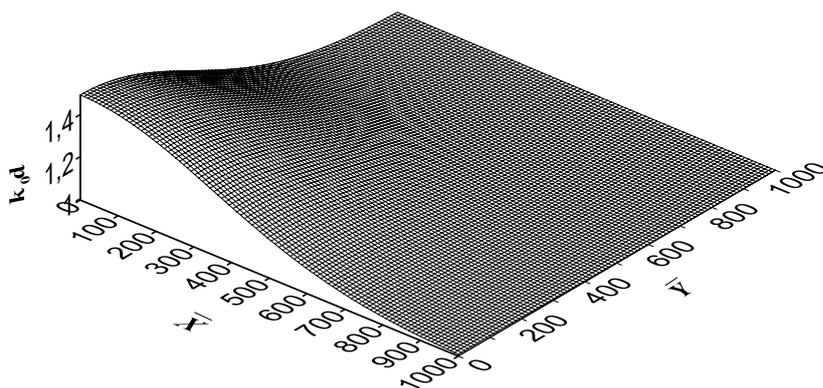
где  $R_i^e$  – измеренное значение коэффициента отражения света, имеющего поляризацию  $\rho$ , при угле падения света  $\gamma_i$ , отсчитанном от нормали к поверхности слоистой структуры ( $i = \overline{1, n}$ );  $R(\rho, \gamma_i, \mathbf{z})$  – рассчитанное значение коэффициента отражения на основе предполагаемой модели диэлектрической проницаемости структуры;  $\mathbf{z} = (\varepsilon, d)$  – комплекс неизвестных параметров структуры, которые необходимо оценить (в нашем случае диэлектрическая проницаемость и толщина слоя  $\text{SiO}_2$ ),  $n$  – количество углов, при которых производится измерение. Результаты измерений и численного моделирования отражения света от структуры с учетом погрешностей регистрации коэффициента отражения ( $\delta R \sim 0,005$ ) и решения обратной задачи определения параметров структуры показывают, что определение параметров слоев может быть достаточно точным при  $d > 0,05$  мкм. Более высокой чувствительности и точности определения указанных параметров можно достигнуть при использовании, так называемой, призмной схемы

измерения (призма, приведенная в контакт с исследуемой структурой). Это подтверждают результаты измерений и численного моделирования отражения света от призмы, приведенной в контакт со структурой Si-SO<sub>2</sub>. В качестве буферного слоя использовался иммерсионный слой. Толщина буферного слоя 0,1 мкм определялась также с помощью МНК с погрешностью менее 5 %.

Аналогичные исследования отражения света от призмы с металлическим (Au) слоем показало, 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.

В рамках задачи восстановления распределения толщины  $d(x,y)$  слоя SiO<sub>2</sub> промоделировано отражение света от неоднородного слоя, расположенного на кремниевой подложке (рис. 4). При этом предполагалось, что данное распределение описывается функцией Гаусса (рис. 4, а).

а)



б)

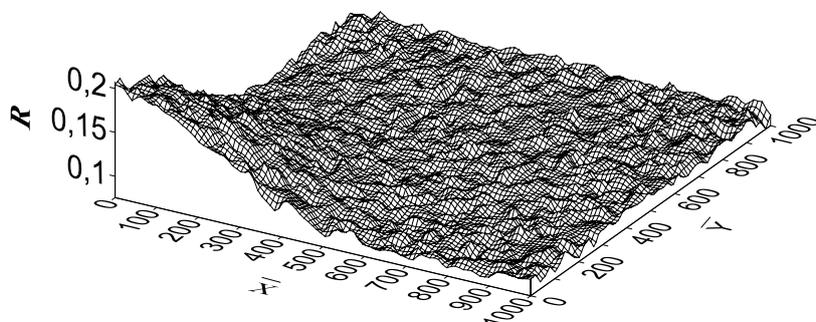


Рис. 4. Распределения толщины (а) слоя SiO<sub>2</sub> и соответствующего коэффициента отражения (б)

Для определения распределения  $d(x,y)$  использована аппроксимация распределения толщины слоя многочленами Чебышева

$$\bar{d} = k_0 d(x, y) = \sum_{k=0}^r \sum_{l=0}^s C_{k,l} G_k(\bar{x}) T_l(\bar{y}), \quad \bar{x} = x / a_x, \quad \bar{y} = y / a_y, \quad (1)$$

где  $G_k(\bar{x})$  ( $k = \overline{0, r}$ ) и  $T_l(\bar{y})$  ( $l = \overline{0, s}$ ) – многочлены Чебышева;  $k_0$  – волновое число вакуума;  $a_x$  и  $a_y$  – некоторые масштабные факторы. Неизвестные коэффициенты  $C_{k,l}$  ( $k = \overline{0, r}, l = \overline{0, s}$ ) определяются при минимизации функционала

$$I = \sum_{j=1}^{n_x} \sum_{i=1}^{n_y} (R_{j,i}^e - R^t(\bar{d}_{j,i}))^2, \quad \bar{d}_{j,i} = k_0 d(x_j, y_i). \quad (2)$$

Аппроксимация для отдельных сечений поверхности  $d(x, y)$  выполнена в виде

$$\bar{d}_x = k_0 d(x, y_0) = \sum_{k=0}^r A_k G_k(\bar{x}), \quad y_0 = y_{i_0}, \quad (3)$$

или

$$\bar{d}_y = k_0 d(x_0, y) = \sum_{l=0}^s B_l T_l(\bar{y}), \quad x_0 = x_{j_0}. \quad (4)$$

Неизвестные коэффициенты  $A_k$  ( $k = \overline{0, r}$ ) и  $B_l$  ( $l = \overline{0, s}$ ) определяются при минимизации соответственно следующих функционалов:

$$I(y_{i_0}) = \sum_{j=1}^{n_x} (R_{j,i_0}^e - R^t(\bar{d}_{j,i_0}))^2, \quad \bar{d}_{j,i_0} = k_0 d(x_j, y_{i_0}), \quad (5)$$

$$I(x_{j_0}) = \sum_{i=1}^{n_y} (R_{j_0,i}^e - R^t(\bar{d}_{j_0,i}))^2, \quad \bar{d}_{j_0,i} = k_0 d(x_{j_0}, y_i). \quad (6)$$

$$I(y_{i_0}) = \sum_{\rho=0}^1 \sum_{j=1}^{n_x} (R_{\rho,j,i_0}^e - R^t(\rho, n, d_{j,i_0}))^2, \quad I(x_{j_0}) = \sum_{\rho=0}^1 \sum_{i=1}^{n_y} (R_{\rho,j_0,i}^e - R^t(\rho, n, d_{j_0,i}))^2$$

На рис. 5, а представлены результаты моделирования отражения света от неоднородного слоя  $\text{SiO}_2$ , распределенного по закону  $\bar{d} = \bar{d}_0 + a \exp(-(\bar{x}/w)^2)$  ( $w = 300, 500, 700$  на рис. 5, б, соответственно, представлены кривыми 1, 3, 5).

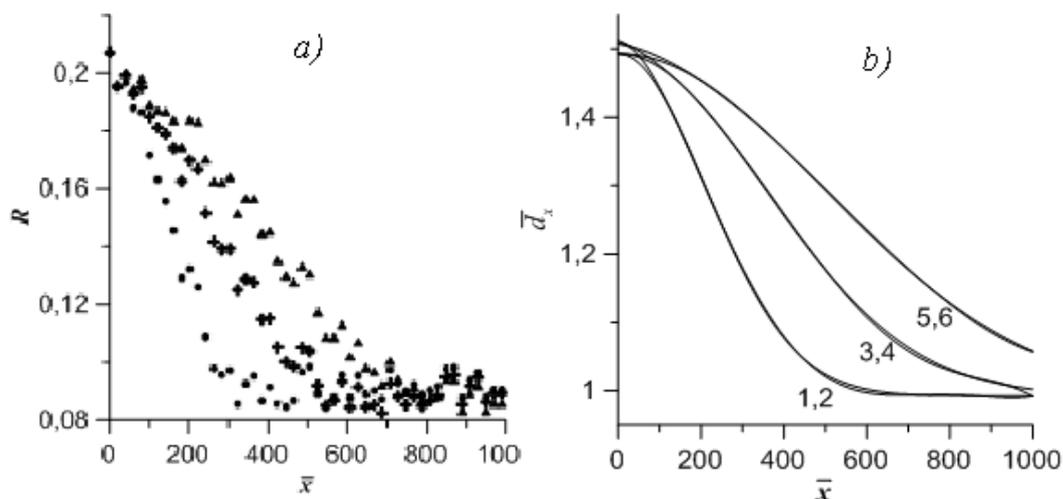


Рис. 5. Распределения коэффициента отражения (а) и толщины слоя  $\text{SiO}_2$  (б)

Результаты восстановления распределения на рисунке 5, б представлены кривыми 2, 4, 6. Погрешность определения  $d$  не превышала 10 %.

Таким образом, метод исследования оптических свойств тонких пленок, основанный на регистрации угловой зависимости коэффициента отражения светового пучка при возбуждении мод оптического диапазона, и метод угловой оптической рефлектометрии применимы для контроля и измерения параметров тонкопленочных структур, используемых в оптике и микроэлектронике.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ржанов, А. В.** Основы эллипсометрии / А. В. Ржанов. – Новосибирск : СО Наука, 1979.
2. **Сотский, А. Б.** [и др.] // ЖТФ. – 2013. – Т. 83, вып. 11. – С. 105–110.
3. **Соколов, В. И.** Квант / В. И. Соколов [и др.] // Электроника. – 2013. – Т. 43. – № 12. – С. 1149.
4. **Алиев, И. М.** [и др.] // ЖТФ. – 2015. – Т. 85, вып. 10. – С.145–147
5. **Khomchenko, A. V.** Waveguide spectroscopy of thin films / A. V. Khomchenko. – New York : Academic Press. – 2005.

E-mail: avkh@mogilev.by