

УДК 535.32: 621.378

**РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ  
ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР**

*А. В. ХОМЧЕНКО, И. У. ПРИМАК*

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

UDC 535.32: 621.378

**PARAMETER TESTING OF THIN-FILM STRUCTURE  
BY REFLECTOMETRY TECHNIQUE**

*A. V. KHOMCHENKO, I. U. PRIMAK*

**Аннотация.** Рассмотрены особенности и пределы применимости методов измерения параметров тонкопленочных структур, основанных на регистрации угловой зависимости коэффициента отражения поляризованного светового пучка в схеме призмного возбуждения волноводных, вытекающих 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.

**Keywords:** 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. В ряде работ продемонстрирована высокая чувствительность методов рефлектометрии и волноводной спектроскопии к вариациям параметров тонкопленочных структур. В 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, вытекающих, плазмонных мод или его отражения от поверхности исследуемой структуры. При возбуждении волноводных мод в традиционной схеме зависимость  $R(\gamma)$  для  $\lambda = 633$  нм представлена на рис. 1 (кривая 1).

Аналогичное распределение регистрируется при возбуждении вытекающих мод в тонкопленочной структуре (см. рис. 1, кривые 2 и 3). Комплексная постоянная распространения возбуждаемых оптических мод зависит от оптических и геометрических параметров тонкопленочной структуры, что при соответствующей обработке зарегистрированной зависимости  $R(\gamma)$  позволяет определить их параметры. Структуры 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. Погрешность измерения не превышает  $1 \cdot 10^{-4}$  для показателя преломления  $n$  и  $\sim 3\%$  для коэффициента поглощения  $k$  и толщины  $d$ .

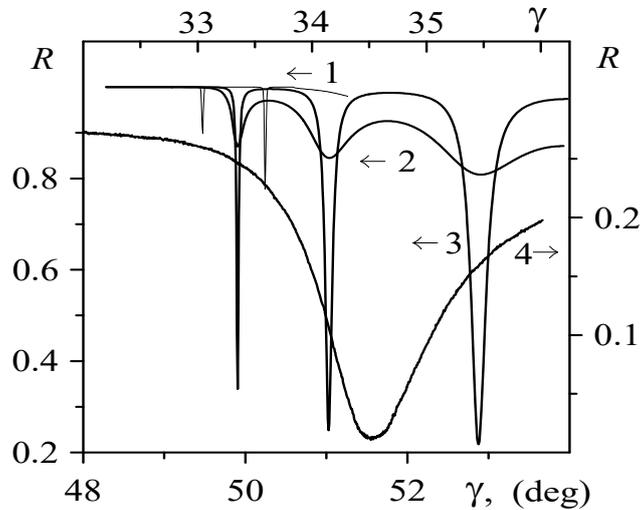


Рис. 1. Угловая зависимость коэффициента отражения светового пучка при возбуждении оптических мод в тонкопленочной структуре  $\text{SiO}_x$  на подложке из кварцевого стекла (1), пленке  $\text{SiO}_x$  на подложке из стекла К8 (2) и кремния (3), пленке алюминия на подложке из стекла (4)

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

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

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.

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:

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

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 ( $i = \overline{1, n}$ );  $R(\rho, \gamma_i, z)$  – рассчитанное значение коэффициента отражения на основе предполагаемой модели диэлектрической проницаемости структуры;  $z$  – комплекс неизвестных параметров структуры, которые необходимо оценить (в данном случае диэлектрическая проницаемость и толщина слоя  $\text{SiO}_2$ ),  $z = (\varepsilon, d)$ ;  $n$  – количество углов, при которых производится измерение.

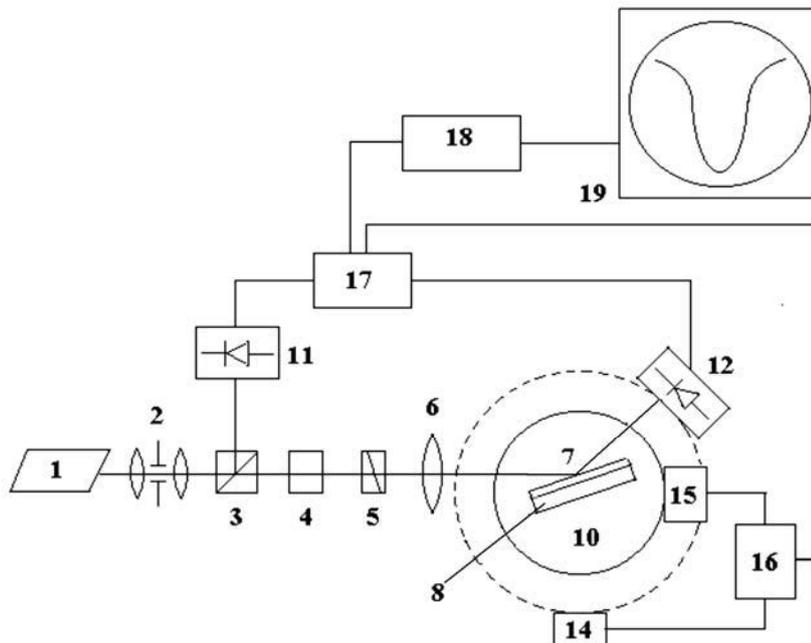


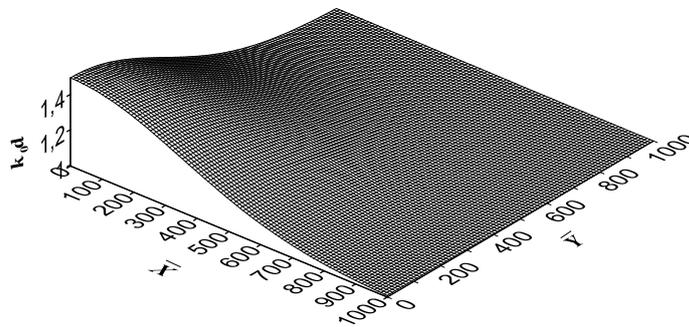
Рис. 2. Схема установки для измерения угловой зависимости коэффициента отражения лазерного пучка: 1 – источник излучения; 2 – коллиматор; 3 – делитель пучка; 4 – аттенюатор; 5 – поляризатор; 6 – линза; 7 – тонкопленочная структура на подложке 8; 10 – поворотный столик; 11, 12 – фотоприемники; 14, 15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

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 модели-

рования отражения света от призмы, приведенной в контакт со структурой Si-SO<sub>2</sub>. Толщина буферного слоя 0,1 мкм определялась методом наименьших квадратов с погрешностью менее 5 %. 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.

В рамках задачи восстановления распределения толщины  $d(x,y)$  слоя SiO<sub>2</sub> исследовано отражение света от неоднородного слоя, расположенного на кремниевой подложке (рис. 3).

a)



b)

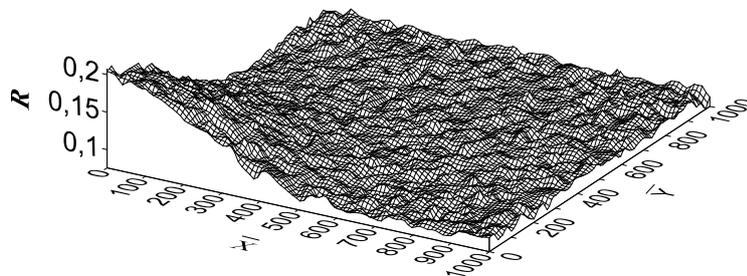


Рис. 3. Распределения толщины (a) слоя SiO<sub>2</sub> и соответствующего коэффициента отражения (б)

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