

02;07;12

## Определение параметров тонких пленок в схеме призмного возбуждения мод

© А.В. Хомченко, А.Б. Сотский, А.А. Романенко,  
Е.В. Глазунов, Д.Н. Костюченко

Институт прикладной оптики НАН Беларуси, Могилев  
E-mail: ipo@physics.belpak.mogilev.by

Поступило в Редакцию 10 декабря 2001 г.

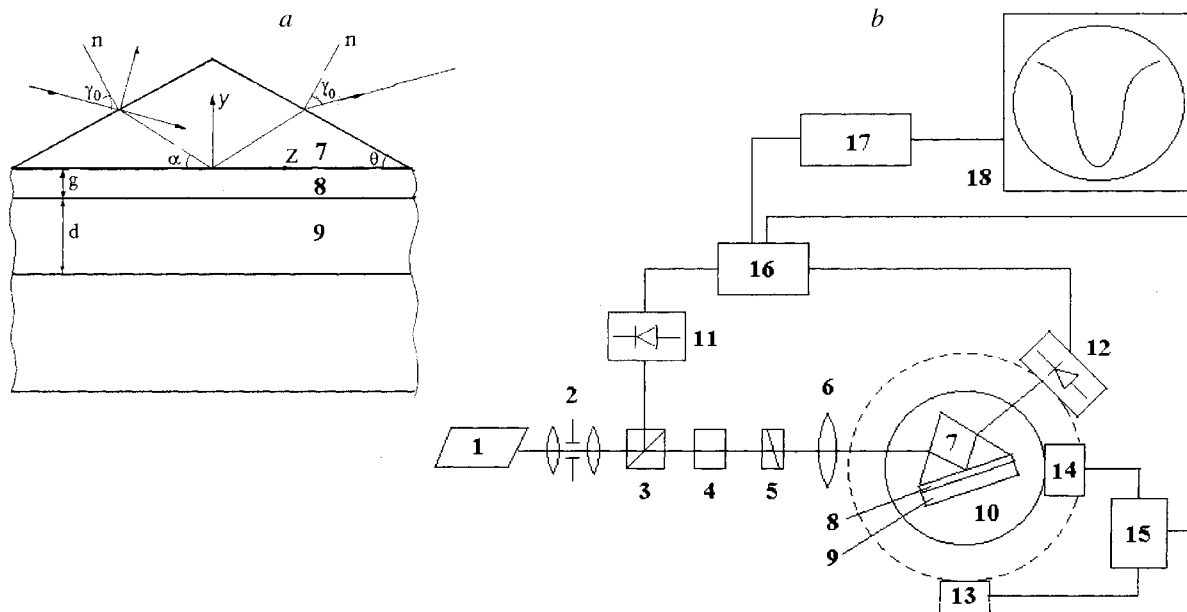
Предложен метод измерения коэффициента поглощения, показателя преломления и толщины тонких пленок, основанный на регистрации угловой зависимости коэффициента отражения светового пучка в схеме призмного возбуждения волноводных либо вытекающих мод. Обсуждаются особенности определения параметров  $\text{SiO}_2$ -пленок на кремниевой и стеклянной подложках.

Произошедшие изменения в области контроля производства тонкопленочных структур [1] позволяют использовать контактные волноводные методы для измерения параметров тонких пленок. Соответствующие методы, основанные на измерении постоянных распространения волноводных мод, возбуждаемых в исследуемой пленке с помощью призмного устройства связи, были предложены в работах [2,3]. Однако с их помощью можно определить лишь показатель преломления и толщину пленки.

В настоящем сообщении представлены результаты, демонстрирующие новые возможности измерения параметров тонких пленок с комплексной диэлектрической проницаемостью в схеме призмного устройства связи. Предлагаемый подход основан на регистрации угловой зависимости энергетического коэффициента отражения светового пучка при возбуждении волноводных либо вытекающих мод исследуемой пленки и восстановлении комплексных постоянных распространения мод по результатам обработки этой зависимости.

Рассмотрим тонкую пленку, направляющую моды оптического диапазона, которая расположена на подложке с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_s$  и приведена в контакт с равнобедренной призмой, как показано на рис. 1, а. Призма с углом  $\theta$  при основании, окружающая призму среда и буферный слой толщины  $g$  имеют вещественные диэлектриче-





**Рис. 1.** Призмное устройство связи (а) и схема установки для измерения угловой зависимости коэффициента отражения светового пучка (b): 1 — источник излучения, 2 — коллиматор, 3 — делитель пучка, 4 — аттенуатор, 5 — поляризатор, 6 — линза, 7 — призма, 8 — зазор, 9 — тонкопленочная структура, 10 — поворотный столик, 11 и 12 — фотоприемники, 13 и 14 — шаговые двигатели, 15 — блок синхронного управления шаговыми двигателями, 16 — блок сравнения каналов, 17 — аналого-цифровой преобразователь, 18 — ЭВМ.

ские проницаемости  $\varepsilon_p$ ,  $\varepsilon_a$  и  $\varepsilon_g$  соответственно, причем  $\varepsilon_p > \varepsilon_g \geq \varepsilon_a$ . Структура возбуждается гауссовым пучком радиуса  $w_0$ , ось которого составляет угол  $\gamma$  с нормалью к входной грани призмы. Энергетический коэффициент отражения пучка от призмы определяется равенством  $R(\gamma) = A(\gamma)r(\gamma)$ , где  $r(\gamma)$  — коэффициент отражения от основания призмы,  $A(\gamma) = 16\kappa^2/(1 + \kappa)^4$ ,  $\kappa = (\varepsilon_p/\varepsilon_a)^T \cos \gamma / \sqrt{\varepsilon_p/\varepsilon_a - \sin^2 \gamma}$ ,  $T = 0$  для волн  $TE$ - и  $T = 1$  для волн  $TM$ -поляризации [4]. Обобщение результатов работы [5] позволяет заключить, что при условии резонансного возбуждения волноводной моды ее комплексную постоянную распространения  $h$  можно восстановить из экспериментальной зависимости  $r(\gamma)$ . Если эта зависимость измерена в диапазоне углов  $\gamma_0 - a \leq \gamma \leq \gamma_0 + a$ , где  $\gamma_0$  — координата минимума функции  $r(\gamma)$ , соответствующего данной моде, то формула восстановления имеет вид

$$h = \beta + \frac{\sin \alpha}{w} \left\{ p_4^{(0)} + i [p_1 - p_2(1 - \delta)^2(2\delta)^{-1}] \right\}. \quad (1)$$

Здесь  $\beta = k_0 \sqrt{\varepsilon_p} \cos \alpha$ ,  $\alpha = 0.5\pi - \theta + \arcsin(\sqrt{\varepsilon_a \varepsilon_p^{-1}} \sin \gamma_0)$ ,

$$\delta = (\varepsilon_p \varepsilon_g^{-1})^T \sqrt{(k_0^2 \varepsilon_g - \beta^2)(k_0^2 \varepsilon_p - \beta^2)},$$

$$w = w_0 (\cos \gamma_0)^{-1} \sqrt{1 - \varepsilon_a \varepsilon_p^{-1} \sin^2 \gamma_0},$$

$k_0 = 2\pi/\lambda_0$  — волновое число вакуума,  $p_1$  является корнем уравнения

$$[G(-p_1)]^{-1} \operatorname{Re} \int_0^a G dp_4 = \left( 2a - \int_{\gamma_0 - a}^{\gamma_0 + a} r d\gamma \right) 0.5 k_0 \sqrt{\varepsilon_a} w_0 (1 - r_0)^{-1}, \quad (2)$$

где  $G(t) = \frac{i}{\sqrt{2}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-\tau^2)}{it - \tau\sqrt{2}} d\tau$ ,  $t = -p_1 + ip_4$ ,  $a_1 = k_0 \sqrt{\varepsilon_a} w_0 a$ ,  $r_0 = r(\gamma_0)$ ,

а значения  $p_2 = |p_2| \exp(i\sigma)$ ,  $\sigma$  и  $p_4^{(0)}$  вычисляются из выражений

$$2|p_2| = -p_1 + (-1)^\rho \sqrt{p_1^2 + p_1 \sqrt{0.5\pi(1 - r_0)} [G(-p_1)]^{-1}}, \quad (3)$$

$$\sigma = k_0 \sqrt{\varepsilon_a} w_0 \left( \int_{\gamma_0}^{\gamma_0 + a} r d\gamma - \int_{\gamma_0 - a}^{\gamma_0} r d\gamma \right) N^{-1}, \quad p_4^{(0)} = \sigma P, \quad (4)$$



где  $\rho$  равно 0 или 1,

$$N = 8|p_2| \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left\{ \operatorname{Im} \int_0^{a_1} G d p_4 - \left( \frac{|p_2|}{p_1} + 1 \right) [\operatorname{Re} G(-p_1 + i a_1) - G(-p_1)] P \right\},$$

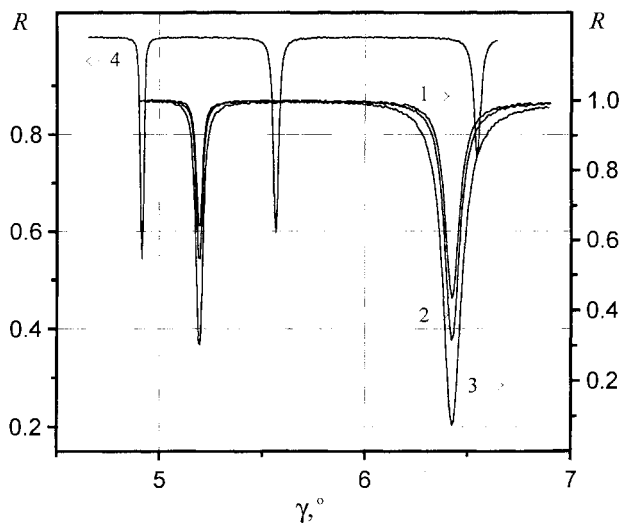
$$P = [p_1 G(-p_1) + \sqrt{0.5\pi}] \left\{ (1 + |p_2| p_1^{-1}) [p_1 \sqrt{0.5\pi} + (1 + p_1^2) G(-p_1)] \right\}^{-1}.$$

Выражение (1) позволяет восстановить комплексные постоянные распространения мод с учетом возмущающего влияния призмы связи на исследуемую структуру, т.е. измеряемая величина  $h$  не зависит от толщины буферного слоя, определяемого степенью прижима призмы к пленке. При подстановке значений  $h$  для двух поддерживаемых пленкой мод любого типа в соответствующие дисперсионные уравнения можно определить показатель преломления  $n$ , коэффициент поглощения  $k$  ( $\varepsilon = (n + ik)^2$ ) и толщину пленки  $d$  [5].

Для проведения измерений была создана автоматизированная установка, принципиальная схема которой приведена на рис. 1, *b*. В ней гауссов пучок He-Ne-лазера с параметрами  $\lambda_0 = 0.6328 \mu\text{m}$  и  $w_0 = 492 \mu\text{m}$  падает на призмный элемент связи 7, установленный на поворотном столике 10, а угол падения пучка на призму изменяется с помощью шагового двигателя 14. В экспериментах шаг дискретизации угла поворота измерительного столика составлял 20 угловых секунд. Зависимость  $r(\gamma)$  регистрировалась с помощью фотоприемника 12, синхронно перемещаемого вторым шаговым двигателем 13, путем измерения мощности светового пучка, отраженного от призмного устройства связи, и мощности падающего пучка, которая контролировалась фотоприемником 11 (блок управления двигателями 15 синхронизирован с блоком сравнения каналов 16). После цифровой обработки (10-разрядный аналого-цифровой преобразователь) сигнал поступал в оперативную память компьютера.

В качестве исследуемых образцов были использованы тонкопленочные структуры двух типов, полученные ВЧ-распылением кварцевого стекла марки КВ в атмосфере аргона и кислорода (4:1) соответственно на кремниевые подложки (показатель преломления подложки  $n_s = 3.515$ ) и подложки из этого же стекла ( $n_s = 1.4567$ ). Структура первого типа поддерживала только вытекающие моды. Зависимости  $r(\gamma)$ , измеренные при различном прижиме призмы к пленке





**Рис. 2.** Угловая зависимость коэффициента отражения светового пучка для структуры „SiO<sub>x</sub>-Si“ при различном прижиге образца к призме (1-3) и „SiO<sub>x</sub>-кварцевое стекло“ (4).

и соответствующие возбуждению в ней трех вытекающих *TE*-мод, приведены на рис. 2 (кривые 1-3), где меньшему значению толщины буферного слоя *g* соответствует больший номер кривой. Учет влияния призмы проявляется в неоднозначности выбора  $\rho$  в выражении (3) [5]. На практике это означает, что приходится выбирать одно из двух значений постоянной распространения, полученных в ходе обработки экспериментальных данных, причем любое из этих значений нельзя исключить заранее, ибо оно может оказаться истинным. Результаты обработки кривых 1-3 (рис. 2) показывают, что величина *h*, соответствующая корректному  $\rho$ , является устойчивой, в то время как другая изменяется (табл. 1). По измеренным *h* для различных мод были определены параметры пленки SiO<sub>x</sub> на кремниевой подложке:  $n = 1.47545$ ,  $k = 1.6 \cdot 10^{-5}$ ,  $d = 3.50 \mu\text{m}$ . Среднеквадратичные ошибки определения *n*, *k* и *d* составили  $1 \cdot 10^{-5}$ ,  $0.1 \cdot 10^{-5}$  и  $0.01 \mu\text{m}$  при ошибках измерений  $k_0^{-1} \text{Re } h$  и  $\text{Im } h$ , равных  $6 \cdot 10^{-6}$  и  $0.02 |\text{Im } h|$  соответственно.



**Таблица 1.** Результаты обработки угловых зависимостей, приведенных на рис. 2

Номер кривой	$\text{Re } h_0^*$	$\text{Re } h_1^*$	$ \text{Im } h_0^*  \times 10^4$	$ \text{Im } h_1^*  \times 10^4$
1	1.46489	1.46491	1.31	2.04
2	1.46488	1.46491	0.62	2.04
3	1.46490	1.46491	0.45	2.04

\*  $h_\rho$  — значение  $h$ , восстановленное при соответствующем  $\rho$  в (3).

**Таблица 2.** Параметры волноводной пленки  $\text{SiO}_x$  на подложке из кварцевого стекла

Номер моды	$\text{Re } h/k_0$	$ \text{Im } h_0 , \times 10^{-5}$	$n$	$k \times 10^{-5}$	$d, \mu\text{m}$
0	1.47335	1.57			
1	1.46720	1.49	1.47544	1.57	3.50
2	1.45785	1.15*	$\pm 1 \cdot 10^{-5}$	$\pm 0.03$	$\pm 0.004$

\* значение соответствует оптическим потерям 9.91 dB/cm.

Структура второго типа ( $n_s = 1.4567$ ) была волноводной [6], и в ней распространялись три моды  $TE$ -поляризации (рис. 2, кривая 4). Измеренные значения постоянных распространения волноводных мод и определенные на их основе параметры пленки приведены в табл. 2. При этом среднеквадратичные ошибки измерения  $k_0^{-1}\text{Re } h$  и  $k_0^{-1}\text{Im } h$  составили  $4 \cdot 10^{-6}$  и  $1.5 \cdot 10^{-7}$  соответственно. Для проверки корректности полученных результатов параметры волноводных пленок были определены независимыми методами. Измерение оптических потерь, выполненное методом сканирования волокна вдоль волновода [7] для третьей моды (погрешность 0.3 dB/cm), дало значение 9.7 dB/cm. Толщина пленки, измеренная профилографом с точностью  $0.02 \mu\text{m}$ , составила  $3.51 \mu\text{m}$ . Как видно, эти значения удовлетворительно согласуются с данными, приведенными в табл. 2. Поскольку исследованные структуры обоих типов были изготовлены совместно в одном технологическом цикле, то их параметры должны быть достаточно близкими, что и подтверждают данные эксперимента.



Анализ результатов исследования пленок, поддерживающих вытекающие моды, свидетельствует о том, что возможность корректного определения их параметров связана со степенью локализации полей мод в пленке, которая зависит от величины  $\Delta n = n_s - n$  и толщины пленки  $d$ . В случае  $\Delta n \geq 0.75$  измеренные  $k$  в пределах ошибки  $\delta k/k = 0.03$  совпадают с данными, полученными для аналогичной волноводной пленки. При  $\Delta n < 0.75$  величина  $\delta k/k$  зависит от толщины пленки, и при  $d \geq 3.5 \mu\text{m}$  она не превышала 0.05 для  $\text{SiO}_x$ -пленки на подложке из оптического стекла К8. Наименьшее значение  $k$ , которое можно определить данным методом при приемлемой точности измерений, также обусловлено величиной потерь на вытекание. Так, для  $\text{SiO}_x$ -пленки, осажденной на Si-подложку, при  $k = 10^{-5}$  и толщине пленки  $2.5 \mu\text{m}$   $\delta k/k = 0.1$ , а при  $k = 3 \cdot 10^{-5}$  величина  $\delta k/k$  была равна 0.03. Точность определения показателя преломления и толщины пленки во всех случаях была не хуже  $5 \cdot 10^{-5}$  и 3% соответственно. Следовательно, применение метода для определения поглощения тонких пленок, поддерживающих только вытекающие моды, целесообразно при достаточно большой разности показателей преломления подложки и осаждаемой пленки (по крайней мере, при  $\Delta n > 0.5$ ). В случае малых  $\Delta n$  использование метода оправдано при толщине пленки  $d \geq 5 \mu\text{m}$ .

Заметим, что изложенный подход применим и при исследовании металлических пленок, направляющих плазмонные моды.

Таким образом, предложенный метод измерения параметров тонких пленок может представлять интерес при исследовании свойств различных тонкопленочных структур, используемых в оптике, опто- и микроэлектронике.

## Список литературы

- [1] Сретенский В.Н., Юдинов В.А. // Зарубеж. радиоэлектр. 1996. № 3. С. 69–75.
- [2] Ulrich R., Torge R. // Appl. Opt. 1973. V. 12. N 12. P. 2901–2908.
- [3] Hou T.W., Mogab C.J. // Appl. Optics. 1981. V. 20. N 18. P. 3184–3188.
- [4] Сотский А.Б., Хомченко А.В., Сотская Л.И. // Оптика и спектроскопия. 1995. Т. 78. № 3. С. 502–511.
- [5] Романенко А.А., Сотский А.Б. // ЖТФ. 1998. Т. 68. В. 4. С. 88–95.
- [6] Петровский Г.Т., Редько В.П., Хомченко А.В. // ЖТФ. 1984. Т. 54. В. 10. С. 2045–2047.
- [7] Kersten R.Th. // Vakuum-Technik. 1973. V. 23. N 1. P. 16–19.

