

## **К определению неоднородности толщины слоя на кремниевой подложке методами оптической рефлектометрии**

*И. У. Примак, А. В. Хомченко*

*Разработана простая и эффективная процедура обработки распределений коэффициента отражения электромагнитного излучения от планарных структур, которая позволяет восстановить пространственное распределение толщины пленочного покрытия на кремниевой подложке.*

**Ключевые слова:** оптическая рефлектометрия, распределение толщины слоя, распределение коэффициента отражения, погрешности восстановления параметров слоя.

## **To determination of the thickness heterogeneity of the layer on a silicon substrate by optical reflectometry techniques**

*I. U. Primak, A. V. Khomchenko*

*A simple and effective procedure for processing the distributions of coefficient of reflection of electromagnetic radiation from planar structures has been developed, which allows one to reconstruct the spatial distribution of the thickness of the film coating on a silicon substrate.*

**Keywords:** optical reflectometry, distribution of layer thickness, distribution of reflection coefficient, reconstruction errors of the layer parameters.

Планарные структуры  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  широко используются в микроэлектронике и интегральной оптике, тонкие пленки оксида индия, легированного оловом (ИТО), применяются в качестве прозрачных проводящих покрытий при изготовлении жидкокристаллических дисплеев, электролюминесцентных ламп, электродов фотопроводящих элементов. Одной из важных задач производства указанных структур является контроль их равномерности, обнаружение царапин, сколов. В этом отношении наиболее практичными являются методы оптической рефлектометрии [1–3]. Ранее для построения распределения толщины слоя на подложке было предложено осуществлять измерение его параметров в различных точках структуры (с помощью методов многоугловой рефлектометрии) с последующей их линейной интерполяцией. Такой подход может быть достаточно точным, если многоугловые измерения производить для большого числа точек. В противном случае погрешности линейной интерполяции параметров пленки могут превысить 15 % [3]. В результате, многократное проведение многоугловых измерений усложняет и затягивает процесс контроля. В этой связи

более простым и эффективным представляется подход, основанный на регистрации одномерных распределений  $R(x)$  или  $R(y)$  (или если это необходимо двумерного распределения  $R(x,y)$ ) коэффициента отражения света от слоя, расположенного на подложке. Однако и такой подход, основанный на классическом решении обратной задачи об определении толщины и показателя преломления слоя в каждой точке структуры, предполагает достаточно большие временные и вычислительные затраты [1, 2]. В этой связи существует необходимость в разработке процедуры обработки распределений коэффициента отражения, которая позволила бы упростить процесс определения параметров структуры и снизить временные затраты.

В данной работе решение обратной задачи строится на основе регистрации распределений коэффициента отражения света s- и p-поляризации от рассматриваемой структуры под углом  $\alpha$  (рис. 1). Такой подход в общем случае позволяет одновременно определять толщину исследуемого слоя и его показатель преломления [1].

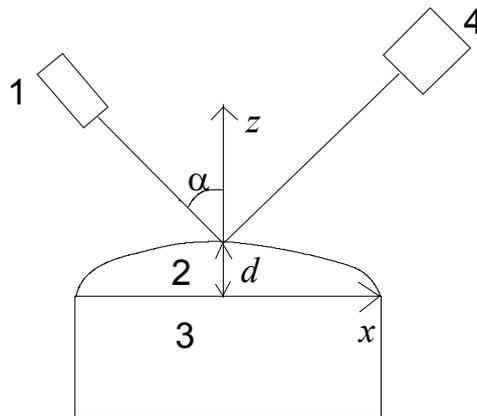


Рис. 1. Схема измерений: 1 – источник излучения, 2 – исследуемый слой, 3 – кремниевая подложка, 4 – линейка или матрица фотоприемников

Далее предлагается соответствующее распределение толщины  $d(x)$  (рассматривается одномерный случай, полученные результаты несложно обобщить и на двумерное распределение толщины) слоя аппроксимировать полиномом  $\bar{d} = k_0 d(x) = \sum_{k=0}^r A_k G_k(\bar{x})$ ,  $\bar{x} = x/a$ , где  $G_k(\bar{x})$  ( $k = \overline{0, r}$ ) – ортогональные полиномы Чебышева,  $k_0$  – волновое число вакуума,  $a$  – некоторый масштабный фактор. Неизвестные коэффициенты  $A_k$  ( $k = \overline{0, r}$ ) и показатель преломления слоя  $n$  определяются при минимизации функционала

$$I = \sum_{\rho=0}^1 \sum_{i=0}^s (\tilde{R}_i^{\rho} - R(x_i, \rho, n, A_1, A_2, \dots, A_r))^2, \quad (1)$$

где  $\tilde{R}_i^{\rho}$  – измеренный коэффициент отражения света в точке с координатой  $x = x_i = ia$  ( $i = \overline{1, s}$ ) при заданной поляризации света  $\rho$  ( $\rho = \overline{0, 1}$ ),

$R(\alpha, x_i, \rho, n, A_1, A_2, \dots, A_r)$  – рассчитанное значение коэффициента отражения для заданных  $x_i, \rho, n, A_1, A_2, \dots, A_r$ . Здесь  $\rho = 0$  в случае s-поляризованного и  $\rho = 1$  для p-поляризованного света.

В этой ситуации оценки погрешностей определения толщины  $\delta \bar{d}_k$  ( $k = \overline{1, s}$ ) и показателя преломления  $\delta n$  пленки, вызванных погрешностями регистрации коэффициента отражения  $\delta \tilde{R}_i^p$  ( $i = \overline{1, s}, \rho = 0, 1$ ), описываются следующим образом:

$$\delta \bar{d}_m \approx \sum_{k=0}^r \sum_{i=1}^s \sum_{\rho=0}^1 \frac{\delta \tilde{R}_i^p (\partial R_i^p / \partial \bar{d})}{(\partial R^p / \partial \bar{d})^2} \overline{G_k^i G_k^m}, \quad \overline{G_k^{i,m}} = G_k(\bar{x}_{i,m}) \left( \sum_{l=1}^s (G_k(\bar{x}_l))^2 \right)^{-0.5}, \quad (m = \overline{1, s}), \quad (2)$$

$$\delta n \approx \sum_{\rho=0}^1 \sum_{i=1}^s (\partial R_i^p / \partial n) \left[ \delta \tilde{R}_i^p - (\partial R_i^p / \partial \bar{d}) \delta \bar{d}_i \right] \left( \sum_{\rho=0}^1 \sum_{i=1}^s (\partial R_i^p / \partial n)^2 \right)^{-1}, \quad (3)$$

где производные  $\partial R_i^p / \partial n$  и  $\partial R_i^p / \partial \bar{d}$  вычисляются при  $x = x_i$  ( $i = \overline{1, s}$ ) и заданном  $\rho$  ( $\rho = 0, 1$ ), а  $(\partial R^p / \partial \bar{d})^2$  – средние значения функции  $(\partial R(x) / \partial \bar{d})^2$  при  $\rho = 0, 1$  (при этом полагаем, что на рассматриваемом интервале изменения координаты  $x$  данные производные изменяются незначительно).

Полученные оценки погрешностей позволяют определиться с выбором оптимального значения параметра  $r$ . Согласно [4], степень полинома  $r$  выбирается равной значению, при котором остаточная дисперсия

$S^2 = \frac{1}{s-r-1} \sum_{m=1}^s \left( \bar{d}_m - \sum_{k=0}^r A_k G_k^m \right)^2$  является минимальной. В этой связи с учетом

(2) остаточную дисперсию будем оценивать как

$$S^2 = \frac{1}{s-r-1} \sum_{m=1}^s (\delta \bar{d}_m)^2 = \frac{1}{s-r-1} \sum_{m=1}^s \left( \sum_{k=0}^r \sum_{i=1}^s \sum_{\rho=0}^1 \frac{\delta \tilde{R}_i^p (\partial R_i^p / \partial \bar{d})}{(\partial R^p / \partial \bar{d})^2} \overline{G_k^i G_k^m} \right)^2, \quad (4)$$

где предполагается  $\delta \tilde{R}_i^p = \tilde{R}_i^p - R(x_i, \rho, n, A_1, A_2, \dots, A_r)$ .

Эффективность такого подхода анализируется на основе численного моделирования отражения света от слоев SiO<sub>2</sub> на кремнии и пленок ИТО на кремнии с учетом погрешностей регистрации коэффициента отражения (нормальное распределение со среднеквадратическим отклонением  $\sigma = 0,005$ ). На рис. 2, а и б и табл. 1 и 2 приведены результаты определения  $\bar{d}(x)$  и  $n$  слоев SiO<sub>2</sub> и пленок ИТО на основе обработки отражения света с длиной волны 0,6328 мкм, падающего под углом  $\alpha = 45^\circ$ . Здесь 1, 2, 3 – точные зависимости, которые моделировались полиномами пятого порядка, 4, 5, 6 – восстановленные зависимости, построенные для оптимального значения  $r = 2$ .

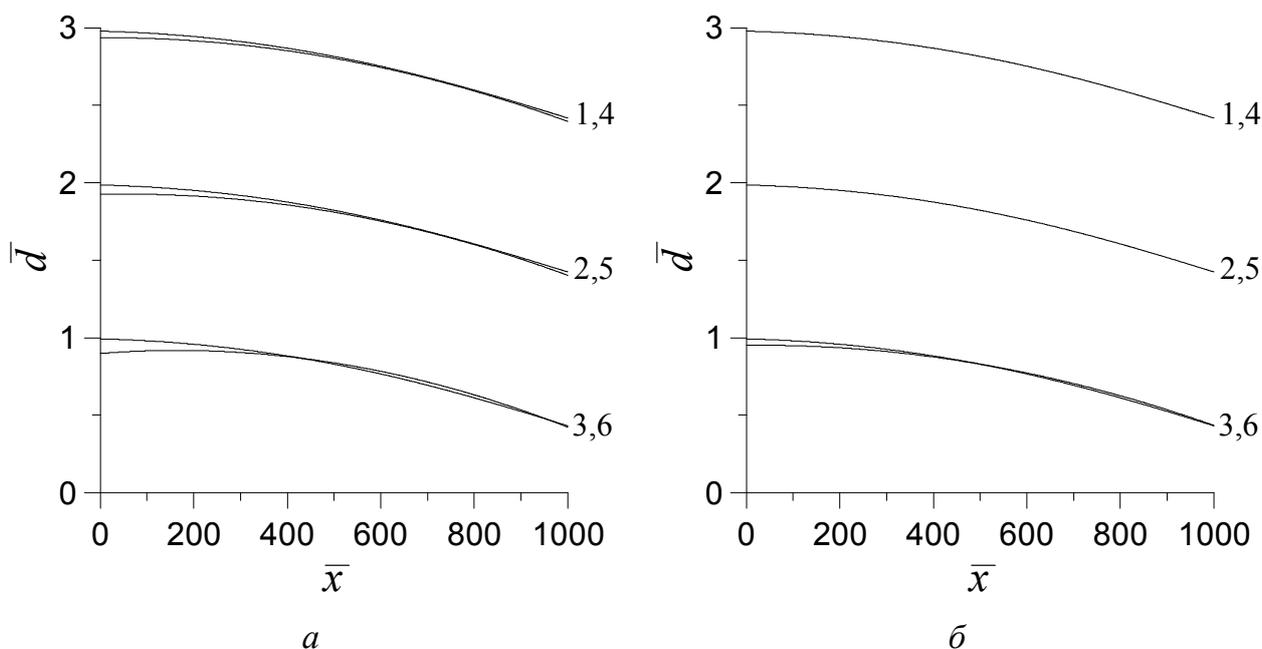


Рис. 2. Точные (кривые 1, 2, 3) и восстановленные (кривые 4, 5, 6) зависимости  $\bar{d}(\bar{x})$  для слоев  $\text{SiO}_2$  (а) и пленок ITO (б)

Таблица 1. Результаты восстановления параметров слоев  $\text{SiO}_2$

№ распределения на рис. 2, а	Восстановленное $n$ ITO (точное значение $n = 1,4567$ )	Погрешность $ \delta n / n  \%$	$\sqrt{S^2}$
1	1,4608	0,28	$2,0 \cdot 10^{-2}$
2	1,4641	0,51	$2,61 \cdot 10^{-2}$
3	1,4620	0,36	$3,40 \cdot 10^{-2}$

Таблица 2. Результаты восстановления параметров пленок ITO

№ распределения на рис. 2, б	Восстановленное $n$ ITO (точное значение $n = 2$ )	Погрешность $ \delta n / n  \%$	$\sqrt{S^2}$
1	2,0043	0,22	$8,69 \cdot 10^{-3}$
2	2,0087	0,44	$1,22 \cdot 10^{-2}$
3	2,0121	0,61	$1,74 \cdot 10^{-2}$

Представленные результаты расчетов демонстрируют, что погрешности восстановления показателя преломления и толщины пленки ITO составляют менее 2 и 5 % соответственно. В то же время результаты восстановления распределения толщины  $\bar{d}(x)$  слоев  $\text{SiO}_2$  несколько хуже по сравнению с нормальным отражением [3]. Во многом это связано с тем, что в [3] рассматривалась более простая задача восстановления зависимости толщины  $\bar{d}(x)$  при известном показателе преломления  $n$  слоя  $\text{SiO}_2$ , точность численного решения которой выше. Кроме того, анализ формул (2)–(3) показывает, что рассматриваемые погрешности можно снизить при максимизации производных  $\partial R / \partial n$  и  $\partial R / \partial \bar{d}$

за счет выбора угла падения. Причем это имеет смысл при исследовании слоев  $\text{SiO}_2$ , так как величину указанных производных можно изменить за счет выбора угла более чем на 30 %. В то же время для высокопреломляющих слоев типа ИТО эти производные незначительно зависят от угла.

Таким образом, предложена простая и эффективная процедура обработки распределений коэффициента отражения излучения от планарных структур, которая позволяет восстановить пространственное распределение толщины слоя. Оценены погрешности восстановления указанных параметров структуры и предложены пути их снижения, выполнено численное моделирование отражения света от слоев оксида кремния и пленок ИТО на кремниевой подложке. Продемонстрированы возможности восстановления показателя преломления и толщины слоя менее 2 и 5 % соответственно.

### Список использованных источников и литературы

1. Определение оптических свойств и толщины нанослоев по угловым зависимостям коэффициента отражения / Д. И. Биленко [и др.] // Журнал технической физики. – 2010. – Т. 80, № 10. – С. 89–94.
2. Измерение распределения толщин многослойных пленочных структур методами спектральной рефлектометрии / В. Г. Цепулин [и др.] // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». – 2016. – № 3. – С. 3–12.
3. Контроль параметров тонкопленочных структур методами рефлектометрии и волноводной спектроскопии / И. У. Примак [и др.] // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов : сборник статей 6-й Международной научно-технической конференции / Бел.-Рос. ун-т. – Могилев, 2017. – С. 172–178.
4. Носач, В. В. Решение задач аппроксимации с помощью персональных компьютеров / В. В. Носач. – Москва : МИКАП, 1994. – 382 с.

### Сведения об авторах

*Игорь Ульянович Примак*, кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель декана экономического факультета Белорусско-Российского университета (Республика Беларусь, г. Могилев), [primak\\_igor@mail.ru](mailto:primak_igor@mail.ru)

*Александр Васильевич Хомченко*, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой «Физика» Белорусско-Российского университета (Республика Беларусь, г. Могилев), [avkh@mogilev.by](mailto:avkh@mogilev.by)