

УДК 535.51

## Оптические характеристики естественного поверхностного слоя на кремниевой подложке

Н. И. Стаськов<sup>1</sup>, А. Б. Сотский<sup>1</sup>, Л. И. Сотская<sup>2</sup>, И. В. Ивашкевич<sup>1</sup>,  
Н. А. Крекотень<sup>3</sup>, Л. Д. Буйко<sup>3</sup>

Контроль параметров наноразмерных слоевых структур на кремниевой подложке с помощью эллипсометрии основывается на выборе модели для оптических и геометрических характеристик исследуемого образца. Измеряемые поляризационные углы  $\Delta$  и  $\Psi$  при выбранных углах падения должны быть достаточно чувствительны к свойствам поверхности образца. Только тогда можно получить устойчивое решение обратной задачи эллипсометрии. Кроме того, эллипсометр должен обладать достаточной разрешающей способностью.

В работе [1] путем моделирования и численных расчетов исследовано влияние естественных поверхностных слоев кремниевых подложек КЭФ-5 на точность определения показателя преломления и толщины наноразмерного покрытия. Здесь, как и в [2, 3] допускается, что на кремниевых подложках до нанесения пленки имеется слой естественного окисла  $\text{SiO}_2$ . Однако при определении характеристик пленки этот окисел непосредственно не учитывается, а используется эффективный комплексный показатель преломления кремниевой подложки.

Обратим внимание на то, что для излучения с длиной волны 632,8 нм слой  $\text{SiO}_2$  прозрачен, а чистая подложка Si имеет показатель поглощения  $-\text{Im } n < 0,05$  [4]. Однако эффективный показатель поглощения КЭФ-5 по данным работы [1] на порядок превосходит показатель поглощения чистого кремния. Это, а также результаты монографии [3] указывают на проблематичность использования эффективного показателя преломления подложки и необходимость учета переходного слоя.

В данной работе делается попытка определения оптических характеристик естественного поверхностного слоя на кремниевой подложке КЭС 0,01 Ом·см с кристаллографической ориентацией [111] методом многоугловой эллипсометрии градиентных структур без резких границ раздела. Предполагаем, что соответствующая оптическая модель позволит более детально представить отражающую систему и исследовать физико-химические процессы в поверхностных и контрольных слоях, динамику изменения параметров этих слоев при нанесении пленок и покрытий, а также исследовать влияние различных воздействий – температуры, облучения и т.д.

Поляризационные углы  $\Delta$  и  $\Psi$  подложек Si измерялись на эллипсометре ЛЭФ-2 ( $\lambda = 632,8$  нм) в области углов падения от  $45^\circ$  до  $80^\circ$  с шагами от  $0,5^\circ$  до  $5^\circ$  (рис. 1). Решение прямых и обратных задач эллипсометрии проводилось для трех оптических моделей:

- 1) неоднородный градиентный слой с  $n(y)$  ( $-\infty < y < 0$ ) непрерывно переходящий в подложку с показателем преломления  $n_1$ ,
- 2) однородный слой ( $n_3, h$ ) на подложке ;
- 3) однородная подложка.

Для задания профиля диэлектрической проницаемости приповерхностной области кремния мы использовали модель

$$\varepsilon(y) = \varepsilon_1 F(y, y_1, \alpha_1) + \varepsilon_2 F(-y, -y_1, \alpha_2) F(y_1, y_2, \alpha_2) + \varepsilon_3 F(-y_1, -y_2, \alpha_3), \quad (1)$$

где

$$F(a, b, c) = \{1 + \exp[c(a - b)]\}^{-1}.$$

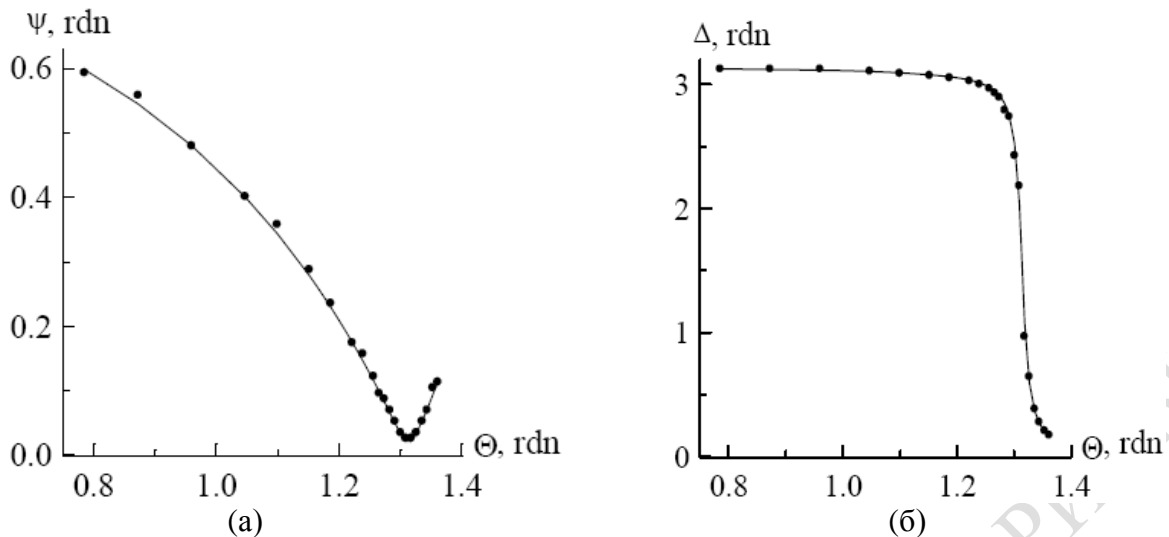


Рисунок 1 – Зависимости эллипсометрических углов  $\Psi$  (а) и  $\Delta$  (б) от угла падения  $\Theta$ . Точки – экспериментальные данные, кривые – решение обратной задачи для модели (1).

Произведение функций Ферми в (1) (второе слагаемое) позволяет учесть возможность существования промежуточной фазы кремния между монокристаллическим кремнием и поверхностным слоем, расположенным при  $y_1 < y < y_2$ . Параметры  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  в (1) имеют смысл комплексных диэлектрических проницаемостей указанной структуры,  $y_1, y_2$  – координаты условных границ раздела фаз,  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – константы, учитывающие глубину взаимного проникновения фаз.

Обратная задача многоугольной эллипсометрии для модели (1) решалась путем минимизации методом градиентного спуска приведенного в [5] функционала невязки теоретических и экспериментальных поляризационных углов. Теоретические данные получались с помощью интегрирования известных волновых уравнений для волн  $s$ – и  $p$ – поляризации методом Рунге-Кутты 4–го порядка точности.

Результаты решения представлены на рис.1 и 2. Найденные значения констант модели (1) составили  $n_1 = 3.822 - i0.0344$ ,  $n_2 = 4.168 - i0.160$ ,  $n_3 = 1.347 - i0.122$ ,  $y_1 = -0.0018 \mu m$ ,  $y_2 = -0.0017 \mu m$ ,  $\alpha_1 = 5.87 \cdot 10^4 \mu m^{-1}$ ,  $\alpha_2 = 7.89 \cdot 10^4 \mu m^{-1}$ ,  $\alpha_3 = 7.89 \cdot 10^4 \mu m^{-1}$ , где  $n_i = \sqrt{\varepsilon_i}$  ( $i = 1, 2, 3$ ).

Обратим внимание на сильное поглощение в приповерхностной области кремния (мнимая часть показателя преломления этой области примерно на порядок превосходит мнимую часть показателя преломления кремниевой подложки). Аналогичный результат мы получили, решив обратную задачу эллипсометрии для более простой ступенчатой модели переходного слоя, которая является частным случаем модели (1) при  $\varepsilon_2 = 0$ ,  $y_2 = y_1$ ,  $\alpha_1 \rightarrow \infty$ ,  $\alpha_3 \rightarrow \infty$ . В рамках этой модели толщина  $h$  переходного слоя оказалась равной  $h = -y_1 = 0.0019 \mu m$ , а показатели преломления этого слоя и подложки составили  $n_3 = 1.359 - i0.173$  и  $n_1 = 3.833 - i0.0172$ , соответственно. В то же время решив обратную задачу для модели однородной подложки, не учитывающей поверхностный слой ( $y_1 = 0$ ,  $\alpha_1 \rightarrow \infty$ ,  $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$ ), мы получили эффективный показатель преломления подложки, равный  $n_1 = 3.800 - i0.138$ . В этом случае значение мнимой части показателя преломления примерно на порядок превысило справочные данные для мнимой части показателя преломления монокристаллического кремния. Аналогичный результат был получен и авторами работы [1].

Проведенное рассмотрение указывает на необходимость учета переходного слоя на поверхности кремния при получении оценок оптических потерь материала методом

эллипсометрии. Анализируя рис.2, можно предположить, что поверхностный слой на моно-Si состоит из фаз поли-Si и  $Si_xO_y$ . Очевидно, что этот слой должен фигурировать и в моделях, используемых в эллипсометрическом анализе тонкопленочных покрытий на кремнии.

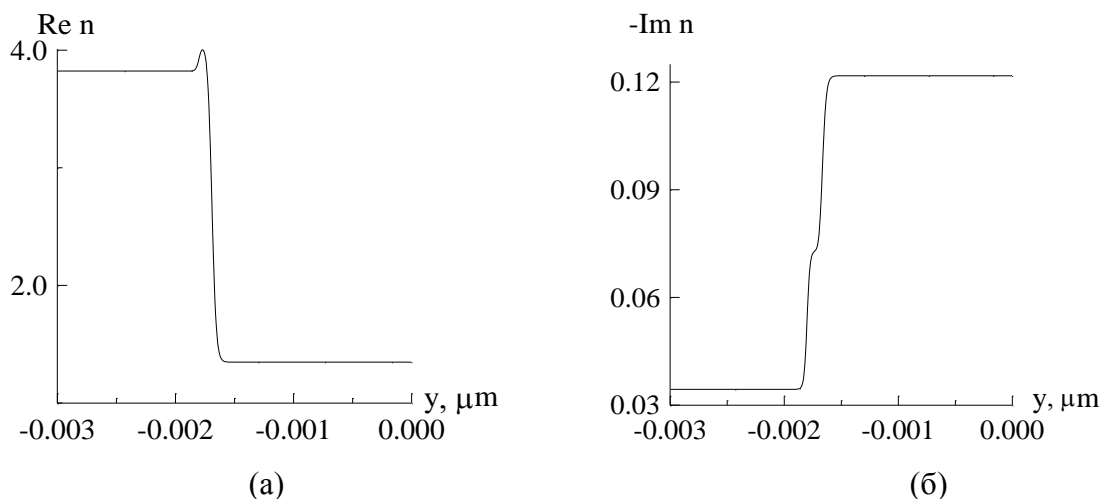


Рисунок 2 – Восстановленные профили действительной (а) и мнимой (б) частей показателя преломления кремния с поверхностным слоем (модель (1)).

### Abstract.

### Литература

1. Д. И. Биленко, В. П. Полянская, М. А. Гецьман, Д. А. Горин, А. А. Невешкин, А. М. Яценюк, ЖТФ, Т. 75, вып. 6, (2005), С. 69–73.
2. Б. М. Аюпов, Н. П. Сысоева, Е. Ф. Титова, Эллипсометрия: теория, методы, приложения, Новосибирск, Наука (1983).
3. В. И. Пшеницын, М. И. Абаев, Н. Ю. Лызлов, Эллипсометрия в физико-химических исследованиях, Ленинград, Химия (1986).
4. А. В. Ржанов, Эллипсометрия – эффективный метод исследования поверхности твердых тел и тонких пленок // Современные проблемы эллипсометрии, Новосибирск, Наука (1980), С. 4–11.
5. В. И. Пшеницын, И. А. Храшчовский И. А. , Методы эллипсометрического анализа неоднородных поверхностных слоев и шероховатых поверхностей // Сборник научных трудов. Эллипсометрия. Теория, методы, приложения, Новосибирск, Наука (1991), С. 20–33.

<sup>1</sup>Могилевский государственный университет им. А.А. Кулешова, ул. Космонавтов 1, 212022, Могилев, Беларусь, e-mail: Sotsky@msu.mogilev.by

<sup>2</sup>Могилевский государственный университет продовольствия, п-т Шмидта 4, 212030, Могилев, Беларусь,

<sup>3</sup>Научно-технический центр Белмикросистемы ул.Корженевского 12, 220108, Минск, Беларусь, e-mail: office@bms.by