

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ СЛОЕВ В СТРУКТУРЕ ПОЛУПРОВОДНИК – ДИЭЛЕКТРИК – ПОЛУПРОВОДНИК

Кремний и его соединения представляют практический интерес для разработки наноразмерных структур. Одним из эффективных методов исследования оптических свойств таких структур является отражательная эллипсометрия. Ее основное уравнение

$$\operatorname{tg}\psi_e \exp(i\Delta_e) = r_p / r_s$$

содержит в левой части измеряемые поляризационные углы  $\Delta_e$  и  $\psi_e$ , а в правой части -- амплитудные коэффициенты отражения  $r$ - и  $s$ -поляризованного излучения  $r_p$  и  $r_s$ , которые на данной длине волны  $\lambda$  определяются пространственным распределением комплексного показателя преломления  $N(y) = n(y) - ik(y)$  исследуемой структуры (ось  $y$  перпендикулярна границам раздела слоев – подложка). Трудности решения обратной задачи эллипсометрии (ОЗЭ) – определение функции  $N(y)$  по  $\Delta_e$  и  $\psi_e$  структур с тонкими переходными слоями ( $d < 0,01\lambda$ ), усугубляются многими факторами [1]. При известной точности измерения углов  $\Delta_e$  и  $\psi_e$  можно указать большое число моделей  $N(y)$  с рассчитанными  $\Delta$  и  $\psi$ , хорошо согласующимися с экспериментальными углами.

Для структуры полупроводник – полупроводник, например слой аморфного кремния (сSi) на подложке монокристаллического кремния (сSi), существует несколько подходов к решению ОЗЭ. Обычно эллипсометрическое исследование данной структуры основывается на одно- или двухслойной модели [2], либо на определении сложной многопараметрической функции  $N(y) = n(y) - ik(y)$  при  $0 > y > -\infty$ , которая учитывает неоднородности поверхностного и переходного слоев [3].

Для другой практически важной структуры полупроводник – диэлектрик – полупроводник, например, слои поликристаллического кремния (pSi) и термического оксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) на подложке монокристаллического кремния (сSi), предложена трехслойная модель [2], в которой учитывается поверхностный (нарушенный) слой.

Целью данной работы является решение ОЗЭ для двух выше указанных структур при моделировании переходных слоев слоями диполей с поляризуе-

мостью  $\alpha_{zj}$ . При этом преследуется цель исключить влияние переходных слоев без детализации их внутренней структуры. Это позволяет сократить количество рассчитываемых параметров при численном решении ОЗЭ. В качестве подложки c-Si использовался КЭС-0,01 с кристаллографической ориентацией [111]. Модель исследуемых структур представлена на рис. 1. При  $\alpha_{z1} = 0$  и  $d_1 = 0$  двухслойная модель трансформируется в однослойную для системы  $\alpha\text{Si} - \text{cSi}$ . Эллипсометрические углы  $\Delta_e$  и  $\psi_e$  исследуемых образцов измерялись на стандартном эллипсометре ЛЭФ-2 ( $\lambda = 632,8$  нм) при углах падения от  $45^\circ$  до  $80^\circ$  с достаточным шагом для каждой структуры.

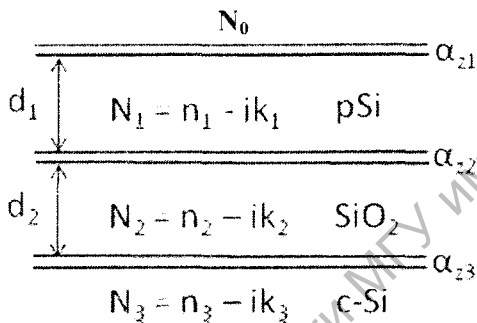


Рис. 1.  
Оптическая модель отражающей системы

Обобщенные коэффициенты Френеля  $r_s, r_p$  в этом случае представляются рекуррентными выражениями, учитывающими фазовую толщину  $j$ -ого слоя  $\delta_{j-1} = (2\pi/\lambda)d_{j-1}N_{j-1}\cos\varphi_{j-1}$  и коэффициенты отражения для границы раздела  $j-k$  ( $j = 0, 1, 2, k = j + 1$ )

$$r_{s,p} = \frac{r_{01} + r_{13}e^{-2i\delta_1}}{1 + r_{01}r_{13}e^{-2i\delta_1}},$$

где

$$r_{13} = \frac{r_{12} + r_{23}e^{-2i\delta_2}}{1 + r_{12}r_{23}e^{-2i\delta_2}},$$

$$r_{ijk} = \frac{N_j \cos \varphi_j - N_k \cos \varphi_k}{N_j \cos \varphi_j + N_k \cos \varphi_k},$$

$$r_{ijk} = \frac{N_k \cos \varphi_j - N_j \cos \varphi_k + i2\pi / (\lambda) \alpha_{zj} N_j^3 N_k \sin^2 \varphi_j}{N_k \cos \varphi_j + N_j \cos \varphi_k - i2\pi / (\lambda) \alpha_{zj} N_j^3 N_k \sin^2 \varphi_j}$$

В этих выражениях углы падения  $\varphi_i$  и преломления  $\varphi_k$  связаны законом Снеллиуса.

Параметры модели для трех образцов с разной толщиной слоя  $\alpha\text{Si}$  на  $\text{cSi}$  подложке при  $\alpha_{z1} = 0$  и  $d_1 = 0$  приведены в таблице.

Параметры	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3
$\alpha_{z2}$ , нм	-3,10	-0,37	-3,60
$N_2$	4,40 – i0,50	4,38 – i0,24	4,40 – i0,30
$d_2$ , нм	70	155	360
$\alpha_{z3}$ , нм	-4,00	-3,50	-3,90
$N_3$	3,87 – i0,03	3,87 – i0,03	3,87 – i0,05

Приведенные данные хорошо согласуются с данными из [3], полученными в рамках модели неоднородных слоев с  $N(y)$ .

Для структуры  $\text{pSi} - \text{SiO}_2 - \text{cSi}$  параметры модели (рис. 1) имеют значения:

$\text{pSi}$ :  $\alpha_{z1} = -1,2$  нм;  $N_1 = 3,94 - i0,04$ ;  $d_1 = 222$  нм;

$\text{SiO}_2$ :  $\alpha_{z2} = -0,6$  нм;  $N_2 = 1,46$ ;  $d_2 = 45$  нм;

$\text{cSi}$ :  $\alpha_{z3} = -0,15$  нм;  $N_3 = 3,88 - i0,02$ .

Расчет толщины слоя  $\text{SiO}_2$  по полюсе поглощения в ИК спектре показывает, что  $d_2 = 42$  нм. Проведенная оценка интерференционного ИК спектра образца  $\text{pSi} - \text{SiO}_2 - \text{cSi}$  позволила установить, что толщина слоя  $\text{pSi}$   $d_1 = 280$  нм, а его показатель преломления  $n_1 = 3,92$ . При шаговом распылении (2 нм за 20 с) слоя  $\text{pSi}$  ионами  $\text{Ag}^+$  его толщина составила 240 нм. Эти данные удовлетворительно коррелируют с данными многоугловой эллипсометрии.

Таким образом, однопараметрическая модель переходного слоя позволяет исключить его влияние при определении толщин и оптических параметров структуры полупроводник - диэлектрик - полупроводник.

### Литература

1. Назаренко И.Н., Дорофеева Д.Л. // Вестник ВГУ серия химия, биология. 2001. № 1. С. 164-169.
2. Ржаиов А.В. Современные проблемы эллипсометрии. – Новосибирск: Наука. 1980. – 192 с.
3. Стаськов Н.И. и др. Многоугловая эллипсометрия слоя аморфного кремния // Оптика неоднородных структур: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Могилев, 2-3 октября 2007 г. / МГУ им. А.А. Кулешова; редкол.: В.И. Лебедев [и др.]. – Могилев, 2007. – С. 100-103.