

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 Δ_e и ψ_e , а в правой части -- амплитудные коэффициенты отражения r - и s -поляризованного излучения r_p и r_s , которые на данной длине волны λ 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 Δ_e и ψ_e структур с тонкими переходными слоями ($d < 0,01\lambda$), усугубляются многими факторами [1]. При известной точности измерения углов Δ_e и ψ_e можно указать большое число моделей $N(y)$ с рассчитанными Δ и ψ , 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 (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 α_{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 с-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 Δ_e и ψ_e исследуемых образцов измерялись на стандартном эллипсометре ЛЭФ-2 ($\lambda = 632,8$ нм) при углах падения от 45° до 80° с достаточным шагом для каждой структуры.

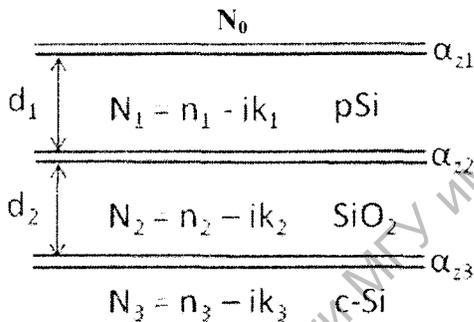


Рис. 1.
Оптическая модель отражающей системы

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 φ_i и преломления φ_k связаны законом Снеллиуса.

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

Параметры	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3
α_{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
α_{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: pSi : $\alpha_{z1} = -1,2$ нм; $N_1 = 3,94 - i0,04$; $d_1 = 222$ нм;

SiO_2 : $\alpha_{z2} = -0,6$ нм; $N_2 = 1,46$; $d_2 = 45$ нм;

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

Расчет толщины слоя 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 pSi $d_1 = 280$ нм, а его показатель преломления $n_1 = 3,92$. При шаговом распылении (2 нм за 20 с) слоя pSi ионами 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.