

Формирование Нанопленок CoSi_2 На Поверхности Si При Твердофазном Осаждении

*А. К. Тауатов*¹, *Н. М. Мустафоева*²

Аннотация: В работе для получения упорядоченно расположенных наночастиц Co и CoSi_2 , на поверхности Si предварительно создаются зародыши методом бомбардировки ионами Ar^+ с $E_0=0,5$ keV и $D=8 \cdot 10^{13}$ см⁻². Установлено, что при толщине слоя Co менее чем 3 ML в зонной структуре появляется узкая запрещенная зона ($E_g \approx 0,3$ eV). Металлические свойства пленки Co проявляются при толщине больше чем 4-5 ML. Прогрев системы $\text{Co/Si}(111)$ при $T=900$ K приводит к образованию наночастиц и нанопленок CoSi_2 . E_g наночастиц CoSi_2 с $\theta \approx 3$ монослоя составляет $\sim 0,8$ eV, а пленки CoSi_2 - 0,6 eV.

Ключевые слова: наночастица, эпитаксия, низкоэнергетическая бомбардировка, поверхность, монокристалл, островковый рост, доза ионов, степень покрытия.

Многослойные системы на основе Si и силицидов металлов являются основными материалами современной микро-нано- и оптоэлектроники. В частности, наноструктуры MeSi_2/Si перспективны для создания СВЧ-транзисторов, УБИС, оптических резонаторов, электронных и магнитных запоминающих устройств [1-3]. Поэтому изучению физико-химических свойств наночастиц и нанослоев MeSi_2/Si , полученных методами молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), твердофазной эпитаксии (ТФЭ), ионной-имплантации (ИИ) посвящено большое число работ [4-7]. Среди силицидов металлов для создания многослойных ПДП и МДП систем наиболее оптимальным материалом является CoSi_2 , благодаря его металлическим свойствам (удельное сопротивление $\sim 20-30$ мкОм·см) и возможности его эпитаксиального выращивания на Si из-за близости параметров решетки. В последние годы для получения наноразмерных фаз и слоев CoSi_2 на поверхности и в приповерхностной области Si широко используется метод ионной имплантации [7-9].

Особый интерес представляет случай получения упорядоченно расположенных структур с одинаковыми размерами. В [8,9] показано, что при низкоэнергетической ($E_0 = 0,5 - 1$ кэВ) бомбардировке монокристаллического CaF_2 ионами Ar^+ при не больших дозах $D = (5 - 6) \cdot 10^{13}$ см⁻² ионы попадают на отдельные участки поверхности. При напылении атомов различных элементов эти участки могут являться зародышами для скопления атомов. В случае бомбардировки ионами Ar^+ с энергией $E_0 = 0,5-1$ кэВ расстояние между центрами зародышей составляет $\sim 50-60$ нм. Наиболее качественные зародыши формируются на гладких и атомарно чистых поверхностях материалов.

В данной работе мы попытались методом твердофазной эпитаксии получить наноразмерные фазы и пленки Co и $\text{CoSi}_2/\text{Si}(111)$ с использованием метода предварительной бомбардировки Si ионами Ar^+ и изучить зависимость параметров энергетических зон от размеров наночастиц Co и CoSi_2 .

Нанесение пленок Co на поверхность Si осуществлялось нагревом Co электронной бомбардировкой и проводилось при комнатной температуре подложки. Скорость роста пленок определялась предварительно с использованием метода ОЭС в сочетании с ионным травлением и она составляла ~ 2 Å/мин. Напыление атомов Co , прогрев образцов, исследование их состава и параметров энергетических зон с использованием методов оже-электронной спектроскопии ОЭС и измерением интенсивности проходящего через образец света проводились в одном и том же приборе в условиях сверхвысокого вакуума ($P = 10^{-7}$ Па). Морфология поверхности изучалась методами растровой электронной микроскопии РЭМ (*Jeol*).

На рис.1 приведены зависимости интенсивности I проходящего через образец света от энергии $h\nu$, для $\text{Si}(111)$ с нанопленкой Co разной толщины θ . Здесь $I = I_{\text{CoSi}_2} / I_{\text{Si}}$; I_{Si} - интенсивность проходящего света через чистый $\text{Si}(111)$. I_{CoSi_2} - интенсивность проходящего света через $\text{Si}(111)$, с пленкой CoSi_2 .

¹ Каршинский государственный университет, Карши, Узбекистан

² Каршинский государственный университет, Карши, Узбекистан

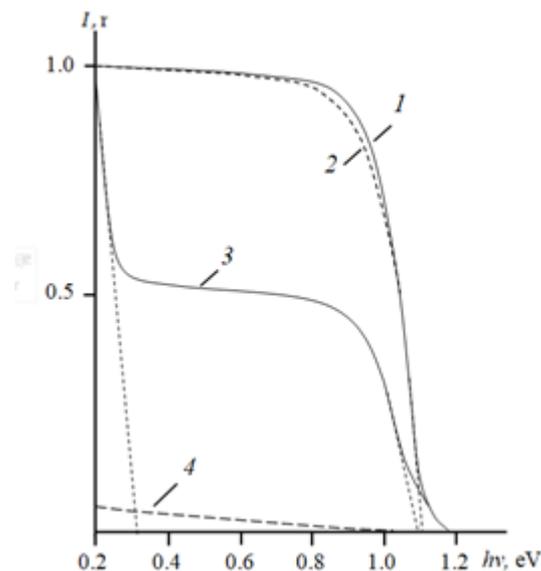


Рис. 1. Зависимости $I(h\nu)$ для $Si(111)$ с пленкой Co различной толщины θ (монослой): 1- $\theta=0$ (чистый Si); 2- $\theta=1$; 3- $\theta=3$; 4- $\theta=6$.

Видно, что при $\theta=1$ монослой вид зависимости $I(h\nu)$ не отличается от таковой для чистого $Si(111)$. Только в области $h\nu \approx 0,9 - 1$ эВ наблюдается более существенное уменьшение I . По-видимому, скопление атомов Co в центрах зародышей пока ещё существенно не влияет на оптические свойства Si . В случае $\theta=3$ монослой значение I резко уменьшается в двух областях $h\nu$: при $h\nu \approx 0,2$ эВ и при $h\nu=0,9$ эВ. Первое уменьшение I связано с наличием на поверхности участков покрытых атомами Co , а второе – не покрытых Co участков Si . Экстраполяция правой части кривой к оси $h\nu$ дает значение $\sim 0,3$ эВ, т.е. E_g этих участков составляет $\approx 0,3$ эВ. По формуле $Q = 1 - (I_{Co} / I_{Si})$ можно оценить степень покрытия Q поверхности Si атомами Co . В данном случае значение $Q \approx 0,35 - 0,4$. Это приблизительно согласуется с данными РЭМ (рис. 2).

Если учесть, что расстояние между центрами этих фаз $\sim 50-60$ нм, то их средние поверхностные диаметры составляют $d \approx 20-25$ нм, а примерная толщина наночастиц $\sim 6-8$ монослой ($\sim 12-15 \text{ \AA}$).

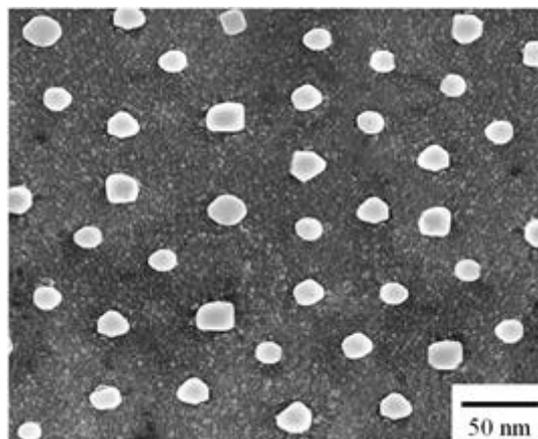


Рис. 2. РЭМ – изображения поверхности $Si(111)$ с пленкой Co с $\theta = 6$ монослой.

Исходя из этого мы предполагаем, что при небольших размерах наночастиц Co ($\theta \leq 3$ монослой) проявляются квантово-размерные эффекты: в фазе металлического Co появляется узкая запрещенная зона, характерная для узкозонных полупроводников. При $\theta \approx 6$ монослой степень покрытия поверхности Si наночастицами Co приближается к 1 и на кривой $I(h\nu)$ не наблюдается двойное резкое уменьшение I , т.е. значение $E_g \approx 0$. При $\theta \approx 8 - 10$ монослой поверхность полностью покрывается атомами Co . Однако свет небольшой интенсивности проходит через пленку вплоть до $\theta \approx 10 - 12$ нм. По-видимому, очень тонкая пленка Co пропускает свет. Отметим, что наночастицы и нанопленки Co были аморфными. Результаты ОЭС показали, что при комнатной температуре не происходит заметная взаимодиффузия атомов между подложкой и пленкой. После прогрева кремния с наночастицами и пленками Co при $T \approx 850 - 900$ К формировались нанокристаллические фазы и пленки $CoSi_2$. На рис.3 приведены зависимости $I(h\nu)$ для Si покрытого пленкой $CoSi_2$ с толщиной 3 и 10 (кривая 2 и 3) монослой, измеренные после прогрева при $T \approx 900$ К в течение 40 мин.

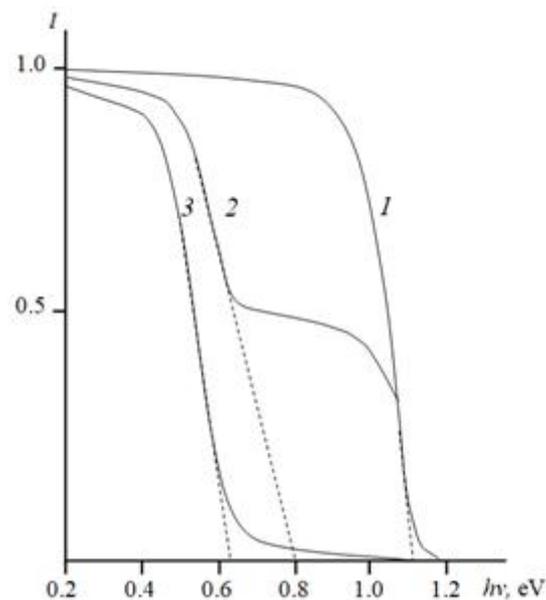


Рис. 3. Зависимости $I(h\nu)$ для пленки $CoSi_2/Si(111)$ с толщиной θ (монослой): 1- $\theta=0$ (чистый Si); 2- $\theta=6$; 3- $\theta=10$.

Из кривой 2 видно, что в случае наночастиц $CoSi_2$ с $\theta \approx 3$ монослой степень покрытия поверхности составляет 0.5 - 0.6, $d \approx 25-30$ нм а значение $E_g \sim 0.8$ эВ. В случае $\theta_{CoSi_2} \approx 10$ монослой, значение I практически уменьшается до нуля в интервале $h\nu = 0,45 - 0,65$ эВ. Можно полагать, что при этом поверхность Si полностью покрывается сплошным, однородным эпитаксиальным слоем $CoSi_2$ с толщиной $\sim 20-25$ монослой и E_g этого слоя составляет $\sim 0,6$ эВ, что характерно для толстых эпитаксиальных слоев $CoSi_2$.

Таким образом, в работе методом бомбардировки ионами Ar^+ на поверхности Si получены упорядоченно расположенные центры, которые служили зародышами для получения наноразмерных фаз и пленок Co . Впервые изучены E_g наночастицы и нанопленки Co . Предполагается, что наноразмерные фазы Co с поверхностными диаметрами $\leq 20 - 25$ нм обладают свойствами узкозонных полупроводников ($E_g \approx 0,3$ эВ). Последующий отжиг при $T \approx 900$ К привел к формированию наночастиц $CoSi_2$ на поверхности $Si(111)$. Показано, что квантоворазмерные эффекты в случае наночастиц $CoSi_2$ проявляются при $d \leq 25-30$ нм.

Список Литературы

1. H.W. Chang, J.S. Tsay, Y.C. Hung, F.T. Yuan, W.Y. Chan, W.B. Su, C.S. Chang, Y.D. Yao. J. Appl. Phys. 101, 09D124. (2007). DOI.org/10.1063/1.2712532
2. M.V. Gomoyunova, G.S. Grebenyuk, I.I. Pronin, Tech. Phys., 56 (6), 865-868 (2011). DOI: 10.1134/S1063784211060077.
3. В.Л. Дубов, Д.В. Фомин, Успехи прикладной физики. 4 (6), 599-605. (2016). <https://www.advance.orion-ir.ru/UPF-16/6/UPF-4-6-599.pdf>
4. В.Е. Umirzakov, D.A. Tashmukhamedova, A. Dzhurakhalov, E.U. Boltaev. Materials Science and Engineering, 101 (1). 124-127. (2003) DOI:10.1016/S0921-5107(02)00677-3.
5. A.S. Rysbaev, A.K. Tashatov, Sh.X. Dzhuraev, Zh.B. Khuzhaniyazov, G. Arzikulov, and S.S. Nasriddinov. Surf. Inves. X-ray. 5 (6), 1193-1196. (2011). DOI: 10.1134/S1027451011100193
6. Umirzakov, В.Е., Tashmukhamedova, D.A., Tashatov, A.K., Mustafoeva, N.M. Technical Physics, 2019, 64(5), 708-710
7. В.С. Вавилов. Некоторые физические аспекты ионной имплантации. УФН, 145 (2), 329-346. (1985). http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?monosloy?wshow=paper&jrnid=ufn&paperid=8270&option_lang=rus
8. A. K. Tashatova, N. M. Mustafoeva. // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2020, Vol. 14, No. 1, pp. 81-84.
9. В.Е. Umirzakov, S.B. Donaev, Surf. Inves. X-ray., 11 (4), 746-748. (2017). DOI: 10.1134/S1027451017040139.