

ISSN 1684-789X

АБУ РАЙҲОН БЕРУНИЙ
НОМИДАГИ
ТОШКЕНТ ДАВЛАТ
ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ



**ТошДТУ
ХАБАРЛАРИ**

**ВЕСТНИК
ТашГТУ**

3

2013

вызывают долговременную релаксацию фотопроводимости и высокой фоточувствительности к воздействию внешнего освещения. Предложенное авторами объяснение исследуемого процесса, протекающего при указанных выше условиях, не объясняет всей глубины происходящих явлений и будет развито в последующих публикациях.

Тем не менее экспериментально установленное авторами существенное влияние эффекта Пельтье на рост выделяемого тепла и, соответственно, температуры на границе раздела между Mn_4Si_7 и $Si<Mn>$ имеет место при 10^{-11} А и меньших значениях протекающего электрического тока через границу раздела.

Литература

- 1 Shukurova D.M., Kamilov T.S., Sharipov B.Z., Klechkovskaya V.V., Orekhov A.S., Feodorov M.I. Study of Peculiarities of Heat Emission at the Interface of Mn_4Si_7 - $Si<Mn>$ Me Heterostructures // Abstracts Book, 29 th International Conference on Thermoelectrics, 30 May-3 June, Shanghai. China, 2010. P.211.
2. Шукурова Д.М., Орехов А.С., Шарипов Б.З., Ключковская В.В., Камиллов Т.С. Исследование фотодиодов на основе Mn_4Si_7 - $Si <Mn>$ - Mn_4Si_7 и Mn_4Si_7 - $Si <Mn>$ - М. ЖТФ, 2011. Т.81. Вып.10. С. 44-49.
3. Камиллов Т.С., Ключковская В.В., Орехов А.С., Ивакин Г.И., Тураходжаев С.Ж., Эрнст И.В., Холмухамедова В.Х. Некоторые особенности роста пленок силицида марганца при диффузионном легировании кремния марганцем. -Санкт-Петербург, 2013. С. 380-385

ТашГТУ, НИЛ «Электроника и
микроэлектроника»

Дата поступления
12.10.2012

УДК 537.533

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ТОНКИХ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНОК $CoSi_2$, ПОЛУЧЕННЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ ПРИ МОЛЕКУЛЯРНО- ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ АТОМОВ Co и Si

А.С.Рысбаев, Ж.Б.Хужаниязов, А.М.Рахимов, Р.Ф.Файзуллаев,
И.Р.Бекпулатов, З.А.Рысбаева (ТашГТУ)

В статье методами электронной спектроскопии и дифракции медленных электронов исследован процесс формирования тонких наноразмерных плёнок $CoSi_2$. Рост плёнок осуществлен методом молекулярно-лучевой эпитаксии МЛЭ в сверхвысоком вакууме, толщина плёнок составляет 5-20 нм. Определены оптимальные технологические режимы МЛЭ для формирования совершенных плёнок силицида кобальта. Установлено, что в результате осаждения атомов Co и Si на поверхности $Si(111)$ толщиной $30-50\text{Å}$ и последующем прогреве при 900 K образуется монокристаллическая плёнка $CoSi_2$ со структурой $CoSi_2/Si(111)-2\times 2$. А в случае осаждения атомов Co и Si на $Si(100)$ толщиной 100Å и последующего прогрева при 950 K формируется плёнка со структурой $CoSi_2/Si(100)-2\times 4$.

Мақолада электрон спектроскопия ва кичик электронлар дифракцияси усуллари билан юққа нанойлчамли CoSi_2 плёнкаларни ҳосил қилиш жараёни ўрганилди. Плёнкалар ўта юқори вакуум шароитида молекуляр-нурли эпитаксия (МЛЭ) усули билан ўстирилди, ҳосил бўлган МЛЭ плёнкалар қалинлиги 5-20 нм. мукамал кобальт силицид МЛЭ плёнкаларни ўстириш технологиясининг оптимал шароитлари аниқланди. Si(111) юзасига Co ва Si атомлари 30-50Å қалинликда ўстириб 900 K ҳароратда қиздирилгандан кейин $\text{CoSi}_2/\text{Si}(111)$ -2x2 тузилишли CoSi_2 монокристалл плёнкаси олинди. Si(100) юзасига Co ва Si атомлари 100Å қалинликда ўстирилиб 950 K ҳароратда қиздирилганда $\text{CoSi}_2/\text{Si}(100)$ -2x4 тузилишли CoSi_2 монокристалл плёнкаси олинди.

In the article methods of electron spectroscopy and diffraction of low electrons process of formation of thin nanodimensional films of CoSi_2 is investigated. Growth of films is carried out to methods of a molecular beam epitaxy of MBE in high vacuum, thickness of films makes 5-20 nm. The MBE optimum technological modes for formation of perfect films of silicide of cobalt are defined. Defined, that in result of Co and Si atoms sediments on Si(111) surface with thickness of 30-50Å and following warming at 900 K applies CoSi_2 monocrystal film with $\text{CoSi}_2/\text{Si}(111)$ -2x2 structure. And in case of beselging of Co and Si atoms on Si(100) with thickness 100Å and following warming at 950 K are formatted film with $\text{CoSi}_2/\text{Si}(100)$ -2x4 structure.

Ключевые слова: наноразмерные плёнки, поверхность, молекулярно - лучевая эпитаксия, дифракция, электроны, спектроскопия, силицид, кремний, кобальт, вакансия, модель, сверхструктура.

Повышенный интерес к исследованию тонких наноразмерных плёнок CoSi_2 , сформированных на поверхности монокристаллов Si(111) и Si(100), обусловлен, во-первых; их хорошей совместимостью – постоянные решётки и коэффициенты температурного расширения Si и CoSi_2 практически совпадают; во-вторых, плёнки CoSi_2 имеют низкое удельное сопротивление, высокую термостабильность, стойкость к агрессивным и окислительным средам и, в третьих, система CoSi_2 Si(111) имеет большую перспективу использования в качестве материала для изготовления транзисторов с металлической и проникаемой базами, а также детекторов ультрафиолетового и рентгеновского излучения [1-4].

Плёнки CoSi_2 авторы получали методом молекулярно - лучевой эпитаксии (МЛЭ) атомов Co и Si на поверхность Si (111) и Si (100) в стандартной установке типа LAS-2200. Авторами использована модернизированная сверхвысоковакуумная технологическая система молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) с базовым давлением 10^{-8} Па, предназначенная для эпитаксиального выращивания тонких плёнок кремния, силицида кобальта, арсенида галлия и фторида кальция в едином вакуумном цикле. Возможность формирования многослойных структур разных материалов в едином вакуумном цикле создает предпосылки для создания эпитаксиальных гетероструктур с высоким кристаллическим совершенством и чрезвычайно низким содержанием инородных примесей.

Кристаллическое совершенство плёнок авторами контролировалось методами дифракции быстрых и медленных электронов (ДБЭ и ДМЭ). Состав и электронная структура плёнок CoSi_2 контролировались методами электронной оже-спектроскопии (ЭОС) и фотоэлектронной спектроскопии. Была применена следующая технология получения плёнок: при МЛЭ молекулярные потоки Co и Si одновременно осаждались на чистую поверхность Si (100) и Si (111) в сверхвысоковакуумных условиях.

Соотношение интенсивности потоков Si и Co во всех случаях составляло 2:1. Постоянство потоков Si и Co в процессе роста пленок обеспечивалось путем контроля количества осажденного вещества с помощью кварцевых датчиков. Скорость роста наносимого покрытия изменялась в интервале $V_p = 5-2 \text{ \AA}/\text{с}$, а температура роста пленок была в диапазоне $T_p \approx 800-1000 \text{ К}$.

Результаты контроля технологии получения пленок сведены в табл.1. Из табл.1 видно, что для МЛЭ технологии пленок $\text{CoSi}_2/\text{Si}(100)$ характерны следующие закономерности:

Таблица 1

Характеристики МЛЭ - пленок CoSi_2 на поверхности Si(100)

Подложка	CoSi_2	$V_p, \text{ \AA}/\text{с}$	$T_p, \text{ К}$	ДБЭ,РЭМ	ОЭС
КЭФ - 4,5	30	2	850-900	с.фас., нер. п.	о.с; н.с.
КЭФ - 4,5	60	2	850-900	с.фас., нер. п.	о.с; н.с.
КЭФ - 4,5	120	2	850-900	фас., сс., гл. п.	о.п.
КЭФ - 4,5	200	2	850-900	н.фас., н.сс., гл.п.	о.п.
КЭФ - 4,5	60	0,5 - 1	850-900	фас., н.сс.	о.п.
КЭФ - 4,5	100	0,5	850-900	н.фас., н.сс., гл.п.	о.п.
КЭФ - 4,5	20	1	900-1000	фас.	о.п.
КЭФ - 4,5	100	0,5 - 1	900-1000	н.ф., н. сс.	о.п.

где *с.фас.* - сильное фасетирование, *нер.п.* - неровная поверхность, *гл.п.* - гладкая поверхность, *сс* - сверхструктура, *н.сс.* - нет сверхструктуры, *о.с.* - островковая структура, *н.с.* - неоднородный состав, *о.п.* - однородная поверхность.

- независимо от температуры подложки T_p и скорости выращивания V_p рост пленки $\text{CoSi}_2/\text{Si}(100)$ до толщин $\theta \leq 25-30 \text{ \AA}$ происходит неравномерно и имеет место фасетирование. При сравнительно высоких температурах ($T_p=900 \div 1000 \text{ К}$) фасетирование существенно меньше;

- на поверхности пленок с толщиной $\theta \leq (100 \div 120) \text{ \AA}$, выращенных при сравнительно больших скоростях ($V_p > 1 \text{ \AA}/\text{с}$), наблюдалось образование сверхструктурных перестроек типа (2 x n);

- пленки CoSi_2 с толщинами $\theta > 30 \text{ \AA}$, выращенные с меньшими скоростями ($V_p < 1 \text{ \AA}/\text{с}$), не имели поверхностной реконструкции (нет сверхструктуры) при любых температурах роста;

- все пленки $\text{CoSi}_2(100)$ с $\theta > 50-60 \text{ \AA}$, полученные при $T_p > 900 \text{ К}$, обладали совершенной кристаллической структурой, гладкой поверхностью и однородным составом.

Таким образом, оптимальным технологическим режимом получения совершенных пленок CoSi_2 с ($\theta > 50 \text{ \AA}$) является режим относительно медленного их нанесения ($V_p < 1 \text{ \AA}/\text{с}$) на подложку при $T_p > 900 \text{ К}$.

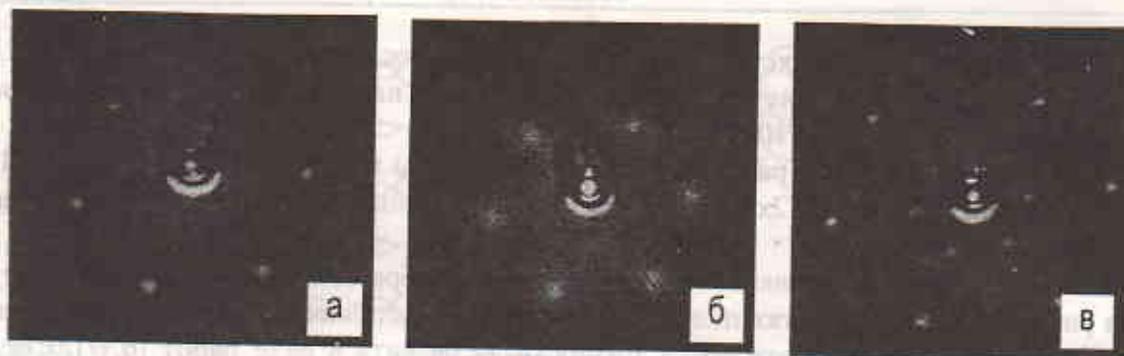


Рис.1. Картины ДМЭ: для чистой поверхности Si (111) (а), Si, покрытой пленкой атомов Co и Si толщиной $\theta = 1,0$ монослоя (б) и CoSi_2/Si (111) – 2x2, полученные после отжига при $T=900$ К пленки CoSi_2 толщиной $\theta=100$ Å (в)

Основной целью применения метода ДМЭ в настоящей работе было качественное определение состояния кристаллической структуры поверхности Si (100) и Si (111) на различных этапах МЛЭ атомов кобальта и кремния. На рис.1 приведены картины ДМЭ для чистой поверхности Si(111) (а) и после совместной молекулярно – лучевой эпитаксии атомов Co и Si толщиной покрытия $\theta=1,0$ монослоя (б), а также кремния, покрытого совместно атомами Si и Co толщиной $\theta=100$ Å, и проведения последующего термического отжига при $T=900$ К - в. Для чистой поверхности Si (111) характерна структура (1x1). Осаждение Si и Co до одного монослоя не приводит к существенному нарушению структуры (1x1) Si(111), наблюдаются лишь некоторое ослабление интенсивности рефлексов и усиление фона. Такая картина может быть связана с островково-эпитаксиальным характером роста пленки в начальной стадии. Начиная с $\theta>30$ Å наблюдается появление фасеток, что приводит к характерному смещению дифракционной картины при изменении энергии падающих электронов. При покрытиях $\theta>60-70$ Å монослоев наблюдаются картины с сильным диффузионным фоном, свидетельствующим о наличии значительных дефектов. Прогрев при $T=900$ К Si(111), покрытого пленкой Co и Si толщиной $\theta=30-50$ Å приводит к появлению сверхструктуры $\text{CoSi}_2/\text{Si}(111)-2\times 2$ (рис.1, в). Очевидно, что такой режим осаждения пленки CoSi_2 является наиболее оптимальным.



Рис.2. Картины ДМЭ: для чистой поверхности Si(100) – 1x1 (а), Si, покрытой атомами Co и Si толщиной $\theta=20$ монослоев (б) и CoSi_2/Si (100) – 2x4, полученные после отжига пленки CoSi_2 толщиной $\theta=100$ Å при $T=950$ К (в)

На поверхности очищенного исходного Si(100) имелась структура (1x1). Проведение послойного осаждения атомов Co и Si приводило к постепенному ослаблению рефлексов и увеличению интенсивности фона, начиная с толщин $\theta>60$ Å. Термический прогрев при $T=900$ К не приводил к появлению новых структур.

Образование новой сверхструктуры наблюдалось после прогрева при $T=950$ К МЛЭ покрытий CoSi_2 толщиной $\theta > 100$ Å. При этом на поверхности устанавливалась сверхструктура $\text{CoSi}_2/\text{Si}(100) - 2 \times 4$ (рис.2. а-в).

Таким образом, в работе впервые обнаружены новые структуры $\text{CoSi}_2/\text{Si}(111) - 2 \times 2$ и $\text{CoSi}_2/\text{Si}(100) - 2 \times 4$, по которым построены модели прямых и обратных двумерных решеток.

На возможность вакансионного механизма образования атомных сверхструктур на различных поверхностях полупроводниковых кристаллов Si и Ge впервые отмечено в [5, 6]. В дальнейшем эта точка зрения была развита в ряде работ [6, 7]. Согласно вакансионной модели атомная поверхностная структура полупроводникового кристалла стабилизируется посредством образования поверхностных вакансий большой концентрации с последующей реорганизацией в бензольноподобные или цепеобразные атомные поверхностные сверхструктуры.

Наблюдаемую экспериментальную сверхструктуру $\text{CoSi}_2/\text{Si}(100) - 2 \times 4$ при $E_p=50$ эВ можно интерпретировать с помощью вакансионной модели атомной структуры, показанной на рис.3. В приведенной модели (рис.3) атомы Si не смещены относительно регулярных положений атомов Si в подложке, а атомы Co смещены в направлении (011). Степень покрытия атомами Co и Si составляет $\theta=0,88$. В основу данной атомной структуры положена модель спаренных атомов.

На рис.4. приведена вакансионная модель структуры $\text{CoSi}_2/\text{Si}(111) - 2 \times 2$, соответствующая картине ДМЭ, показанной на рис.2. Образование такой сверхструктуры авторами объясняется следующим образом. В результате термического отжига пленки CoSi_2 при $T=900$ К атомы Si и Co образуют упорядоченную структуру аналогичную атомной структуре подложки Si (111) - 1x1. Однако из-за различия атомных размеров Co и Si и сил связи между атомами Si-Si, Co-Si, Co-Co в пленке образуется регулярная сетка дефектов несоответствия с соответствующим нониусом, отображаемым наблюдаемой сверхструктурой.

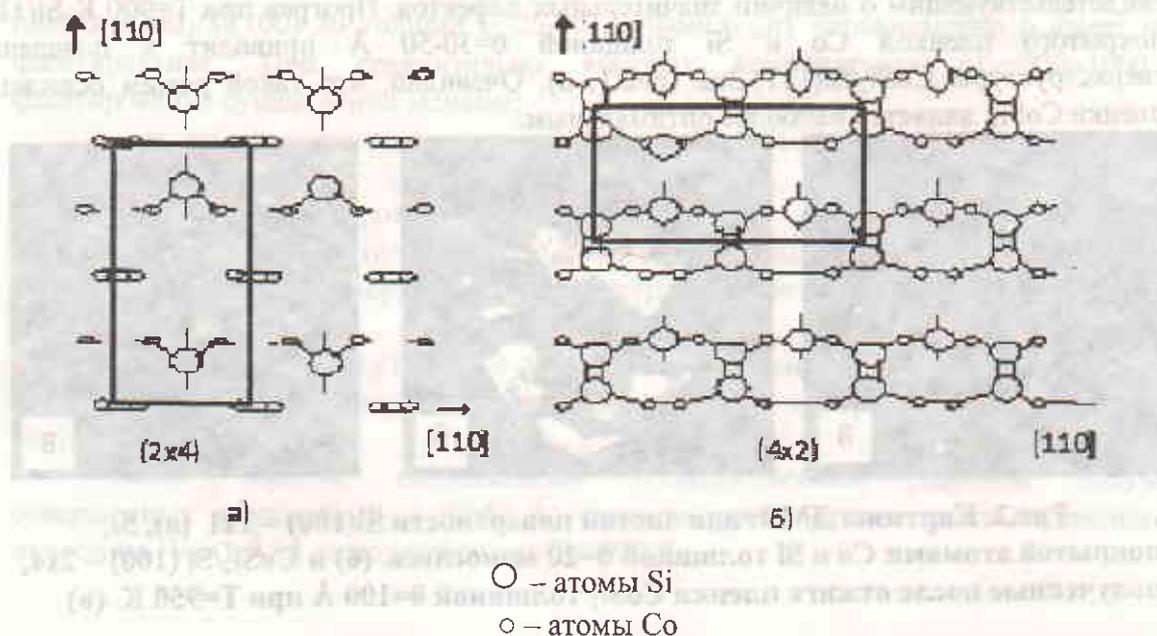


Рис. 3. Вакансионная модель поверхностной структуры $\text{CoSi}_2/\text{Si}(100) - 2 \times 4$ (а) и $\text{CoSi}_2/\text{Si}(100) - 4 \times 2$ (б)

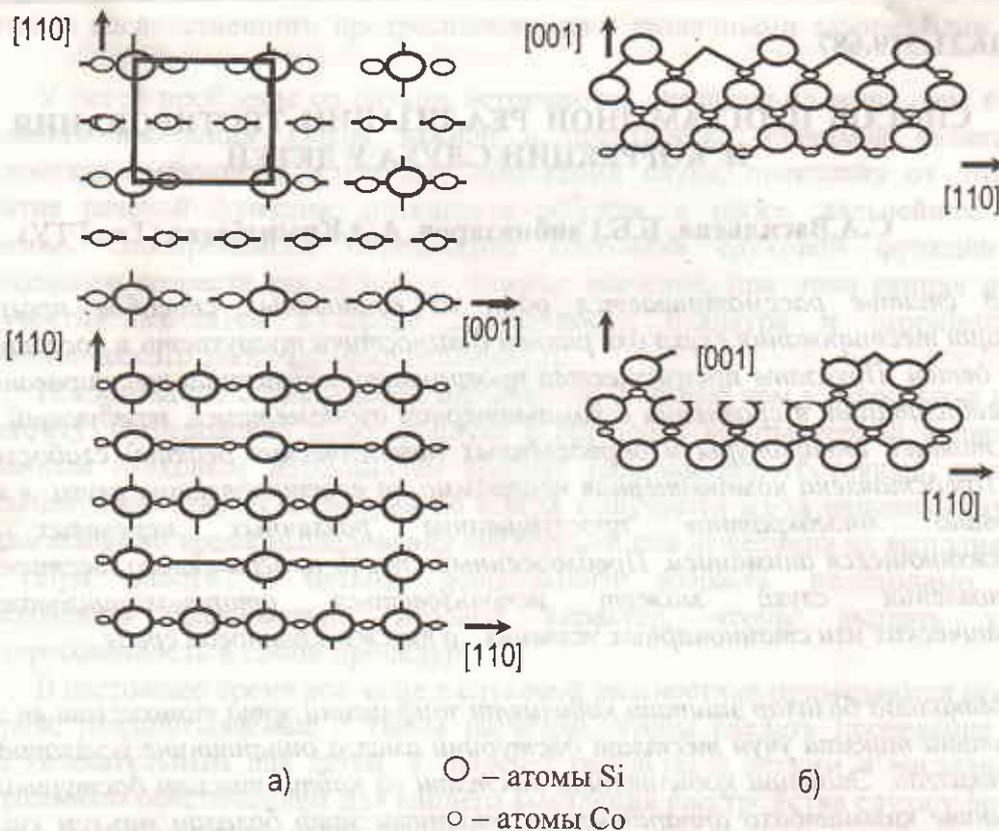


Рис.4. Вакансионная модель поверхностной структуры $\text{CoSi}_2/\text{Si}(111) - 2 \times 2$

Таким образом, в результате МЛЭ Co и Si на поверхности Si (100) образуется сверхструктура $\text{CoSi}_2/\text{Si}(100) - 2 \times 4$, а в случае МЛЭ пленки CoSi_2 толщиной 30-40 Å на поверхности Si (111) и последующем прогреве при $T=950$ К образуется сверхструктура $\text{CoSi}_2/\text{Si}(111) - 2 \times 2$.

Литература

1. Murarka S; Silicide thin films and their application in microelectronics.//Intermetallics, 1995. №3. P.173-186.
2. Герасименко Н.Н. Самоорганизованные имплантированные наноразмерные структуры в полупроводниках / В кн. Нанотехнологии в электронике. / Под ред. Ю.А. Чаплыгина -М: Техносфера, 2005. С.135-171.
3. Иваненко Л.И. Термоэлектрические свойства полупроводниковых силицидов //Доклады БГУКР, 2005. № 2. С. 90-100.
4. Рысбаев А.С., Ташатов А.К., Джураев Ш.Х., Хужаниёзов Ж.Б.//Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2011. №12. С. 98-104.
5. Saranin A.A., Zotov A.V., Tovpik A.N. et. al. Composition and atomic structure of the Si(111) In surface //Surface Sci,2000. Vol. 450. №1/2. P.34-43.
6. Abukawa T., Wei C.M., Yoshimura K., Kano S. Direct method of surface structure determination by Patterson analysis of correlated thermal diffuse scattering for Si(001)2x1 //Ibid, 2000. Vol. 62. N 23. P.1606916073.
7. Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А., Зотов А.В., Катаяма М. Введение в физику поверхности.-М: Наука, 2006.