

11; 12

© 1991

## ТОНКИЕ ПЛЕНКИ ЖЕЛЕЗА НА $Si(111)$ И СТРУКТУРА $\sqrt{3} \times \sqrt{3} - R 30^\circ$

Ю.Л. Г а в р и л ю к, Л.Ю. К а ч а н о в а,  
В.Г. Л и ф ш и ц

### В в е д е н и е

Исследуя микроскопическое поведение тонких пленок железа на кремнии, *Urano* и др. [1, 2] показали полученную с помощью ДМЭ двумерную фазовую диаграмму системы. Они сообщают, что для пленок толщиной более 0.5 монослоя (ML) ДМЭ картина  $1 \times 1$  изменяется в суперструктуру  $2 \times 2$  при отжиге выше  $400^\circ\text{C}$ . Другие типы суперструктур на фазовой диаграмме отсутствуют.

Наши эксперименты показывают, что граница раздела системы  $Fe/Si(111)$  может реконструироваться также в структуру  $\sqrt{3} \times \sqrt{3} - R 30^\circ$ .

Эксперименты проводились при базовом давлении  $\sim 2 \cdot 10^{-10}$  Тор на установке LAS-600 фирмы RIBER, оснащенной системой ДМЭ, ХПЭЭ и Оже-спектрометром с цилиндрическим анализатором. Монокристаллический кремний  $n$ -типа сопротивлением  $5\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$  перед установкой в вакуумную камеру тщательно очищался в органических растворителях. Окончательная очистка производилась *in situ* отжигом в сверхвысоком вакууме при  $1250^\circ\text{C}$  прямым пропусканием тока через образец. В результате наблюдалась четкая картина ДМЭ  $7 \times 7$  и количество примесных атомов было ниже чувствительности Оже-спектрометра. Напыление железных пленок производилось со скоростью  $\sim 1$  ML/мин из вольфрамовой корзинки при комнатной температуре (RT) подложки. Температура образца определялась с помощью измерения проводимости. Поверхностная концентрация атомов  $Fe$  определялась из соотношения интенсивностей Оже-пиков  $Fe-MVV$  (48 эВ) и  $Si-LVV$  (92 эВ) с учетом коэффициентов элементной чувствительности [3, 4].

### Р е з у л т а т ы и о б с у ж д е н и е

Существует различие в значении поверхностной концентрации  $C_{Fe}$  до и после отжига. На рис. 1 приведены эти значения для пленок, полученных при различном времени напыления  $Fe$ . Здесь же указаны области покрытий, при которых после отжига наблюдаются различные суперструктуры. Поведение пленок  $Fe$  до отжига совпадает с данными [1]. При малых покрытиях ( $C_{Fe} < 0.15$ ) наблюдается постепенно ослабевающая картина ДМЭ  $7 \times 7$  и при больших покрытиях ( $C_{Fe} > 0.15$ ) картина  $1 \times 1$ , которая сопровождается повышенным фоном. Кроме того, при  $0.15 < C_{Fe} < 0.30$  рефлексы имеют естественную ширину, а при  $C_{Fe} > 0.30$  сильно

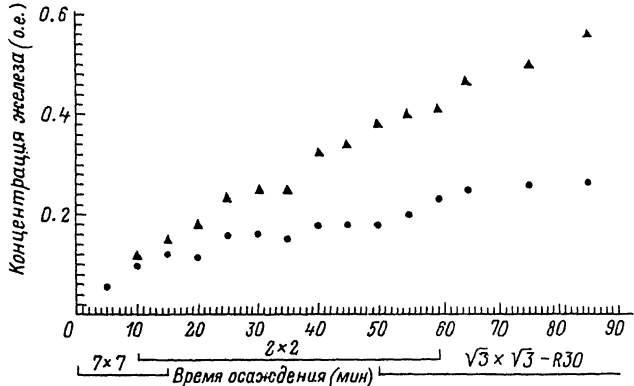
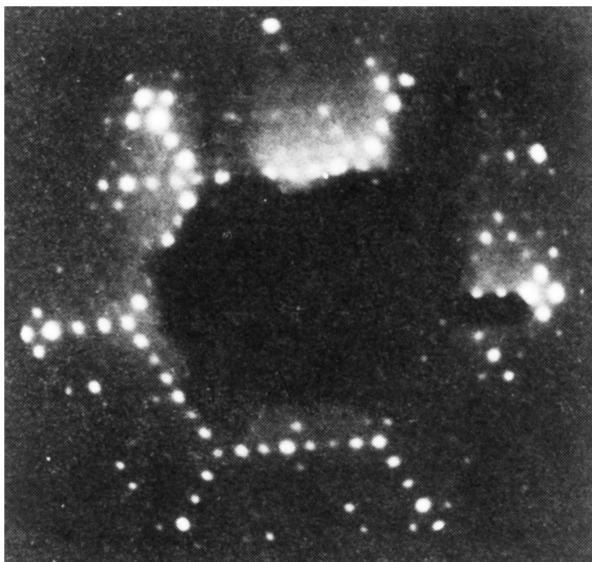


Рис. 1. Изменение поверхностной концентрации  $Fe$  на  $Si(111)$  при отжиге  $450^{\circ}C$ , 1 мин для различного времени напыления  $Fe$ .

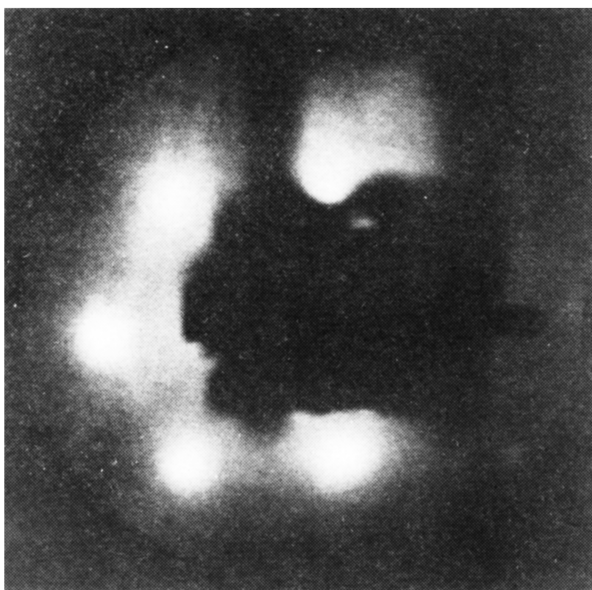
размыты. Структура  $1 \times 1$  сохраняется и для толстых пленок (например, при толщине  $\sim 600 \text{ \AA}$ ), т.е. пленка железа псевдоморфна и растет так, что атомы железа занимают те же места, что и атомы кремния. В результате получается эпитаксиальная пленка  $Fe(111)$ . Уширенные рефлексы  $1 \times 1$  показывают, что эта пленка при толщине больше одного монослоя состоит из отдельных блоков, одинаково ориентированных в азимутальной плоскости и имеющих размеры, соизмеримые с длиной когерентности электронов первичного пучка ДМЭ. Блочность возникает вследствие напряжений в пленке железа в плоскости, параллельной поверхности. Постоянная двумерной решетки триангулярной ОЦК структуры  $Fe(111)$  на 5% больше, чем у  $Si(111)$  поверхности. Если пленка  $Fe$  толще 1 монослоя растет псевдоморфно, то решетка в направлении, параллельном поверхности сжата, а в перпендикулярном растянута.

Поведение системы  $Fe-Si$  после отжига при  $T > 400^{\circ}C$  зависит от количества предварительно напыленного железа. Если  $\theta \leq 1 \text{ ML}$  ( $C_{Fe} \leq 0.33$ ), происходит перестройка структуры  $1 \times 1$  в  $2 \times 2$ . При этом определенная часть с помощью ЭОС поверхностная концентрация уменьшается до значения  $C_{Fe} \approx 0.19$ , что вызвано перемещением атомов железа во второй слой. Это подтверждается результатами ФЭС с угловым разрешением, которые показывают смену мест для адсорбированных атомов  $Fe$  [2].

Если до отжига  $\theta > 2 \text{ ML}$ , после отжига при  $400^{\circ}C < T < 530^{\circ}C$  ДМЭ картина отсутствует. Если же температура выше  $530^{\circ}C$ , наблюдается ДМЭ картина  $1 \times 1$ . ХПЭЭ спектры, полученные для данной системы, подобны спектрам соединения  $FeSi_2$  независимо, есть ли ДМЭ картина или отсутствует. Очевидно отжиг при  $T > 530^{\circ}C$  приводит к упорядочению структуры дисилицида. Поверхностная концентрация после отжига во всех случаях составля-

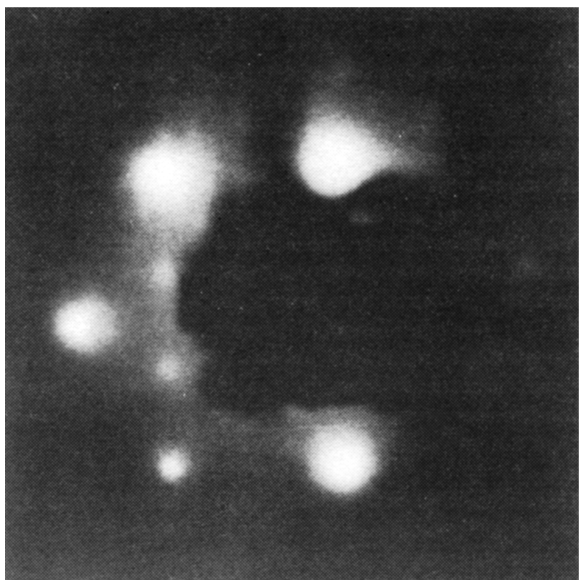
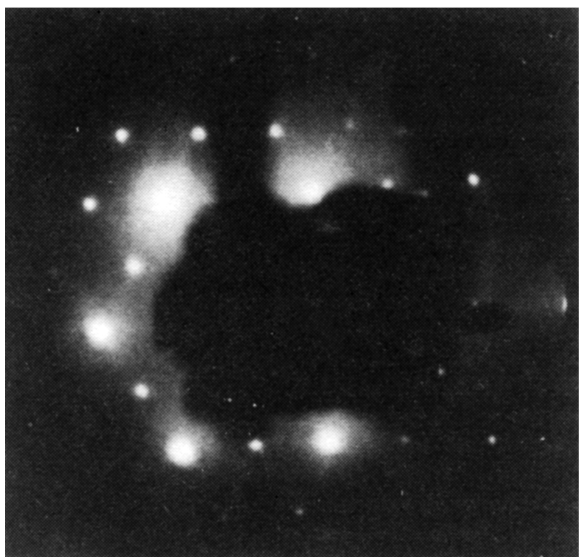


a



б

Рис. 2. ДМЭ картины: а -  $Si(111) 7 \times 7$ , б -  $Si(111) 1 \times 1$ , в -  $Si(111) 2 \times 2-Fe$ , г -  $\sqrt{3} \times \sqrt{3} - 30^\circ$ .  $E_p = 55$  эВ.





ет  $\sim 0,33$ , в том числе и для больших предварительных покрытий (20-30 ML).

Если толщина пленки при  $RT$  больше 1 ML, но меньше 2 ML, после отжига возникает структура  $\sqrt{3} \times \sqrt{3} - 30^\circ$  (рис. 2). Оже-анализ показывает, что  $C_{Fe} \approx 0,25$ . Рефлексы ДМЭ картины размыты. Спектры ХПЭЭ полученной структуры аналогичны спектрам объемного силицида  $FeSi$  и отличаются от спектров дисилицида и описанной выше структуры  $Si(111) 2 \times 2 - Fe$ . По-видимому, отжиг приводит к упорядоченному перемешиванию атомов железа и кремния в приповерхностном слое. Регистрируемая с помощью ЭОС поверхностная концентрация уменьшается. Несоизмеримая с решеткой кремния структура приводит к латеральным напряжениям в пленке и, как следствие, возникновению доменов. Поскольку размеры доменов малы, рефлексы ДМЭ картины размыты.

#### В ы в о д ы

Анализ тонких пленок железа на  $Si(111)$  поверхности с помощью Оже, ДМЭ и ХПЭЭ-спектроскопии показывает, что при отжиге выше  $400^\circ C$  образуются три различные структуры. Если  $\theta < 1 ML$ , формируется поверхностная фаза  $Si(111) 2 \times 2 - Fe$ . Если  $1 ML < \theta < 2 ML$  образуется двумерный силицид  $FeSi$  со структурой  $\sqrt{3} \times \sqrt{3} - 30^\circ$ . Для пленок более толстых, чем 2 ML, растет объемный дисилицид  $FeSi_2$  со структурой  $1 \times 1$ .

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] U r a n o T. and K a n a j i T. // Appl. Surf. Sci. 1988. V. 33/34. P. 68.
- [2] U r a n o T., O g a v a T., K a n a j i T. and F u j i m o t o F. // J. Vac. Sci. Technol. 1987. V. A5. P. 2046.
- [3] P a l m b e r g P.W. // J. Vac. Sci. Technol. 1976. V. 13. P. 214.
- [4] L i f s h i t s V.G., A k i l o v V.B., C h u r u s o v B.K., G a v r i l j u k Yu.L. // Surf. Sci. 1989. V. 222. P. 21.

Поступило в Редакцию  
13 июня 1991 г.