

06; 11; 12

© 1992

УПОРЯДОЧЕННЫЕ ПОВЕРХНОСТНЫЕ ФАЗЫ В СИСТЕМЕ $Si(111)-Sb$

А.В. З о т о в, В.Г. Л и ф ш и ц, А.Н. Д е м и д ч и к

Взаимодействие атомов сурьмы с кристаллическими поверхностями кремния представляет значительный интерес для сверхвысоковакуумной технологии полупроводников, т. к. сурьма является основной донорной примесью в молекулярно-лучевой эпитаксии кремния. Ранее было установлено, что в то время, как на поверхности $Si(100)$ сурьма не образует упорядоченных структур [1, 2], на поверхности $Si(111)$ существует несколько упорядоченных поверхностных фаз, образуемых сурьмой: (2×2) , $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})$, $(5\sqrt{3} \times \sqrt{3})$ и $(7\sqrt{3} \times 7\sqrt{3})$ [1, 3-5]. Были определены двумерные фазовые диаграммы для системы $Sb/Si(111)$ как для случая напыления Sb на чистую поверхность $Si(111) 7 \times 7$ [4, 5], так и для случая десорбции Sb с поверхностной фазы $Si(111) \sqrt{3} \times \sqrt{3}-Sb$ [3, 5]. В то же время данные о структуре поверхностных фаз Sb на поверхности $Si(110)$ весьма ограничены. Для системы $Sb/Si(110)$ известно лишь то, что один моноатомный слой сурьмы, напыленный на подложку $Si(110)$ при 320-370 °С, образует структуру (2×3) [6]. В настоящей работе методами дифракции медленных электронов (ДМЭ) и электронной Оже-спектроскопии (ЭОС) изучено формирование поверхностных фаз в системе $Si(110)-Sb$. Получены новые поверхностные структуры и обнаружена корреляция кинетики десорбции Sb с образованием поверхностных фаз.

Эксперименты проводились в сверхвысоковакуумной камере, оснащенной Оже-спектрометром и дифрактометром электронов низких энергий. В качестве образцов использовались пластины Si марки КДА-0.06 с ориентацией (110). Поверхность образцов очищали прогревом в вакууме при 1200 °С в течение 3 мин. После очистки Оже-анализ показывал на отсутствие загрязнений на поверхности. Картина ДМЭ от очищенной поверхности соответствовала структуре (2×16) [7, 8] со слабыми следами структуры (5×1) [9].

Сурьму напыляли из ячейки Кнудсена со скоростью около $3 \times 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ на очищенную поверхность при температуре 650 °С. В результате напыления на поверхности устанавливалась равновесная концентрация Sb . Согласно данным ЭОС, величина равновесной концентрации соответствует покрытию в 1 моноатомный (МС). 1 МС определяется, как концентрация атомов в верхнем слое нереконструированной грани $Si(110)$, т. е. $9.6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. От такой поверхности наблюдается четкая картина ДМЭ (2×3) .

Затем напыление Sb прерывали, и проводили отжиг образца $Si(110)-Sb$ при температурах 650-850 °С. При этом уменьше-

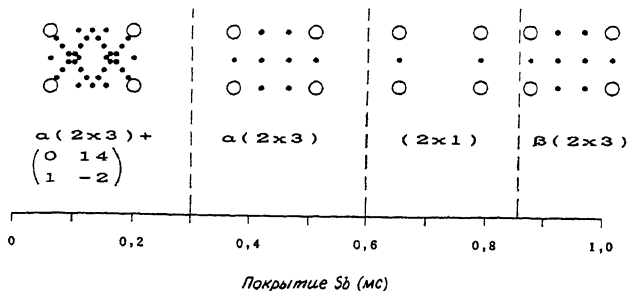


Рис. 1. Двумерная фазовая диаграмма системы Sb/Si (110). Схематически показаны картины ДМЭ (обратные решетки) наблюдающихся фаз. Незакрашенными кружками изображены основные рефлексы, точками – суперрефлексы картин ДМЭ.

ние концентрации сурьмы на поверхности в результате десорбции приводило к структурным перестройкам поверхности образца. При покрытии Sb около 0,85 мс структура (2x3) переходит в структуру (2x1). Высокий уровень фона и низкая интенсивность рефлексов ДМЭ свидетельствуют о том, что поверхность слабо упорядочена. При дальнейшей десорбции появляется новая структура (2x3). Эта структура существует при покрытиях Sb менее 0,6 мс, а наиболее яркая картина ДМЭ от новой фазы (2x3) наблюдается при покрытии Sb 0,5 мс. Хотя последняя структура (2x3) имеет такую же периодичность, как и структура (2x3), наблюдающаяся при покрытиях Sb около 1 мс, распределение интенсивности рефлексов ДМЭ для этих двух структур сильно отличается. Чтобы различать структуры, мы будем называть структуру (2x3) с покрытием 0,5 мс $\alpha(2x3)$, а структуру (2x3) с покрытием 1 мс $\beta(2x3)$. При покрытиях менее 0,3 мс наблюдалась суперпозиция двух фаз: $\alpha(2x3)$ и новой фазы, структуру которой можно описать в матричной форме как $\begin{pmatrix} 0 & 14 \\ 1 & -2 \end{pmatrix}$, причем последняя фаза существует в виде доменов двух типов. Использование матричной формы записи связано с тем, что элементарная ячейка этой структуры непрямоугольная.

Таким образом, при десорбции Sb с поверхности $Si(110)$ – Sb при температурах 650–850 °С наблюдались следующие фазы: $\beta(2x3)$ при покрытии Sb от 1 до 0,85 мс, (2x1) при 0,85–0,6 мс Sb , $\alpha(2x3)$ при 0,6–0,3 мс Sb , и $\alpha(2x3) + \begin{pmatrix} 0 & 14 \\ 1 & -2 \end{pmatrix}$ при покрытии Sb меньше 0,3 мс. Изложенные результаты представлены в виде фазовой диаграммы для системы $Si(110)$ – Sb на рис. 1.

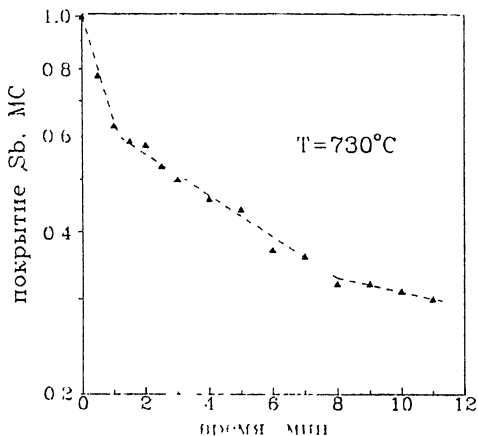


Рис. 2. Кинетика десорбции Sb при $T=730^{\circ}C$.

Изотермы десорбции Sb обнаруживают систематические особенности, аналогичные показанным на рис. 2. На графике зависимости покрытия Sb от времени десорбции отчетливо видны три участка, коррелирующие с образованием различных структур. Первый участок описывает десорбцию фазы (2×1) до покрытия Sb 0.6 МС. Излом при 0.6 МС Sb соответствует переходу фазы (2×1) в фазу $\alpha(2 \times 3)$, и второй участок отражает десорбцию фазы $\alpha(2 \times 3)$. Наконец, третий участок представляет десорбцию суперпозиции фаз $\alpha(2 \times 3)$ и $\begin{pmatrix} 0 & 14 \\ 1 & -2 \end{pmatrix}$ при покрытиях Sb меньше 0.3 МС. Каждый участок можно описать десорбционной кинетикой первого порядка: $v^i = v_0^i \exp(-t/t_0^i)$. Энергии активации десорбции, определенные из температурных зависимостей времени жизни t_0^i , оказались равными 3.3 эВ для фазы (2×1) и 3.6 эВ для фазы $\alpha(2 \times 3)$. Эти результаты отражают общую тенденцию: поверхностные фазы с низким покрытием имеют большую энергию активации десорбции, нежели фазы с высоким покрытием [10-12].

В данной работе количественно исследовали десорбцию только фаз (2×1) и $\alpha(2 \times 3)$. Десорбционные параметры фаз $\beta(2 \times 3)$ и $\alpha(2 \times 3) + \begin{pmatrix} 0 & 14 \\ 1 & -2 \end{pmatrix}$ не были определены по следующим причинам: хотя десорбция фазы $\beta(2 \times 3)$ может быть прослежена при более низких температурах ($650^{\circ}C$), диапазон покрытий Sb (0.85-1.0 МС при котором наблюдается фаза $\beta(2 \times 3)$), слишком узок для точного определения t_0^i . Количественное рассмотрение десорбции суперпозиции фаз $\alpha(2 \times 3)$ и $\begin{pmatrix} 0 & 14 \\ 1 & -2 \end{pmatrix}$ было затруднено вследствие того, что амплитуда Оже-сигнала Sb при низких покрытиях становится сравнимой с уровнем шумов и не может быть определена с достаточной точностью.

- [1] З о т о в А.В., С а р а н и н А.А., Л и ф ш и ц В.Г., Х р а м -
ц о в а Е.А. // П и с ь м а в Ж Т Ф. 1989. Т. 15. В. 24. С. 1-5.
- [2] Z o t o v A.V., S a r a n i n A.A., L i f s h i t s V.G
K h r a m t s o v a E.A. // Surf. Sci. 1990. V.230.
L147-L150.
- [3] P a r k C.Y., A b u k a w a T., K i n o s h i -
t a T., E n t a Y., K o n o S. // Japan. J. Appl.
Phys. 1988. V. 27. P. 147-148.
- [4] К а н т е р Б.З., Н и к и ф о р о в А.И., С т е н и н С.И. //
П и с ь м а в Ж Т Ф. 1988. Т. 14. В. 21. С. 1963-1968.
- [5] A n d r i e u S. // J. Appl. Phys. 1991. V. 69.
P. 1366-1370.
- [6] R i c h D.H., F r a n k l i n G.E., L e i b s -
l e F.M., M i l l e r T., C h i a n g T.-C. //
Phys. Rev. B. 1989. V. 40. P. 11804-11816.
- [7] I c h i n o k a w a T., A m p o H., M i u r a S.,
T a m u r a A. // Phys. Rev. B. 1985. V. 31.
P. 5183-5186.
- [8] Y a m a m o t o Y., I n o S., I c h i k a w a T. //
Japan. J. Appl. Phys. 1986. V. 25. P. L331-L334.
- [9] O l s h a n e t s k y B.Z., S h l y a e v A.A. //
Surf. Sci. 1977. V. 67. P. 581-588.
- [10] L e L a y G., M a n n e v i l l e M., K e r n R. //
Surf. Sci. 1978. V. 72. P. 405-422.
- [11] B o u r g u i g n o n B., S m i l g y s R.V.,
L e o n e S.R. // Surf. Sci. 1988. V. 204. P. 473-484.
- [12] 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 Y u.L. // Surf. Sci.
1989. V. 222. P. 21-30.

Институт автоматики
и процессов управления
с вычислительным центром
РАН, Владивосток

Поступило в Редакцию
20 января 1992 г.