

АНОМАЛЬНОЕ ПОВЕДЕНИЕ МОНОАТОМНЫХ СТУПЕНЕЙ ПРИ СТРУКТУРНОМ ПЕРЕХОДЕ $(1 \times 1) \rightleftharpoons (7 \times 7)$ НА АТОМНОЧИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ (111)

А.В.Латышев, А.Л.Асеев, С.И.Стенин

Анализ поведения моноатомных ступеней на поверхности кремния (111) с помощью сверхвысоковакуумной отражательной электронной микроскопии (СВВ ОЭМ) показывает перераспределение значительного количества атомов при структурном переходе $(1 \times 1) \rightleftharpoons (7 \times 7)$.

Последние достижения в области сканирующей туннельной микроскопии ^{1, 2} позволили установить координаты атомов в элементарной ячейке сверхструктуры (7×7) на атомно-чистой поверхности кремния (111) . Однако механизм обратимой перестройки структуры (1×1) в сверхструктуру (7×7) не определен, что связано с трудностями получения информации об особенностях кинетики данного фазового структурного перехода.

В настоящей работе с помощью ранее развитой методики СВВ ОЭМ ³ проведено *in situ* изучение процесса сверхструктурной перестройки на атомно-чистой поверхности кремния (111) . В зависимости от условий приготовления ⁴ поверхность содержала следующие элементы микрорельефа: систему эквидистантно расположенных моноатомных ступеней; систему эшелонов моноатомных ступеней, которая состоит из скоплений ступеней, разделенных почти сингулярными террасами; двумерные отрицательные островки, которые возникают при сублимации на террасах с шириной, превышающей удвоенную диффузионную длину адатомов при данной температуре сублимации; двумерные островки роста, которые образуются на начальных стадиях роста эпитаксиальной пленки кремния из молекулярного пучка непосредственно в устройстве СВВ ОЭМ.

В данной работе обнаружено смещение моноатомных ступеней в сторону более высокой террасы при переходе $(7 \times 7) \rightarrow (1 \times 1)$ и в направлении более низкой террасы при обратном переходе (рис. 1) на величину, равную 0,2 – 0,3 от ширины данной террасы. Направление смещения моноатомных ступеней, ограничивающих двумерные отрицательные островки или островки роста (рис. 2 б и в), соответствует направлению перемещения эквидистантно расположенных ступеней (рис. 2 а).

Для двумерных островков малых размеров величина смещения могла быть достаточна для их полного исчезновения. Для ступеней в эшелонах величина смещения ступеней при структурном переходе определяется шириной прилегающих к ступеням нижних террас, что приводит к изменению расстояния между ступенями в эшелонах в соответствии с рис. 2 г.

Интенсивность зеркально отраженного электронного пучка, измеренная с помощью детектора электронов, встроенного в электронный микроскоп, возрастает при фазовом переходе $(1 \times 1) \rightarrow (7 \times 7)$ и уменьшается в процессе обратного перехода приблизительно на порядок величины.

Поскольку величина смещения моноатомной ступени при фазовых переходах $(1 \times 1) \rightarrow (7 \times 7) \rightarrow (1 \times 1)$ остается постоянной, то одинаковое количество атомов мигрирует по поверхности при прямом и обратном переходах. Отсюда следует также, что процессами десорбции атомов с поверхности в данном случае можно пренебречь. Из величины смещения моноатомных ступеней можно оценить количество атомов, которые поглощаются ступенями при переходе $(1 \times 1) \rightarrow (7 \times 7)$ или генерируются ступенями при обратном переходе. Количество указанных атомов составляет $4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, что на 3 – 4 порядка превышает термически равновесную концентрацию адатомов на поверхности при температуре перехода, которая, согласно ⁵, составляет $10^{10} \div 10^{11} \text{ см}^{-2}$. При этом время, необходимое для генерации указанного количества адатомов моноатомной ступенью при сублимации более чем в

10^4 раз превышает экспериментально наблюдаемое время перемещения ступеней при переходе $(7 \times 7) \rightarrow (1 \times 1)$.

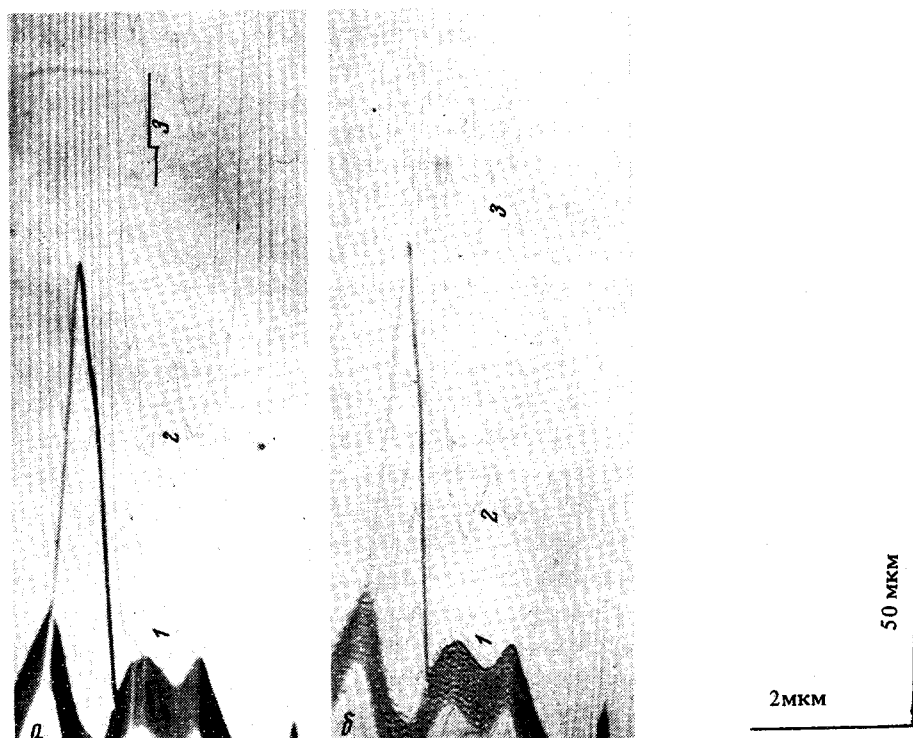


Рис. 1. ОЭМ изображение поверхности кремния (111) со структурой (1×1) (а) и после фазового перехода $(1 \times 1) \rightarrow (7 \times 7)$ (б). Темная полоса – эшелон близкорасположенных моноатомных ступеней. Цифрами обозначены отдельные моноатомные ступени

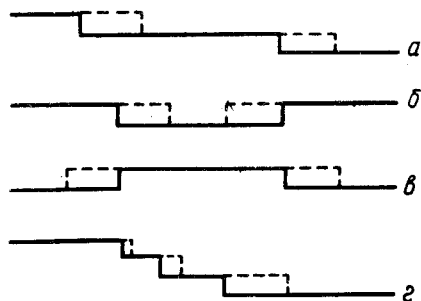


Рис. 2. Схема обратимого смещения моноатомных ступеней на поверхности кристалла кремния при переходе $(1 \times 1) \rightleftharpoons (7 \times 7)$ в системе эквидистантно расположенных ступеней (а); при изменении размера двумерных островков сублимации (б) и роста (в); в эшелоне ступеней (г). Сплошная линия указывает положение ступеней для структуры (1×1) , пунктирная – для структуры (7×7)

По данным 1, 2 элементарная ячейка сверхструктуры (7×7) содержит 12 атомов в первом слое и одну вакансию во втором. Если принять, что структура (7×7) формируется из атомно-гладкой поверхности (1×1) , то в рамках модели ^{1, 2} из первого полностью заполненного слоя необходимо удалить и встроить в ступени 80 – 90% атомов. В это число включены атомы, образующие вакансии во втором слое. Исключение составят 12 атомов первого слоя, которые должны лишь изменить свои позиции. Экспериментально при переходе $(1 \times 1) \rightarrow (7 \times 7)$ наблюдается сток на ступени лишь 0,2 – 0,3 монослоя. Отсюда можно предположить, что поверхность (1×1) является атомно-шероховатой с заполнением 0,5. Поскольку снижение интенсивности зеркального рефлекса обычно объясняют возрастанием атомной шероховатости ⁶, полученные нами экспериментальные данные о поведении зеркально-отраженного пучка при фазовом переходе также свидетельствуют в пользу предположения о частичном заполнении поверхностного слоя структуры (1×1) .

Литература

1. *Binning G., Rorer H., Gerber C., Welbel E.* Phys. Rev. Lett., 1983, 50, 120.
2. *Golovchenko J.A.* Science, 1986, 232, 48.
3. *Асеев А.Л., Латышев А.В., Стенин С.И.* Проблемы электронного материаловедения. Новосибирск. : Наука, 1986, 109.
4. *Latyshev A. V., Aseev A. L., Krasilnikov A. B., Stenin S. I.* Electron Microscopy 1986, Kyoto, 1986, 1, 989.
5. *Чернов А.А.* Современная кристаллография, т. 3, М.: Наука, 1980, 7.
6. *Neave J.H., Joyce B.A., Dobson P.J., Norton N.* Appl. Phys. Lett., 1983, A31, 1.

Институт физики полупроводников
Сибирское отделение
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
17 декабря 1988 г.
После переработки
14 марта 1988 г.