

ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД НА СТУПЕНЧАТЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ КРЕМНИЯ

В.И.Машанов, Б.З.Ольшанецкий

Обнаружены фазовые переходы на чистых поверхностях кремния, отклоненных от плоскости (111) к $[2\bar{1}\bar{1}]$. При температурах ниже 850°C на таких поверхностях формируются системы упорядоченных ступеней высотой в три межплоскостных расстояния d_{111} , которые обратимо перестраиваются в ступени высотой в одно межплоскостное расстояние выше 850°C .

Как было показано ранее¹⁻³, на чистых поверхностях германия и кремния с определенными при изменениях температуры происходят обратимые фазовые переходы порядок – порядок и порядок – беспорядок, в том числе и на чистых вицинальных поверхностях кремния, отклоненных от плоскости (111) к $[\bar{2}11]$.

Целью данной статьи является сообщение об обратимом фазовом переходе, обнаруженном с помощью метода дифракции медленных электронов (ДМЭ) на поверхностях кремния, отклоненных от плоскости (111) к $[2\bar{1}\bar{1}]$.

Известно⁷, что на чистых вицинальных (111) поверхностях кремния формируются системы упорядоченных атомных ступеней, т.е. ступени с одинаковой высотой и шириной террасы. На картинах ДМЭ от ступенчатых поверхностей дифракционные рефлексы расщепляются в мультиплеты. По угловому расщеплению рефлексов можно определить ширину террасы, а измеряя энергии электронов, при которых определенный рефлекс наблюдается в виде синглета можно с высокой точностью определить высоту ступеней^{5,6}. В силу того, что плоскость (111) имеет ось симметрии нечетного (третьего) порядка, в зависимости от направления поворота поверхностной плоскости вокруг направления $[01\bar{1}]$ возможно образование двух типов ступеней. В идеальной решетке (см.рис.1) атомы на краях ступеней с фронтом по $[\bar{2}11]$ имеют три ближайших соседа и одну оборванную связь, а атомы с фронтом по $[2\bar{1}\bar{1}]$ – два ближайших соседа и две оборванные связи.

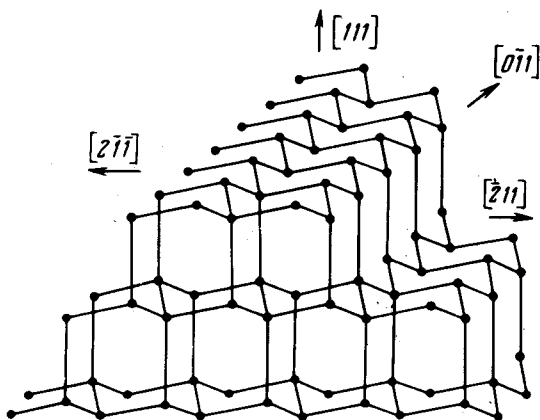


Рис.1. Модель атомных ступеней на поверхности (111) кремния в идеальной решетке

Ранее сообщалось¹⁻⁴, что на поверхностях, отклоненных от плоскости (111) к $[\bar{2}11]$, имеют место обратимые перестройки ступеней высотой в одно межплоскостное расстояние в ступени высотой в два межплоскостных расстояния. В данной работе были исследованы поверхности, отклоненные от плоскости (111) к $[2\bar{1}\bar{1}]$. Ступени с фронтом по $[2\bar{1}\bar{1}]$ наблюдались на поверхностях кремния, приготовленных сколом в сверхвысоком вакууме⁷. Эти ступени имели высоту в одно межплоскостное расстояние, а после отжига при температуре свыше 600°C происходила их коалесценция. В настоящей работе исследовались образцы, ст-

клоненные на углы от 3 до $11,5^\circ$. Образцы ориентировались с помощью рентгеновского метода. С целью удаления нарушенного слоя на поверхности после шлифовки и полировки образцы окислялись на глубину около 1 мкм. Перед установкой в вакуумную камеру окисел с поверхности образцов удалялся растворением в парах плавиковой кислоты. На приготовленных таким образом поверхностях еще до их очистки наблюдаются ступени высотой в одно межплоскостное расстояние⁸. Очистка поверхности образцов осуществлялась прогревом в вакууме $1 \div 2 \cdot 10^{-10}$ мм.рт.ст. После прогрева при температуре 700°C от всех исследованных поверхностей, хотя еще не была достигнута их полная очистка, наблюдались картины ДМЭ, соответствующие структуре Si (111) — 7×7 . Это свидетельствует о коалесценции ступеней и формировании участков поверхности с ориентацией (111) с размерами больше длины когерентности электронов, которая имеет порядок 100 Å. И только после прогрева при температуре около 1250°C вновь получались дифракционные картины от ступенчатой поверхности.

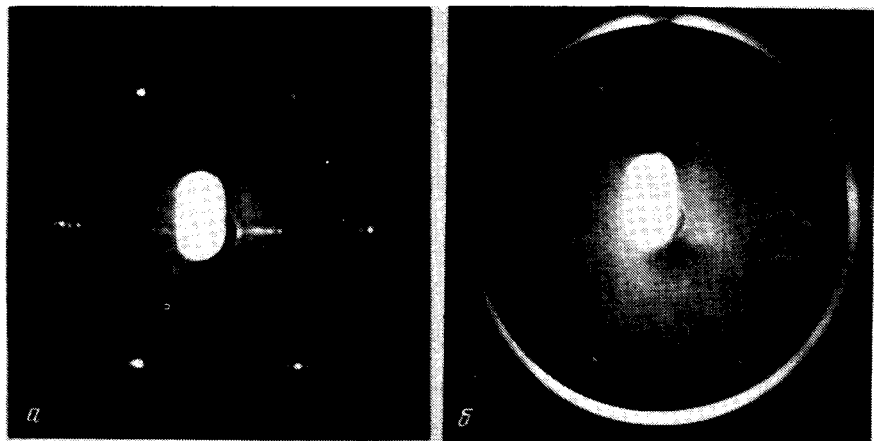


Рис.2. Картины ДМЭ от поверхности Si (755). Угол с плоскостью (111) $9,45^\circ$. Энергия электронов 47 эВ. а — 740°C ; б — 870°C

Оже-спектры не показывают при этом наличия примесей. После получения чистой поверхности описанным выше способом исследовалось поведение картин ДМЭ при разных температурах образца. Картины ДМЭ, наблюдавшиеся при температурах образцов ниже 850°C (см. рис.2а) соответствуют поверхности, содержащей упорядоченные ступени с террасами (111) и высотой в три межплоскостных расстояния d_{111} , на что указывает чередование синглетов при изменениях энергии электронов, а также угловое расщепление рефлексов при данном угле отклонения поверхности (111). При небольших углах наклона поверхности размеры террасы становятся соизмеримыми с когерентной длиной электронов и на картинах ДМЭ от таких поверхностей видны рефлексы порядков кратных $1/7$ от структуры Si (111) — 7×7 на террасах. В то же время из-за уменьшения углового расщепления рефлексов затрудняется определение параметров ступеней⁴. При температуре около 850°C происходит обратимая перестройка поверхности. Получающиеся в результате картины ДМЭ (рис.2б) соответствуют дифракции от эквидистантных ступеней с террасами (111), но с высотой в одно межплоскостное расстояние и в три раза более узкой террасой. При понижении температуры образца между рефлексами на картине, показанной на рис.2б, вновь появляются два исчезнувших при нагревании рефлекса, т.е. восстанавливается прежняя система ступеней. Рефлексы, присутствующие на электрограмме 2б, сохраняются при всех температурах образца.

Время перестройки одной системы ступеней в другую оказалось сравнимым с временем установления температуры образца при изменении тока накала. Поэтому не представлялось возможным провести изучение кинетики процесса, измеряя зависимость интенсивностей ре-

флексов от времени при различных температурах, как это делалось в ^{9, 10}. При фазовых переходах отсутствует заметный гистерезис. Здесь уместно отметить, что гистерезис не наблюдается также и при переходах $\text{Si } (111) - 7 \times 7 \rightleftharpoons \text{Si } (111) - 1 \times 1$ ¹¹, которые являются переходами первого рода ¹².

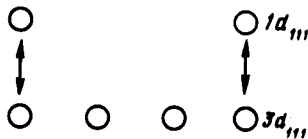


Рис.3. Схема изменения мультиплета при фазовом переходе

Авторы выражают благодарность А.И.Никифорову, который принимал участие в экспериментах на первом этапе работы.

Литература

1. *Ольшанецкий Б.З., Репинский С.М., Шкляев А.А.* Письма в ЖЭТФ, 1977, 25, 195.
2. *Ольшанецкий Б.З.* В сб.: Проблемы физики полупроводников. Материалы IX Зимней школы по физике полупроводников, ФТИ им. А.Ф.Иоффе АН СССР, Л., 1979, 140.
3. *Olshanetsky B.Z.* Stud. Surf. Sci. Catal., 1982, 9, 214
4. *Olshanetsky B.Z., Shklyev A.A.* Surface Sci., 1979, 82, 445.
5. *Henzler M.* Surface Sci., 1970, 19, 159.
6. *Ольшанецкий Б.З., Никифоров А.И., Машанов В.И.,* ФТТ, 1981, 23, 3136.
7. *Henzler M.* Surface Sci., 1913, 36, 109.
8. *Ольшанецкий Б.З., Ржанов А.В.* Письма в ЖЭТФ, 1981, 32, 337.
9. *Ольшанецкий Б.З., Репинский С.М., Шкляев А.А.* Письма в ЖЭТФ, 1978, 27, 403.
10. *Ольшанецкий Б.З., Шкляев А.А.* ЖЭТФ, 1981, 81, 361.
11. *Bennett P.A., Webb M.W.* Surface Sci., 1981, 81, 361.
12. *Osakabe N., Tanishiro Y., Yagi K., Honjo G.* Surface Sci., 1981, 109, 353.