

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА СООТНОШЕНИЕ ПЛОЩАДЕЙ ДОМЕНОВ (2×1) И (1×2) НА ЧИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ (001) В ПРОЦЕССЕ СУБЛИМАЦИИ

А.В.Латышев, А.Б.Красильников, А.Л.Асеев,
С.И.Стенин

Обнаружено, что доля поверхности, занимаемая доменами со структурой (2×1) или (1×2) на атомно-чистой поверхности кремния (001), зависит от направления и величины электрического тока, осуществляющего нагрев кристалла.

Известно, что атомно-чистая поверхность кремния (001) содержит сверхструктурные домены (2×1) и (1×2). Реконструкция на Si(001) обусловлена димеризацией атомов, имеющих по две разорванных связи, вдоль направления $\langle 110 \rangle$ с образованием сверхструктуры (1×2). В следующей атомной плоскости (001), отстоящей от предыдущей на расстояние $a/4$, направление димеризации изменяется на 90° и на ней формируется сверхструктура (2×1). Если поверхность содержит ступени моноатомной высоты ($a/4$), то соседние террасы имеют разные сверхструктуры, при высоте ступеней $a/2$ на всех террасах формируется одинаковая сверхструктура (1×2) или (2×1)¹⁻⁷.

В настоящей работе исследованы структурные перестройки на поверхности кремния (001) $\pm 2'$ методом *in situ* отражательной электронной микроскопии в сверхвысоком вакууме (ОЭМ СВВ)⁸. Нагрев изучаемых кристаллов осуществлялся пропусканием через них электрического тока (переменного или постоянного).

Поверхность кремния после очистки (1250°C , 10 мин) содержала регулярную систему моноатомных ($a/4$) ступеней. При $T > 800^\circ\text{C}$ происходит сублимация исследуемого кристалла, при которой ступени служат источниками адатомов, десорбирующихся с поверхности. Результатом этого является перемещение ступеней в направлении, определяемом исходной разориентацией образца.

Если нагрев кристалла осуществляется переменным током, на чистой поверхности формируется система эквидистантно расположенных моноатомных ступеней, которые двигаются в процессе сублимации без изменения расстояния между ними. Террасы между ступенями имеют попеременно светлый и темный контраст (рис. 1а), что обусловлено чередованием сверхструктур (1×2) и (2×1) при высоте ступеней $a/4$ (см. схему на рис. 2а).

Сублимация кристалла в условиях нагрева образца постоянным током при $T > 900^\circ\text{C}$ приводит к попарному сближению моноатомных ступеней. Минимальное расстояние ступеней в паре достигает 0,1 мкм при среднем расстоянии 0,5 – 2 мкм в эквидистантной системе. Если направление постоянного тока и направление движения ступеней при сублимации противоположны, то почти вся поверхность имеет сверхструктуру (1×2) – димеры перпендикулярны моноатомным ступеням, а участки между ступенями в паре характеризуются сверхструктурой (2×1) – димеры параллельны ступеням (рис. 2б). Если направления тока и движения ступеней совпадают, то поверхность имеет, в основном, сверхструктуру (2×1) (рис. 1б, 2в).

Переход от одного типа поверхности к другому при смене полярности постоянного тока является обратимым. Он происходит путем уменьшения скорости движения ступени, которая является нижней в данной паре, и увеличения скорости движения верхней ступени в процессе сублимации. Для любого направления постоянного тока при температурах $\text{менее } 900^\circ\text{C}$ устойчива система эквидистантно расположенных моноатомных ступеней с чередующимися сверхструктурами (1×2) и (2×1) на террасах (типа представленной на рис. 1а).

Можно предположить, что соотношение долей поверхности, занятой сверхструктурами (1×2) и (2×1) в условиях нагрева электрическим током, определяется, во-первых, анизотропией поверхностной диффузии, направление которой связано с ориентацией димеров

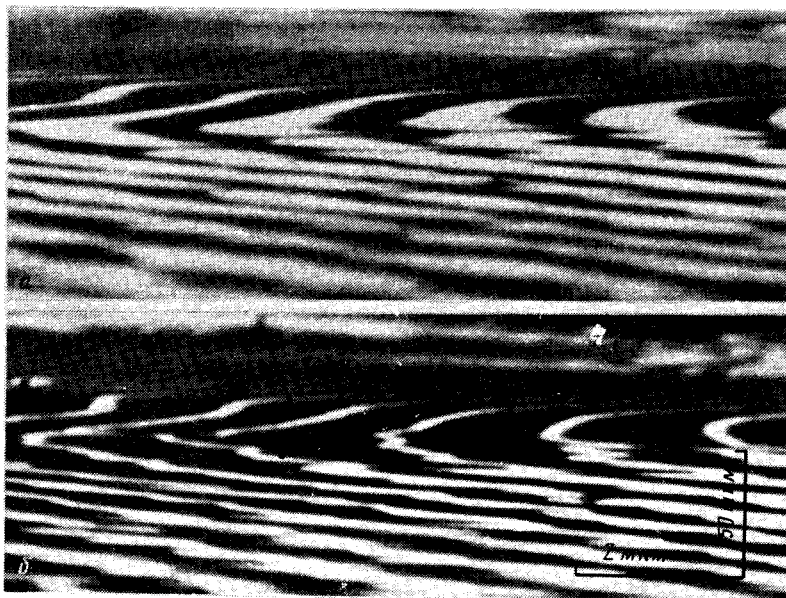


Рис. 1. ОЭМ-изображения одного и того же участка атомно-чистой поверхности кремния (001), полученные в сверхструктурном рефлексе (1×2) при направлении пучка электронов $\langle 110 \rangle$. Данный участок содержит систему эквидистантно расположенных монокристаллических ступеней при нагреве переменным током с частотой 50 Гц (а). При нагреве постоянным электрическим током, направление которого совпадает с направлением движения монокристаллических ступеней при сублимации, преобладают домены (2×1) (б). Области повышенной интенсивности представляют собой изображение участков поверхности со сверхструктурой (1×2) , а области пониженной интенсивности — (2×1) . Области с различным контрастом разделены монокристаллическими ступенями высотой $a/4$

в сверхструктурных доменах разного типа, и, во-вторых, существованием эффективного заряда адатомов. Действительно, на поверхности кремния (001), содержащей двумерные островки сублимации глубиной $a/4$, обнаружена асимметрия формы островков. Островок имеет форму эллипса, при этом большая ось эллипса перпендикулярна ориентации димеров сверхструктуры на дне островка. Несимметричная форма двумерных островков (отношение величины малой и больших осей составляет $0,7 \div 0,8$) указывает, что на поверхности кремния (001) имеются направления преимущественной диффузии адатомов, возникновение которых обусловлено наличием димеров в сверхструктурных доменах. Следует указать, что сог-

ласно ⁹ анизотропия диффузионных процессов имеет место даже на неперестроенной поверхности кремния (001). С анизотропией перестроенной поверхности связано также формирование цепочек вдоль $\langle 110 \rangle$ адатомов щелочных металлов на поверхности кремния (001) при субмонослойных покрытиях ¹⁰⁻¹¹. Эффективный заряд адатома определяется согласно ¹,

$$z_{\text{эфф}} = e(z_0 - nc_n l_n + pc_p l_p),$$

где z_0 — степень ионизованности атома; c_n, p, l_n, p — соответственно сечения рассеяния и длины пробега электронов (n) и дырок (p), e — заряд электрона.

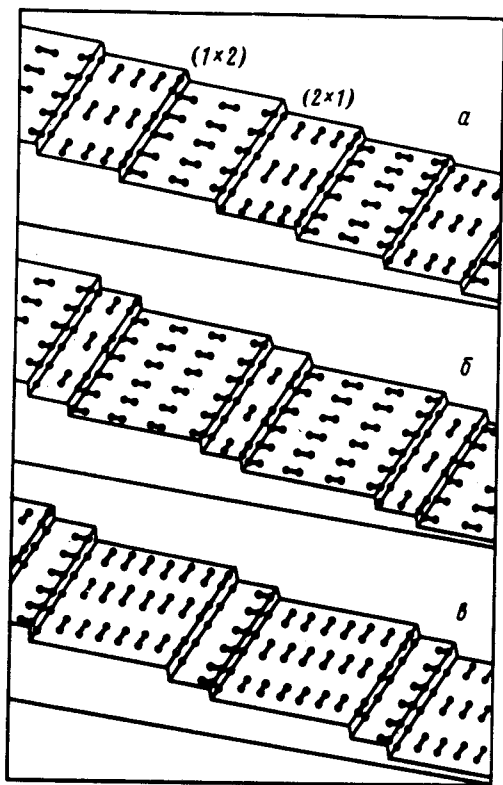


Рис. 2. Схематическое изображение структуры поверхности кремния (001) в процессе сублимации при нагреве переменным током (а) и постоянным током. Направление постоянного электрического тока указано стрелкой и противоположно (б) или совпадает (в) с направлением движения монослойных ступеней при сублимации в рассматриваемом случае

В данных условиях механизм попарного сближения монослойных ступеней состоит в следующем. Наличие эффективного заряда адатомов приводит к увеличению обратного потока адатомов на ступени тех террас, у которых направление димеризации параллельно линии ступени. Так, для экспериментальной ситуации на рис. 2б возрастает обратный поток на верхние ступени террас со структурой (2×1) , что приводит к уменьшению скорости перемещения этих ступеней по отношению к нижним ступеням данных террас. В случае, представленном на рис. 2в, уменьшается скорость перемещения нижних ступеней террас со структурой (2×1) . Таким образом, изменение относительных скоростей движения монослойных ступеней вызывает попарное сближение ступеней, при котором изменяются относительные площади сверхструктур (2×1) и (1×2) .

Следует отметить, что согласно данным, представленным на рис. 2, $z_{эфф} < 0$. Вывод о наличии эффективного заряда адатома согласуется с полученными ранее результатами о влиянии направления постоянного электрического тока, осуществляющего нагрев кристалла, на процессы эшелонирования моноатомных ступеней на чистой поверхности кремния (111) ¹².

Литература

1. Нестеренко Б.А., Снитко О.В., Физические свойства атомарно-чистой поверхности полупроводников. Киев: Наук. Думка, 1983.
2. Hamers R.J., Tromp R.M., Demuth J. E. Phys. Rev. B, 1986, **34**, 5343.
3. Olshanetsky B.Z., Shklyayev A.A. Surface Sci., 1972, **82**, 445.
4. Wierenga P.E., Kubby J.A., Griffith J.E. Phys. Rev. Lett., 1987, **59**, 2169.
5. Aspnes D.E., Ihm J. Phys. Rev. Lett., 1986, **57**, 3054.
6. Nakayama T., Tanishiro Y., Takayanagi K. Jpn. J. Appl. Phys., 1987, **26**, L280, L1186.
7. Inoue N., Yanishiro Y., Yagy K. Jpn. J. Appl. Phys., 1987, **26**, 293.
8. Асеев А.Л., Латышев А.В., Стенин С.И., Проблемы электронного материаловедения. Новосибирск: Наука, 1986, с. 109.
9. Рузайкин М.П., Свечников А.Б., Либединец О.Г. Поверхность, 1988, **26**, 293.
10. Ishida H., Shima N., Tsukada M. Surface Sci., 1985, **158**, 438.
11. Levine J.D., Surface Sci., 1973, **34**, 90.
12. Латышев А.В., Асеев А.Л., Красильников А.Б., и др. Докл. АН СССР, 1988, **300**, 84.

Поступила в редакцию

12 июля 1988 г.

После переработки

4 октября 1988 г.

Институт физики полупроводников
Сибирское отделение
Академии наук СССР