

О ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ САМОДИФФУЗИИ КРЕМНИЯ МЕТОДОМ ДИФРАКЦИИ МЕДЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Б.З.Ольшанецкий, С.М.Репинский, А.А.Шкляев

Показана возможность исследования поверхностной самодиффузии по кинетике перестройки поверхности при фазовых переходах типа порядок-порядок на чистых поверхностях полупроводников.

Поверхностная самодиффузия атомов определяет характер многих процессов, протекающих на поверхности твердого тела. Однако информация о параметрах поверхностной самодиффузии на полупроводниках, имеющаяся в литературе, крайне недостаточна. Это связано со сложностью процессов поверхностной самодиффузии и ограниченностью возможностей исследования процессов в чистых условиях. В связи с тем, что применение методов прямого наблюдения поверхностной самодиффузии (с помощью автоионного микроскопа) к полупроводникам вызывает затруднения, важное значение для изучения поверхностной самодиффузии имеют эксперименты, связанные с переносом массы на монокристаллических поверхностях, обусловленным минимизацией поверхностной свободной энергии [1]. Примером таких исследований являются работы, выполненные в автоэлектронном проекторе [2 — 4].

Как показано ниже, поверхностная диффузия германия и кремния может исследоваться путем изучения кинетики перестройки чистых поверхностей при обратимых фазовых переходах типа порядок-порядок, ряд проявлений которых был описан ранее [5 — 8]. На чистых поверхностях кремния, ориентированных в зоне [011] под небольшими углами к плоскости (100) имеются упорядоченные ступени с высотой в два межплоскостных расстояния, устойчивые во всем диапазоне температур, в котором оказалось возможным наблюдение картин дифракции медленных электронов (ДМЭ), — до 1050 °С. На поверхностях, близких по ориентации к (110), при этих же температурах наблюдались фасеточные плоскости типа (47 35 7), составляющие угол 10° 42' с плоскостью (110). Поверхности, ориентированные в зоне [110], под малыми углами к плоскости (111) могут содержать ступени с фронтом по $[2\bar{1}\bar{1}]$ либо с фронтом по $[211]$ в зависимости от направления поворота поверхности. В первом случае ступени имеют высоту, близкую к одному межплоскостному расстоянию. Эти ступени исчезают при отжиге образца в вакууме. Ступени с фронтом по $[211]$ при температуре ниже 800 °С имеют высоту, равную двум межплоскостным расстояниям. При 800 °С происходит обратимая перестройка этих ступеней в ступени с высотой в одно межплоскостное расстояние (рис. 1). Аналогичные структурные переходы на поверхности германия наблюдаются около 500 °С [8]. Образование ступеней с высотой в два межплоскостных расстояния сопровождается появлением дополнительных рефлексов на картинах ДМЭ.

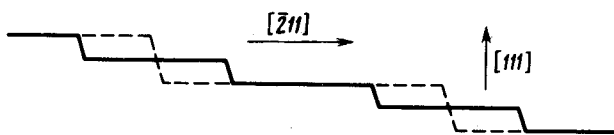


Рис. 1. Схема перестройки ступеней с фронтом по $[2\bar{1}1]$ на поверхности (111) кремния. Сплошной линией обозначены ступени с высотой в одно межплоскостное расстояние, пунктирной линией — с высотой в два межплоскостных расстояния

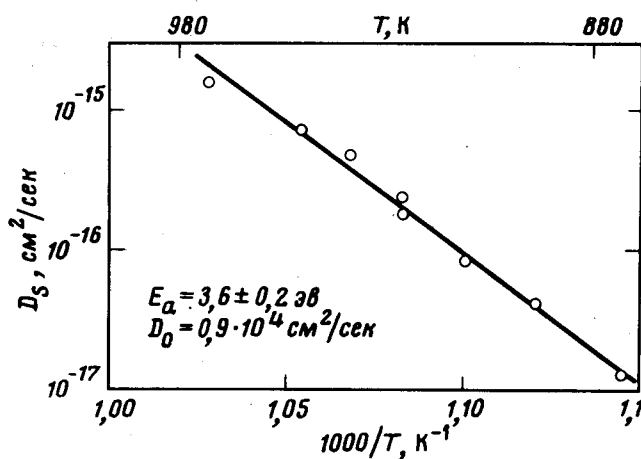


Рис. 2. Зависимость коэффициента диффузионного переноса массы от температуры

Перестройка поверхности связана с переносом вещества, и время ее зависит от температуры. Будем считать, что процесс перестройки поверхности состоит из отрыва атома от излома ступени и последующей диффузии его по террасе с ориентацией (111) к месту встраивания. Тогда выражение, описывающее процесс поверхностной перестройки, может быть записано в виде [1]:

$$D_s = D_0 \exp(-E_a/kT) = \frac{\langle r^2 \rangle}{2t},$$

где D_s — коэффициент диффузионного переноса массы, E_a — энергия активации, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, D_0 — предэкспоненциальный множитель, $\langle r^2 \rangle$ — среднее квадратичное смещение атома при диффузии, t — время отрыва и диффузии атома на соответствующее расстояние. Исследуя зависимость времени перестройки поверхности от температуры по интенсивностям дополнительных рефлексов, можно получить значение энергии активации процесса перестройки. Измерения производились на образцах кремния, поверхность которых была повернута на 8° относительно плоскости (111) в зоне $[\bar{1}10]$.

Полученное значение энергии активации для процесса перестройки ступеней с высотой в одно межплоскостное расстояние в ступени с высотой в два межплоскостных расстояния составляет $3,6 \pm 0,2$ эв. Для оценки величины предэкспоненты, $\langle r^2 \rangle$ бралось равным квадрату ширины террасы ступеней высотой в одно межплоскостное расстояние, а t — равным времени перестройки, измеряемому в эксперименте. Значение предэкспоненты получалось равным $9 \cdot 10^3$ см²/сек (рис. 2). Полученное значение энергии активации составляет около 3/4 от энергии активации самодиффузии кремния в объеме [9, 10].

Как видно из работ [5 — 8], фазовые переходы, связанные с переносом вещества, являются довольно общим свойством поверхностей однокомпонентных полупроводников. Их исследование дает новые возможности для изучения поверхностной самодиффузии на полупроводниках. Преимуществами описанного метода являются возможности исследования диффузии на определенной грани в условиях сверхвысокого вакуума, многократного воспроизведения исходной поверхности и изменения расстояния, на которое переносится вещество путем изменения ориентации поверхности.

Институт физики полупроводников
Академии наук СССР
Сибирское отделение

Поступила в редакцию
1 февраля 1978 г.

Литература

- [1] H.P.Bonzel. CRC Crit. Rev. in Solid State Sci., 6, 171, 1976.
- [2] F.G.Allen. J.Phys. Chem. Solids, 19, 87, 1961.
- [3] G.R.Arthur. Jr. J. Phys. Chem. Solids, 25, 583, 1964.
- [4] Х.Нойманн. ФТТ, 7, 2013, 1965.
- [5] Б.З.Ольшанецкий, С.М.Репинский, А.А.Шкляев. Письма в ЖЭТФ, 25, 195, 1977.
- [6] B.Z.Olshanetsky, S.M.Repinsky, A.A.Shklyayev. Surface Sci., 64, 224, 1977.
- [7] B.Z.Olshanetsky, A.A.Shklyayev. Surface Sci., 67, 581, 1977.
- [8] B.Z.Olshanetsky, S.M.Repinsky, A.A.Shklyayev. Surface Sci., 69, 205, 1977.
- [9] B.G.Masters, G.M.Fairfield. Appl. Phys. Lett., 8, 280, 1966.
- [10] R.F.Peart. Phys. Stat. Sol., 15, K119, 1966.