

КВАЗИРЕЗОНАНСНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ОБМЕН ПРИ ЭМИССИИ ВТОРИЧНЫХ ИОНОВ С ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ

В.А.Абраменко, Д.В.Ледянкин, И.Ф.Уразгильдин, В.Е.Юрасова

Обнаружен осциллирующий характер энергетического и углового распределений вторичных возбужденных ионов кремния при бомбардировке поверхности, предложен механизм квазирезонансного электронного обмена для объяснения этого явления.

Эксперименты проводились с использованием метода совпадений; регистрировались вторичные положительные ионы материала мишени Si^+ , совпадающие по времени образования с фотонами определенной длины волны, эмиттированными из распыленных возбужденных ионов $Si^+ *$.

В качестве образца использовался монокристалл кремния. В камере измерений образец термически обезгаживался с одновременной очисткой ионным пучком. Во время проведения измере-

ния образец нагревался до 250°C , что способствовало стеканию заряда из зоны бомбардировки за счет повышения собственной проводимости кремния. Образец бомбардировался по нормали к поверхности ионами Ne^{+} с энергией $7,5$ кэВ. Плотность тока пучка $j = 150$ мкА/см², давление остаточных газов $p = 5 \cdot 10^{-7}$ Торр. Линии ионно-фотонной эмиссии выделялись с помощью интерференционного фильтра 382 ± 15 нм. Вторичные ионы Si^{+} регистрировались энергетическим анализатором с разрешением $E/\Delta E = 100$ в плоскости, не содержащей низкоиндексных направлений под углом 30° к бомбардируемой поверхности. В область пропускания интерференционного фильтра попадают еще три линии: Si^{*} и две линии Si^{++*} , но вклада в распределение они не дают, так как на совпадение регистрируются только ионы Si^{+} . Временное разрешение схемы совпадений $\tau = 50$ нс.

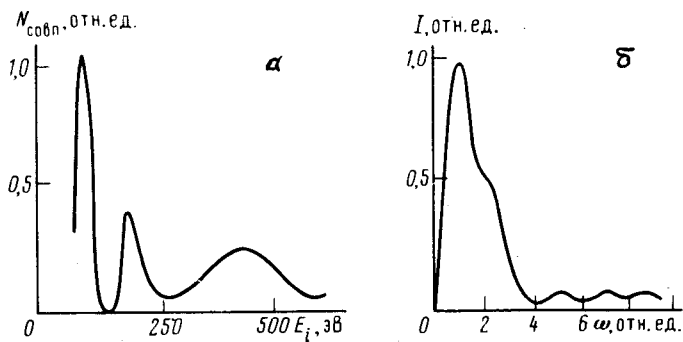


Рис. 1. Число совпадений фотонов Si II с ионами Si^{+} в зависимости от энергии Si^{+} — а. Функция спектральной плотности, полученная в результате спектрального анализа кривой 1, а — б

На рис. 1, а показано число совпадений $N_{\text{сов}}$ вторичных ионов Si^{+} , вылетающих с грани (111) Si при ионной бомбардировке, и фотонов с $\lambda = 385$ нм в зависимости от энергии E вторичных ионов Si^{+} , т.е. энергетическое распределение возбужденных вторичных ионов Si^{+*} . Подобные осцилляции наблюдались в ¹ при рассеянии иона He^{+} на поверхности некоторых твердых тел и объяснены почти резонансным колебательным электронным обменом (перезарядкой) между энергетическим уровнем оболочки атомов твердого тела и основным состоянием удаляющейся от поверхности атомной частицы при определенном соотношении между продолжительностью процесса перехода и длительностью взаимодействия атома с твердым телом. При изменении скорости частицы длительность взаимодействия меняется, что приводит к изменению фазы электронного обмена в точке выхода атомной частицы из области взаимодействия с твердым телом. Этот процесс может проходить, когда разрешенные энергетические уровни атомов твердого тела отличаются от энергетического уровня основного состояния атома не более, чем на $\Delta E = 10$ эВ. Согласно ² в случае такого квазирезонансного электронного обмена вероятность того, что ион сохранит свое зарядовое состояние после взаимодействия с поверхностью твердого тела определяется выражением $P = A + B \cos^2 \delta/2$, где A и B — коэффициенты, слабо зависящие от энергии столкновения, фаза δ :

$$\delta = \frac{1}{\hbar} \int \Delta E dt \cong \frac{2}{\hbar v} \int_{R_0}^{R_m} \Delta E(R) dR = \frac{2}{\hbar v} \langle \Delta E \Delta R \rangle,$$

где примерное равенство записано в предположении постоянства относительной скорости взаимодействующих частиц, ΔE — разность энергии уровней, между которыми происходит электронный обмен, R_m и R_0 — минимальное и максимальное расстояния взаимодействия атомных частиц. Из выражения для δ видно, что при изменении величины $1/v$ вероятность P изменяется по гармоническому закону с частотой, определяемой $\langle \Delta E \Delta R \rangle$ ($\langle \Delta E \Delta R \rangle$ — при этом меняется очень незначительно).

Применение этого подхода к нашему случаю дает основания считать, что мы тоже имеем дело с квазирезонансным процессом. Действительно, если провести спектральный анализ кривой, данной на рис. 1, а, но перестроенной в зависимости от $1/\sqrt{E} \sim 1/v$, то получится характерная частота функции спектральной плотности (рис. 1, б). Оценки дают значение $\langle \Delta E \Delta R \rangle \sim 0,3 \text{ \AA} \cdot \text{эВ}$, что значительно меньше аналогичной величины для процесса, рассмотренного в

Следовательно в нашей ситуации электронный обмен должен происходить между более близкими расположенными уровнями, что и будет показано ниже.

Преобладание некоторой частоты функции спектральной плотности свидетельствует об одном преимущественном механизме, ответственном за перезарядку. Анализ электронной структуры кремния (рис. 2) показывает, что вблизи свободного уровня иона Si^{++} $E = 5,3$ эВ имеется зона поверхностных и примесных уровней Si $E = 6,0 \div 5,0$ эВ³, с которыми может происходить электронный обмен ($\Delta E < 1$ эВ).

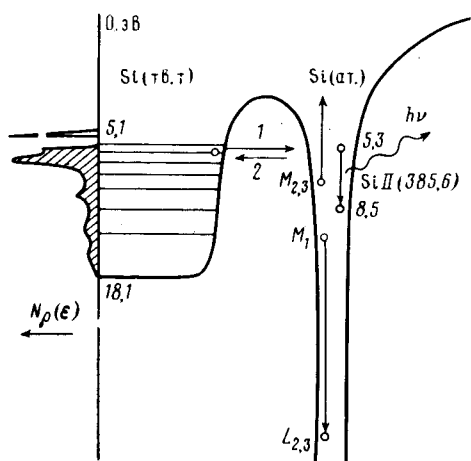


Рис. 2. Диаграмма электронной энергии, поясняющая процессы резонансного туннелирования при излучательной нейтрализации (переход 1) и ионизации (переход 2)

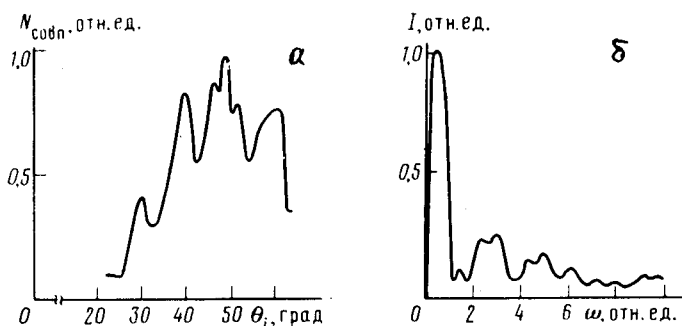


Рис. 3. Число совпадений фотонов Si II с ионами Si^+ в зависимости от угла наблюдения ионов Si^+ — а. Функция спектральной плотности, полученная в результате спектрального анализа кривой 3, а — б

Таким образом, для объяснения зависимости, показанной на рис. 1, а, предлагается следующий механизм. При бомбардировке кремния ускоренными ионами Ne^+ в результате "жестких" столкновений $\text{Ne} - \text{Si}$ или $\text{Si} - \text{Si}$ происходит образование вакансии на глубокой L оболочке. За счет оже-процесса с участием верхних M оболочек (переход LMM) образуется двухзарядный ион Si^{++} (анализ энергетического спектра вторичных электронов показал наличие максимума при $E_e = 86$ эВ, что соответствует оже-электронам, эмиттированным в результате LMM -перехода). Перезарядка на возбужденный уровень Si^{++} вследствие электронного обмена с поверхностными уровнями кремния (рис. 2) приводит к появлению осцилляций выхода Si^{+*} в зависимости от времени взаимодействия частицы с поверхностью, т.е. от перпендикулярной составляющей ее скорости v_{\perp} . Максимум образования Si^{+*} при определенной энергии соответствует максимуму числа совпадений ионов Si^+ и фотонов, образовавшихся в результате распада этого возбужденного состояния.

Поскольку главным в таком резонансном процессе является время взаимодействия частицы с поверхностью, которое определяется величиной v_{\perp} , то изменение угла наблюдения при фиксированной энергии наблюдения также должно приводить к осциллирующему виду угловой зависимости числа совпадений, что и было получено в настоящей работе (рис. 3). Опознанные, проведенные с учетом времени резонансного туннелирования электрона и характерных для нашего эксперимента скоростей вторичных ионов, показывают, что электронный обмен

может происходить уже на расстояниях менее 5 Å от поверхности. Это согласуется с данными работы ⁴, в соответствии с которой такой обмен возможен на расстояниях до 10 Å от поверхности.

В заключение авторы выражают благодарность Ферлегеру В.Х. за ценные замечания при обсуждении работы.

Литература

1. *Erickson R.L., Smith D.P.* Phys. Rev. Lett., 1975, 34, 297.
2. *Tully J.C.* Phys. Rev., 1977, В 16, 4324.
3. *Ciraci S., Butz B., Oellig E.M., Wagner H.* Phys. Rev., 1984, В 30, 711.
4. *Hagstrum H.D.* Phys. Rev., 1961, 123, 758.

Московский государственный университет
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию
17 июля 1986 г.