

01;02;11

©1995

ЗАВИСИМОСТЬ СТЕПЕНИ ИОНИЗАЦИИ РАСПЫЛЕННЫХ ЧАСТИЦ ОТ ЗАРЯДА БОМБАРДИРУЮЩЕГО ИОНА

*И.А.Войцеховский, И.В.Иванов,
М.В.Медведева, В.Х.Ферлегер*

Вопрос о зависимости коэффициента распыления Y от заряда z бомбардирующего иона активно обсуждался в 80-х годах в связи с механизмом "кулоновского взрыва" [1]. Однако до настоящего времени не получено ни одного четкого экспериментального свидетельства в пользу механизма [1], не только при распылении металлов, но также полупроводников и диэлектриков, когда условия, необходимые для реализации этого механизма, могут выполняться. Типичный результат был получен в работе де-Шварта [2], где измерялись коэффициенты распыления атомов Si (Y) и ионов Si^+ (Y^+) в зависимости от заряда бомбардирующих ионов Ar^{z+} ($1 \leq z \leq 9$) с начальной энергией $E_0 = 20$ кэВ. Было показано, что Y не зависит от z во всем исследованном интервале, в то время как Y^+ и, следовательно, степень ионизации $\eta^+ = Y^+/(Y^+ + Y)$ резко возрастают в области $z \geq 6$. Таким образом, z -чувствительным оказалось не распыление, а формирование зарядового состояния.

Близкий по смыслу результат был получен недавно в работах [3,4], где измерялись величины Y^+ для ионов Ni^+ и CO^+ и Y — для молекул CO, распыленных при бомбардировке поверхности Ni(111), покрытой пленкой адсорбированных молекул CO, ионами Ne^{z+} и Kr^{z+} ($1 \leq z \leq 2$) с $E_0 = (20 - 500)$ эВ. Было обнаружено, что отношение $Y^+(z=2)/Y^+(z=1) \geq 1$ во всех исследованных случаях и с уменьшением E_0 возрастает, и Y не зависит от z .

Эффект, описанный в [2], наблюдается в [3] при существенно меньших z , что может быть связано с различными механизмами распыления: каскадным в [2] (характерное время $\tau \approx 10^{-13}$ с) и первичным прямым выбиванием в [3] ($\tau \leq 10^{-14}$ с). Результаты [3] и [4] не получили объяснения даже на качественном уровне.

В настоящей работе делается попытка понять физическую причину зависимости $Y^+(z)$ (т. е. $\eta^+(z)$) распыленных

атомов в рамках модели формирования зарядовых состояний отлетающих частиц [5], модифицированной с учетом зависимости частот электронно-обменных процессов от локального электронного состояния поверхности [6].

В области малых энергий ($E_0 \leq 500$ эВ) процессы распыления (первичное прямое выбивание) и формирование зарядовых состояний рассеянных и распыленных частиц происходят практически одновременно. Чем больше заряд бомбардирующего иона, тем больше электронов из локальной области поверхности размером порядка элементарной ячейки кристалла затрачивается на его нейтрализацию. Так как выбитый ион нейтрализуется электронами из этой же области, то с ростом z вероятность его нейтрализации будет уменьшаться, если за время столкновения электроны из соседних областей не успевают полностью восстановить начальное значение электронной плотности путем туннелирования в нарушенную область.

Для оценки порядка величины эффекта в простейшем случае $z = 1, 2$ рассматривается система дифференциальных уравнений.

Например, для $z = 2$:

$$\frac{dP^{2+}(t)}{dt} = -P^{2+}(t)W_{2-1}(t), \quad (1)$$

$$\frac{dP^+(t)}{dt} = -P^+(t)W_{1-0}(t) + P^{2+}(t)W_{2-1}(t), \quad (2)$$

$$\frac{dQ^+(t)}{dt} = -Q^+(t)W(t), \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dn(t)}{dt} = & -Q^+W(t) - 2P^{2+}(t)W_{2-1}(t) - \\ & - 2P^+(t)W_{1-0}(t) + \omega_t(n_0 - n(t)). \end{aligned} \quad (4)$$

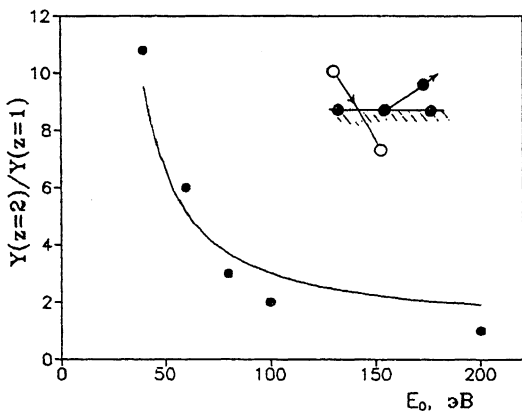
Здесь $-\infty < t < \infty$, момент времени $t = 0$ связывается со стартом выбитой частицы с поверхности.

Уравнения (1) и (2) описывают нейтрализацию бомбардирующего двухзарядного иона путем последовательных Оже-переходов, переводящих его сначала в однозарядный ион ($2 \rightarrow 1$), а затем в нейтральный атом ($1 \rightarrow 0$) и происходящих как до выбивания атома поверхности ($-\infty < t < 0$), так и после. $P^{2+}(t)$ и $P^+(t)$ — относительные числа сохранившихся к моменту t двух- и однозарядных ионов бомбардирующего пучка, $P^{2+}(t) + P^+(t) + P^0(t) = 1$. Уравнения (1) и (2) решаются при начальном условии $P^{2+}(-\infty) = 1$,

$P^+(-\infty) = 0$. Частоты $W_{2-1}(t)$ и $W_{1-0}(t)$ выбираются в виде [5]: $W_{i-k}(t) = A_{i-k}(t) \exp(-\alpha\nu_{\perp}t)$, где $A_{i-k}(t) = a_{i-k}R^2(t)$, a_{i-k} — частота Оже-перехода на поверхности мишени при $n(t) = n_0$, $R(t) = n(t)/n_0$ — вероятность обнаружить электрон в локальной области поверхности, $n(t)$ — эффективное число электронов в этой области в момент времени t , $n_0 = n(-\infty)$, α^{-1} определяет эффективный размер области электронного обмена отлетающих частиц с поверхностью, ν_{\perp} — нормальная к поверхности составляющая скорости иона.

Уравнение (3) описывает нейтрализацию выбитой частицы путем туннелирования. $Q^+(t)$ — относительное число выбитых ионов, сохранившихся к моменту t , $Q^+(t < 0) = 0$, а при $t \geq 0$ $Q^+(t) + Q^0(t) = 1$. Уравнение (3) решается при начальном условии $Q^+(0) = 1$, $Q^+(\infty) = \eta^+(z=2)$ — искомая степень ионизации выбитых частиц. $W(t) = A(t) \times \exp(-\alpha\nu'_{\perp}t)$ — частота туннелирования электронов из мишени в выбитый атом, $A(t) = aR(t)$, a — частота туннелирования на поверхности мишени при $n(t) = n_0$, ν'_{\perp} — нормальная составляющая скорости выбитой частицы.

Уравнение (4) описывает кинетику заселенности локального участка поверхности электронами. Первые три члена в правой части (4) описывают потерю электронов за счет их переходов к бомбардирующим и выбитым ионам, а последний член — захват электронов из соседних областей мишени



Зависимость отношения степеней ионизации распыленных ионов Ni^+ при бомбардировке $Ni(111)+CO$ ионами Kr^{2+} и Kr^+ от E_0 . Точки — эксперимент [3], сплошная линия — расчет. В правом верхнем углу показан механизм распыления.

путем туннелирования с частотой $\omega_t = \text{const}$. Уравнение (4) решается при начальном условии $n(-\infty) = n_0$.

Соответствующая система уравнений для случая $z = 1$ получается из системы (1)–(4) при $P^{2+}(t) = 0$. Ее решение $\eta^+(z = 1)$ находится при начальном условии $P^+(-\infty) = 1$.

Системы уравнений (1–4) для $z = 2$ и $z = 1$ решались численно. Величина $\eta^+(z = 2)/\eta^+(z = 1)$ сравнивалась с измеренной в [3] величиной $Y^+(z = 2)/Y^+(z = 1)$ (они совпадают, если коэффициенты распыления Y не зависят от z) для случаев Kt^{2+} , $\text{Kt}^+ \rightarrow \text{Ni}(111) + \text{CO}$ (см. рисунок). Расчет проводился при типичных для процессов нейтрализации частотах [7]. Удовлетворительное согласие с экспериментом получается при следующих параметрах модели: $n_0 = 3$, $\omega_t = 8 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$.

Полученная величина ω_t примерно на порядок меньше соответствующего значения для чистых металлических поверхностей, что, возможно, связано с покрытием поверхности Ni пленкой CO.

Полученные результаты позволяют понять, почему в работе [2] рассматриваемый эффект наблюдается только при $z \geq 6$, — при каскадном распылении ($\tau \approx 10^{-13}$) электронная система поверхности при небольших зарядах бомбардирующих ионов успевает практически полностью релаксировать к моменту старта распыленной частицы.

Данная работа была частично поддержана Международным научным фондом, грант № RU 2000.

Список литературы

- [1] Битенский И.С., Миразмедов М.Н., Парилис Э.С. // ЖТФ. 1979. Т. 49. С. 1042–1047.
- [2] de Zwart S.T., Fried T., Boerma D.O., Hoeckstra R., Drentje A.G. // Surf. Sci. Lett. 1986. V. 177. P. L939–L946.
- [3] Diebold U., Varga P. // Surf. Sci. Lett. 1991. V. 241. P. L6–L10.
- [4] Desorption Induced by Electronic Transitions, DIET-IV. Springer Verlag, Berlin, 1990.
- [5] Парилис Э.С., Ферлегер В.Х. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1979. Т. 43. С. 560–565.
- [6] Абдулкасымов Ф., Алимов Ш., Ферлегер В.Х. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. Т.52. С. 1604–1610.
- [7] Трубников Б.А., Явлинский Ю.И. // ЖЭТФ. 1967. Т. 52. С. 1638–1645.

Институт электроники
им. У.А. Арифова АН Узбекистана
Ташкент

Поступило в Редакцию
8 ноября 1994 г.