

11

© 1990

РОЛЬ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ В ПРОЦЕССЕ ВЗРЫВНОЙ ЭМИССИИ

Ю.В. К р а с н я к, О.А. С и н к е в и ч

Экспериментальные исследования процесса взрывной эмиссии (ВЭ) свидетельствуют о том, что для него характерны высокая $\sim 5 \cdot 10^7 \frac{\text{В}}{\text{см}}$ напряженность электрического поля на вершине взрывающегося микроострия, высокая температура $\sim (3-5)10^3\text{К}$, а также высокая плотность потока вещества, которое поступает с разрушающегося микрокатода в межэлектродное пространство как в виде отдельных испарившихся атомов, так и в виде мелкодисперсной фазы. Исследования процесса разрушения микроострий из W , Ni , Ta , проведенные в работах [3-5], показывают, что удельная эрозия микроострия при взрыве составляет $\sim 2 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 10^{-1} \frac{\text{г}}{\text{Кул}}$, то есть на один электрон, вылетевший из катода в процессе ВЭ, приходится $\sim 10^2 - 10^3$ испарившихся атомов. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что атомы практически всех элементов, используемых для изготовления катодов, на которых наблюдается явление ВЭ, обладают положительным сродством к электрону. В этой связи представляет интерес рассмотрение процесса зарядки испаряющихся с катода атомов ввиду той роли, которую могут играть образовавшиеся вблизи катода отрицательные ионы в переносе тока и газодинамических процессах, сопровождающих ВЭ.

Туннельный механизм образования отрицательного иона вблизи катода в сильном электрическом поле был рассмотрен в работе [1], в которой было получено выражение для вероятности захвата электрона, туннелирующего из катода, на удаляющуюся от него частицу, обладающую сродством к электрону: $\omega \approx \frac{4\pi^2}{\beta} |\psi|^2$, где $\beta = \frac{\sigma f}{\delta}$, $\frac{\delta^2}{2}$ есть энергия сродства рассматриваемого атома к электрону, f - напряженность электрического поля, σ - скорость отлетающего от катода атома, $|\psi|^2$ - квадрат амплитуды волновой функции туннелирующего электрона в области взаимодействия с атомом, т.е. в точке x , в которой $\epsilon_0 = \mathcal{U}(x) - \frac{\delta^2}{2}$, где ϵ_0 - энергия туннелирующего электрона, отсчитываемая от дна энергетической зоны, $\mathcal{U}(x)$ - потенциальная энергия электрона (в простейшей модели $\mathcal{U}(x) = 0$, $x < 0$, $\mathcal{U}(x) =$

$= \varphi + \varepsilon_F - f x$, $x > 0$, ε_F - энергия Ферми, φ - работа выхода материала катода).

Полную вероятность образования отрицательного иона можно получить, суммируя вероятности захвата по всем электронам металла в модели Зоммерфельда. В результате получим следующее соотношение:

$$\omega_{tot} = \frac{f}{4\beta} \int_0^{\varphi + \varepsilon_F - \frac{b^2}{2} - f x_0} d\varepsilon \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_F}{kT}\right)} \cdot \frac{\exp\left\{-\frac{2}{3f}\left((2(\varphi + \varepsilon_F - \varepsilon))^{3/2} - b^3\right)\right\}}{b\left\{(2(\varphi + \varepsilon_F - \varepsilon))^{1/2} - b\right\}} \quad (1)$$

Величина x_0 , входящая в выражение, определяющее верхний предел интегрирования в формуле (1), есть минимальное расстояние, необходимое для того, чтобы образовавшийся на таком расстоянии от катода отрицательный ион не мог распасться за счет туннелирования электрона обратно в металл. Это расстояние может быть оценено из соотношения

$$\Gamma(x_0) = -\sigma \left(\ln \Gamma(x) \right) \Big|_{x=x_0}, \quad (2)$$

где $\Gamma(x)$ - отнесенная к единице времени вероятность перехода электрона из связанного состояния в металл для расстояния между ядром отрицательного иона и поверхностью катода. Вычисление $\Gamma(x)$ можно провести методом, изложенным в [2], моделируя потенциал нейтрального атома, как и при нахождении вероятности захвата отдельного электрона, потенциалом нулевого радиуса с параметром связи b . В результате получаем

$$\Gamma(x) = \frac{f \exp\left\{-\frac{2}{3f}\left((b^2 + 2fx)^{3/2} - b^3\right)\right\}}{2\left\{(b^2 + 2fx)^{1/2} - b\right\}} \quad (3)$$

Оценка x_0 , которая проводится с использованием соотношений (2) и (3), дает для атомов со сродством ≈ 1 эВ и скоростью отлета $10^4 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$ $x_0 \approx 6 \text{ \AA}$, а для атомов со сродством ≈ 0.5 эВ с такой же скоростью отлета $x_0 \approx 9 \text{ \AA}$.

Анализ подынтегрального выражения в формуле (1) показывает, что в случае, если выполняется соотношение $\frac{f}{2(b^2 + 2fx_0)^{1/2}} < kT$, основной вклад в интеграл (1) вносит область интегрирования, близкая к верхнему пределу данного интеграла; оценивая интеграл с учетом данного обстоятельства, а также выражений (2) и (3), получим выражение для полной вероятности образования отрицательного иона

$$\omega_{tot} \approx \frac{f \exp\left\{-\frac{\varphi - \frac{\delta^2}{2} - fx_0}{kT}\right\}}{4,3\delta(b^2 + 2fx_0)^{1/2}} \Gamma(x_0) \approx \frac{1}{2} \exp\left\{-\frac{\varphi - \frac{\delta^2}{2} - fx_0}{kT}\right\}. \quad (4)$$

Соотношение (4) было получено в пренебрежении возможностью распада отрицательного иона вследствие туннелирования локализованного на атоме дополнительного электрона в межэлектродное пространство, что накладывает ограничение на величину электрического поля. Как известно, отнесенная к единице времени вероятность распада отрицательного иона, находящегося в электрическом поле, равна $\Gamma_0 = \frac{f}{2\delta} \exp\left(-\frac{2}{3} \frac{\delta^3}{F}\right)$ (см. [2]). Критерием эффективного „выживания“ отрицательных ионов является выполнение условия $f \leq \frac{2}{3} \delta^3$ (5). Для атомов с электронным сродством $\approx 0,5$ эВ это ограничение дает: $f \leq 2,5 \cdot 10^7 \frac{\text{В}}{\text{см}}$, для сродства ≈ 1 эВ, $f \leq 9 \cdot 10^7 \frac{\text{В}}{\text{см}}$. Заметим, что при невыполнении условия (5) рассматриваемый процесс дает вклад в суммарный ток ВЭ за счет электронов, поступающих в межэлектродное пространство при распаде отрицательных ионов. В том случае, если образование отрицательного иона произошло в точке x , для которой $\Gamma(x) < \Gamma_0$, распад отрицательного иона происходит за счет туннелирования электрона в межэлектродное пространство. С учетом этого обстоятельства в качестве величины x_0 , входящей в выражение, определяющее верхний предел интеграла (1), должно быть выбрано минимальное из расстояний, определяемых соотношением (2) и равенством $\Gamma(x_0) = \Gamma_0$ (6). В том случае, если величина x_0 определяется соотношением (6), аналогичная вышеприведенной оценке интеграла (1) дает следующее выражение для вероятности того, что процесс образования отрицательного иона приведет к эффективному вкладу в ток ВЭ:

$$\omega_{tot} \approx \frac{\exp\left\{-\frac{\varphi - \frac{\delta^2}{2} - fx_0}{kT}\right\}}{4\sigma(\delta^2 + 2fx_0)^{1/2}} \Gamma_0 \approx \frac{\exp\left\{-\frac{\varphi - 0,8\delta^2}{kT}\right\}}{5\sigma\delta} \Gamma_0. \quad (7)$$

Отметим, что возможность использования результатов работы [1] для нахождения вероятности захвата электрона налагает определенные ограничения на скорость отлетающей частицы и напряженность электрического поля. Одно из них связано с тем, что изменение координаты атома в процессе захвата должно быть мало по сравнению с характерным расстоянием $\sim \frac{1}{\delta}$, а второе состоит в том,

что время захвата должно быть меньше характерного времени установления стационарной волновой функции $\sim (\Gamma(x))^{-1}$. Из работы [1] следует, что время захвата $\sim (b\beta)^{-1/2} = (vf)^{-1/2}$, поэтому указанные ограничения имеют вид

$$\left(\frac{v}{f}\right)^{1/2} \ll \frac{1}{b}; \quad (vf)^{-1/2} \ll (\Gamma(x))^{-1}. \quad (8)$$

Заметим, что в случае, если величина x_0 определяется соотношением (2), указанные критерии совпадают и сводятся к соотношению $f \gg v\delta^2$. Указанное ограничение является достаточно мягким: например, для скорости отлета атома $10^4 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$ оно дает $f \gg 3 \cdot 10^4 \frac{\text{В}}{\text{см}}$ для частицы с энергией средства $\approx 1 \text{ эВ}$.

Это означает, что результаты данной работы могут быть применены и к процессам функционирования катодного пятна.

Оценки вероятности образования отрицательного иона, проведенные с использованием выражений (4) и (7), дают для различных материалов катода значения $\omega_{\text{от}} \sim 10^{-1} - 10^{-3}$. Корреляция полученных в работе результатов с цитированными выше данными по эрозии микроострий позволяет предположить, что значительная часть тока ВЭ может быть связана с образованием отрицательных ионов. Нам представляется, что прямая проверка наличия отрицательных ионов при верьвной эмиссии была бы весьма интересной и могла бы пролить новый свет на природу этого явления. Авторы благодарят участников семинара А.А. Рухадзе за полезные обсуждения и замечания.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Красняк Ю.В., Петрин С.Ю., Сенкевич О.А. // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 48. С. 376.
- [2] Сумецкий М.Ю., Дубровский Г.В. // ДАН СССР. 1979. Т. 245. С. 74.
- [3] Фурсей Г.Н., Жуков В.М. // ЖТФ. 1976. Т. 46. В. 2. С. 310.
- [4] Жуков В.М., Аксенов М.С., Фурсей Г.Н., Изв. АН СССР. Сер. физ. 1982. Т. 46. № 7. С. 1310.
- [5] Жуков В.М., Аксенов М.С., Фурсей Г.Н. // Радиотехника и электроника. 1984. Т. 29. № 2. С. 314.

Московский энергетический институт

Поступило в Редакцию
26 июня 1990 г.