



# Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Ю. В. Красняк, О. А. Синкевич, Роль отрицательных ионов в процессе взрывной эмиссии, *Письма в ЖТФ*, 1990, том 16, выпуск 19, 62–65

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.82

3 декабря 2024 г., 11:12:37



## 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:  $\omega \propto \frac{4\pi^2}{\beta} |\psi|^2$ , где  $\beta = \frac{\sigma f}{\delta}$ ,  $\frac{\delta^2}{2}$  есть энергия сродства рассматриваемого атома к электрону,  $f$  - напряженность электрического поля,  $\sigma$  - 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  $\epsilon_0$  - энергия туннелирующего электрона, отсчитываемая от дна энергетической зоны,  $\mathcal{U}(x)$  - потенциальная энергия электрона (в простейшей модели  $\mathcal{U}(x) = 0$ ,  $x < 0$ ,  $\mathcal{U}(x) =$

$= \varphi + \varepsilon_F - fx$ ,  $x > 0$ ,  $\varepsilon_F$  - энергия Ферми,  $\varphi$  - 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;

$$\omega_{tot} = \frac{f}{4\beta} \int_0^{\varphi + \varepsilon_F - \frac{b^2}{2} - fx_0} d\varepsilon \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_F}{kT}\right)} \cdot \frac{\exp\left\{-\frac{2}{3f}\left((2(\varphi + \varepsilon_F - \varepsilon))^{3/2} - b^3\right)\right\}}{b\left\{(2(\varphi + \varepsilon_F - \varepsilon))^{1/2} - b\right\}} \quad (1)$$

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 средством  $\approx 1$  эВ и скоростью отлета  $10^4 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$   $x_0 \approx 6 \text{ \AA}$ , а для атомов со средством  $\approx 0.5$  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

$$\omega_{tot} \approx \frac{f \exp\left\{-\frac{\varphi - \frac{b^2}{2} - f x_0}{kT}\right\}}{4.36(b^2 + 2f x_0)^{1/2}} \Gamma(x_0) \approx \frac{1}{2} \exp\left\{-\frac{\varphi - \frac{b^2}{2} - f x_0}{kT}\right\}. \quad (4)$$

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  $\Gamma_0 = \frac{f}{2\delta} \exp\left(-\frac{2}{3} \frac{b^3}{f}\right)$  (см. [2]). Критерием эффективного „выживания“ отрицательных ионов является выполнение условия  $f \leq \frac{2}{3} b^3$  (5). Для атомов с электронным средством  $\approx 0.5$  эВ это ограничение дает:  $f \leq 2.5 \cdot 10^7 \frac{\text{В}}{\text{см}}$ , для средства  $\approx 1$  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:

$$\omega_{tot} \approx \frac{\exp\left\{-\frac{\varphi - \frac{b^2}{2} - f x_0}{kT}\right\}}{4.36(b^2 + 2f x_0)^{1/2}} \Gamma_0 \approx \frac{\exp\left\{-\frac{\varphi - 0.8b^2}{kT}\right\}}{5.0b} \Gamma_0. \quad (7)$$

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  $\sim \frac{1}{b}$ , 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  $\sim (\delta\beta)^{-1/2} = (vf)^{-1/2}$ , поэтому указанные ограничения имеют вид

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

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 сродства  $\approx 1 \text{ эВ}$ .

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  $\omega_{\text{иот}} \sim 10^{-1} - 10^{-3}$ . Корреляция полученных в работе результатов с цитированными выше данными по эрозии микроустройств позволяет предположить, что значительная часть тока ВЭ может быть связана с образованием отрицательных ионов. Нам представляется, что прямая проверка наличия отрицательных ионов при взрывной 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.