

02;07;10;12

Электронный ток увлечения в газах при бомбардировке пучками быстрых высокозарядных ионов

© А.Б. Войткив, Б.Г. Краков

Институт электроники АН РУ, Ташкент

Поступило в Редакцию 30 января 1997 г.

В окончательной редакции 6 марта 1998 г.

Показано, что асимметрия в вылете электронов в элементарном акте столкновения атома с быстрым высокозарядным ионом может привести к появлению макроскопического эффекта — электронного тока увлечения — при бомбардировке газовой мишени пучком быстрых высокозарядных ионов. Рассчитан ток увлечения при бомбардировке гелиевой мишени пучком $25 \text{ MeV/u Mo}^{40+}$.

В последние годы большое внимание уделяется исследованию ионизации атомов в столкновениях с быстрыми высокозарядными ионами (ВЗИ) (см., например, [1–6] и цитируемую там литературу). Одно из обнаруженных в этих работах интересных явлений — это значительная асимметрия в вылете электронов при ионизации атомов; большая их часть имеет положительные проекции скорости на направление движения быстрого ВЗИ. Например, в эксперименте [1] при исследовании однократной ионизации атомов гелия ионами Ni^{24+} (энергия столкновения 3.6 MeV/u) было найдено, что даже в так называемых ”мягких” столкновениях около 90% вылетающих из атомов гелия электронов движутся в пределах $0 \leq \vartheta \leq \pi/2$, где угол вылета ϑ отсчитывается от направления скорости быстрого высокозарядного иона. К близким значениям асимметрии в вылете электронов приводит и теоретическое рассмотрение [1,7] однократной ионизации гелия в ”мягких” столкновениях. Эксперименты также показывают, что подобная асимметрия имеет место и в процессах двух- и более кратной ионизации атомов в столкновениях с быстрыми высокозарядными ионами [5,6].

В данной работе мы покажем, что асимметрия в вылете электронов, наблюдаемая в микроскопическом акте столкновения, может привести к макроскопическому эффекту — электронному ”току увлечения” —

при бомбардировке газовой мишени пучком быстрых ВЗИ, и оценим величину плотности этого тока. Пусть имеется газ с концентрацией атомов n_a , который облучается пучком быстрых частиц с концентрацией n_i , имеющих скорость v ($v \gg v_0 \simeq 2 \cdot 10^8$ см/с). Пусть $d^2\sigma_e/d\varepsilon \cdot d\Omega$ — дважды дифференциальное сечение "образования" свободного электрона с энергией ε и определенным направлением вылета из атома, происходящего при столкновении налетающего ВЗИ с атомом мишени. Тогда

$$\Delta n_e = n_i n_a v \frac{d^2\sigma_e}{d\varepsilon d\Omega} \Delta\varepsilon \Delta\Omega \quad (1)$$

— это количество электронов, имеющих энергии в узком интервале $\varepsilon \div \varepsilon + \Delta\varepsilon$ и летящих внутри малого элемента телесного угла $\Delta\Omega$, которые "производятся" в единице объема мишени в единицу времени в столкновениях с пучком бомбардирующих частиц. Пусть $\tau_e(\varepsilon)$ — средний промежуток времени между вылетом электрона из "родительского" атома и столкновением с каким-либо другим атомом. Ниже будем предполагать, что газовая мишень является достаточно плотной, так что средняя длина свободного пробега электронов и соответственно время $\tau_e(\varepsilon)$ определяется столкновениями с атомами мишени, а не стенками камеры (при обычных плотностях высокозарядных ионов в пучке концентрации образующихся ионов отдачи гораздо меньше концентрации нейтральных атомов газа, поэтому столкновениями электронов с ионами отдачи можно пренебречь). Как обычно (см., например, [8]) будем считать, что в среднем уже первое столкновение электрона с атомом приводит к выбытию электрона из тока, т.е. что время $\tau_e(\varepsilon)$ является "временем жизни" электрона с энергией ε в токе. Тогда можно записать:

$$\frac{d}{dt} \Delta N_e = -\frac{\Delta N_e}{\tau_e(\varepsilon)} + n_i n_a v \frac{d^2\sigma_e}{d\varepsilon d\Omega} \Delta\varepsilon \Delta\Omega, \quad (2)$$

где ΔN_e — концентрация участвующих в токе свободных электронов, имеющих энергии в интервале $\varepsilon \div \varepsilon + \Delta\varepsilon$, и направления скорости внутри $\Delta\Omega$. Считая, что пучок быстрых частиц был впрыснут в мишень в момент времени $t = 0$ и пренебрегая (в силу большой скорости этих частиц) запаздыванием, получаем (с учетом $\lim_{\Delta\Omega \rightarrow 0} \lim_{\Delta\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\Delta N_e}{\Delta\Omega \Delta\varepsilon} = \frac{d^2 N_e}{d\Omega d\varepsilon}$):

$$\frac{d^2 N_e}{d\varepsilon d\Omega} = n_i n_a v \tau_e(\varepsilon) \frac{d^2\sigma_e}{d\varepsilon d\Omega} (1 - \exp(-t/\tau_e(\varepsilon))). \quad (3)$$

Выражение для плотности электронного тока имеет вид

$$j_{el} = -|e| \int d\Omega \int d\varepsilon v_e \cos \vartheta \frac{d^2 N_e}{d\varepsilon d\Omega}, \quad (4)$$

где e — заряд электрона, v_e — скорость электрона. В стационарном режиме ($t \gg \tau_e$) из (3) и (4) находим

$$j_{el} = -|e| n_i n_a v \int d\Omega \int d\varepsilon v_e \cos \vartheta \tau_e(\varepsilon) \frac{d^2 \sigma_e}{d\varepsilon d\Omega}. \quad (5)$$

Поскольку $\tau_e(\varepsilon) = 1/(n_a \sigma_{ea} v_e)$, где $\sigma_{ea}(\varepsilon)$ — полное сечение взаимодействия электрона энергии ε с атомом, то

$$j_{el} = -A_{el} |e| n_i v, \quad (6)$$

где

$$A_{el} = 2\pi \int_0^\infty \frac{d\varepsilon}{\sigma_{ea}(\varepsilon)} \int_0^\pi d\vartheta \sin \vartheta \cos \vartheta \frac{d^2 \sigma_e}{d\varepsilon d\Omega}. \quad (7)$$

Количество электронов, производимое пучком быстрых ВЗИ в газе, пропорционально концентрации атомов газа, а их "время жизни" в токе обратно пропорционально этой концентрации. Поэтому окончательное выражение (6) для плотности электронного тока от концентрации атомов не зависит. Поскольку величины сечений ионизации атомов в столкновениях с быстрыми высокозарядными ионами довольно быстро падают с ростом кратности ионизации (особенно быстрое падение сечений происходит при переходе от одно- к двукратной ионизации (см., например, [5,6]), то для оценки можно положить $d^2 \sigma_e / d\varepsilon d\Omega = d^2 \sigma_e^{(1+)}/d\varepsilon d\Omega$, где справа стоит дважды дифференциальное сечение однократной ионизации атома. В качестве примера оценим значение плотности электронного тока, возникающего при бомбардировке газа, состоящего из атомов гелия, пучком ионов Mo^{40+} (25 MeV/u) (реакция (25 MeV/u) $\text{Mo}^{40+} + \text{He} \rightarrow \text{Mo}^{40+} + \text{He}^+ + e^-$ является одной из очень немногих с участием быстрых высокозарядных ионов, для которых табулированы значения дважды дифференциального сечения однократной ионизации [9,2,10]). Для получения значений полного сечения взаимодействия $\sigma_{ea}(\varepsilon)$ электронов с атомами гелия использовались

известные (см., например, [8,11–13]) данные по сечениям упругого и неупругих столкновений. Численный расчет приводит к $A_{el} = 2.1$ и

$$j_{el}^{\text{He}} = -2.1|e|n_i v. \quad (8)$$

При концентрациях ионов в пучке $n_i \simeq (1 \div 100) \text{ cm}^{-3}$ и скорости $v \simeq 7 \cdot 10^9 \text{ cm/s}$ (что соответствует энергии 25 MeV/u) имеем $j_{el}^{\text{He}} \simeq 2 \cdot (10^{-9} \div 10^{-7}) \text{ A/cm}^2$, т.е. величину, которая вполне допускает экспериментальное наблюдение рассматриваемого эффекта.

В заключение авторам хотелось бы выразить признательность проф. А.С. Балтенкову и проф. В.Х. Ферлегеру за полезное обсуждение.

Список литературы

- [1] Moshhammer R., Ullrich J., Unverzagt M. et al. // Phys. Rev. Lett. 1994. V. 73. P. 3371–3375.
- [2] Stolterfoht N., Platten H., Schiwietz G. et al. // Phys. Rev. 1995. A52. N 5. P. 3796–3799.
- [3] Moshhammer R., Unverzagt M., Schmitt W., Ullrich J., Schmidt-Bocking H. // NIM. 1996. B108. P. 425–441.
- [4] Moshhammer R., Ullrich J., Unverzagt M. et al. // NIM. 1996. B107. P. 62–65.
- [5] Jardin P., Cassimi A., Grandin J.P., Hennecart D., Lemoigne J.P. // NIM. 1996. B107. P. 41–44.
- [6] Unverzagt M., Moshhammer R., Schmitt W., Olson R.E., Jardin P., Mergel V., Ullrich J., Schmidt-Bocking H. // Phys. Rev. Lett. V. 76. N 7. P. 1043–1046.
- [7] Voitkiv A.B. // J. Phys. 1996. B29. N 22. P. 5344–5354.
- [8] Атомные и молекулярные процессы / Под редакцией Д. Бейтса. М.: Мир, 1964. 777 с.
- [9] Stolterfoht N., Schneider D., Tanis J. et al. // Europhys. Lett. 1987. V. 4(8). P. 899–904.
- [10] Stolterfoht N., Schneider D., Tanis J. et al. 1995. Preprint Hahn–Meitner–Institut. ISSN 0936–0891.
- [11] Момм Н., Мессу Г. Теория атомных столкновений М.: Мир, 1969. 765 с.
- [12] Друкарев Г.Ф. Столкновения электронов с атомами. М.: Наука, 1978. 256 с.
- [13] Shan M.B., Elliot D.S., McCallion P., Gilbody H.B. // J. Phys. 1988. B21. P. 2751–2761.