

УДК 533.9

Вторичная ион-электронная эмиссия с обеих поверхностей тонких металлических пленок

В. П. Журенко, С. И. Кононенко, В. И. Муратов
Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, г. Харьков, Украина

В. И. Карась

Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт", г. Харьков, Украина

Экспериментально исследован механизм вторичной электронной эмиссии (ВЭЭ), индуцированной быстрыми легкими ионами с обеих поверхностей тонких металлических фольг. В экспериментах измерен коэффициент ВЭЭ, индуцированной α -частицами из Al, Cu, Ni на прострел γ_F и на отражение γ_B при одной и той же энергии ионов. Показано, что коэффициент $R = \gamma_F / \gamma_B$ составил $1,69 \pm 7\%$ для исследуемых материалов. Установлено, что поток энергии, переданной быстрым ионом электронам среды, движется вперед в $\sim 1,7$ раза быстрее, чем в противоположном направлении.

Известно, что прохождение быстрой заряженной частицы через вещество приводит к передаче части ее кинетической энергии электронам среды. Движущийся в веществе ион теряет свою энергию в результате двух типов соуда-

рений: далеких и близких [1]. При далеких соударениях рождаются медленные электроны, при близких соударениях рождаются быстрые δ -электроны, которые при дальнейших столкновениях производят медленные электроны в результате каскадного процесса. Медленные электроны движутся изотропно, в то время как быстрые движутся преимущественно в направлении движения иона. Хотя количество быстрых электронов мало, энергия, переносимая ими, в случае протонов и α -частиц примерно равна энергии, теряемой в далеких соударениях [2]. Следует заметить, что движущийся в веществе ион увлекает за собой некоторые электроны, которые носят название "электроны сопровождения" либо "конвойные". Скорость этих электронов равна скорости иона и имеет то же направление [3]. Поскольку значительная часть энергии иона передается электронам, движущимся вперед, по ходу движения первичной частицы, то поток энергии, диссипированной ионом в веществе в направлении его движения, больше, чем в противоположном.

Часть электронов, приведенных в движение ионом, может покинуть твердое тело через поверхность (эмиттироваться). Эмиссию по направлению движения первичного иона называют эмиссией "вперед" (F) или "на прострел", а в противоположном — "назад" (B) или "на отражение". Чаще всего в экспериментах проводилось изучение коэффициентов ВЭЭ на отражение [4]. В некоторых работах исследовались коэффициенты ВЭЭ и энергетические спектры вторичных электронов с обеих поверхностей тонких фольг, т. е. эмиссия на "прострел" и "отражение" [5–7].

В работе [5] проведены измерения энергетических спектров и электронных выходов с обеих поверхностей тонкой углеродной пленки при бомбардировке протонами 25–250 КэВ. Показано также, что энергетические спектры на прострел отличались от спектров на "отражение", хотя используемая авторами методика была не вполне корректной. Измеренные коэффициенты ВЭЭ на "прострел" γ_F оказались несколько больше, чем на "отражение" γ_B .

А. Кловасом с сотрудниками были проведены широкие экспериментальные исследования электронных выходов с обеих поверхностей тонкой углеродной пленки для 15 сортов бомбардирующих частиц (от $Z = 1$ до $Z = 32$) с различными зарядовыми состояниями и энергиями [6]. Для пучка протонов в широком диапазоне энергий (20 КэВ–7,5 МэВ) наблюдалась слабая зависимость $R = \gamma_F/\gamma_B$ от энергии протонов, а среднее значение R составляло 1,3 [6].

Ранее нами было проведено исследование энергетических спектров электронов вторичной эмиссии, индуцированной ионами гелия [7]. Полученные спектры имеют кусочно-степенной характер с показателями степени, различными на различных энергетических интервалах. Показано, что показатель степени на первом энергетическом интервале s_1 уменьшается с ростом энергетических потерь иона в веществе мишени в обоих случаях: на "прострел" и на "отражение" [7].

В настоящее время считается теоретически и экспериментально доказанным, что для легких ионов коэффициент ВЭЭ пропорционален средним удельным ионизационным потерям иона в веществе dE/dx . В связи с этим целесообразно провести измерения коэффициентов γ на "прострел" и на "отражение" для различных материалов при одной и той же энергии бомбардирующих ионов. В данной работе экспериментально измерены коэффициенты ВЭЭ, индуцированной α -частицами из Al, Cu, Ni на "прострел" γ_F и на "отражение" γ_B при одной и той же энергии ионов, и рассчитаны отношения R , позволяющие оценить потоки энергии в направлении движения первичной частицы и в обратном направлении.

Экспериментальная установка

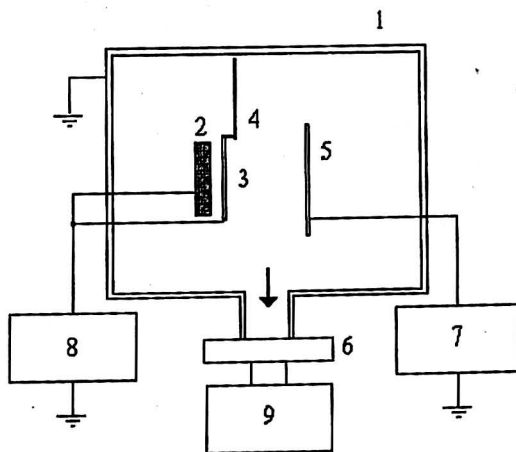
Эксперименты по исследованию вторичной эмиссии проводились на установке, принципиальная схема которой представлена на рис. 1. В вакуумной камере размещались источник первичных частиц, мишень и коллектор. В качестве источника первичных частиц использовался радиоизотопный источник типа МИРЗ-А с изотопом Pu^{239} , который создавал поток α -частиц интенсивностью $I_{\alpha 0} = 4,64 \cdot 10^6$ част./с с энергией 5,15 МэВ. Поток α -частиц пронизывал мишень и попадал на массивный сменный коллектор, изготовленный из того же материала, что и мишень. Эксперименты проводились для мишеней из Al, Cu, Ni, представляющих собой тонкие фольги толщиной 5,6; 2,01 и 0,27 мкм, соответственно, что меньше длины пробега α -частиц с данной энергией в веществе мишени. Радиоизотопный источник находился в электрическом контакте с мишенью. С помощью источника постоянного тока типа Б5-50 между коллектором и мишенью прикладывалось напряжение до 300 В обеих полярностей. В случае положительного напряжения измерялся коэффициент ВЭЭ с коллектора γ_B (эмиссия на отражение), а в случае отрицательного — коэффициент ВЭЭ с наружной поверхности мишени γ_F (эмиссия на "прострел"). Ток ВЭЭ I_k измерялся в коллекторной цепи с помощью электрометрического вольтметра типа ВК2-16. Давление остаточных газов в камере — не хуже 10^{-6} торр. Для настройки аппаратуры между источником и мишенью размещалась подвижная заслонка, перекрывающая поток заряженных частиц.

Коэффициент γ определялся по формуле:

$$\gamma = 2 \frac{k_F I_{\alpha 0} + I_k}{k_F I_{\alpha 0}}, \quad (2)$$

где $I_{\alpha 0}$ — ток α -частиц радиоизотопного источника;
 k_F — доля α -частиц, прошедших мишень.

Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:
 1 — вакуумная камера; 2 — источник первичных частиц; 3 — мишень; 4 — подвижная заслонка; 5 — коллектор; 6 — высоковакуумный клапан; 7 — электрометрический вольтметр типа ВК2-16; 8 — источник постоянного тока типа Б5-50; 9 — магнитоэлектрический насос НДМ 0,4



Экспериментальные результаты и обсуждение

В данной работе экспериментально определены коэффициенты ВЭЭ, индуцированной α -частицами из различных металлов, затем вычислены их отношения. Полученные значения коэффициента R : для Al — 1,57; Cu — 1,69; Ni — 1,82.

Как видно, коэффициенты для различных материалов различаются незначительно (не более чем на 10 %).

В работе [6] приведены электронные выходы для углеродной мишени и различных бомбардирующих ионов. Для разных сортов использованных ионов коэффициенты R имеют разную величину, наиболее близкий к нашему — случай использования ионов лития.

Для Li^{2+} с энергией 4–10 МэВ отношение R составляло $1,7 \div 1,8$ [6], что близко к полученным нами значениям для α -частиц.

Поскольку радиоизотопный источник излучает α -частицы изотропно в полупространство, то прошедшие фольгу толщиной d частицы имели энергию от 0 до $E_{\text{max}} = f(d)$. Следовательно, полученные результаты являются усредненными по энергиям. Как было показано в [5], для энергий бомбардирующих частиц более чем 150 КэВ/атом. ед. массы коэффициент R не зависит от их энергии.

Ранее нами были проведены исследования энергетических спектров ВЭЭ с обеих поверхностей тонких пленок Al, Cu, Ni [7]. Было отмечено, что спектры имеют вид: $N(E) = AE^{-s}$, где s — показатель степени; $E = eU + E_F + e\phi$, где E_F — энергия Ферми, $e\phi$ — работа выхода. На рис. 2 приведены зависимости показателя степени s_1 на первом энергетическом интервале (0–35 эВ) от тормозной способности $S(E)$ для энергий бомбардирующих ионов гелия 1–3 МэВ на “отражение” (см. рис. 2, а) и на “прострел” (см. рис. 2, б). Как видно из рис. 2, показатель степени падает с ростом тормозной способности.

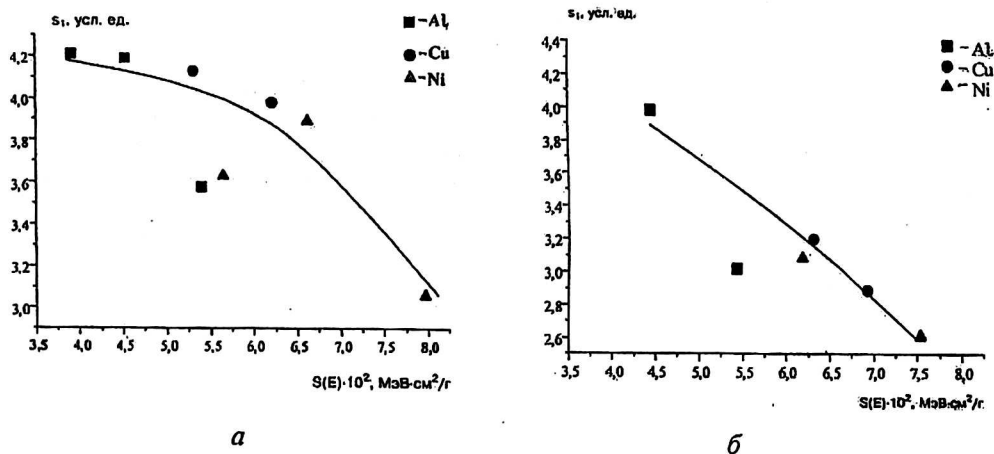


Рис. 2. Зависимость показателя степени s_1 от тормозной способности $S(E)$ иона в случае эмиссии на “отражение” (а) и на “прострел” (б) при бомбардировке ионами He^+ с энергиями 1, 2 и 3 МэВ мишеней из Al, Cu, Ni

Выше отмечено, что поток энергии, переданный ионом электронам среды вперед, превышает таковой в обратном направлении. Следовательно, потери энергии иона при выходе из мишени превышают таковые при входе в мишень (при одной и той же энергии). Поскольку имеются два потока энергии, переданной ионом электронам среды — “вперед” и “назад”, то величину $S(E)$ можно представить как: $S(E) = k_F S(E) + k_B S(E)$, где k_F, k_B — коэффициенты, характеризующие доли энергии, переданной ионом электронам среды вперед и назад, соответственно. С учетом этого на рис. 3 приведена зависимость

показателя степени s_1 от тормозной способности для всех проведенных нами экспериментов — на “прострел” и на “отражение”. При построении кривой тормозные способности, соответствующие экспериментам на “прострел”, были умножены на отношение $k_F/k_B = 1,7$. Как видно из приведенного рисунка, все экспериментальные точки достаточно хорошо укладываются на одну кривую.

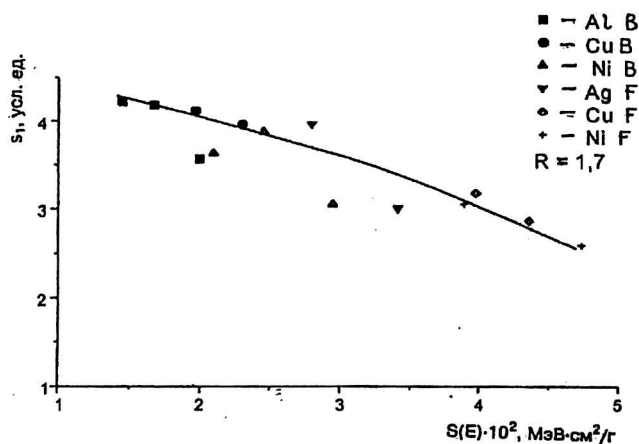


Рис. 3. Зависимость показателя степени s_1 от тормозной способности $S(E)$ иона и на “отражение” и на “прострел” при бомбардировке ионами He^+ с энергиями 1, 2 и 3 МэВ мишеней из Al, Cu, Ni

Заключение

В работе показано, что коэффициент $R = \gamma_F/\gamma_B$ составил $1,69 \pm 7\%$ для исследуемых материалов. Поток энергии, переданной быстрым ионом электронам среды, движется вперед в $\sim 1,7$ раза быстрее, чем в противоположном направлении. Эти результаты хорошо коррелируют с проведенными экспериментальными исследованиями по измерению энергетических распределений электронов ВЭЭ, индуцированной ионами He^+ с обеих поверхностей тонких пленок Al, Cu, Ni.

Литература

1. Sternglass E. J. Theory of secondary electron emission by high-speed ions // Phys. Rev. 1957. V. 108. P. 1.
2. Ковалев В. П. Вторичные электроны. — М.: Энергоатомиздат, 1987.
3. Frischkorn H. J., Groeneveld K. O., Hoffmann D., Koschar P., Lats R., Schade J. Ion-induced electron ejection from solids // Nucl. Instr. and Meth. B. 1983. V. 214. № 1. P. 123—128.
4. Hasselcamp D., Hippler S., Scharmann A. Ion-induced secondary electron spectra from clean metal surfaces // Ibid. 1987. V. 18. P. 561—565.
5. Meckbach W., Braunstein G., Arista N. Secondary electron emission in the backward and forward direction from thin carbon foils traversed by 25—250 KeV proton beams // Journ. of Phys. B. 1975. V. 8. № 14. P. 344—349.
6. Clouvas A., Potiriadis C., Rothard H., Hofmann D., Wunsch R., Groeneveld K. O., Katsanos A., Xenoulis A. C. Role of projectile electrons in secondary electron emission from slid surfaces under fast-ion bombardment // Phys. Rev. B 55. 1997. № 18. P. 12086—12098.
7. Kononenco S. I., Karas I. V., Karas V. I., Muratov V. I. The kinetic electron emission induced by fast ions // 13 th international conference on high-power particle beams. BEAMS-2000, Nagaoka, Japan, June 25—30, 2000. Program and Abstracts. P. 107.

Secondary ion-electron emission from both surfaces of thin metal films

V. P. Zhurenko, S. I. Kononenko, V. I. Muratov
Kharkov National University, Kharkov, Ukraine

V. I. Karas

Kharkov Physical and Technical Institute, Kharkov, Ukraine

We studied experimentally the mechanism of SEE induced by fast light ions from the both surfaces of metal foil targets. We measured the coefficient of SEE from the beam entrance (γ_F) and exit surfaces (γ_B) of Al, Cu, Ni targets bombarded by α -particles with the same energy. It was experimentally shown that the coefficient $R = \gamma_F/\gamma_B$ was estimated to be $1.69 \pm 7\%$ for the materials under study. Thus, the flux of the energy transferred from fast ions to the medium electrons moving in the forward direction is 1.7 times as much as in the backward direction.