

# ВТОРИЧНАЯ ИОННО-ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ ИЗ МЕДНОЙ ФОЛЬГИ НА ПРОСТРЕЛ И НА ОТРАЖЕНИЕ

*С.И. Кононенко, В.П. Журенко, О.В. Калантарьян, В.И. Муратов, В.Т. Колесник*  
*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина*

*Харьков, Украина*

*E-mail: zhurenko@htuni.kharkov.ua*

Экспериментально исследована вторичная эмиссия электронов из медной фольги 5 мкм на прострел и на отражение при нормальном падении пучка протонов с энергией 1,5 МэВ. Измерения были проведены при помощи двух малоапертурных энергоанализаторов с тормозящим полем. Измерены функции распределения электронов по энергиям в интервале 0...90 эВ. Проведен сравнительный анализ распределений электронов по энергиям на прострел и на отражение и обсуждаются возможные причины наблюдаемых различий.

PACS: 34.50.Dy

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что при больших скоростях налетающего иона практически вся его энергия передается в электронную подсистему вещества. При этом передача энергии может происходить различными путями: в близких и дальних соударениях [1]. Первые могут осуществляться при малых прицельных параметрах столкновений с большими значениями переданного импульса, дальним же соответствуют большие параметры удара и малые переданные импульсы. Часть энергии иона может тратиться на возбуждение плазменных колебаний [2].

В близких соударениях рождаются быстрые  $\delta$ -электроны (максимальная скорость  $\delta$ -электронов равна удвоенной скорости налетающего иона), которые в свою очередь при дальнейших столкновениях производят медленные электроны в результате каскадного процесса [3]. Ионы также способны увлекать за собой некоторые электроны среды, так называемые "конвойные". Скорость этих электронов равна скорости иона [3].

При движении иона в среде, которая не является бесконечной, а существует граница раздела с вакуумом, часть образовавшихся неравновесных электронов может преодолеть поверхностный потенциальный барьер и выйти в вакуум. Этот процесс называют вторичной ионно-электронной эмиссией (ВИЭЭ). Для быстрых легких ионов коэффициент ВИЭЭ прямо пропорционален средним удельным ионизационным потерям иона в веществе  $dE/dx$  [4]. Функции распределения электронов ВИЭЭ по энергиям часто аппроксимируют степенными зависимостями вида:

$$f(E) = A \cdot E^s, \quad (1)$$

где  $A$  – константа,  $s$  – показатель степени [4-6].

В экспериментах с тонкими мишенями (толщина которых меньше длины пробега иона в данном веществе) эмиссия электронов происходит как со стороны входа пучка в мишень (на отражение), так и со стороны выхода пучка (на прострел).

В данной работе мы обращаем внимание на особенности ВИЭЭ на прострел и на отражение, наблю-

даемые в экспериментах с медной фольгой при падении на нее пучка быстрых протонов.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследования вторичной ионно-электронной эмиссии проводились на ускорителе Ван де Граафа с пучком ионов водорода. Схема эксперимента представлена на Рис.1. Ионный пучок с энергией 1,5 МэВ, скользящий с помощью системы диафрагм, падал перпендикулярно на поверхность мишени, вызывая эмиссию электронов на отражение и на прострел. Мишень представляла собой тонкую поликристаллическую медную фольгу высокой степени чистоты с толщиной 5 мкм и диаметром 15 мм. Фольга фиксировалась в медной оправке. Диаметр пучка на мишени составлял 3 мм. Ток пучка ионов, регистрируемый цилиндром Фарадея, составлял  $I_{цф}=0,8$  мкА. Цилиндр Фарадея имел следующие размеры:  $\varnothing=20$  мм,  $l=130$  мм. Энергия ионов на выходе из мишени, рассчитанная на основе эмпирической формулы Готта для потерь энергии иона в веществе, была близка к значению 1,04 МэВ [7]. Давление остаточных газов в вакуумной камере составляло не более  $10^{-4}$  Па.

Для регистрации электронов, эмитированных обеими поверхностями мишени, использовались два идентичных малоапертурных цилиндрических энергоанализатора с тормозящим электрическим полем. Они были установлены симметрично относительно плоскости мишени под углом  $53^\circ$  к пучку и на расстоянии 48 мм от эмитирующей поверхности. Геометрические размеры энергоанализатора составляли: длина 65 мм, диаметр 19 мм, входная апертура 3 мм. В металлическом корпусе энергоанализатора размещались три сетки высокой прозрачности ( $>90\%$ ) и коллектор в виде цилиндра Фарадея. Крайние сетки были заземлены, а к центральной прикладывался тормозящий потенциал  $U$  от генератора линейноизменяющегося напряжения в диапазоне от 0 до 90 В с шагом в 1 В. Токи коллекторов энергоанализаторов, регистрирующих эмиссию на прострел  $I_F$  и на отражение  $I_B$ , усиливались соответствующими электрометрическими усилителями, сигналы с которых подавались через аналого-цифровой

преобразователь на компьютер, управляющий экспериментом. Измерительный комплекс позволял для каждого значения тормозящего поля в течение 7 секунд производить усреднение по 100 измерениям тока электронов. Конструкция энергоанализаторов и их электрические измерительные тракты удовлетворяли требованиям, предъявляемым к электрометрическим цепям [8].

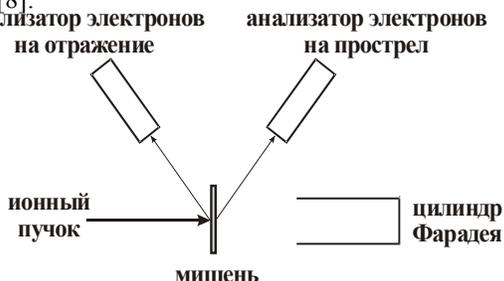


Рис.1. Схема эксперимента

Поскольку соотношение апертуры регистрирующего устройства к расстоянию до мишени много меньше единицы, т.е. анализ электронов происходит в узком телесном угле, то в таком энергоанализаторе анализ происходит по модулю скорости электронов. Следовательно, возможно получить функцию распределения электронов по энергии путем дифференцирования кривых задержки  $I_{F/B}(U)$ .

В случае, когда функция распределения степенная (1), производная тока эмиссии по энергии электронов  $dI/dU$  может быть представлена как:

$$dI/dU = B \cdot E^{s+1}, \quad (2)$$

где  $B$  – константа. Следовательно, в логарифмическом масштабе зависимость (2) представляет собой прямую с тангенсом угла наклона, равным  $s+1$ .

Дифференциальный коэффициент ВИЭЭ можно определить при помощи энергоанализатора в отсутствие тормозящего потенциала по формуле:

$$\gamma_{F/B} = I_{F/B} / I_{ЦФ}. \quad (3)$$

Дифференцирование экспериментальных кривых задержки осуществлялось при помощи ЭВМ.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментов показывают, что вызванная прохождением протонов эмиссия электронов из медной фольги на прострел превышает таковую на отражение при одном и том же угле наблюдения. Используя выражение (3), было получено отношение коэффициентов ВИЭЭ на прострел  $\gamma_F$  и на отражение  $\gamma_B$ :

$$R = \gamma_F / \gamma_B = k \cdot I_F / I_B \approx 1,8,$$

где множитель  $k$  учитывает тот факт, что протоны на выходе из медной фольги имеют энергию отличную от первоначальной энергии пучка. Введение этого множителя возможно благодаря тому, что для протонов в исследуемом диапазоне энергий хорошо соблюдается пропорциональность коэффициента эмиссии и удельных ионизационных потерь энергии иона в веществе [4]. Множитель  $k$  можно определить как отно-

шение удельных ионизационных потерь энергии протонов  $dE/dx$  на входе пучка в мишень и на выходе. В нашем случае эта величина составляла примерно 0,8 (значения  $dE/dx$  были рассчитаны по программе SRIM2003 [9]).

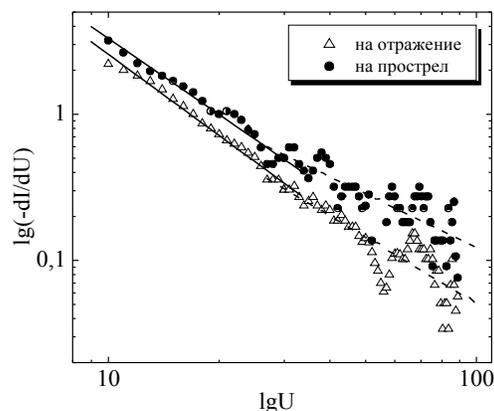


Рис.2. Функции распределения электронов эмиссии по энергиям в двойном логарифмическом масштабе

Отметим, что полученное значение отношения  $R$  для меди весьма близко к значениям, полученным для других сортов легких ионов с энергиями от нескольких килоэлектронвольт до нескольких мегаэлектронвольт и других мишеней, в частности, углерода (см., например, работу [10] и ссылки, приведенные в ней). Так авторами работы [11] для случая нормального падения пучка протонов с энергией до 250 кэВ на тонкую углеродную фольгу было получено отношение интегральных по углу вылета коэффициентов ВИЭЭ на прострел и на отражение близкое к 1,55. Для ионов  $Li^+$  с энергией 4 МэВ и мишени из углерода это отношение, часто называемое в литературе фактором Мэкбаха, было около 1,72 [12]. Нами ранее в работе [13] были представлены результаты экспериментов по исследованию анизотропии потерь энергии быстрых  $\alpha$ -частиц в ряде металлов, которые были проведены путем измерения интегральных по углу вылета  $\gamma_F$  и  $\gamma_B$ . Было показано, что  $\gamma_F / \gamma_B \approx 1,7$ , а, следовательно, потери энергии иона по ходу движения частицы примерно в 1,7 раза превышают таковые для противоположного направления. Результат, полученный в настоящей работе для меди, позволяет предположить, что в случае легких ионов с энергией в несколько мегаэлектронвольт соотношение между  $\gamma_F$  и  $\gamma_B$  слабо изменяется как для интегральных, так и для дифференциальных по углу вылета величин.

Типичной для ВИЭЭ функцией распределения электронов по энергиям является кривая с максимумом при малых энергиях в несколько электронвольт и дальнейшим степенным спадом [4]. В нашем случае функции распределения имели аналогичную структуру. На Рис.2 представлены типичные энергетические распределения электронов, эмитированных из меди, в

двойном логарифмическом масштабе для случая на прострел и на отражение (на рисунке не показаны начальные участки распределений до 10 эВ, где наблюдаются максимумы). Из Рис.2 видно, что участки распределений хорошо аппроксимируются прямыми с различными углами наклона (непрерывные и прерывистые прямые линии). Это указывает на кусочно-степенной характер распределений с показателями степени  $s$ , величина которых варьируется от -2 до -3. Точки перегиба, в которых меняются значения показателей степени, лежат в области энергий 25...30 эВ как для эмиссии на прострел так и на отражение. Кусочно-степенная зависимость распределений электронов по энергиям наблюдалась также для ряда других металлов [4-6, 14, 15].

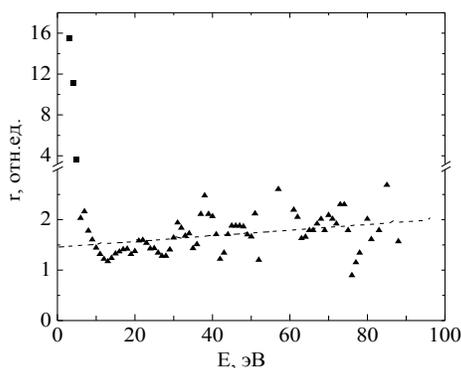


Рис.3. Отношение функций распределения электронов по энергиям, индуцированным протонами на прострел и на отражение

Чтобы выявить различия в функциях распределения электронов по энергиям на прострел и на отражение, нами было найдено их отношение  $r = (dl/dU)_P / (dl/dU)_B$  (Рис.3). Величина  $r$  превышает единицу на всем исследуемом диапазоне энергий электронов. Эта особенность является вполне закономерной, поскольку наблюдалась и в других экспериментах на прострел и на отражение. Например, для нормального падения атомарного и молекулярного пучков ионов водорода с энергией 0,8 МэВ/а.е.м. на тонкую фольгу Au интенсивность спектра на прострел (угол наблюдения  $0^\circ$ ) превышала приблизительно в два раза интенсивность спектра на отражение (угол наблюдения  $180^\circ$ ) [16].

Теперь обратим внимание на характер зависимости  $r(E)$ . Значительные отличия в распределениях наблюдаются в области максимума (участок до 10 эВ), который часто называют “каскадным”. Для электронов с энергией более 10 эВ в поведении величины  $r$  наблюдается медленный рост. Для наглядности на Рис.3 также показан прерывистой линией результат линейной аппроксимации отношения  $r$  в интервале 10...90 эВ (уравнение прямой  $y = 1,455 + 0,006 \cdot x$ ). Как легко видеть, доминирование электронов на прострел увеличивается по мере роста энергии электронов в распределении. Аналогичная тенденция была отмечена в рабо-

те [11], хотя ее авторы отмечали более сильную степень доминирования.

Наблюдаемое доминирование эмиссии на выходе пучка из фольги над эмиссией на входе может объясняться асимметрией углового распределения электронов, рожденных внутри металла. Поскольку при движении быстрого иона основным источником генерации электронов внутри вещества являются ионизационные потери энергии иона, то асимметрия распределения электронов указывает на анизотропию потерь энергии движущейся в веществе частицей. Как хорошо известно [см., например, 17], в случае эмиссии на прострел имеется группа быстрых конвойных и  $\delta$ -электронов, которые уносят значительную часть энергии, переданную ионом электронам. Обладая достаточно большой энергией, эти электроны уже сами могут стать причиной появления новых неравновесных электронов и привести к развитию каскадного процесса соударений. Направленное движение конвойных и  $\delta$ -электронов, по-видимому, является основной причиной анизотропии потерь энергии иона в веществе. Эта анизотропия проявляется во вторичном эффекте эмиссии при регистрации электронов на прострел и на отражение.

#### 4. ВЫВОДЫ

Проведенные экспериментальные исследования индуцированной быстрыми протонами с обеих поверхностей тонкой медной фольги вторичной электронной эмиссии в малом телесном угле, продемонстрировали различие эмиссионных характеристик на прострел и на отражение. Различия связываются с анизотропией потерь энергии ионом в веществе, обусловленной направленным движением конвойных и  $\delta$ -электронов, которые обладают значительными скоростями. Полученные результаты хорошо коррелируют с данными проведенных ранее эмиссионных исследований для быстрых легких ионов, в которых измерения проводились интегрально по углу вылета электронов.

Увеличение доли быстрых электронов в функции распределения в случае эмиссии на прострел, по-видимому, также обусловлено анизотропией потерь энергии ионом в веществе.

Авторы выражают благодарность В.И. Карасю за постоянное внимание к работе и ценные замечания при обсуждении результатов.

Работа частично поддержана проектом УНТЦ #3473.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. E.J. Sternglass. Secondary emission of electrons by ion impact on surfaces. // *Phys. Rev.* 1957, v.108, №1, p.1-12.
2. M. Rosler. Plasmon effects in the particle-induced kinetic electron-emission from solids // *Scanning Microsc.* 1994, v.8, p.3-22.
3. H.J. Frischkorn et.al. Ion induced electron ejection from solids // *Nucl. Instr. and Meth.* 1983, v.214,

- p.123-128.
4. D. Hasselkamp. Secondary emission of electrons by ion impact on surfaces // *Comments At. Mol. Phys.* 1988, v.21, p.241-255.
  5. D. Hasselkamp, S. Hippler, A. Scharmann Ion-induced secondary electron spectra from clean metal surfaces // *Nucl. Instr. and Meth. B.* 1987, v.18, p.561-565.
  6. Е.Н. Батракин и др. Исследование вторичной эмиссии из тонких пленок Al, Cu, Be, индуцированной пучком протонов 1 МэВ // *ЖЭТФ.* 1985, т. 89, № 3(9), с.1098-1100.
  7. Ю.В. Готт. *Взаимодействие частиц с веществом в плазменных исследованиях.* М.: "Атомиздат", 1978, 272 с.
  8. А.М. Илюкович. *Техника электрометрии.* М.: "Энергия", 1976, с.399.
  9. Программа SRIM2003, см. www.SRIM.org, J.F. Ziegler. SRIM-2003. // *Nucl. Instr. And Meth. in Phys. Res. B.* 2004, v.219-220, p.1027-1036.
  10. H. Rothard, J. Schou, K.O. Groeneveld. Projectile and charge- state- dependent electron yields from ion penetration of solids as a probe of preequilibrium stopping power // *Phys. Rev. A.* 1992, v.45, p.1701-1710.
  11. W. Meckbach, G. Braunstein, N. Arista. Secondary-electron emission in the backward and forward directions from thin carbon foils traversed by 25...250 keV proton beams // *J. Phys. B.* 1975, v.8, №14, p.L344-L349.
  12. A. Clouvas et.al. Role of projectile electrons in secondary electron emission from solid surfaces under fast-ion bombardment // *Phys. Rev. B.* 1997, v.55, p.12086-12098.
  13. В.П. Журенко, С.И. Кононенко, В.И. Карась, В.И. Муратов. Диссипация энергии быстрой заряженной частицей в твердотельной плазме // *Физика плазмы.* 2003, т.29, №2, с.150-156.
  14. S.I. Kononenko et. al. Energy distributions of electrons in stainless steel bombarded by fast ions // *Вісник Харківського університету. Сер. фіз. "Ядра, частинки, поля".* 2004, №619, вып.1(23), с.119-122.
  15. N.V. Sidorenko, S.I. Kononenko, V.P. Zhurenko. Mean energy of electrons emitted from solids under swift light ion bombardment // *Вісник Харківського університету. Сер. фіз. "Ядра, частинки, поля".* 2005, № 627, вып. 1(26), с.81-84.
  16. H. Rothard et.al. Secondary electron velocity spectra and angular distributions from ions penetrating thin solids // *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.* 1990, v.00, p.1-5.
  17. H. Rothard et.al. Target-thickness-dependent electron emission from carbon foils bombarded with swift highly charged heavy ions // *Phys. Rev. A.* 1995, v.51, № 4, p.3066-3078.

#### **FORWARD AND BACKWARD SECONDARY ION-INDUCED ELECTRON EMISSION FROM COPPER FOIL**

*S.I. Kononenko, V.P. Zhurenko, O.V. Kalantaryan, V.I. Muratov, V.T. Kolesnik*

Forward and backward secondary electron emission induced by normal incidence of 1.5 MeV protons from 5 μm copper foil was experimentally studied. Measurements were carried out by means of two low-aperture retarding field energy analyzers. Electron distribution functions were measured in 0...90 eV energy interval. The comparative analysis of electron distribution for forward and backward cases was performed and possible reasons for the differences observed were discussed.

#### **ВТОРИННА ІОННО-ЕЛЕКТРОННА ЕМІСІЯ ІЗ МІДНОЇ ФОЛЬГИ НА ПРОСТРІЛ І НА ВІДБИТТЯ**

*С.І. Кононенко, В.П. Журенко, О.В. Калантар'ян, В.І. Муратов, В.Т. Колесник*

Експериментально досліджена вторинна емісія електронів із мідної фольги 5 мкм на простріл і на відбиття при нормальному падінні пучка протонів з енергією 1,5 МеВ. Вимірювання були проведені за допомогою двох малоапертурних енергоаналізаторів з гальмуючим полем. Виміряні функції розподілу електронів за енергіями у інтервалі 0...90 еВ. Проведено порівнювальний аналіз розподілу електронів за енергіями на простріл і на відбиття, обговорюються можливі причини спостережених різниць.