

ОСОБЕННОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЭЛЕКТРОНОВ ВТОРИЧНОЙ ЭМИССИИ, ИНДУЦИРОВАННОЙ ИОНАМИ H^+ ИЗ МЕТАЛЛОВ

*В.П. Журенко, С.И. Кононенко, О.В. Калантарьян, Ж.С. Кононенко
Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
Харьков, Украина*

E-mail: kononenko@univer.kharkov.ua

Экспериментально исследованы энергетические распределения электронов в диапазоне 0...100 эВ, индуцированные ионами H^+ с энергией 1...2,25 МэВ. Мишенями служили фольги из серебра и титана, а также массивный образец нержавеющей стали. Распределения хорошо аппроксимируются степенными функциями на двух участках с точкой перегиба в области 20...35 эВ. Выявлены зависимости показателей степени и средней энергии электронов в распределениях от удельных ионизационных потерь энергии ионом. Эти изменения связываются с влиянием плазменной ионизации атомов вещества и возможным установлением «универсальной функции» распределения высокоэнергетичных электронов, показатель степени которой не зависит от структуры и мощности источника и стока.

1. ВВЕДЕНИЕ

Эмиссия электронов из твердого тела при бомбардировке ионами – фундаментальный эффект взаимодействия иона с поверхностью. Электроны, вышедшие с поверхности материала, несут информацию о процессах, происходящих внутри твердого тела. Расширение областей применения ионных пучков мегаэлектронвольтовых энергий в науке и технике требует более детального представления о процессах, происходящих на поверхности и в объеме твердого тела при ионной бомбардировке.

В течение последних лет была проведена большая работа, направленная на исследование ионно-индуцированной эмиссии нейтральных и заряженных атомов и молекул, значительно проясняющая суть физических процессов, происходящих на эмиттирующей поверхности. Вопросы, связанные с ионно-электронной эмиссией, изучены фрагментарно, и отсутствует понимание ряда качественных эффектов, происходящих при ионной бомбардировке. Это утверждение особенно справедливо по отношению к экспериментальному и теоретическому аспектам так называемой кинетической вторичной ионно-электронной эмиссии (ВИЭЭ). Экспериментальные исследования кинетической эмиссии, предпринятые рядом авторов [1-3], касаются, в основном, измерений коэффициентов вторичной эмиссии γ (количества вторичных электронов, приходящихся на один падающий ион) для различных пар ион-мишень.

Значительный интерес к изучению энергетических спектров ионно-электронной эмиссии обусловлен тем, что форма и структура таких спектров является значительно более информативной характеристикой, чем обычно измеряемые коэффициенты.

В ряде экспериментальных работ показано, что электроны, выбитые из металла ионами, распределены по энергиям по степенному закону [4, 5]. Авторы работы [6] указывают, что в области энергий эмиттируемых электронов свыше 50 эВ энергетическое распределение может быть аппроксимировано степенным законом $N(E) \sim E^{-s}$, где E – энергия вторичных элек-

тронов, s – показатель степени, принимающий значения от 1,5 до 3,0 для различных пар ион-мишень и различных энергий первичного пучка. Авторы [6] использовали нормировку $N(E)$ на электронный выход γ , т.е. $\int N(E)dE = \gamma$. Отмечается следующий факт: для легких ионов (H_1^+ , He^+) показатель степени s зависит от энергии ионов таким образом, что при росте энергии первичного пучка относительная доля вторичных электронов ($s > 50$ эВ) также увеличивается. Используя в экспериментах пучки протонов с энергиями около 1 МэВ, авторы работы [7] обращают внимание на кусочно-степенную структуру энергетических спектров, т.е. функция распределения вторичных электронов имеет степенную асимптотику с различными показателями степени в различных энергетических интервалах.

Теоретические исследования неравновесной плазмы и плазмоподобных систем показали, что в таких условиях возможно формирование степенных функций распределения частиц [8]. Степенные решения кинетических уравнений как Больцмана, так и Ландау впервые были найдены в работах [9]. Техническим средством для решения уравнений Больцмана были либо использование преобразований, основанных на свойствах симметрии интеграла столкновений, либо прямые вычисления интеграла столкновений для степенных функций распределения.

Детальное рассмотрение процессов, происходящих в треке высокоэнергетичного иона, движущегося в плазме металла, показало, что ситуация близка к теоретически рассмотренному случаю неравновесных стационарных распределений электронов с удовлетворением критериев, приведенных в [10]. В случае, когда взаиморасположение источника и стока, а также их интенсивности удовлетворяют условиям, при которых для чисел заполнения n_s выполнено неравенство $n_s(3p_F) \gg 10^3$, неравновесное распределение электронов близко к универсальному [11]. Условие универсальности строго выполняется не во всех экспериментальных случаях. Чаще всего наблюдается зависимость показателей степени неравновесных

распределений от мощности источника частиц [10].

В связи с этим целесообразно выяснить влияние различных факторов на структуру и показатель степени неравновесной функции распределения электронов на различных энергетических интервалах.

Изучение неравновесных распределений электронов по энергии в твердом теле при прохождении быстрых ионов невозможно без выяснения механизмов диссипации энергии движущейся заряженной частицей при взаимодействии с веществом. Существуют два основных канала диссипации энергии. В случае движения быстрого нерелятивистского иона в веществе может происходить возбуждение плазмонов [12-14]. Другим каналом может являться передача энергии отдельным электронам при столкновении, что приводит к ионизации атомов. В свою очередь, распространяющиеся в веществе плазмоны также могут приводить к ионизации атомов в полях плазменных колебаний и созданию неравновесных электронов. Оба канала вносят свой вклад в формирование неравновесного распределения электронов.

Целью работы было изучение вторичной электронной эмиссии на отражение из ряда металлов, индуцированной пучком быстрых ионов H^+ в диапазоне энергий 1...2,25 МэВ. В работе анализируется влияние мощности источника (удельных ионизационных потерь энергии ионов) на особенности энергетических распределений электронов эмиссии.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперименты проводились с пучками ионов H^+ на электростатическом ускорителе Ван-де-Граафа (ННЦ ХФТИ). Измерения энергетических распределений электронов кинетической ВИЭЭ проводились для энергий бомбардирующих ионов от 1,00 до 2,25 МэВ с шагом 0,25 МэВ. Экспериментальная установка более подробно описана в нашей работе [15]. В качестве мишеней использовались фольги из Ag и Ti, а также массивный образец нержавеющей стали 12X18H10T. Диаметр каждой мишени составлял 10 мм, а диаметр пучка на мишени - 3 мм. Пучок ионов, сколиммированный с помощью системы диафрагм, падал на мишень и вызывал с ее поверхности ВИЭЭ на отражение. Плоскость мишени была перпендикулярна оси пучка. Плотность ионного тока на мишени была не выше, чем 30 мкА/см^2 . Давление остаточных газов в вакуумной камере не превышало 10^{-4} Па.

Электроны, эмиттированные с поверхности мишени, собирались на сферическом электростатическом энергоанализаторе, состоящем из двух полусфер с радиусом 100 мм. Мишень на держателе помещалась в центре энергоанализатора. Тормозящее электрическое поле создавалось между мишенью и двумя полусферами. Энергетические распределения измерялись в интервале от 0 до 100 эВ с шагом в 1 эВ. Поскольку радиус энергоанализатора значительно превышал диаметр пучка на мишени, то распределение поля было близко к сферическому. Распределения электронов ВИЭЭ по энергии были получены путем дифференцирования кривых задержки.

Для калибровки измерительной системы за задней полусферой располагался цилиндр Фарадея,

позволяющий непосредственно регистрировать ток пучка ионов при выведенной из-под пучка мишени.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования энергетических распределений ВИЭЭ показывают, что для всех начальных энергий H^+ распределения электронов в интервале энергий от 5 до 100 эВ имеют неравновесный характер и хорошо аппроксимируются степенными функциями вида: $f(E) = A \cdot E^{-s}$, где A — константа, s — показатель степени. Типичное распределение, формируемое в Ti при прохождении пучка H^+ с энергией 1,25 МэВ, представлено в двойном логарифмическом масштабе на Рис.1. Как видно из рисунка, распределение имеет кусочно-степенной характер. На экспериментальной кривой наблюдаются два линейных участка в интервалах энергий электронов 5...30 эВ и 30...100 эВ, которым соответствуют различные показатели степени $s_1 = 3,3$ и $s_2 = 2,6$. Кусочно-степенной характер распределений с точкой перегиба, варьирующейся в диапазоне от 20 до 35 эВ, наблюдался для всех исследованных металлов и энергий ионов. На Рис.1 также показана средняя энергия электронов E_{cp} в распределении, которая вычислялась как [16]

$$E_{cp} = \frac{\int E f(E) \sqrt{E} dE}{\int f(E) \sqrt{E} dE} \quad (1)$$

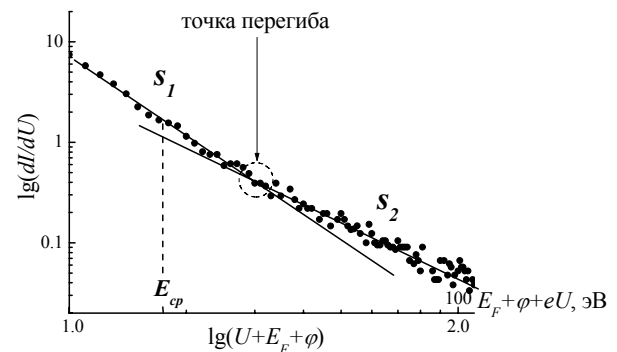


Рис.1. Типичное распределение, формируемое в Ti при прохождении пучка H^+ с энергией 1,25 МэВ, представленное в двойном логарифмическом масштабе

Наряду с механизмом образования электронов за счет ионизации атомов вещества движущимся быстрым ионом в парных соударениях, заметную роль может играть рождение неравновесных электронов за счет ионизации в полях плазменных колебаний [12]. Существование такого дополнительного источника неравновесных электронов может проявляться на формируемом распределении. Кусочно-степенная зависимость энергетических распределений неравновесных электронов в металлах, а именно, наличие двух интервалов может быть связано, по нашему мнению, с двумя различными механизмами передачи энергии движущимся быстрым ионом электронной подсистеме: 1) возбуждением плазмонов с последующей ионизацией атомов вещества в полях коллективных плазменных колебаний; 2) неупругими столкновениями, приводящими к непосредственной ионизации.

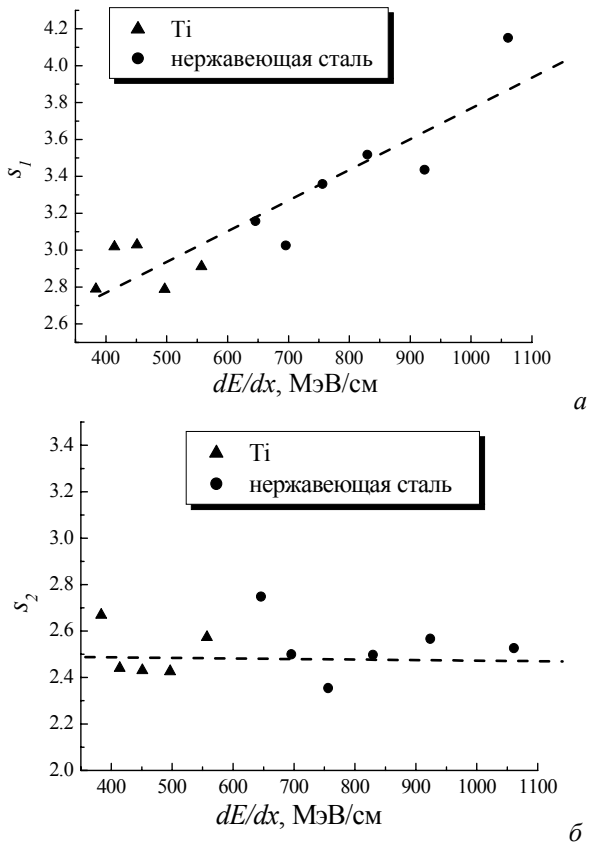


Рис.2. Зависимости показателей степени функции распределения в различных энергетических интервалах s_1 (а) и s_2 (б) от удельных ионизационных потерь иона в веществе

Теоретическое рассмотрение кильватерных волн пространственного заряда при движении быстрого иона в веществе показало, что потери энергии иона в канале зависят от скорости движения частицы как

$$\Delta E_k / \Delta E = \ln(v / 10v_0) / 2 \ln(v / v_0), \quad (2)$$

где ΔE_k – потери энергии на возбуждение колебаний кильватерной плотности заряда, ΔE – полные потери энергии быстрой заряженной частицы в твердотельной плазме, v_0 – скорость электрона в основном состоянии атома водорода.

Проведенная математическая обработка экспериментально полученных спектров вторичной эмиссии по методике, подробно описанной в [10], позволила рассчитать показатели степени функции распределения в различных энергетических интервалах s_1 и s_2 . Полученные результаты приведены на Рис.2. Как видно из приведенного рисунка, абсолютная величина показателя степени для медленных электронов s_1 растет по мере увеличения удельных ионизационных потерь иона. Представленная кривая может быть аппроксимирована линейной зависимостью. Показатель степени s_2 практически не изменяется в исследуемом диапазоне.

Согласно формуле Бета-Блоха,

$$-dE/dx = (4\pi Z_1^2 e^4 / mv^2) Z_2 N \ln(2mv^2 / I), \quad (3)$$

(m – масса электрона, Z_1 – заряд налетающего иона, Z_2 – заряд атомов тормозящей среды, N – плотность атомов мишени, I – средний потенциал возбуждения атомов тормозящей среды, v – скорость иона), в области высоких энергий налетающих частиц ионизационные потери уменьшаются как v^{-2} . Относитель-

ная доля потерь энергии на возбуждение кильватерной плотности заряда, согласно формуле (2), также уменьшается со скоростью иона, что и приводит к уменьшению эффективности «плазмонного» механизма создания вторичных электронов. В экспериментальных результатах это проявляется как относительное увеличение доли медленных электронов, рожденных в далеких соударениях быстрого иона с атомами вещества (см. Рис.3).

Отмеченная зависимость показателя степени свидетельствует о том, что количество электронов с энергиями большими, чем энергия объемного плазмона, возрастает для больших скоростей иона. Предположительно, происходит перераспределение потерь энергии между каналами диссипации, в результате которого плазмонный механизм становится менее эффективным по сравнению с механизмом потерь энергии в непосредственных соударениях. Авторами работы [17] было теоретически показано, что при увеличении энергии налетающей частицы относительная роль механизмов возбуждения связанных электронов в непосредственных соударениях и за счет оже-процессов (электроны внутренних оболочек) возрастает по сравнению с механизмами возбуждения электронов проводимости в результате распада объемных плазмонов, генерируемых налетающей частицей. Отмеченная тенденция согласуется с нашими предположениями об уменьшении относительного вклада плазмонного механизма в создание неравновесных электронов с ростом скорости иона.

Показатель степени на втором энергетическом интервале слабо зависит от удельных ионизационных потерь иона (мощности источника) (см. Рис.2,б). Эта ситуация более соответствует случаю универсальности неравновесного распределения, введенному в работах [11].

Наблюдаемые зависимости показателей степени от удельных ионизационных потерь иона приводят к тому, что в энергетическом распределении происходит изменение соотношения между низкоэнергетичными и высокоэнергетичными электронами (условное разделение электронов в распределении введено лишь для акцентирования изменения формы распределения с изменением удельных ионизационных потерь иона). Эта тенденция особенно хорошо проявляется на средней энергии электронов в распределении (Рис.3). При увеличении удельных энергетических потерь иона средняя энергия электронов в распределении смещается в сторону меньших значений. Эти результаты находятся в согласии с данными других авторов. Например, в работе [5] указывается на зависимость показателя степени прямых, которыми аппроксимируют энергетические распределения ВИЭЭ на отражение в области энергий электронов 50...200 эВ, от энергии в случае легких ионов. Проанализировав результаты для целого ряда образцов, они пришли к выводу, что с увеличением энергии возрастает относительная доля вторичных электронов с энергиями выше 50 эВ. С ростом энергии ионов в диапазоне от 75 до 900 кэВ наблюдалось увеличение средней энергии электронов в низкоэнергетическом спектре (0...200 эВ) ВИЭЭ для мишени из золота, что совпадает с нашими результатами.

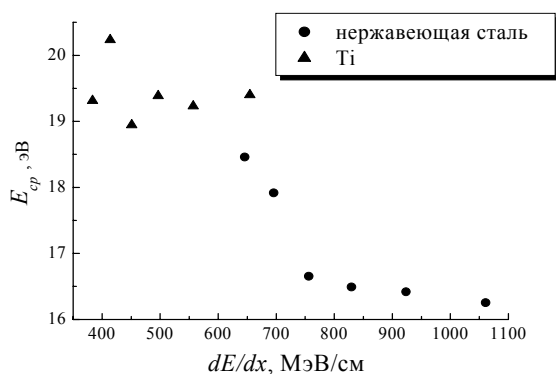


Рис.3. Зависимость средней энергии в распределении электронов для титана от удельных ионизационных потерь иона в веществе

Поскольку спектр имеет кусочно-степенную структуру с различными показателями степени на различных энергетических интервалах, нами была введена условная точка перегиба (см. Рис.1), т.е. область энергий на спектре, где происходит резкое изменение показателя степени. На Рис.4 представлена зависимость точки перегиба для титановой мишени от удельных ионизационных потерь протонов в веществе. Поведение точки перегиба хорошо укладывается в общую схему влияния удельных ионизационных потерь на особенности функций распределения электронов вторичной эмиссии.

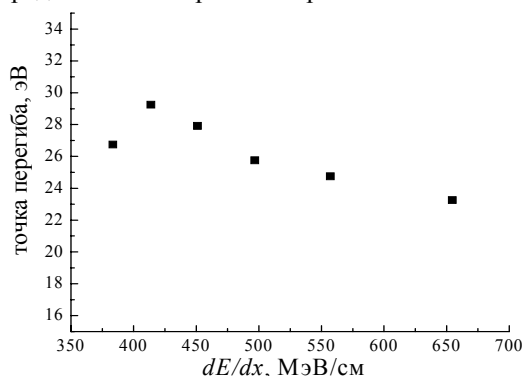


Рис.4. Зависимость положения точки перегиба кусочно-степенной функции распределения электронов для титана от удельных ионизационных потерь иона в веществе

ВЫВОДЫ

Экспериментально измерены энергетические распределения электронов вторичной ионно-электронной эмиссии на отражение при облучении некоторых металлов пучком быстрых ионов водорода и проанализирована их функциональная зависимость. Установлен кусочно-степенной характер распределений в интервале энергий электронов от 5 до 100 эВ, а именно, установлены два энергетических интервала с отличающимися показателями степени и так называемой точкой перегиба в области 20...35 эВ.

Выявлены зависимости показателя степени на первом энергетическом интервале и средней энергии электронов в распределениях от энергии иона. Эта зависимость показателя степени для металлов показывает, что при увеличении удельных ионизационных потерь иона в энергетическом распределении происходит изменение соотношения между низкоэнергетичными и высокоэнергетичными электронами. При этом средняя энергия электронов в распределении изменяется.

Указанное выше изменение связывается с уменьшающимся с ростом удельных ионизационных потерь влиянием плазменной ионизации атомов вещества и возможным установлением универсальной функции распределения высокоэнергетичных электронов, показатель степени которой не зависит от структуры и мощности источника и стока.

В заключение, авторы считают своим приятным долгом поблагодарить Караса В.И. за постоянное внимание к работе и плодотворное обсуждение полученных результатов. Кроме того, авторы выражают благодарность коллективу обслуживающего персонала ускорителя ВГ-5 ННЦ ХФТИ, а также студентам Н. Сидоренко, О. Болотову, Ю. Москвитиной за участие в математической обработке экспериментального материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Rothard, M. Jung, J.-P. Grandin, B. Gervais, M. Caron, A. Billebaud, A. Clouvas, R. Wunsch, C. Thierfelder, K.O. Groeneveld. Heavy ion track potentials in solids probed by electron yield measurements // *Nucl. Instr. and Meth. B.* 1997. v.125, p.35-40.
2. Н. Rothard. Electron ejection from solids by heavy ions at high energies (1-100 MeV/u) // *Nucl. Instr. and Meth. B.* 1998, v.146, p.1-10.
3. Neugebauer, R. Wuensch, T. Jalowy, K.O. Groeneveld, H. Rothard, A. Clouvas, C. Potiriadis. Secondary electron emission near the electronic stopping power maximum // *Phys. Rev. B.* 1999, v.59, p.11113-11116.
4. Е.Н. Батракин, С.И. Кононенко, В.И. Муратов. Об экспериментальном исследовании вторичной электронной эмиссии, индуцированной α -частицами из медной пленки // *УФЖ.* 1985, т.30, №8, с.1185-1186.
5. D. Hasselkamp. Secondary emission of electrons by ion impact on surfaces // *Comments At. Mol. Phys.* 1988, v.21, p.241-255.
6. 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.
7. Е.Н. Батракин, И.И. Залюбовский, В.И. Карась, С.И. Кононенко, В.Н. Мельник, С.С. Моисеев, В.И. Муратов. Исследование вторичной эмиссии из тонких пленок Al, Cu, Be, индуцированной пучком протонов 1 МэВ // *ЖЭТФ.* 1985, т.89, № 3(9), с.1098-1100.
8. В.И. Карась, С.С. Моисеев, В.Е. Новиков. Неравновесные стационарные распределения частиц в твердотельной плазме // *ЖЭТФ.* 1976, т.71, №4(10), с.1421-1433.
9. А.В. Кац, В.М. Конторович, С.С. Моисеев, В.Е. Новиков. Степенные решения кинетического уравнения Больцмана, описывающие распре-

- деления частиц с потоками по спектру // *Письма в ЖЭТФ*. 1975, т.21, №1, с.13-16.
10. В.М. Балебанов, В.И. Карась, И.В. Карась и др. Неравновесные стационарные распределения электронов с потоком по спектру в твердотельной плазме и их использование // *Физика плазмы*. 1998, т.24, №9, с.789-807.
 11. В.И. Карась, С.С. Моисеев, А.П. Шуклин. Универсальные неравновесные распределения частиц в конечных энергетических интервалах // *УФЖ*. 1980, т.25, №5, с.820-825.
 12. Н.П. Калашников, В.С. Ремизович, М.И. Рязанов. *Столкновения быстрых заряженных частиц в твердых телах*. М.: «Атомиздат», 1980, 272 с.
 13. R.A. Baragiola, C.A. Dukes, P. Riccardi. Plasmon excitation in ion-solid interactions // *Nucl. Instr. and Meth. B*. 2001, v.182, p.73-83.
 14. M.F. Burkhard, H. Rothard, K.-O.E. Groeneveld. Single-electron deexcitation of volume plasmons induced by heavy ions in thin solid foils // *Phys. Stat. Sol. B*. 1988, v.147, p.589-592.
 15. S.I. Kononenko, V.M. Balebanov, V.P. Zhurenko, O.V. Kalantar'yan, V.I. Karas', V.T. Kolesnik, V.I. Muratov, V.E. Novikov, I.F. Potapenko, R.Z. Sagdeev. Nonequilibrium Electron Distribution Functions in a Semiconductor Plasma Irradiated with Fast Ions // *Plasma Physics Reports*. 2004, v.30, №8, p.671-686.
 16. 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, в.1(26), с.81-84.
 17. M. Rosler, W. Brauer. Contribution of core states to the emission properties in the particle-induced electron emission of metals // *Nucl. Instr. and Meth. B*. 1992, v.67, p.641-645.

Статья поступила в редакцию 31.05.2010 г.

FEATURES OF ENERGY DISTRIBUTIONS OF SECONDARY ELECTRON EMISSION INDUCED BY H^+ IONS FROM METALS

V.P. Zhurenko, S.I. Kononenko, O.V. Kalantar'yan, Zh.S. Kononenko

Energy distributions of electrons induced by 1...2,25 MeV H^+ ions have been experimentally studied for 0...100 eV energy interval. The targets were foils of silver, titanium and bulk specimen made from stainless steel. The distributions are approximated with high accuracy by power-law functions with two energy intervals and flex point near 20...35 eV. The dependences of power indexes and average energy of electrons in the distributions on specific ionization loss of ions have been found. Influence of atom ionization by plasmons and possible formation of «universal» distribution function of high energy electrons (power index of function has no dependence on structure and power of source and sink) are the reasons for these dependences.

ОСОБЛИВОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РОЗПОДІЛІВ ЕЛЕКТРОНІВ ВТОРИННОЇ ЕМІСІЇ, ЯКА ІНДУКОВАНА ІОНАМИ H^+ З МЕТАЛІВ

В.П. Журенко, С.І. Кононенко, О.В. Калантар'ян, Ж.С. Кононенко

Експериментально досліджені енергетичні розподіли електронів в діапазоні 0...100 eВ, що індуковані іонами H^+ з енергією 1...2,25 MeВ. Як мішені використовувалися фольги з срібла та титану, а також масивний зразок з нержавіючої сталі. Розподіли добре апроксимуються степеневими функціями на двох інтервалах з точкою перегину близько 20...35 eВ. Виявлено залежності показників степеня і середньої енергії електронів в розподілі від питомих іонізаційних втрат іона. Ці зміни пов'язуються з впливом плазмонної іонізації атомів речовини і можливим формуванням «універсальної» функції розподілу високо енергетичних електронів, показник степеня якої не залежить від структури і потужності джерела і стоку.