

## **МНОГОЭЛЕКТРОННАЯ ВТОРИЧНАЯ ЭМИССИЯ ТОНКИХ ФОЛЬГ, БОМБАРДИРУЕМЫХ ПУЧКАМИ УСКОРЕННЫХ АТОМОВ**

*М.А.Грунтман, А.А.Козочкина, В.Б.Леонас*

Систематически исследована статистика вторичной электронной эмиссии тонкой ( $\sim 40 \text{ \AA}$ ) углеродной фольги, бомбардируемой атомами H, He, O, S с энергиями от десяти до нескольких сотен кэВ. Экспериментально обнаружено проявление двух механизмов генерации вторичных электронов эмиссии.

Явление вторичной электронной эмиссии (ВЭ), вызванной бомбардировкой твердой мишени энергичными атомными частицами, изучается уже много лет <sup>1</sup>. Однако развитые феноменологические теории явления <sup>2-3</sup> не способны предсказывать дифференциальные (по числу, энергии, углу вылета) вероятности выхода электронов в условиях бомбардировки мишени пучком известного состава и энергии, что стимулирует постановку новых исследований многоэлектронной вторичной эмиссии (МВЭ).

В настоящей работе ставилась задача систематического изучения дифференциальных (по числу  $k = 0, 1 \dots$  выходящих электронов) вероятностей МВЭ, вызванной бомбардировкой тонкой углеродной фольги (толщиной  $\sim 40 \text{ \AA}$ ) пучками атомов. Исследовались  $P_k(E)$ ,  $P_{k'}(E)$  вероятности выхода с обеих сторон фольги и вероятности  $P_{kk'}(E)$  одновременных двусторонних выходов (индексы  $k, k'$  соответствуют выходам на прострел и на отражение). Вероятности связаны соотношением вида  $P_k(E) = \sum_{k'} P_{kk'}(E)$ .

Исследование статистики в принципе обеспечивается измерением только  $P_{kk'}(E)$ . Однако методически оказалось удобным вести измерения всех трех величин, независимо получая два массива данных, допускающих взаимную проверку и более точное определение величин  $P_k$ . Измерения проводились при бомбардировке фольги атомами  $^1\text{H}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{32}\text{S}$  с энергиями от десяти до нескольких сотен кэВ.

Методика измерений подробно описана в <sup>4</sup> и вкратце сводится к следующему. Для получения пучков использовалась нейтральная компонента ионного пучка (перезарядка на фоне, неперезарядившиеся ионы отклоняются) линейного ускорителя. Углеродная фольга устанавливалась перпендикулярно бомбардирующему пучку между двумя поворотными (на  $90^\circ$ ) электростатическими зеркалами. С помощью зеркал вторичные электроны ускорялись до энергии  $\sim 1$  кэВ и направлялись на специально сконструированные детекторы  $D_1$  (прострел),  $D_2$  (отражение) <sup>5</sup>. Детекторы работают в режиме счета и обеспечивают возможность уверенно различать эмиссионные события по числу приходящих электронов — амплитуды сигналов  $D_1, D_2$  пропорциональны числу приходящих на их вход электронов. Для детектирования прошедших фольгу атомов пучка использовался детектор  $D_3$ .

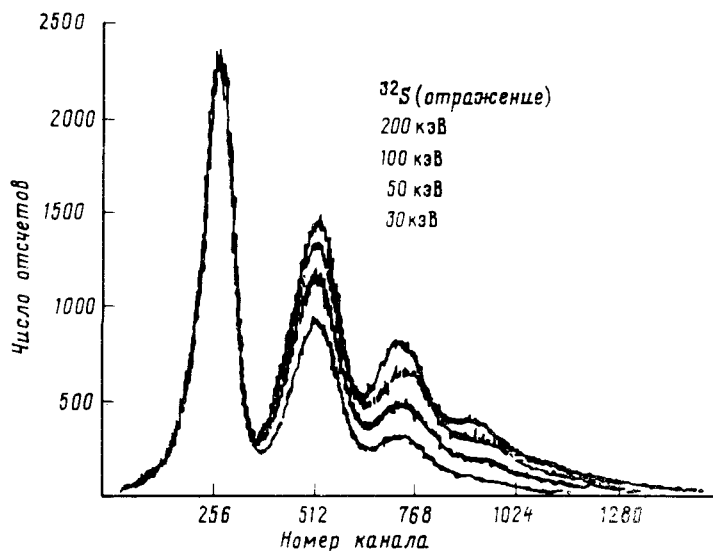


Рис. 1. Амплитудные спектры выходящих импульсов детектора  $D_2$ , полученные при бомбардировке фольги атомами  $^{32}\text{S}$  разной энергии. Пики распределений отвечают одновременной регистрации 1, 2 и т.д. электронов эмиссии, ширина пиков обусловлена статистическим характером умножения в детекторе

На рис. 1 представлены типичные спектры выхода МВЭ, из которых после численной деконволюции можно извлечь истинные распределения  $N_k$  по числу выходящих из фольги электронов. При известной интенсивности первичного пучка  $I_0$  (которая может быть определена по скоростям счета и счета совпадений детекторов <sup>6</sup>) по этим распределениям, накопленным за время  $T$ , можно найти абсолютные выходы, т.е. определить абсолютные вероятности эмиссии  $k$  электронов  $P_k$  ( $P_k = N_k/M, k = 0, 1, 2, \dots; M = I_0 T$ ).

На рис. 2а приведены результаты обработки измерений (рис. 1): гистограммы показывают распределения  $P_k$  и характер изменений вероятностей эмиссии с энергией атомов S (аналогичные получены и для H, He, O).

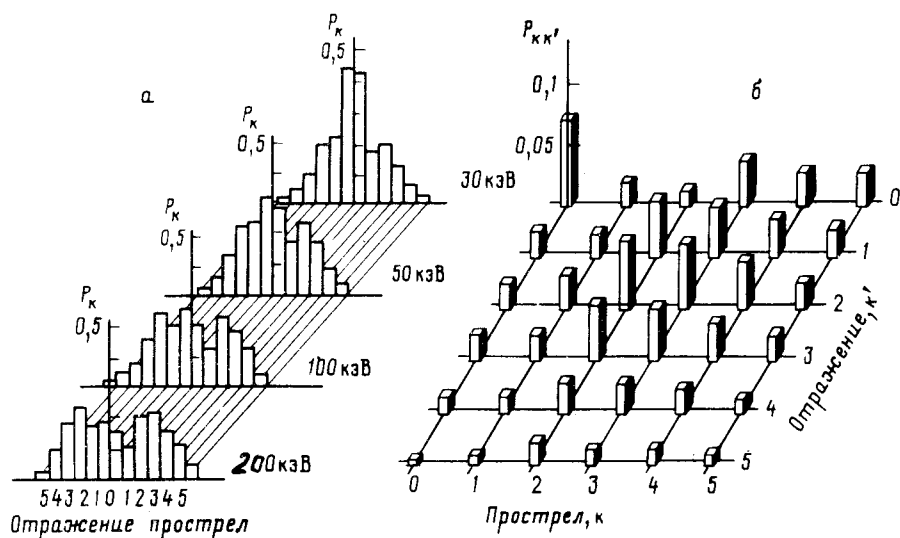


Рис. 2. Распределения вероятностей выхода вторичных электронов при бомбардировке атомами  $^{32}\text{S}$ : а – независимый выход при разных энергиях, б – выходы в совпадениях для  $E = 200$  кэВ

Здесь видна асимметрия выхода ВЭ, имеющая впервые обнаруженные специфические особенности. Так, оказываются неодинаковыми энергетические зависимости вероятностей  $P_k$  и  $P_{k'}$ , они не воспроизводят хода соответствующих зависимостей удельных потерь  $S_e$  от энергии (приблизительное воспроизведение этого хода отмечено только для средних выходов электронов  $\bar{q}(E) \approx \sum_k P_k k$ ). Последнее может быть связано с процессом установления равновесного заряда частицы в фольге – характерная длина требуемого пробега сравнима с толщиной фольги. Степень асимметрии  $\Delta P_k = (P_{k'} - P_k)/(P_k + P_{k'})$  меняет знак для различных  $k$  ( $\Delta P_{0,1} > 0$ ;  $\Delta P_{k > 1} < 0$ ).

Полученные данные дали возможность провести анализ характера статистики МВЭ; вероятности  $P_k, P_{k'}$  не следуют пуассоновскому распределению, в частности  $\bar{q} \neq -\ln P_0$ .

Обработка амплитудных измерений в режиме совпадений позволила найти  $P_{kk'}(E)$ . Независимо определявшиеся вероятности  $P_k, P_{k'}$  и  $P_{kk'}$  (случайные ошибки не превышают 1%) оказались в хорошем количественном согласии. Пример гистограммы вероятностей одновременного выхода на отражение и прострел показан на рис. 2б. По величинам  $P_k(E), P_{k'}(E), P_{kk'}(E)$  можно вычислить коэффициенты корреляций вероятностей  $\rho_{kk'}(E)$  и так называемый выборочный коэффициент корреляции  $\hat{\rho}(E)$ . Оказывается, что для всех систем  $\hat{\rho} \leq 0,2$ . Поскольку основной вклад в величину  $\hat{\rho}$  связан с вероятностью  $P_{00}$ , можно заключить, что сколько-нибудь заметная корреляция выходящих на обе стороны зарядов отсутствует.

Корреляции вероятностей  $\rho_{kk'}$  имеют значимые величины ( $\leq 0,4$ ) также только для  $k = k' = 0$ , т.е. для "холостых" прострелов фольги.

Отсутствие корреляций, различия в поведении зависимостей удельных потерь  $S_e$  и вероятностей  $P_k$  от энергии, отклонения  $P_k$  от пуассоновского поведения, специфические асимметрии вероятностей  $P_k$  и  $P_{k'}$ , асимметрий вероятностей  $P_{ij}$  и  $P_{ji}$  – все эти наблюдения могут найти объяснение только на основе рассмотрения двух механизмов генерации электронов ВЭ. Эти механизмы соответствуют столкновительной ионизации атомов вещества и каскадному размножению возникших внутренних вторичных электронов. Относительные вклады механиз-

мов меняются с энергией и родом бомбардирующих атомов. Действительно, численное монтекарловское моделирование процесса переноса внутренних вторичных электронов с известным <sup>7</sup> энергетическим спектром, рожденных в результате ионизирующих столкновений с атомами  $H$ , позволило воспроизвести ряд наблюдаемых особенностей зависимостей  $P_k(E)$ ,  $P_{k'}(E)$ ,  $P_{kk'}(E)$ . Первые положительные результаты позволяют заключить о перспективности такого подхода к численному решению обратной задачи – выявлению количественных вкладов прямых (столкновительная ионизация) и вторичных (электронный каскад) процессов при МВЭ, вызванной прохождением через вещество энергичных атомных частиц.

В заключение отметим, что в настоящей работе впервые в широких энергетическом ( $10 \div 200$  кэВ) и массовом ( $z = 1 \div 16$ ) диапазонах систематически исследованы закономерности многоэлектронной вторичной эмиссии. Совокупность полученных данных создает надежную основу для тестирования количественной теории явления.

#### Литература

1. *Oliphant M.L.E.* Proc. Roy. Soc. (Lnd), 1930, 127, 373.
2. *Sternglass E.J.* Phys. Rev., 1957, 108, 1.
3. *Ковалев В.П.* Вторичные электроны. М.: Энергоатомиздат, 1987.
4. *Грунтман М.А. и др.* ПТЭ, 1989, 3, 157.
5. *Демченкова А.А.* ПТЭ, 1987, 5, 149.
6. *Gruntman M.A., Morozov V.A.* J. Phys. E, 1982, 15, 1356.
7. *Meckbach W. et al.* J. Phys. B, 1975, 8, L 344.