

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ**

[621.384.8 + 537.533.2] (048)

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ
И АСТРОНОМИИ АКАДЕМИИ НАУК СССР****(28 ноября 1990 г.)**

28 ноября 1990 г. в Институте физических проблем им. С.И. Вавилова АН СССР состоялась научная сессия Отделения общей физики и астрономии АН СССР. На сессии были заслушаны доклады:

1. И.Д. Н о в и к о в . Перспективы космологии.
2. А.А. К о з о ч к и н а , В.Б. Л е о н а с . Многоэлектронная эмиссия, вызванная прохождением быстрых атомов через тонкую фольгу.

Краткое содержание одного доклада приводится ниже.

[621.384.8 + 537.533.2] (048)

А.А. Козочкина, В.Б. Леонас. Многоэлектронная эмиссия, вызванная прохождением быстрых атомов через тонкую фольгу. В докладе представлены метод [1, 2] и результаты [3 — 6] экспериментального исследования статистики вторичной электронной эмиссии (ВЭЭ), вызванной бомбардировкой углеродной фольги ускоренными атомами, а также показана возможность количественного описания результатов на основе моделирования методом Монте-Карло (МК) с использованием данных о сечениях атомных и электронных столкновений. Вторичная электронная эмиссия является фундаментальным процессом взаимодействия плазмы с твердым телом. Явление ВЭЭ с поверхности твердого тела известно давно, и первая публикация появилась уже в прошлом веке. К настоящему времени накоплен богатый экспериментальный материал [7, 8], однако приоритет и надежность имеют данные исследований последних 10 — 15 лет. Разработан ряд феноменологических и полуэмпирических теорий явления (см. соответствующие ссылки в [8]).

Традиционно объектами исследований ВЭЭ являются выход γ — среднее число вторичных электронов (ВЭ) на одну ударяющую частицу и энергетический спектр ВЭ — $d\gamma/dE_e$. В последнее время, однако, наряду с упомянутыми интегральными характеристиками ВЭЭ началось изучение дифференциальных — статистики многоэлектронной ВЭ (МВЭ) (распределение по числу выходящих ВЭ), симметрии выхода вперед/назад (по отношению к направлению бомбардирующего пучка), угловых и энергетических

распределений ВЭ. Термин МВЭ подчеркивает, что величина γ является статистическим средним для событий с различной кратностью эмиссии в отдельных актах.

Исследования кинетической ВЭЭ привели к трактовке эмиссионного события как результата реализации трех последовательных стадий (рис. 1):

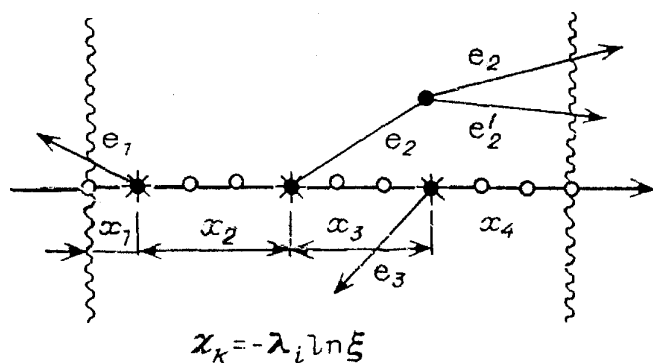


Рис. 1. Качественная картина прохождения быстрой частицы через вещество мишени. x_k — путь, проходимый частицей между последовательными актами ионизации — рождения электронов e_k , e'_k — каскадный электрон, ξ — случайное число на интервале 0 — 1

1) первичная ионизация проходящей через вещество энергичной частицей (возможны также каскадные процессы вторичной ионизации энергичными внутренними электронами и атомами отдачи), 2) миграция возникших внутренних электронов к поверхности раздела вещество — вакуум, 3) вылет в вакуум электронов эмиссии в результате преодоления поверхностного потенциального барьера.

Эти заключения сделаны на основе измерений интегральных характеристик, оставляющих большой произвол для понимания роли реальных физических механизмов, лежащих в основе явления ВЭЭ. Переход к измерениям статистики выхода, измерениям дважды (по углу и энергии) дифференциальных выходов позволит "сузить допуски" на используемые в теориях механизмы процесса и привести к количественному пониманию явления МВЭ.

На рис. 1 представлена качественная картина прохождения энергичной атомной частицы через тонкую мишень, позволяющая обсудить основные столкновительные процессы, связанные с ВЭЭ.

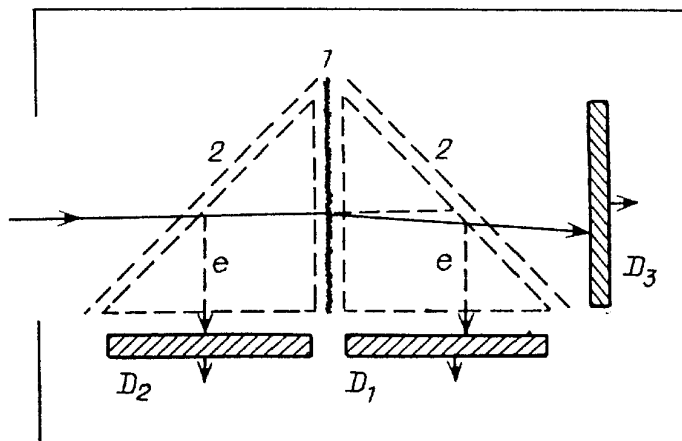
Тяжелая частица после прохождения пути x_k ($k = 1, 2, 3, \dots$), определяемого характерной длиной ионизационного пробега λ_i , порождает внутренний ВЭ e_k . Разлет внутренних ВЭ характеризуется определенным распределением по углам и энергиям. Неэмпирической теории для описания распределения нет, и хорошей моделью может быть обобщение результатов исследований распределений для электронов, эжектируемых при столкновениях протонов в газообразных мишенях [9]. Миграция внутренних ВЭ в мишени сопровождается процессами индивидуального и коллективного взаимодействия. Индивидуальные столкновения приводят к упругому рассеянию — изменению траектории, неупругим столкновениям — торможению электронов и к прямой ионизации — каскадному размножению (появление электронов e'_k ; см. рис. 1). Коллективные взаимодействия сопровождаются торможением.

Важной особенностью исследований последних лет является использование тонких мишеней-фольг, обеспечившее ряд преимуществ по сравнению с массивными мишенями.

На рис. 2 показана схема использованного нами прибора для исследования

статистики ВЭЭ тонкой ($\sim 50 \text{ \AA}$) фольги [2], обеспечившего возможность регистрации выхода ВЭ с обеих сторон как независимо, так и в режиме совпадений. Основными элементами прибора являются два электростатических зеркала, транспортирующих электроны к детекторам (D_1 , D_2). Специально сконструированные [1] детекторы D_1 , D_2 на микроканальных пластинах (МКП)

Рис. 2. Схема прибора для исследования статистики двусторонней эмиссии тонкой мишени [2]. 1 — фольга, 2 — электростатическое зеркало для ускорения и увода электронов с траектории первичного пучка, D_1 , D_2 — детекторы (на основе МКП) электронов, выходящих на прострел и на отражение, D_3 — детектор первичного пучка. D_1 , D_2 , D_3 могут работать независимо и в режиме совпадений. Пунктиром показана траектория ВЭ



обеспечивают различение эмиссионных событий по числу приходящих на них электронов. Частицы пучка детектируются D_3 .

На рис. 3 показаны типичные спектры выхода МВЭ (на отражение) при бомбардировке углеродной фольги пучками атомов Н, He, О. Из спектров такого типа после численной деконволюции могут быть найдены абсолютные вероятности P_k , $P_{k'}$ выхода k , k' (0, 1, 2, ...,) электронов на прострел и на

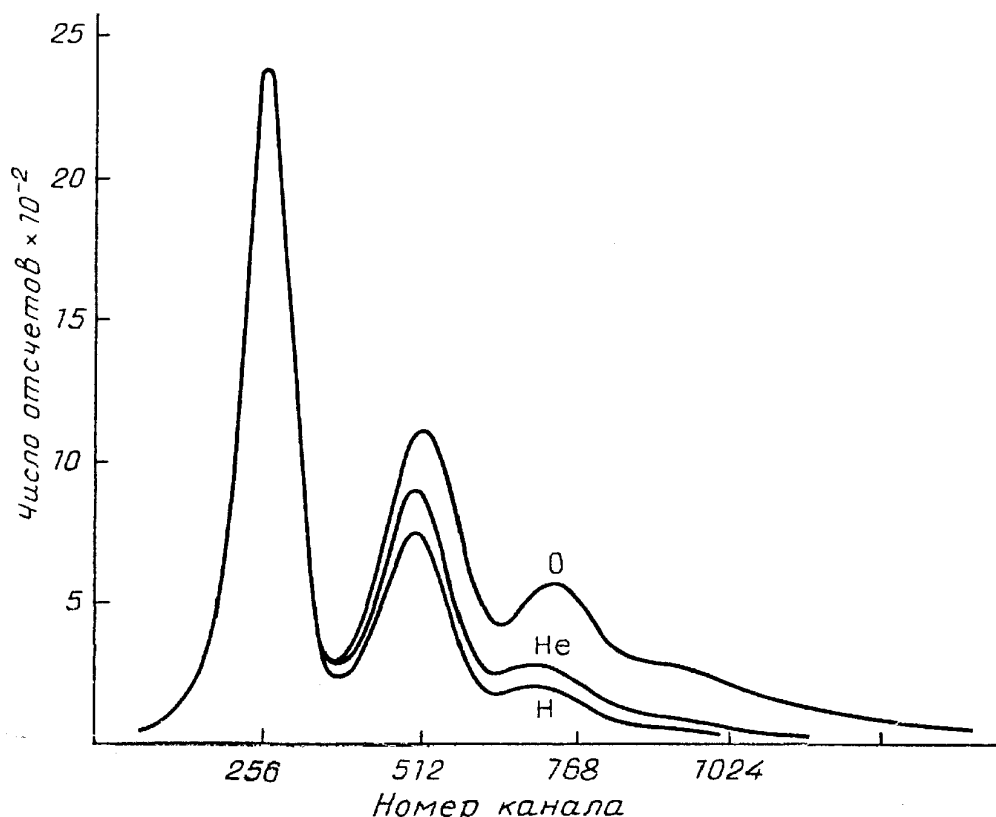


Рис. 3. Сглаженный амплитудный спектр детектора ВЭ (H — $E = 20 \text{ кэВ}$, He — $E = 50 \text{ кэВ}$, O — $E = 200 \text{ кэВ}$, эмиссия на отражение). Пики отвечают приходу на детектор 1, 2, 3 и т.д. электронов одновременно. Ширина одноэлектронного (и других) пиков обусловлена статистикой умножения сборки МКП. Для разделения пиков проводится численная деконволюция спектра

отражение соответственно. Двумерные спектры, измеренные в режиме совпадений выходов различной кратности на прострел и отражение, дают значения вероятностей $P_{kk'}$. Измерения $P_k, P_{k'}, P_{kk'}$ выполнены для пучков атомов Н, Не, О, S в диапазоне энергий от десяти до сотен кэВ.

Полученные данные о $P_k, P_{k'}, P_{kk'}$ отчетливо выявляют и количественно характеризуют асимметрию выходов ВЭ на прострел и отражение. Результаты однозначно указывают на асимметрию углового разлета внутренних ВЭ.

Данные о вероятностях $P_k, P_{k'}$ позволяют проанализировать тип статистики МВЭ. Главный результат анализа — экспериментально найденные распределения $P_k, P_{k'}$ не описываются пуассоновским распределением. Обнаруженные отклонения должны связываться с включением дополнительных к ионизации тяжелыми частицами механизмов рождения внутренних ВЭ.

Данные о $P_k, P_{k'}, P_{kk'}$ позволяют провести корреляционный анализ вероятностей. Установлен факт отсутствия корреляций выходов, означающий независимость событий рождения отдельных внутренних ВЭ. По известным значениям $P_k, P_{k'}$ можно, найти средние выходы $\bar{k}(E), \bar{k}'(E)$ ($\bar{k} = \sum k P_k$), которые согласуются со значениями u , известными из литературы.

Многостадийная природа ВЭЭ затрудняет создание замкнутой количественной неэмпирической теории. Неизбежным в этой ситуации является введение моделей. Представляется, что наибольшей физической прозрачностью обладает столкновительная модель ВЭЭ, качественно обсуждавшаяся в связи с рис. 1. На основе формализации [10] этой модели создан комплекс вычислительных программ, обеспечивающий численное моделирование (на основе метода Монте-Карло) процесса переноса атомов и электронов в веществе мишени. В случае расчетов для атомов Н использовались данные об угловом и энергетическом распределениях электронов из работы [9] и получено хорошее воспроизведение измеренных $P_k, P_{k'}, P_{kk'}$.

В расчетах на основе этого комплекса можно получить практически все доступные для эксперимента — статистические, угловые и энергетические — характеристики МВЭ, и, таким образом, согласование расчетов с измерениями позволит уточнять входные параметры расчета. По существу, таким путем решается обратная задача определения ключевых характеристик столкновительных процессов, ответственных за эмиссию электронов. Более того, могут быть получены и недоступные измерению величины, например каскадный вклад, глубина выхода ВЭ и др.

Первые успешные результаты моделирования позволяют ожидать, что на этом пути удастся прийти к надежному количественному описанию МВЭ.

Перспективы развития экспериментальных исследований МВЭ связаны с одновременной регистрацией статистических, угловых и энергетических характеристик, переходом к исследованиям тонких металлических мишеней, использованием в экспериментах пучков многозарядных ионов и изучением изотопных эффектов для пучков Н и D, использованием мишеней различной

толщины для управляемого "включения" различных столкновительных процессов и контроля зарядового состояния проходящих через мишень частиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демченкова А.А.//ПТЭ. 1987. № 5. С. 149.
2. Грунтман М.А., Козочкина А.А., Леонас В.Б.//ПТЭ. 1989. № 3. С. 157.
3. Грунтман М.А., Козочкина А.А., Леонас В.Б.//Письма ЖЭТФ. 1990. Т. 51. С. 19.
4. Грунтман М.А., Козочкина А.А., Леонас В.Б., Витте М.//Изв. АН СССР. Сер. физ. 1990. Т. 54. С. 1377.
5. Козочкина А.А., Иферов Г.А., Чумаков В.Я.//Тезисы докладов XIX Всесоюзного совещания по взаимодействию заряженных частиц с кристаллами. — М.: Изд-во Моск. ун-та. 1989. С. 78.
6. Gruntman M.A., Kozochkina A.A., Leonas V.B., Witte M.//Nucl. Instr. and Meth. Ser. B. 1991. (in press).
7. Бронштейн И.М., Фрайман Б.С. Вторичная электронная эмиссия. — М.: Наука, 1969.
8. Ковалев В.П. Вторичные электроны. — М.: Энергоатомиздат, 1987.
9. Cheng W.Q., Rudd M.E., Hsu Y.Y.//Phys. Rev. Ser. A. 1989. V. 40. P. 3599.
10. Аккерман А.Ф., Гибрехтерман А.Л.//Nucl. Instr. and Meth. Ser. B. 1985. V. 6. P. 496.