

ИОНИЗАЦИЯ К-ОБОЛОЧКИ КАЛЬЦИЯ
ПРИ ЭЛЕКТРОН-АТОМНЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ

А.М. Соломон

К настоящему времени исследования эффективности процессов ионизации глубоких оболочек свободных атомов были проведены только для некоторых газообразных элементов [1, 2]. Для свободных атомов металлов такие исследования отсутствуют. Традиционные эксперименты по исследованию процессов ионизации глубоких оболочек в столкновениях электронов с атомами металлов в тонких пленках сопряжены с трудностями, обусловленными необходимостью учитывать эффекты от многократного рассеяния, энергетических потерь бомбардирующих электронов и другие. Кроме того, особо затруднены исследования с химически неустойчивыми элементами.

В настоящей работе впервые проведены исследования эффективности ионизации К-оболочки свободных атомов кальция в столкновениях с монокинетическим пучком электронов. С этой целью измерялся характеристический рентгеновский спектр атомов, излучаемый в результате релаксации внутренних вакансий, образованных при столкновениях электронов с атомами кальция, в флуоресцентном канале. Сечение возбуждения Q_K для К-серии рентгеновского излучения связано с сечением ионизации К-оболочки Q_i соотношением

$$Q_K = \omega_K Q_i, \quad (1)$$

где ω_K — флуоресцентный выход.

Для проведения исследований была создана специальная высоковакуумная установка с пересекающимися электронным и атомным пучками и спектрометром рентгеновского излучения на базе кремнийлитиевого полупроводникового детектора. Параметры используемых пучков были следующими: электронного — ток регулировался в интервале 0.3–1.0 мА, а его энергия в интервале 3–45 кэВ; атомного — плотность по проведенным оценкам составляла величину порядка 10^{11} атом/см³. Разрешающая способность спектрометрического тракта составляла 280 эВ на К α линии Ми с энергией 5.9 кэВ. Рентгеновское излучение регистрировалось в направлении, перпендикулярном к плоскости пересечения электронного и атомного пучков.

В результате проведенных экспериментов был получен ряд рентгеновских спектров излучения, возбужденных при бомбардировке атомов кальция электронами. Каждый спектр измерялся при одном фиксированном значении энергии бомбардирующих электронов. Все зарегистрированные спектры состоят из непрерывного тормозного излучения, пика характеристического излучения К-серии атомов кальция, а также незначительной подложки фонового излучения.

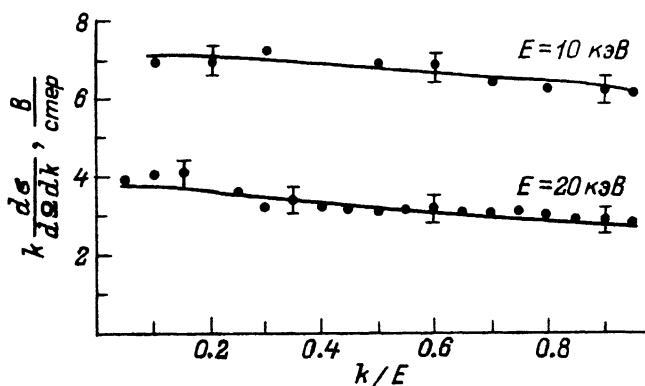


Рис. 1. Зависимость дифференциального сечения тормозного излучения от энергии квантов при энергиях налетающих электронов 10 кэВ и 20 кэВ: сплошные линии – теоретический расчет [3], точки – настоящий эксперимент.

Тормозное излучение в спектре обусловлено торможением электронов в поле атомных систем и всегда присутствует при столкновениях заряженных частиц с атомами.

Пики K_{α} и K_{β} излучения разделялись в спектре только частично, что обусловлено недостаточной разрешающей способностью энергодисперсионного спектрометра с *Si (Li)* детектором.

Фон обусловлен столкновениями электронов с атомами остаточного газа, а также с твердыми конструктивными элементами источника и приемника электронов, излучение от которых рассеивается внутри камеры столкновений. Он является наибольшим при максимальной энергии электронного пучка и составляет величину не более 30% от всех зарегистрированных импульсов.

Из каждого измеренного спектра рентгеновского излучения можно путем вычета фонового, а также характеристического излучения *K*-серии кальция получить относительную зависимость для дифференциального сечения тормозного излучения от энергии испущенных квантов.

В работе получен ряд таких зависимостей при различных энергиях налетающих электронов. Ход полученных экспериментально зависимостей дифференциального сечения тормозного излучения сравнивался с теоретическими зависимостями этого сечения, рассчитанными по модифицированной формуле Бете-Гайтлера [3]. Для этого была проведена нормировка измеренной величины сечения тормозного излучения при энергии испущенных квантов 7 кэВ и энергии бомбардирующих электронов 20 кэВ на теоретический расчет. Сравнение экспериментальных данных и теоретических зависимостей сечения тормозного излучения показано на рис. 1. Как видно из рисунка,

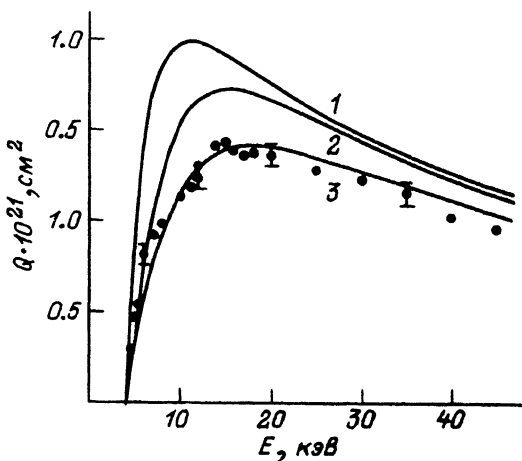


Рис. 2. Энергетическая зависимость эффективного сечения К-ионизации атомов кальция электронами: сплошные линии – расчеты по формулам Рудже-Шварца (1) [5], Гризинского (2) [6], Лотца (3) [7]; точки – настоящий эксперимент.

имеется хорошее согласие между нашими экспериментальными данными и теоретическим расчетом. Это дает основание использовать исследованное в работе тормозное излучение в качестве эталонного источника излучения для определения абсолютного значения сечений К-ионизации атомов Са. В этом случае абсолютное значение эффективного сечения ионизации К-оболочки определяется через отношение интенсивностей характеристического и тормозного излучений, измеренных в одних и тех же условиях эксперимента, по формуле:

$$Q_i = \frac{4\pi}{\omega_K} \frac{J_K}{J_T} \int_{k_1}^{k_2} \frac{d^2\sigma}{d\Omega dk} dk, \quad (2)$$

где J_K – интенсивность характеристического излучения, J_T – интенсивность тормозного излучения в интервале энергий квантов

$k_1, k_2, \frac{d^2\sigma}{d\Omega dk}$ – дифференциальное сечение тормозного излучения,

рассчитанное по модифицированной формуле Бете-Гайтлера [3].

Значение выхода флуоресценции $\omega_K^* = 0,163$ взято из работы [4].

Таким образом, использование тормозного излучения в качестве эталонного источника дает возможность определять абсолютные значения сечений ионизации внутренних оболочек атомов при исследованиях в пересекающихся электронном и атомном пучках. В этом случае точность определения абсолютного значения сечений ионизации К-оболочек атомов будет определяться статистической ошибкой измерения интенсивностей характеристического и тормозного излучений. При этом отпадает необходимость в определении ряда пара-

метров, характеризующих условия эксперимента, в частности концентрации атомов в пучке. В настоящих экспериментах ошибка определения абсолютного значения сечений К-ионизации атомов кальция составляла 11%.

Исходя из измеренных в ходе экспериментов интенсивностей характеристического и тормозного излучений при различных энергиях бомбардирующих электронов и используя выражение (2), в работе была получена энергетическая зависимость сечения ионизации К-обложки атомов кальция в абсолютной мере. Эта зависимость представлена на рис. 2. На том же рисунке для сравнения приведен ряд таких зависимостей, рассчитанных по формулам Рудже-Шварца [5], Гризинского [6], Лотца [7]. Экспериментальное сечение, полученное в максимуме возбуждения при 15 кэВ, составляет $1.4 \cdot 10^{-21} \text{ см}^2$ и по своей величине совпадает с соответствующим значением, полученным по формуле Лотца.

В области вблизи порога возбуждения сечение ионизации ведет себя как

$$Q_i \sim (E - E_0)^{0.97 \pm 0.05}, \quad (3)$$

где E - энергия налетающего электрона, E_0 - энергия связи атомного электрона.

Л и т е р а т у р а

- [1] Hippler R., Mc Gregor J., A y d i n o l M., K l e i n p o p p e n H. - Phys. Rev., 1981, A23, p. 1730.
- [2] Quarles C., S e m a n M. - Phys. Rev., 1982, A26, p. 3147.
- [3] Chapman J.N., Gray C.C., R o b e r t s o n B.W., N i c h o l s o n W.A. - x-Ray Spectrometry, 1983, v. 12, p. 153.
- [4] Krause M.O. - J. Phys. Chem. Ref. Data, 1979, v. 8, p. 307.
- [5] R u d g e M.R., S c h w a r t z S.B. - Proc. Phys. Soc., 1966, v. 88, p. 563.
- [6] G r y z i n s k i M. - Phys. Rev., 1965, A 138, p. 336.
- [7] L o t z W. - Z. Phys., 1970, v. 232, p. 101.

Институт ядерных исследований
АН УССР, Ужгородское отделение

Поступило в Редакцию
15 октября 1987 г.
В окончательной редакции
5 января 1988 г.