

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛИН СВОБОДНОГО ПРОБЕГА ЭЛЕКТРОНОВ ДО НЕУПРУГОГО СОУДАРЕНИЯ В МОНОАТОМНЫХ ВЕЩЕСТВАХ

В. В. Макаров, С. И. Игонин, В. П. Артемьев, Н. Н. Петров

Длина свободного пробега электронов относительно неупругих взаимодействий λ является важным параметром в различных методах электронно-зондовой диагностики твердого тела, определяющим информационную глубину и чувствительность этих методов. Для диапазона энергий $E \leq 3$ кэВ, наиболее интересного для оже-спектроскопии, уже в течение десятка лет предпринимаются попытки нахождения универсальных соотношений, описывающих зависимость λ от E и от вещества мишени (например, $[1^{-3}]$). Эту задачу до настоящего времени нельзя считать решенной, так как результаты расчетов и экспериментов различных авторов зача-

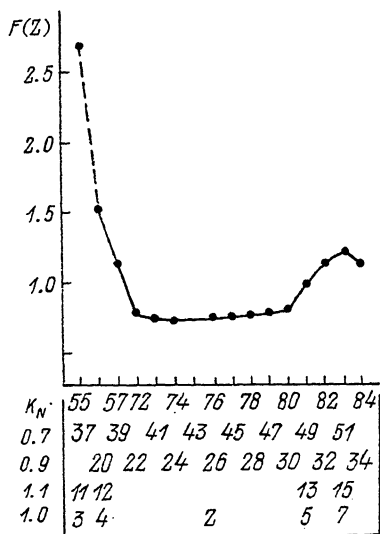


Рис. 1. Функция $F(Z)$ и значения K_N .

существования, описывающих зависимость λ от E и от вещества мишени (например, $[1^{-3}]$). Эту задачу до настоящего времени нельзя считать решенной, так как результаты расчетов и экспериментов различных авторов зача-

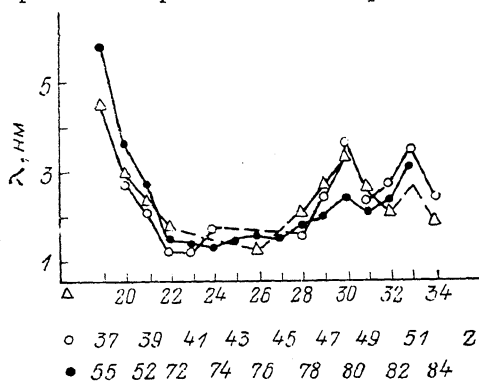


Рис. 2. Зависимость от Z глубины выхода истинно-вторичных электронов [5].

стую существенно расходятся. Для больших же энергий ($E > 10$ кэВ) экспериментальные и теоретические данные весьма немногочисленны.

В настоящей работе на основании наших экспериментальных исследований и анализа литературы предлагается эмпирическая формула для определения λ в моноатомных веществах в широком диапазоне E и атомных номеров Z . Ранее нами было показано [4], что в диапазоне $E=5\div 70$ кэВ зависимость $\lambda(E, Z)$ можно представить в виде произведения двух функций с разделенными переменными

$$\lambda(E, Z) = K_N F(Z) F_1(E), \quad (1)$$

где множитель K_N определяется номером периода, занимаемого элементом в таблице Менделеева, а значение $F(Z)$ — подгруппой. Функция $F(Z)$ и значения K_N приведены на рис. 1.

На рис. 2 показана зависимость $\lambda(Z)$ для медленных вторичных электронов с $E < 10$ эВ (энергия отсчитывается от уровня Ферми), полученная в [5] из анализа экспериментальных результатов [6] по зависимостям коэффициента истинно-вторичной эмиссии от энергии первичных электронов для 45 элементов таблицы Менделеева. Сравнение данных рис. 1 и 2 пока-

зывает удивительно хорошую корреляцию хода кривых $\lambda(Z)$ для быстрых и медленных электронов в пределах каждого периода, за исключением $Z=30, 48$, где во втором случае наблюдаются максимумы. Наличие этих максимумов, по-видимому, связано с превышением по мере увеличения Z энергии E_d ионизации d -оболочек в металлах этой подгруппы ($E_d \approx 9$ эВ [7]) над энергией E внутренних вторичных электронов, за счет чего десять электронов этой оболочки перестают играть роль рассеивающих центров [8]. С возрастанием же E рассматриваемые максимумы должны быстро сглаживаться и ход кривой $\lambda(Z)$ должен приближаться к таковому для быстрых электронов. Поэтому можно ожидать, что формула (1) будет справедлива уже начиная с E порядка сотен эВ. Это предположение подтверждается анализом расчетных данных [9], из которых следует, что вид зависимостей $\lambda(E)$ для различных веществ приблизительно одинаков в очень широком интервале E ; так, величины отношений $\lambda(E=50 \text{ кэВ})/\lambda(E=0.5 \text{ кэВ})$ для элементов с $Z=3 \div 83$ различаются всего на $\pm 10\%$ относительно среднего значения, равного 48.5. Таким образом, подобрав аналитическую аппроксимацию для $F_1(E)$, соответствующую рассчитанному в [9] ходу энергетической зависимости λ , с численным множителем, дающим экспериментально полученные в [4] абсолютные значения λ при $E=10 \div 16$ кэВ, можно сконструировать универсальную эмпирическую формулу для вычисления λ в широком диапазоне Z и E . Удовлетворительной аппроксимацией для $F_1(E)$ является

$$F_1(E) = 1.8 E^{0.88} + 0.15 \exp(-E/8), \quad (2)$$

где E выражена в кэВ, F_1 — в нм.

Область применимости соотношений (1), (2), по нашим оценкам, составляет $Z=3 \div 84$, E — от сотен эВ до десятков кэВ.

В заключение отметим, что прямое определение величин λ с помощью используемого в [4] метода, основанного на обработке экспериментальных данных по упругому отражению электронов с $E \geq 10$ кэВ, при меньших энергиях наталкивается на серьезные трудности, обусловленные необходимостью учета процесса многократного рассеяния [10]. Поэтому авторам [10], использующим этот метод в области $E \leq 3$ кэВ, пока не удалось установить общие закономерности, описывающие зависимость λ от материала мишени и от E .

Список литературы

- [1] Seah M. P., Dench W. A. // Surf. Interface Anal. 1979. V. 1. N 1. P. 2—11.
- [2] Szajman J., Liesegang J., Jenkin J. G., Leckey R. C. G. // J. El. Spectr. Relat. Phenom. 1981. V. 23. N 1. P. 97—102.
- [3] Tokutaka H., Nishimori K., Hayashi H. // Surf. Sci. 1985. V. 149. N 2—3. P. 349—365.
- [4] Артемьев В. П., Игонин С. И., Макаров В. В., Петров Н. Н. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 7. С. 2223—2225.
- [5] Макаров В. В., Петров Н. Н. // ФТТ. 1981. Т. 23. № 6. С. 1767—1774.
- [6] Бронштейн И. М., Фрайман Б. С. Вторичная электронная эмиссия. М.: Наука, 1969. 408 с.
- [7] Зигбан К., Нордлинг К., Фальман А. и др. Электронная спектроскопия. М.: Мир, 1971. 493 с.
- [8] Макаров В. В. // Автореф. докт. дис. Л., ЛГТУ, 1990. 369 с.
- [9] Хлупин С. И., Аккерман А. Ф. // Препринт ИФВЭ 84-21. Алма-Ата, 1985. 43 с.
- [10] Яблоньски А., Гергели Г. // Поверхность. 1987. № 10. С. 74—81.

Ленинградский технический
университет

Поступило в Редакцию
22 января 1991 г.