

ТОРМОЗНАЯ СПОСОБНОСТЬ ВЕЩЕСТВА ДЛЯ ПУЧКА
МОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ АЛЬФА-ЧАСТИЦ

Н.Н. Михеев, И.Ж. Безбах

Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
Ленинский проспект, д. 59, 119333, г. Москва, Россия

2022

МЕТОДИКА РАСЧЕТА Z_{1ef} ДЛЯ АЛЬФА-ЧАСТИЦ

Базовая формула для Z_{1ef}

Предполагалось, что снижение зарядового состояния альфа-частиц с $Z_1 = 2$ до величины зарядового состояния Z_{1ef} может быть обусловлено двумя возможными факторами. Во-первых, уменьшением вероятности однократной ионизации атомов вещества. И, во-вторых, изменением заряда некоторой части альфа-частиц пучка после захвата ими слабо связанных атомных электронов мишени. Поэтому для Z_{1ef} возможно записать базовую формулу в виде:

$$Z_{1ef} = Z_1 \times \left[1 - \exp\left(-\beta \frac{V_0}{V_{1i}}\right) \right], \quad (1)$$

где: β – некоторая функция от переменной V_0/V_{1i} , опосредованно связанная с вероятностью присоединения атомного электрона к иону гелия в зависимости от соотношения скоростей иона V_0 и слабосвязанного атомного электрона V_{1i} .

При $V_0 < 1.5 \cdot V_{1i}$ величина зарядового состояния Z_{1ef} пучка альфа-частиц достигает своего равновесного значения Z_{1ef} , равного $2 \times 0.707107 = 1.4142$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА Z_{1ef}

Результаты применения полученной функциональной зависимости для β при расчете тормозной способности S углерода, алюминия, серебра и золота для альфа-частиц с использованием Z_{1ef} формулы (1) представлены на Рис. 1–4. Проведенный учет Z_{1ef} позволяет сделать следующие выводы:

- для альфа-частиц с энергией E_0 более 1.0 МэВ зарядовое состояние Z_{1ef} в алюминии остается неизменным, равным 2;
- в интервале значений энергий E_0 от ≈ 0.10 МэВ до ≈ 1.0 МэВ Z_{1ef} в алюминии плавно уменьшается до равновесного значения, равного 1.4142;
- на графике зависимости тормозной способности S от энергии E_0 стабилизация Z_{1ef} до равновесного значения сопровождается появлением характерного перегиба.

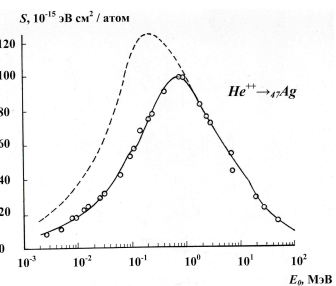


Рис. 3

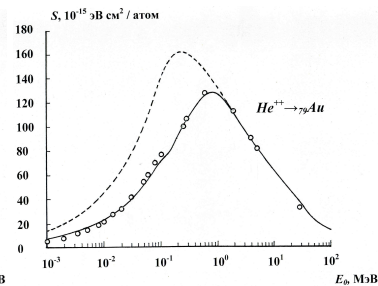


Рис. 4

Цель работы – разработка новой методики учета зарядового состояния Z_{1ef} пучка альфа-частиц в тонких слоях вещества на основе изучения зависимости величины Z_{1ef} от соотношения скоростей V_0 пучка частиц и средней скорости V_{1i} наименее связанных атомных электронов вещества образца.

Решаемые задачи:

- проведение модельных расчетов тормозной способности ряда материалов для альфа-частиц с $Z_1 = 2$ и с энергией E_0 в диапазоне от 1.0 кэВ до 10.0 МэВ;
- сопоставление этих результатов с экспериментально измеренными значениями тормозной способности S , представленными в известных компиляциях [1,2];
- создание новой методики учета зарядового состояния Z_{1ef} альфа-частиц на основе проведенного анализа

МЕТОДИКА РАСЧЕТА Z_{1ef} ДЛЯ АЛЬФА-ЧАСТИЦ

Определение функции β для альфа-частиц

Зависимость функции β от отношения V_0/V_{1i} в широком диапазоне изменений этой переменной от 1,5 до 30 была определена на основе расчетов тормозной способности алюминия, как модельного материала, для альфа-частиц при $Z_1 = 2$ и с энергией E_0 в диапазоне от 10.0 кэВ до 10.0 МэВ. Расчеты проводились в рамках концепции DSDA работы [3], используя значения характерных параметров этого материала $\epsilon_{1i} = 6$ эВ и $\epsilon_{Z2} = 80$ эВ. По результатам сопоставления с экспериментальными значениями тормозной способности S была определена формула, устанавливающая функциональную зависимость β от переменной V_0/V_{1i} :

$$\beta = 0.805 + 0.25 \times \exp\left[-\left(4.25 - \frac{V_0}{V_{1i}}\right) / 1.2211\right], \quad \text{при } 1.5 \leq V_0/V_{1i} \leq 4.25; \quad (2)$$

$$\beta = 1.055, \quad \text{при } V_0/V_{1i} > 4.25. \quad (3)$$

Полученные формулы (1) – (3) определяют поведение зарядового состояния Z_{1ef} пучка альфа-частиц с энергией E_0 , соответствующей интервалу скоростей частиц $[1.5 \cdot V_{1i}; 5.0 \cdot V_{1i}]$.

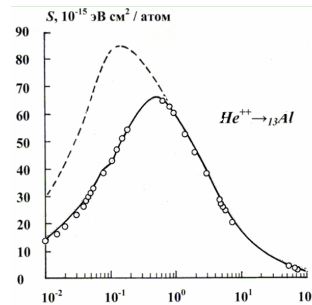


Рис. 1

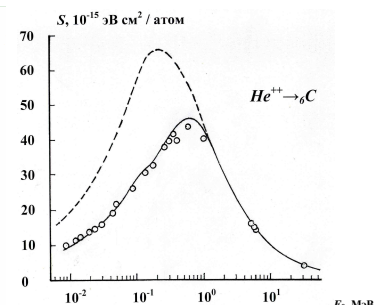


Рис. 2

ВЫВОДЫ

Разработана новая методика учета зарядового состояния Z_{1ef} альфа-частиц. Предложены формулы для расчета Z_{1ef} , устанавливающие функциональную зависимость Z_{1ef} от отношения V_0/V_{1i} . Представлены результаты применения методики при расчете тормозной способности углерода, алюминия, серебра и золота. Установлено хорошее соответствие выполненных расчетов S экспериментальным измерениям во всем приведенном энергетическом диапазоне E_0 . Показано, что до пятикратного превышения V_0 над V_{1i} величина $Z_{1ef} = Z_1 = 2$. При уменьшении отношения V_0/V_{1i} до 1.5 происходит плавное изменение зарядового состояния ионов гелия Z_{1ef} до равновесного значения, равного $2^{1/2}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. ICRU Report 49. Stopping Powers and Ranges for Protons and Alpha Particles. International Commission on Radiation Units and Measurements. 1993.
2. Paul H. IAEA. NDS. <https://www-nds.iaea.org/stopping>.
3. Михеев Н.Н. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2022, № 3, С. 94. DOI: 10.31857/S1028096022030141.