

ГЛУБИНА ПРОБЕГА ПУЧКА ПРОТОНОВ В ВЕЩЕСТВЕ ПРИ НОРМАЛЬНОМ ПАДЕНИИ ЧАСТИЦ НА ПОВЕРХНОСТЬ ОБРАЗЦА

Н.Н. Михеев

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

2022

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Цель работы – в рамках концепции **DSDA** получить формулы, описывающие зависимость глубины пробега R_x моноэнергетических протонов в веществе от их первичной энергии E_0 для широкого интервала энергий: от 3 кэВ до 100 МэВ, при нормальном падении пучка частиц на поверхность образца.

Решаемые задачи:

- модифицировать формулу, описывающую глубину пробега R_x пучка быстрых протонов в веществе для реализации её возможного применения к частицам средней и низкой энергии;
- провести модельные расчеты величины R_x в ряде материалов при первичной энергии E_0 в диапазоне от 3.0 кэВ до 100.0 МэВ;
- сопоставить эти результаты с известными экспериментально измеренными значениями R_x , представленными в научных публикациях.

ГЛУБИНА ПРОБЕГА R_x ПУЧКА БЫСТРЫХ ПРОТОНОВ

$$R_x = \frac{E_0}{8\pi q^4 N_0 Z \times \frac{1}{m_e V_0^2} \times \ln \left(\frac{m_e V_0^2}{J \times \sqrt{1-\beta^2}} \right)}, \quad (1)$$

где: q – заряд электрона; N_0 – плотность атомов мишени; Z – атомный номер; J – усредненное определенным образом значение средней потенциальной энергии атомных электронов мишени.

Согласно результатам работы [1], в которой была получена эта формула, знаменатель выражения (1) представляет собой усредненное значение тормозной способности второй группы пучка протонов, испытавших многократное неупругое рассеяние в слое образца, толщиной R_x . Результаты применения формулы представлены в первых трех строках Таблицы.

ГЛУБИНА ПРОБЕГА R_x ПУЧКА ПРОТОНОВ СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИИ

$$R_x = \frac{E_0}{4\pi q^4 N_0 Z \times \frac{1}{m_e V_0^2} \times F_M^N \times \ln \left(\frac{m_e V_0^2}{\epsilon_{1i} \times \sqrt{1-\beta^2}} \right)}, \quad (2)$$

где: функция F_M^N работы [2] учитывает уменьшение вероятности неупругого рассеяния протонов на электронах мишени, когда средняя скорость частиц становится сопоставимой со скоростью электронов, средняя потенциальная энергия которых превышает J ; ϵ_{1i} – минимальная энергия связи электронов мишени. Результат применения формулы (2) представлен в шестой строке Таблицы.

ГЛУБИНА ПРОБЕГА R_x ПУЧКА ПРОТОНОВ НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ

$$R_x = \frac{2 \times E_0 \times \epsilon_{1i}}{0.184 \times 4\pi q^4 N_0 Z \times F_M^N}, \quad (3)$$

Результаты применения формулы (3) представлены в четвертой и пятой строке Таблицы.

Таблица. Сравнение рассчитанных по формулам данной работы значений R_x^{calc} с результатами экспериментальных измерений величин R_x^{exp} работ [3–5]

№/№	Z, элемент	Частицы	E_0 , МэВ	R_x^{calc} , см	R_x^{exp} , см
1	^{13}Al , алюминий	протоны	19.68	0.2076	0.2066 ± 0.0035
2	^{29}Cu , медь	протоны	660	28.50	28.61 ± 0.13
3	^{79}Au , золото	протоны	49.1	0.2466	0.2461 ± 0.0035
4	^{14}Si , кремний	протоны	0.01	$2.58 \cdot 10^{-5}$	$(2.50 \pm 0.12) \times 10^{-5}$
5	^{14}Si , кремний	протоны	0.04	$5.30 \cdot 10^{-5}$	$(5.48 \pm 0.27) \times 10^{-5}$
6	^{14}Si , кремний	протоны	0.1	$9.9 \cdot 10^{-5}$	$(10.2 \pm 0.4) \times 10^{-5}$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ЗАВИСИМОСТЕЙ ВЕЛИЧИН R_x ОТ ЭНЕРГИЙ ПУЧКА ПРОТОНОВ ДЛЯ УГЛЕРОДА, АЛЮМИНИЯ, ГЕРМАНИЯ, СЕРЕБРА И ЗОЛОТА

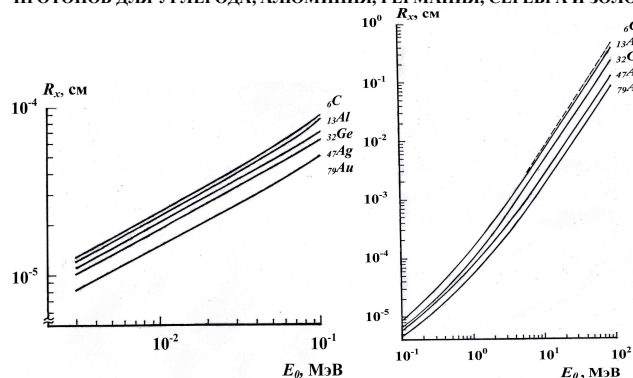


Рис. 1

Рис. 2

ВЫВОДЫ

1. Проведена модификация полученной ранее формулы, описывающей глубину пробега R_x пучка быстрых протонов в веществе, для её применения к частицам средней и низкой энергии;
2. Проведены модельные расчеты величины R_x^{calc} в ряде материалов при первичной энергии E_0 в диапазоне от 3.0 кэВ до 100.0 МэВ;
3. Выполнено сопоставление результатов расчетов с известными экспериментально измеренными значениями R_x^{exp} , представленными в научных публикациях;
4. Показано, что полученные формулы обеспечивают хорошее соответствие R_x^{calc} с R_x^{exp} во всем диапазоне первичной энергии протонов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михеев Н.Н. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2022, № 6, С. 54. DOI: 10.31857/S102809602.
2. Михеев Н.Н. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2010, № 4, С. 25.
3. Hobler G., Bourdelle K.K., Akatsu T. // Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. B. 2006, Vol. 242, P. 617.
4. Tschalar C., Maccabee H.D. // Phys. Rev. B. 1970. Vol. 1, P. 2863.
5. Зрелов В.П., Столетов Г.Д. // ЖЭТФ. 1959, Т. 36, С. 658.