

# 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

## ГЛУБИНА ПРОБЕГА $R_x$ ПУЧКА БЫСТРЫХ ПРОТОНОВ

$$R_x = \frac{E_0}{\frac{8pq^4 N_0 Z}{m_e V_0^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-b^2}} \cdot \ln \frac{F_M^N}{e_{1i}} \cdot \frac{m_e V_0^2}{J \sqrt{1-b^2}}}, \quad (1)$$

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.

**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	$0.2066 \pm 0.0035$
2	$^{29}Cu$ , медь	протоны	660	28.50	$28.61 \pm 0.13$
3	$^{79}Au$ , золото	протоны	49.1	0.2466	$0.2461 \pm 0.0035$
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	$9.9 \cdot 10^{-5}$	$(10.2 \pm 0.4) \times 10^{-5}$

## 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.

## 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 ПРОТОНОВ СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИИ

$$R_x = \frac{E_0}{\frac{4pq^4 N_0 Z}{m_e V_0^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-b^2}} \cdot F_M^N \cdot \ln \frac{F_M^N}{e_{1i}} \cdot \frac{m_e V_0^2}{J \sqrt{1-b^2}}}, \quad (2)$$

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  $J$ ;  $e_{1i}$  – минимальная энергия связи электронов мишени. Результат применения формулы (2) представлен в шестой строке Таблицы.

## ГЛУБИНА ПРОБЕГА $R_x$ ПУЧКА ПРОТОНОВ НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ

$$R_x = \frac{2 \cdot E_0 \cdot e_{1i}}{0.184 \cdot 4pq^4 N_0 Z \cdot F_M^N}, \quad (3)$$

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

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

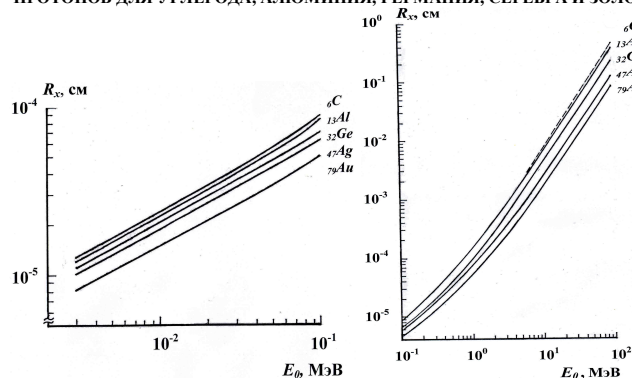


Рис. 1

Рис. 2

## 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.