

УДК 537.533.35:53.072

## ТОРМОЗНАЯ СПОСОБНОСТЬ ВЕЩЕСТВА ДЛЯ ПУЧКА МОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ АЛЬФА-ЧАСТИЦ

© 2023 г. Н. Н. Михеев<sup>а</sup>, \*, И. Ж. Безбах<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН,  
Москва, 119333 Россия

\*e-mail: kmikran@spark-mail.ru

Поступила в редакцию 25.06.2022 г.

После доработки 14.07.2022 г.

Принята к публикации 14.07.2022 г.

Представлены результаты использования статистики многократного рассеяния для описания зависимости тормозной способности  $S$  вещества от энергии  $E_0$  пучка альфа-частиц. Показано, что применение новой методики, основанной на учете зависимости зарядового состояния ионов пучка от отношения скорости ионов к минимальной скорости электронов вещества, позволяет проводить расчеты  $S$  адекватно экспериментальным результатам в широком диапазоне энергии частиц  $E_0$ .

**Ключевые слова:** моноэнергетический пучок альфа-частиц, многократное неупругое рассеяние, тормозная способность вещества, зарядовое состояние иона.

**DOI:** 10.31857/S1028096023010168, **EDN:** BLKVQF

### ВВЕДЕНИЕ

Тормозная способность вещества для направленных пучков моноэнергетических заряженных частиц представляет собой исключительно важную характеристику сложных процессов взаимодействия частиц с веществом. Она необходима во многих областях фундаментальной и прикладной физики [1–3]. Например, для количественных методов локальной диагностики современных наноматериалов и структур (сканирующей гелиевой ионной микроскопии [4, 5]) необходимы надежные знания о тормозной способности исследуемых образцов по отношению к альфа-частицам с энергией  $E_0$  от 100 эВ до 30 кэВ. Для пучка моноэнергетических протонов задача аналитического описания зависимости тормозной способности вещества от энергии в широком диапазоне первичной энергии частиц была решена в [6]. Получены формулы, учитывающие влияние зависимости энергетических потерь частиц от их скорости в четырех различных энергетических диапазонах. Особенность транспорта протонов в твердотельном материале состоит в том, что заряд иона водорода  $Z_1$  остается неизменным и равным единице электрического заряда вплоть до энергии частиц  $E_0$  несколько кэВ. Ситуация существенно иная для ионов с большим электрическим зарядом начиная с альфа-частиц. Общепри-

нято [7], что при скорости  $V_0$  пучка ионов меньше, чем  $5Z_1^{2/3} \times 2.178 \times 10^8 \frac{\text{см}}{\text{с}}$ , необходимо уже учитывать зависимость зарядового состояния  $Z_{\text{lef}}$  ионов от их скорости. Первоначальная оценка среднего заряда иона, двигающегося со скоростью  $V_0$ , была сделана Бором [8], который определил средний заряд иона  $Z_{\text{lef}}$  как:

$$Z_{\text{lef}} \approx Z_1^{1/3} (V_0/V_B),$$

где  $V_B = 2.18 \times 10^8 \text{ см/с}$ , а  $V_B < V_0 < Z^{2/3} V_B$ .

А в настоящее время наиболее часто используется выражение для  $Z_{\text{lef}}$  [9]:

$$Z_{\text{lef}} = Z_1 \left[ 1 - C \exp \left( -Z_1^\gamma \frac{V_0}{V_B} \right) \right],$$

где  $C \approx 1$ ,  $\gamma \approx 2/3$  для большинства материалов, изученных в [9]. Детальный обзор существующих аналитических выражений, используемых для описания зарядового состояния низкоэнергетических ионов, проведен в [7].

При таком подходе, естественно, обращает на себя внимание одна странность, а именно полное игнорирование влияния на величину  $Z_{\text{lef}}$  заряженных частиц непосредственно электронов образца и отсутствие каких-либо попыток установить взаимосвязь зарядового состояния  $Z_{\text{lef}}$  с ре-

альной электронной структурой атомов вещества мишени.

Цель настоящей работы заключалась в разработке новой методики расчета зарядового состояния  $Z_{\text{lef}}$  пучка альфа-частиц в тонких слоях вещества на основе изучения зависимости  $Z_{\text{lef}}$  от соотношения скоростей  $V_0$  частиц пучка и средней скорости  $V_{li}$  самых медленных электронов вещества образца.

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА $Z_{\text{lef}}$ ДЛЯ АЛЬФА-ЧАСТИЦ

#### Базовая формула для $Z_{\text{lef}}$

Как показано в [6, 10], для пучка заряженных частиц массой  $M$  с энергией меньше  $E_{01} = (M/m_e)J^2/8\varepsilon_{li}$  в тонких пленках наиболее вероятная потеря энергии  $\varepsilon_{li}$  соответствует энергии связи самых медленных электронов образца, средняя скорость которых  $V_{li}$  ( $J$  – усредненное значение потенциальной энергии электронов мишени). Поэтому в статистической модели многократного рассеяния этот параметр является ключевым при описании энергетических потерь частиц с энергией меньше  $E_{01}$ .

Ранее в [11] учет уменьшения вероятности неупругих потерь пучка заряженных частиц на электронах мишени, когда скорость пучка становится сопоставимой со средней скоростью  $V_{Z/2}$  электронов области экранирования, был осуществлен путем введения функции  $F_M^N$ :

$$F_M^N = 2.143 \left[ 1 - \exp \left\{ -0.1714 \left( \frac{m_e V_0^2}{\varepsilon_{Z/2}} \right)^{1/2} \right\} \right],$$

где  $\varepsilon_{Z/2}$  – энергия электронов атома, соответствующих граничной области экранирования заряда ядра в модели Томаса–Ферми [12]. Она успешно используется в прикладных задачах [13–16], связанных с описанием энергетических потерь пучков электронов и протонов средних и низких энергий в веществе. Функцию  $F_M^N$  можно представить в виде:

$$F_M^N = 2.314 \left[ 1 - \exp \left\{ -0.2424 \frac{V_0}{V_{Z/2}} \right\} \right].$$

По существу, эта формула отражает зависимость вероятности неупругого рассеяния пучка частиц на электронах, расположенных вне области экранирования, когда  $V_0/V_{Z/2} < 4.7$ . И поэтому вполне разумно, используя метод аналогий, предположить, что уменьшение заряда альфа-частиц с  $Z_1 = 2$  до заряда  $Z_{\text{lef}}$  может быть обусловлено двумя воз-

можными факторами. Во-первых, уменьшением вероятности однократной ионизации атомов вещества, вызванным снижением отношения  $V_0/V_{li}$  – оно становится меньше некоторой величины 4.7–5.0. И, во-вторых, изменением заряда некоторой части альфа-частиц пучка после захвата ими слабо связанных атомных электронов мишени. Поэтому для  $Z_{\text{lef}}$  возможно записать базовую формулу в виде:

$$Z_{\text{lef}} = Z_1 \left[ 1 - \exp \left( -\beta \frac{V_0}{V_{li}} \right) \right], \quad (1)$$

где  $\beta$  – некоторая функция переменной  $V_0/V_{li}$ , опосредовано связанная с вероятностью присоединения электрона вещества к иону гелия в зависимости от соотношения скоростей иона  $V_0$  и слабо связанного электрона  $V_{li}$ .

#### Определение функции $\beta$ для альфа-частиц

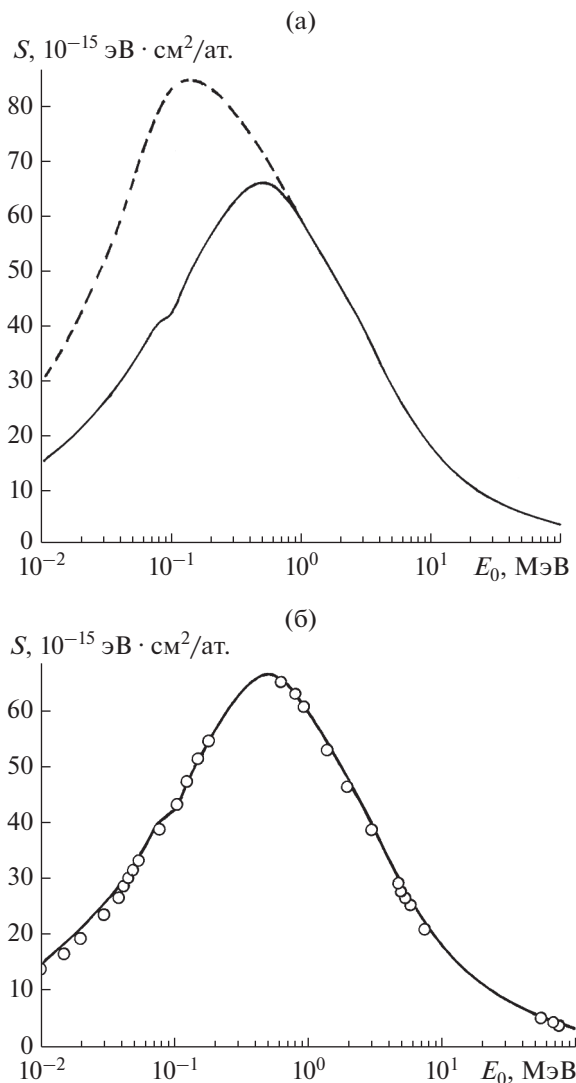
Для изучения зависимости функции  $\beta$  от отношения  $V_0/V_{li}$  в широком диапазоне от 1.5 до 30 были проведены расчеты тормозной способности алюминия как модельного материала для альфа-частиц с  $Z_1 = 2$  и энергией  $E_0$  в диапазоне от 10 кэВ до 10 МэВ. Расчеты проводили в рамках концепции дискретного процесса торможения заряженных частиц [6], используя значения параметров этого материала  $\varepsilon_{li} = 6$  эВ и  $\varepsilon_{Z/2} = 80$  эВ, надежно определенные по результатам торможения пучка протонов в алюминии. Далее полученные результаты сравнивали с экспериментальными значениями тормозной способности  $S$ , представленными в [17, 18]. По результатам проведенного анализа была предложена формула, устанавливающая функциональную зависимость величины  $\beta$  от переменной  $V_0/V_{li}$  для моноэнергетических пучков альфа-частиц в алюминии:

$$\beta = 0.805 + 0.25 \exp \left[ - \frac{\left( 4.25 - \frac{V_0}{V_{li}} \right)^2}{1.2211} \right] \quad (2)$$

при  $1.5 \leq V_0/V_{li} \leq 4.25$ ,

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

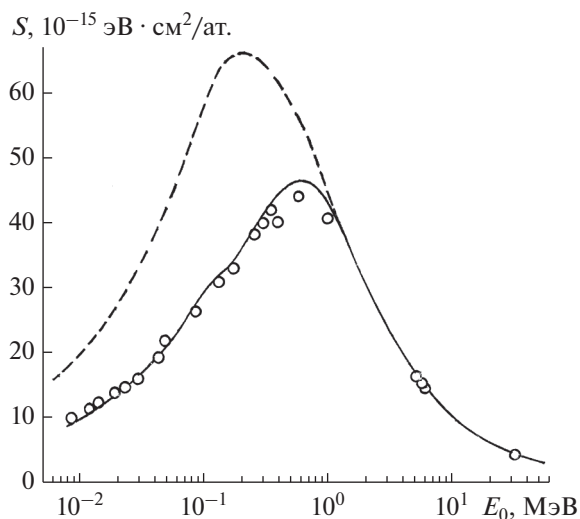
Полученные формулы (1)–(3) определяют поведение зарядового состояния  $Z_{\text{lef}}$  пучка альфа-частиц с энергией  $E_0$ , соответствующей интервалу скоростей частиц  $V_{li}$  1.5–5.0. При  $V_0 < 1.5V_{li}$  заряд  $Z_{\text{lef}}$  пучка альфа-частиц достигает своего равновесного значения  $2\sqrt{2}/2 = \sqrt{2}$ .



**Рис. 1.** Зависимость тормозной способности  $S$  алюминия для пучка альфа-частиц с энергией от 10 кэВ до 100 МэВ ( $\text{He}^{++} \rightarrow {}_{13}\text{Al}$ ): а – расчет с  $Z_1 = 2$  по формулам [6] (пунктир) и  $Z_{1ef}$  по формулам (1)–(3) (сплошная кривая); б – расчет с  $Z_{1ef}$  по формулам (1)–(3) (сплошная кривая) и экспериментальные данные [17] (символы).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА $Z_{1ef}$

Результаты применения полученной функциональной зависимости для  $\beta$  при расчете тормозной способности  $S$  алюминия для альфа-частиц с использованием формулы (1) представлены на рис. 1. Как видно из рис. 1а, учет  $Z_{1ef}$  позволяет сделать следующие выводы: для альфа-частиц с энергией  $E_0$  более 1.0 МэВ заряд  $e Z_{1ef} = 2$  в алюминии остается неизменным; в интервале значений энергии  $E_0$  1.0–0.1 МэВ  $Z_{1ef}$  в алюминии пла-



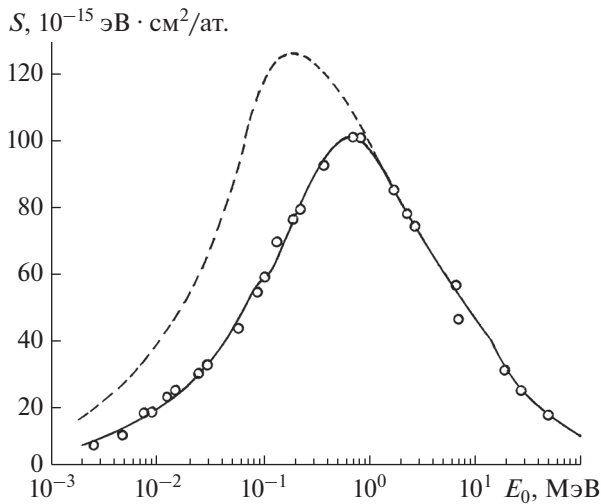
**Рис. 2.** Зависимость тормозной способности  $S$  углерода для пучка альфа-частиц с энергией от 6 кэВ до 50 МэВ ( $\text{He}^{++} \rightarrow {}_6\text{C}$ ): пунктирная линия – расчет с  $Z_1 = 2$  по формулам [6]; сплошная кривая – расчет с  $Z_{1ef}$  по формулам (1)–(3).

но уменьшается до равновесного значения  $\sqrt{2}$ ; на графике зависимости тормозной способности  $S$  от энергии  $E_0$  стабилизация  $Z_{1ef}$  (достижение равновесного значения) сопровождается появлением характерного перегиба.

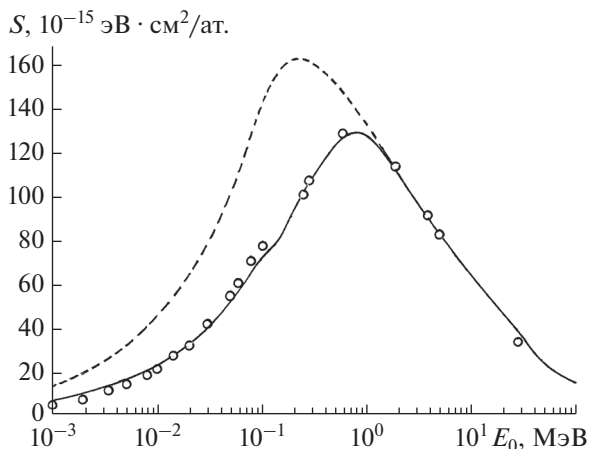
Результаты сравнения рассчитанных по методике значений  $S$  с результатами экспериментальных измерений [17, 18] представлены на рис. 1б и свидетельствуют о хорошем соответствии расчетов и экспериментальных данных для алюминия во всем приведенном энергетическом диапазоне  $E_0$ .

Результаты использования новой методики учета зарядового состояния ионов гелия при расчете тормозной способности  $S$  углерода, серебра и золота для пучка альфа-частиц с использованием формулы (1) представлены на рис. 2–4. Сказанное выше о результатах, представленных на рис. 1, в полной мере относится и к результатам, приведенным на рис. 2–4, которые подтверждают значимость и возможности новой методики учета зарядового состояния альфа-частиц для образцов, относящихся к широкому диапазону значений среднего атомного номера  $Z$  материала мишени.

Отметим, что присутствие характерного перегиба на рассчитанных кривых  $S = S(E_0)$  не является случайным результатом проведенных вычислений, а только подтверждает и объясняет особенность экспериментальных измерений тормозной способности. Эта особенность, однако, слабо вы-



**Рис. 3.** Зависимость тормозной способности  $S$  серебра для пучка альфа-частиц с энергией от 2 кэВ до 100 МэВ ( $\text{He}^{++} \rightarrow {}_{47}\text{Ag}$ ): пунктирная линия – расчет с  $Z_1 = 2$  по формулам [6]; сплошная кривая – расчет с  $Z_{1\text{ef}}$  по формулам (1)–(3).



**Рис. 4.** Зависимость тормозной способности  $S$  золота для пучка альфа-частиц с энергией от 10 кэВ до 100 МэВ ( $\text{He}^{++} \rightarrow {}_{79}\text{Au}$ ): пунктирная линия – расчет с  $Z_1 = 2$  по формулам [6]; сплошная кривая – расчет с  $Z_{1\text{ef}}$  по формулам (1)–(3).

является из-за значительного разброса экспериментально измеренных величин  $S$  в этом диапазоне значений энергии  $E_0$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана новая методика учета зарядового состояния  $Z_{1\text{ef}}$  альфа-частиц. Предложены фор-

мулы для расчета, устанавливающие функциональную зависимость  $Z_{1\text{ef}}$  от отношения  $V_0/V_{1i}$ .

Представлены результаты применения методики при расчете тормозной способности углерода, алюминия, серебра и золота.

Установлено хорошее соответствие выполненных расчетов тормозной способности  $S$  экспериментальным данным во всем исследованном энергетическом диапазоне  $E_0$ . Показано, что до пятикратного превышения  $V_0$  над  $V_{1i}$  величина  $Z_{1\text{ef}} = Z_1 = 2$ . При уменьшении отношения  $V_0/V_{1i}$  до 1.5 происходит плавное изменение заряда ионов гелия  $Z_{1\text{ef}}$  до равновесного значения  $\sqrt{2}$ .

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *ICRU Report 49. Stopping Powers and Ranges for Protons and Alpha Particles.* International Commission on Radiation Units and Measurements. 1993.
2. *Andersen H.H., Ziegler J.F. Hydrogen Stopping Powers and Ranges in All Elements.* N.Y.: Pergamon Press, 1977.
3. *ICRU Report 37. Stopping Powers for Electrons and Positrons.* International Commission on Radiation Units and Measurements. 1984.
4. *Ward E.W., Notte J., Economou N.P.* // J. Vac. Sci. Technol. B. 2006. V. 24. P. 2871.
5. *Van Gastel R., Hlawacek G., Zandvliet H.J.W., Poelsema B.* // Microelectron. Reliability. 2012. V. 52. № 9–10. P. 2104. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2012.06.130>
6. *Мухеев Н.Н.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2022. № 3. С. 94. <https://doi.org/10.31857/S1028096022030141>
7. *Cruz S.A.* // Rad. Effects. 1986. V. 88. P. 159.
8. *Bohr N.* // K. Dan Vidensk. Mat. Fys. Medd. 1948. V. 18. P. 8.
9. *Betz H.D., Hortig G., Leischner E., Schmelzer Ch., Stadler B., Wehrauch J.* // Phys. Lett. A. 1966. V. 22. P. 643.
10. *Мухеев Н.Н.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2022. № 6. С. 54. <https://doi.org/10.31857/S1028096022060141>
11. *Мухеев Н.Н.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2010. № 4. С. 25.
12. *Ландау Л.Д., Лившиц Е.М.* Квантовая механика. Нерелятивистская теория. М.: Наука, 1974. 607 с.
13. *Мухеев Н.Н., Колесник А.С.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2017. № 12. С. 88. <https://doi.org/10.7868/S0207352817120083>
14. *Мухеев Н.Н.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2020. № 12. С. 70. <https://doi.org/10.31857/S1028096020120120201>

15. *Михеев Н.Н.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2020. № 3. С. 77.  
<https://doi.org/10.31857/S1028096020030127>
16. *Михеев Н.Н.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2019. № 8. С. 56.  
<https://doi.org/10.1134/S0207352819080109>
17. *Paul H.* IAEA. NDS. <https://www-nds.iaea.org/stopping>
18. *Ziegler J.F.* Handbook Stopping Powers and Ranges in All Elemental Matters. N.Y.: Pergamon Press, 1978. 368 p.

## Stopping Power of Matter for a Beam of Monoenergetic Alpha Particles

N. N. Mikheev<sup>1, \*</sup>, I. Zh. Bezbakh<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Shubnikov Institute of Crystallography of FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Moscow, 19333 Russia*

*\*e-mail: kmikran@spark-mail.ru*

The results of using the statistics of multiple scattering to describe the dependence of the stopping power  $S$  of matter on the energy  $E_0$  of an alpha particle beam are presented. It is shown that the application of a new technique based on taking into account the dependence of the charge state of the beam ions on the ratio of the ion velocity to the minimum velocity of the substance electrons makes it possible to calculate  $S$  adequately to the experimental results in a wide range of particle energies  $E_0$ .

**Keywords:** monoenergetic beam of alpha particles, multiple inelastic scattering, stopping power of matter, charge state of an ion.