

УДК 539.186

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТОРМОЖЕНИЯ БЫСТРЫХ ИОНОВ В ЦЕЛЛУЛОИДЕ С УЧЕТОМ ПРОЦЕССА ПЕРЕЗАРЯДКИ

© 2004 г. Ю. А. Белкова, Я. А. Теплова

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

На основе полученных ранее экспериментальных результатов для быстрых ионов Be, B, N и O, прошедших через газовые и твердые мишени, рассчитаны зарядовые фракции F_i и квадрат среднего заряда $i_{\text{ef}}^2 = \sum i^2 F_i$ для различных толщин мишени t и начальных зарядов иона i_0 . Это позволило исследовать зависимость потерь энергии, обусловленных взаимодействием ионов с электронами мишени, $-dE/dx_{\text{эл}}$, и потерь энергии, вызванных непосредственно перезарядкой ионов, $-dE/dx_{\text{н}}$, от начального зарядового состояния ионов в области малых толщин мишени до установления зарядового равновесия. Представлены расчеты потерь энергии ионов азота с начальной энергией 0.35 МэВ/нуклон, прошедших через пленки целлулоида.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение процесса прохождения ионов через вещество интенсивно ведется со времен классических работ, например Бора и Линдхарда [1]. Согласно общепринятым положениям, как потери энергии, обусловленные взаимодействием ионов с электронами мишени, $-dE/dx_{\text{эл}}$, так и потери энергии, вызванные непосредственно перезарядкой ионов, $-dE/dx_{\text{н}}$, рассчитываются в предположении, что ион находится в определенном зарядовом состоянии. Как правило, для описания потери энергии ионов в веществе вводится некоторый “эффективный заряд” i_{ef} . Это полуэмпирическая величина, с помощью которой учитывается изменение зарядовых состояний иона при прохождении через вещество. При проведении расчетов потерь энергии принято использовать i_{ef}^2 в качестве нормировочного множителя, позволяющего связать потери энергии данного иона с хорошо известными потерями энергии протонов при тех же скоростях ионов [2]. Обычно принято считать i_{ef}^2 величиной постоянной для данного иона независимо от его начального заряда, что справедливо в том случае, если зарядовое равновесие можно считать установившимся [3]. Однако в последнее время появились работы, в которых наблюдается зависимость потерь энергии от начального зарядового состояния ионов [4–6]. В связи с этим представляется интересным исследовать зависимость i_{ef}^2 и соответственно потерь энергии ионов от начального зарядового состояния ионов и толщины мишени.

МЕТОД РАСЧЕТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для проведения вычислений мы использовали разработанный ранее метод, позволяющий на основе экспериментальных результатов по определению зарядовых фракций F_i , где i – заряд ионов, прошедших через газовые [7] и твердые мишени [8], найти “эффективные” величины сечений потери и захвата электронов ионами Be, B, N и O. Это позволяет рассчитать зависимость зарядовых фракций F_i и квадрата заряда $i_{\text{ef}}^2 = \sum i^2 F_i$ от толщины мишени t для различных начальных зарядов иона i_0 . Проведенные ранее расчеты показали, что в области малых толщин эффективный заряд существенно зависит от начального состояния иона. Это необходимо учитывать при рассмотрении потери энергии ионов в предравновесной области. Действительно, если для расчета потерь энергии воспользоваться известным выражением Блоха [9], заменив ядерный заряд налетающего иона на i_{ef} :

$$(-dE/dx)_{\text{эл}} = (4\pi e^4/mv^2)i_{\text{ef}}^2 Z_c N_c [\ln(2mv^2/I) - Q], \quad (1)$$

где e и m – заряд и масса электрона, v – скорость иона, Z_c и N_c – заряд и плотность среды, I – потенциал ионизации среды, $Q = \text{Re}\psi[1 + i(i_{\text{ef}}e^2/\hbar v)] - \psi(1)$, ψ – логарифмическая производная Г-функции, то становится очевидным, что зависимость потерь энергии от толщины мишени определяется соответствующей зависимостью для i_{ef}^2 .

На рис. 1 представлены результаты расчетов потери энергии для ионов азота с начальной энергией 0.35 МэВ/нуклон, прошедших через пленки целлулоида. При малых толщинах мишени поте-

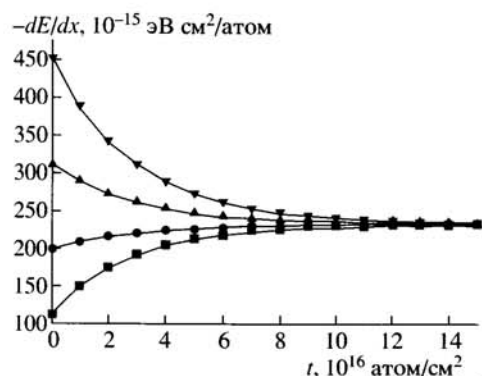


Рис. 1. Электронные потери энергии ионов азота с начальной энергией $E = 0.35$ МэВ/нуклон в зависимости от начального зарядового состояния иона i_0 и толщины мишени (целлулоид): $i_{ef} = 3$ (■), 4 (●), 5 (▲), 6 (▼). $i_0 = i_{ef}$ при $t \rightarrow 0$.

ри энергии имеют различную величину в зависимости от начального состояния иона. Вплоть до наступления зарядового равновесия потери энергии ионов с большим начальным зарядом превосходят потери энергии ионов с меньшим начальным зарядом, что соответствует результатам работ [4–6].

При проведении расчетов некоторая неопределенность возникает при выборе значения среднего потенциала ионизации среды I , точный расчет которого сильно затруднен, особенно в сложных средах типа целлулоида. Однако, как было показано ранее [9], средний потенциал ионизации можно рассматривать как свойство среды независимо от скорости и вида налетающих ионов. Численное значение на практике часто получается путем согласования теоретических расчетов потерь энергии с имеющимися экспериментальными данными. Данные о некоторых средних потенциалах ионизации приведены в [9].

Необходимо также отдельно остановиться на расчете Z_c для материалов, состоящих из атомов различных элементов. Как отмечено в [9], в этом случае химические свойства вещества существенно не влияют на потери энергии проходящих ионов. Такие сложные мишени можно рассматривать на основе правила аддитивности Брэгга, т.е. как комбинацию атомов, которые вносят свой независимый вклад в потери энергии. Тогда

$$NZ_c = \sum N_i Z_i, \quad NZ_c \ln I = \sum N_i Z_i \ln I_i. \quad (2)$$

В приведенных на рис. 1 расчетах заряд среды вычислялся с помощью соотношений (2) и равнялся примерно заряду углерода, а средний потенциал ионизации выбирали, исходя из соответствия рассчитанных значений потерь энергии и экспериментальных результатов для потерь энергии в области

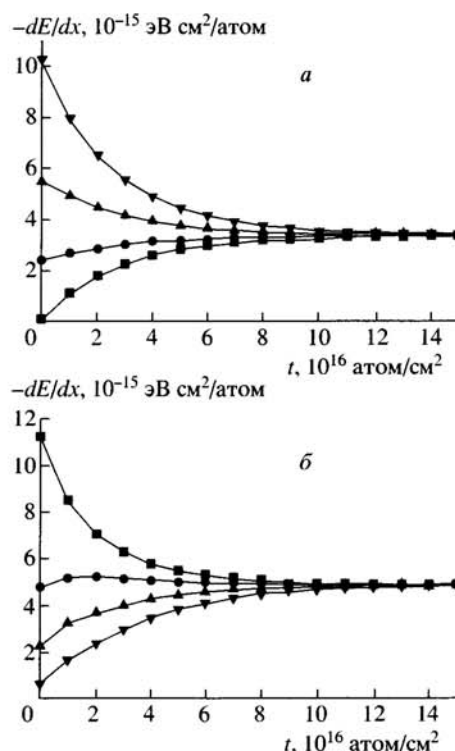


Рис. 2. Потери энергии, связанные с процессами захвата (а) и потери (б) электрона, для ионов азота с начальной энергией $E = 0.35$ МэВ/нуклон в зависимости от начального зарядового состояния иона i_0 и толщины мишени (целлулоид): $i_{ef} = 3$ (■), 4 (●), 5 (▲), 6 (▼). $i_0 = i_{ef}$ при $t \rightarrow 0$.

зарядового равновесия [3]. Необходимо отметить, что определенное таким образом значение потенциала ионизации несколько меньше I , рассчитанного из (2), что можно считать указанием на определяющую роль слабосвязанных электронов в атомах среды в процессе электронных потерь энергии.

Полученная ранее информация о сечениях потерь и захвата электрона и зарядовых распределениях ионов позволяет также оценить величину потерь энергии, связанных непосредственно с перезарядкой ионов. Для оценок можно воспользоваться ранее установленным соотношением [3]

$$(-dE/dx)_n = N \Sigma F_i \sigma_{i,i \pm 1} (J + E_k), \quad (3)$$

где N – количество атомов в 1 см^3 вещества, F_i – зарядовая фракция ионов, $\sigma_{i,i \pm 1}$ – сечение потери или захвата электрона ионом с зарядом i , J – энергия связи электрона в атоме среды для процесса захвата электрона или энергия связи электрона в налетающем ионе для процесса потери электрона, E_k – кинетическая энергия электрона, участву-

ющего в процессе перезарядки. Как было отмечено в [3], потери энергии $(-dE/dx)_n$ играют существенную роль при малых скоростях, $v < v_0$, где v_0 — скорость электрона в атоме водорода.

На рис. 2 представлены потери энергии ионов азота с начальной энергией 0.35 МэВ/нуклон, прошедших через пленки целлюлоида, рассчитанные отдельно для процесса захвата электрона (а) и потери электрона (б). Полученные потери энергии имеют различные значения в зависимости от начальных зарядовых состояний налетающих ионов при малых значениях толщин мишени как для процессов захвата, так и для процессов потери электрона, и только после установления зарядового равновесия величина потерь энергии становится независимой от i_0 . Для всех рассмотренных толщин мишени $(-dE/dx)_n$ существенно меньше, чем $(-dE/dx)_{эл}$, что соответствует известным результатам [3] для рассмотренной энергии налетающих ионов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные расчеты показали, что как потери энергии, вызванные взаимодействием налетающего иона с электронной системой атомов мишени, так и потери энергии, связанные с перезарядкой ионов в предравновесной области при малых толщинах мишени зависят от начального состояния иона. При рассмотрении $(-dE/dx)_n$ необходимо отметить, что потери энергии, связанные с потерей электрона, превосходят по величине потери энергии, определяемые захватом электрона

в равновесной области. В области малых толщин мишени соотношение между потерями энергии зависит от начального зарядового состояния ионов: для меньших значений i_0 преобладают потери энергии, связанные с потерей электрона, а для больших значений начального заряда возрастает роль потерь энергии, связанных с захватом электрона.

Представляется интересным более подробный анализ оценки вклада рассмотренного эффекта в величину полных потерь энергии, а также пробегов ионов в веществе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bohr N., Lindhard J. // Kgl. Dan. Vid. Selsk. Mat.-Fys. Medd. 1954. V. 28. № 7. P. 1.
2. Ziegler J.P., Biersack J.P., Littmark U. The Stopping and Range of Ions in Solids. N.Y.: Pergamon Press, 1985.
3. Теплова Я.А., Николаев В.С., Дмитриев И.С., Фатеева Л.Н. // ЖЭТФ. 1962. Т. 42. № 1. С. 44.
4. Blazevich A., Bohlen H.G., von Oertzen W. // Phys. Rev. A. 2000. V. 61. 032901.
5. Balashov V.V. // Nucl. Instrum. Methods. B. 2003. V. 205. P. 813.
6. Балашиов В.В., Бибииков А.В., Бодренко И.В. // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика, астрономия. 2002. № 2. С. 28.
7. Николаев В.С. // УФН. 1965. Т. 85. С. 679.
8. Теплова Я.А., Дмитриев И.С., Белкова Ю.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2000. Т. 64. № 4. С. 677.
9. Fano U. // Ann. Rev. Nucl. Sci. 1963. V. 13. P. 1.