

УДК 539.188:539.211

ИОН-АТОМНЫЕ СТОЛКНОВЕНИЯ С УЧАСТИЕМ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ ЧАСТИЦ. ТОРМОЖЕНИЕ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ В ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВАХ И ГАЗАХ

Я.А.Теплова, Ю.А.Шурыгина

НИИ ядерной физики МГУ, Москва

Основными характеристиками торможения заряженных частиц являются потери энергии, $-\frac{dE}{dx} = \epsilon$, пробеги R , а также разброс потерь энергии и пробегов ионов в веществе. Теория потерь энергии для частиц с постоянным зарядом была успешно разработана в первой половине 20 столетия /Бор, Бете, Блох и др./ [1]. Однако, для частиц с зарядом ядра $Z \geq 1$, заряд тормозящегося иона перестает быть хорошим параметром для теории, его величина существенно изменяется в разных энергетических областях взаимодействия, для разных партнеров столкновения, поэтому задача определения величины потери энергии непосредственно связана с установлением заряда частицы в каждый данный момент столкновения. В свою очередь, достижение приближенного равновесного заряда в среде связано с конкуренцией процессов захвата и потери электронов ионами, а также с состоянием возбуждения сталкивающихся частиц. Следовательно, в конечном итоге, элементарные бинарные столкновения непосредственно влияют на интегральные характеристики торможения. Область энергии, в которой это влияние особенно заметно, зависит от относительной скорости сталкивающихся частиц и скорости активных электронов на орбитах атомов и ионов, участвующих в обмене. А именно, когда эти скорости близки между собой и обмен электронами достигает большой величины, потери энергии для быстрой частицы становятся максимальными. На рис.1 показана энергетическая зависимость потерь энергии для протонов в кремнии. В общем виде эта закономерность повторяется для любых ионов и сред: I - начальная область, где ϵ пропорциональна скорости частиц V , $\epsilon \sim KV$, III - область применимости борновского приближения для расчета $\epsilon = -\frac{dE}{dx}$, область релятивистского увеличения ϵ - IV и, наконец, максимум ϵ , при скоростях частиц $V \sim V_0 Z^{\frac{2}{3}}$, где $V_0 = 2,19 \cdot 10^8$ см/с - II. С теоретической точки зрения эта II область не имеет доста-

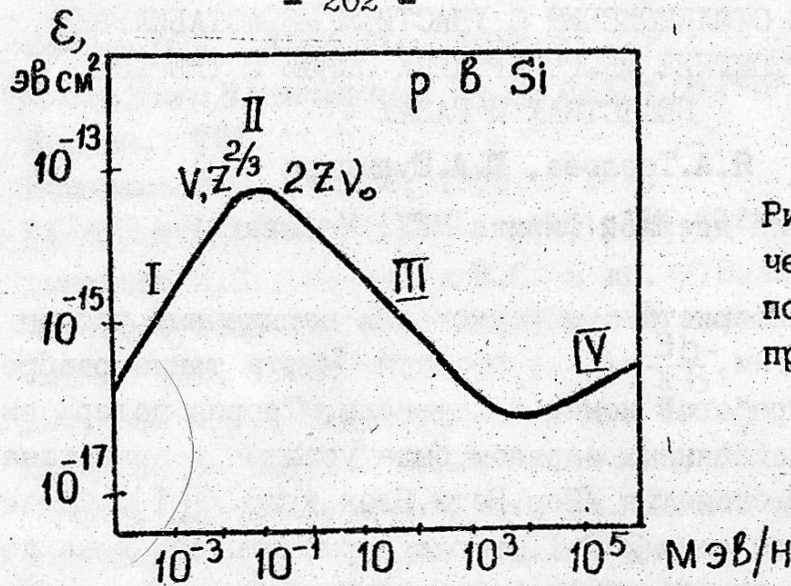


Рис. I. Энергетическая зависимость потерь энергии протонов в кремнии.

точно хорошего описания из-за сложного процесса интерференции нескольких механизмов торможения. При соответствующих скоростях взаимодействующих частиц проявляются их структурные особенности. Осцилляции R и $\mathcal{E}$ от Z и Z_c -ядерного заряда среды, выходят за пределы разброса экспериментальных данных. На рис. 2, 3 приведены примеры зависимости $R(Z)$ и $\mathcal{E}(Z, Z_c)$ [2-5]. Средний заряд ионов $\bar{i} = \sum \Phi_j i$, где Φ_j - относительное количество ионов с зарядом j в ионном пучке в равновесии, осциллирует в первом приближении, адекватно изменениям в величине потерь энергии $\mathcal{E}$, рис. 4 [6]. Значительную немонотонность можно заметить и в величинах сечений потери и захвата электронов для разных ионов при постоянной скорости частиц, см [7]. Современная техника эксперимента позволяет определять R и $\mathcal{E}$ с точностью до долей %. К сожалению, теория даже, казалось бы, в простом случае (тормозящая среда-водород и гелий) не описывает эксперимента в пределах точности измерений. Эта особенность связана со сложностью процесса торможения частиц.

При переходе от простых веществ к сложным соединениям не всегда выполняется аддитивность тормозной способности вещества, что затрудняет практически важную оценку $\mathcal{E}$ в органических средах, в дополнение к сложности установления элементного состава. На рис. 5 приведен пример нарушения аддитивности

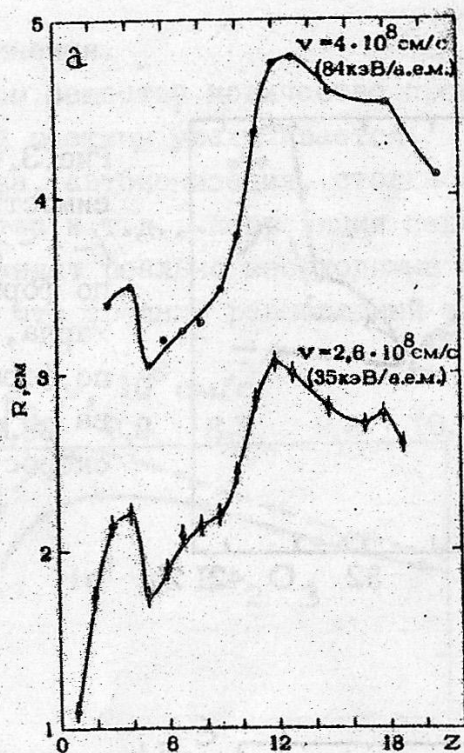


Рис.2. Экстраполи-
рованные пробеги
различных ионов
 $R(Z)$ в воздухе.

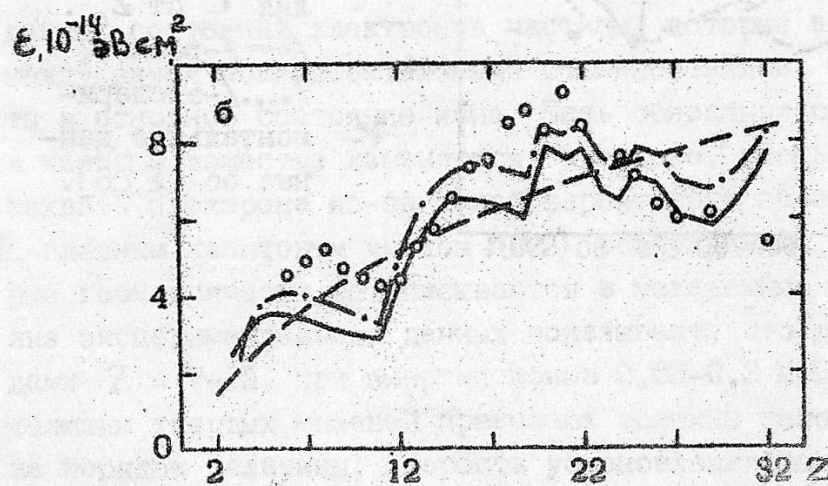


Рис.3. (а) Зависи-
мость ϵ от Z при
скорости $V = 1,3 \cdot 10^8$
см/с в угле-
роде: /---/-рас-
чет по формуле Лин-
дхарца [8], /—/—
расчет по формуле
Фирсова [5].

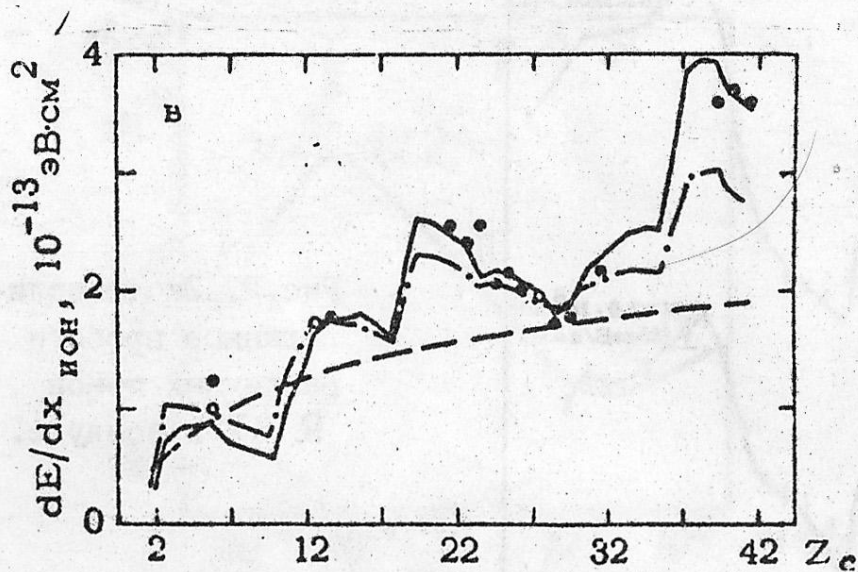


Рис.3.(б) Зависимость ξ от Z_c .
 /---/- расчет по формуле Линдхарда, /-.-.-/- по формуле Фирсова [5], ион азота, скорость $V \sim V_0$.

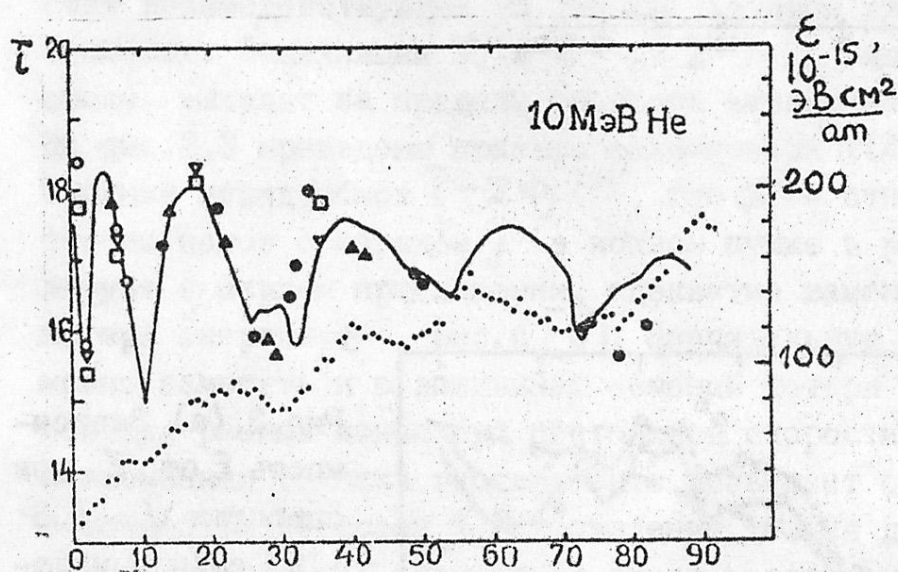


Рис.4. Зависимость среднего заряда ионов гелия $\bar{Z}$ от Z_c .
 /---/- расчет, /.../- экспериментальные данные об ξ [6].

ξ для соединения.

В твердом веществе количество процессов, влияющих на торможение быстрой частицы увеличивается. Процессы на поверхности вещества, автоионизация, столкновение возбужденных частиц внутри вещества и т.д., корреляция перечисленных процессов - все это усложняет реально необходимые оценки. Экспериментально установлено, что средний равновесный заряд достаточно быстрых

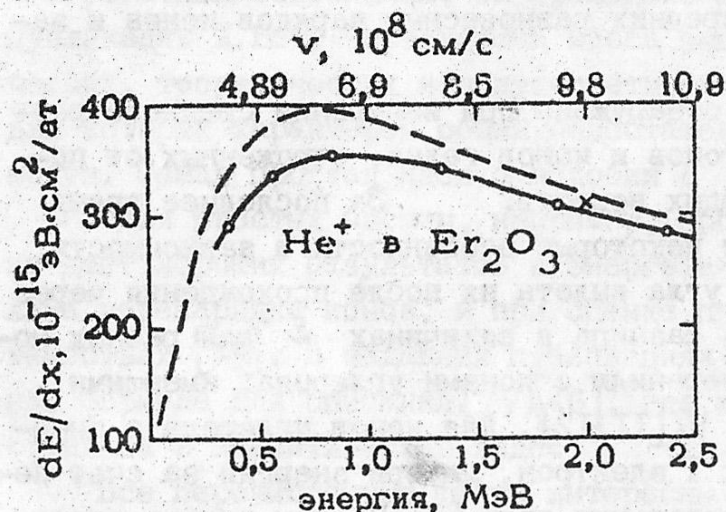


Рис.5. Энергетическая зависимость ξ/V для ионов гелия в Er_2O_3 . /- - -/- расчет, в соответствии с условием аддитивности, /o/ - эксперимент в Er_2O_3 .

ионов в твердом веществе больше, чем в газе. Основной причиной, как известно, является увеличенная потеря электрона из возбужденных состояний электронов частицы, которые в твердом веществе между двумя последовательными столкновениями не успевают перейти в основное состояние иона. Есть основания считать, что в твердом веществе изменяются, а именно, уменьшаются сечения захвата электрона из-за малой вероятности захвата в высокие (с главным квантовым числом $n \geq 2$) возбужденные состояния, которые геометрически не вписываются в межатомные расстояния. Анализ экспериментальных данных показывает, что для ионов с зарядами $Z = 7-15$, при энергии ионов $0,03-0,3$ МэВ/н, равновесные толщины твердых мишеней превышают толщины газовых мишеней почти на порядок величины, скорость установления равновесия тоже значительно отличается.

Обнаруженные экспериментально и подтвержденные теоретически осцилляции сечений захвата электрона ионом в зависимости от заря-

да ядра атома среды возникают из-за того, что экранировка поля атомных ядер электронами меняет потенциал взаимодействия, что сказывается на соотношении между орбитальными скоростями электронов в атоме вещества, находящимися на орбитах с разными n . Поэтому наиболее рельефно осцилляции обнаруживаются в зависимости парциальных сечений перезарядки от Z_c . С приближением атомного поля к кулоновскому (увеличение скорости частицы V) осцилляции такого рода уменьшаются [10]. Указанные особенности сечений отражаются на величинах средних равновесных зарядов ионов и зарядовых фракциях.

Аналогичное явление обнаружено при измерении среднего равновесного заряда $\bar{I}$ протонов и ионов гелия, отраженных от поверхностей различных твердых веществ. За последнее время экспериментально выявлены некоторые особенности в зависимости потери энергии частиц от угла вылета их после прохождения через тонкие пленки, обнаружена разница в величинах ξ для разных модификаций углерода по измерениям с ионами углерода, имеющими скорость в интервале 3-4 V_0 [11, 12]. Для ионов углерода с энергией 3 МэВ/н, сохранивших 1 электрон, потеря энергии за счет перезарядки составляет значительную долю ξ . В этом случае экспериментально обнаруживается эффект зависимости ξ от $Z^{k/2}$ ($k=2$ следует из соотношения, полученного с использованием 1 борновского приближения [1, 13]). Наряду с этими данными для 1-2 МэВ ионов гелия экспериментально установлено приближенное (в пределах экспериментальной точности) совпадение средних равновесных зарядов в парах (газах) и твердых модификациях одного и того же вещества. Это может означать, что для ионов гелия с одним электроном "эффект плотности вещества" не наблюдается [14].

Интересно проследить влияние возбужденных частиц в пучке быстрых ионов на величины ξ . С этой точки зрения, полезны исследования с использованием возбужденных метастабильных частиц, которые существуют сравнительно продолжительное время. Такими временами жизни характеризуются гелиеподобные ионы и атомы гелия в состояниях 1^3S . Пучок таких ионов получается пропусканием ускоренных частиц через твердые пленки или газовые мишени. Априори не ясно, выполняются ли закономерности, известные для невозбужден-

ных частиц в случае метастабильных. В настоящее время установлено, что количество метастабильных частиц сильно зависит от условий столкновений и в области скоростей ионов осциллирует в зависимости от ядра мишени [15].

Ввиду практической важности оценки величин потерь энергии в разных веществах, отличающихся как элементарным составом, так и агрегатным состоянием, за прошедшие почти 60 лет со времени публикации Х.Бете предложена масса эмпирических, полуэмпирических, теоретических и полутеоретических выражений для ξ/V , для которых характерен общий недостаток—"узкая" область применимости. Самая простая идея о подобии ξ для многозарядных ионов ξ' для простых частиц, например, протонов или атомов гелия, не дает хороших результатов в энергетической области, где велика перезарядка ионов, и при оценке потерь энергии в тяжелых веществах [16]. В недавних публикациях предлагается универсальная формула для описания $\xi(V)$ [16], где искомая зависимость представлена в аналитическом виде.

Все перечисленные факты интересны не только с точки зрения фундаментальных исследований, но и для нужд полупроводниковой технологии и микроэлектроники. Сообщалось также, что уточнение величины ξ понадобилось при создании нейтронного дозиметра и для диагностики поверхности тонких пленок [16]. Потребность в хорошем знании ξ возникает в космическом материаловедении, традиционных проблемах установления природы быстрых частиц, при создании новых веществ с необходимыми свойствами, в целях защиты от радиоактивных излучений. Таким образом, совершенствование методов измерения и теоретических оценок ξ необходимо.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сегре Э. // Экспериментальная ядерная физика, т. I, М., ИЛ, 1955.
2. Теплова Я. А., Николаев В. С. и др. ЖЭТФ, 42, 1962, 44.
3. S. Kalbitzer, H. Oetzmann Phys Lett., A59, 1976, 197, Rad E., 47, 1930, 57.
4. Кумахов М. А., Комаров Ф. Ф. Энергетические потери и пробеги ионов в твердых телах. Минск, изд. БГУ, 1979, 5-319.

5. Фирсов О.Б. ЖЭТФ, 36, 1959, 1517.
6. F Fukuzawa, Y. Narayama et al. Abstz. of Pap. XIII ICPEAC, 1983, Берлин, 581.
7. Николаев В.С. УФН, 85, 1965, 674.
8. I. Lindhard, N. Scharff. P.R., 1961, 124, 128.
9. Дмитриев И.С., Николаев В.С. и др. //Взаимодействие атомных частиц в веществе и на поверхности твердого тела", Ташкент, изд-во ФАН, 1978, II4.
10. Дмитриев И.С., Н.Ф.Воробьев и др. Тезисы Межд. конф. X-лучи и процессы во внутр. атомных оболочках, Лейпциг, 1984, II3.
11. Иферов Г.А., Кабачник Н.М. и др. Тезисы докл. ХУП Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Из-во МГУ, Москва, 1987, 37.
12. W. C. Back, G. H. Both et al. P.R.A, 35, 1987, № 1, 57.
13. N. E. B. Cowern et al. P.R.A, 30, 1984, № 4, 1682.
14. Fukuzawa F., Kanamori Y. et al. Preprint, Equilib. charge Fract of Fast He Ions in Solid and Gas Targets, 1987.
15. Воробьев Н.Ф., Теплова Я.А. и др. Тезисы ХУ ICPEAC, 1987, Англия, 506.
16. S. A. Guiz Rad. Eff., 88, 1986, 159-215.