

02;10;12

Взаимодействие ионов H^- с фольговыми мишенями перезарядного устройства канала транспортировки пучка

© А.С. Артемов, Ю.К. Байгачев, А.К. Геворков, А.О. СидоринОбъединенный институт ядерных исследований,
141980 Дубна, Московская область, Россия

(Поступило в Редакцию 3 марта 1997 г.)

Отмечается возможность экспериментального моделирования взаимодействия высокоэнергетических ионов H^- с фольговыми мишенями на пучках более доступных низких энергий при том же безразмерном параметре взаимодействия и аналогичных токовых характеристиках. Представлены результаты первого этапа исследований пучково-фольговой обдирки ионов H^- при энергиях 2 и 7 МэВ. На основе анализа зарядового состава пучка после углеродной фольги определены соответствующие сечения обдирки ионов и ионизации рождающихся при этом атомов водорода. Показано хорошее согласие результатов этих и других пучково-фольговых экспериментов с теоретическими сечениями на углероде при разных энергиях, а также с расчетными значениями при использовании принципа суперпозиции экспериментальных сечений на газовых углеродсодержащих мишенях.

Введение

Особенность атомной структуры ионов H^- позволяет широко использовать перезарядный метод управления потоками частиц в современных ускорительно-накопительных комплексах [1]. Для его реализации в области энергий выше десяти мегаэлектрон-вольт используются различные фольговые внутренние мишени (см., например, [2–4]). Материал и толщина мишени выбираются с учетом требуемого ресурса ее работы и зарядового состава пучка после взаимодействия. В предположении парных столкновений с учетом сечений основных каналов процесса обдирки в мишени [5,6] относительное число ионов H^- (η_-), атомов H^0 (η_0) и протонов (η_+) в пучке определяется выражениями

$$\begin{aligned} \eta_- &= \exp(-\sigma_{-1d} \cdot \hat{t}), \\ \eta_0 &= \frac{\sigma_{-1d}}{\sigma_{-1d} - \sigma_{01}} [\exp(-\sigma_{01} \cdot \hat{t}) - \exp(-\sigma_{-1d} \cdot \hat{t})], \\ \eta_+ &= 1 - \eta_- - \eta_0, \end{aligned} \quad (1)$$

где σ_{-1d} — сечение обдирки иона H^- в различные квантовые состояния атома H^0 , включая непрерывный спектр [cm^2]; σ_{01} — усредненное сечение ионизации рождающихся при обдирке атомов водорода [cm^2], $\hat{t} = 6 \cdot 10^{23} t / A_0$, t и A_0 — толщина мишени [g/cm^2] и ее эффективное атомное число соответственно.

Характерные кривые зарядового состава пучка в зависимости от безразмерного параметра взаимодействия $\sigma_{-1d} \cdot \hat{t}$ приведены на рис. 1 для отношения $\sigma_{-1d} / \sigma_{01} = 2.5$. При одинаковой функциональной зависимости указанных сечений от энергии данные кривые универсальны для взаимодействия пучка ионов H^- с мишенью выбранного материала. В этом случае возможно экспериментально моделировать ряд особенностей данного взаимодействия при малых (более доступных) энергиях и делать прогнозы для высокоэнергетических

пучков. К числу представляющей интерес информации можно отнести оптимальные толщину и тип мишени, а также ресурс ее работы для данной интенсивности, длительности и частоте импульса пучка. При этом можно апробировать методики контроля над целостностью мишени, например, по ее электронному или фотонному излучению. Возможность моделирования ресурса работы фольговой мишени основана на аналогичной сечениям σ_{-1d} и σ_{01} зависимости энерговыведения в ней ($\approx 1/\beta^2$, β — скорость частицы) для данного эффективного заряда частиц пучка в широком диапазоне энергий от нескольких МэВ до релятивистских [7–9] при излучательном теплоотводе с ее поверхности. Таким образом, создавая необходимый зарядовый состав пучка при одной энергии и толщине мишени \hat{t} , можно исследовать тепловые нагрузки, ожидаемые для аналогичного по интенсивности потока ионов другой энергии и толщине мишени, соответствующей тому же безразмерному параметру $\sigma_{-1d} \cdot \hat{t}$ (рис. 1). Это особенно актуально для выбора оптимальных материала, структуры и технологии изготовления фольговых мишеней для перезарядного участка канала транспортировки пучка высокой энергии [4,10].

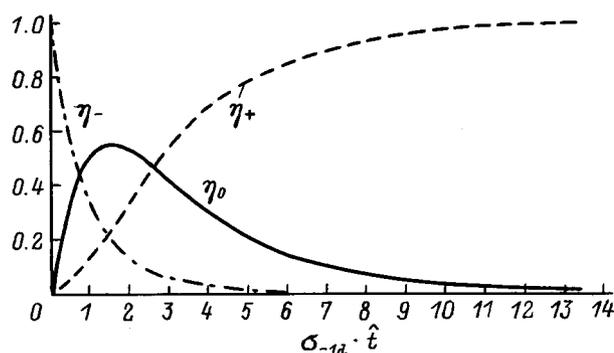


Рис. 1. Зависимость зарядового состава пучка от параметра пучково-фольгового взаимодействия $\sigma_{-1d} \cdot \hat{t}$.

В то же время, как показано в работе [11], поведение релятивистских ионов H^- отличается от положительных ионов низких энергий в процессах пучково-фольгового взаимодействия, отвечающих за формирование потоков высоковозбужденных нейтральных атомов. Экспериментальная информация о подобных процессах с участием ионов H^- низких энергий в настоящее время отсутствует. В связи с этим, несмотря на малое относительное число этих возбужденных частиц в пучке, представляет интерес более детальное изучение их рождения и разрушения при различных энергиях и одинакового времени взаимодействия пучка ионов H^- с "полем" вещества мишени.

В данной работе приведены результаты первого этапа экспериментов, проведенных в 1987–1988 г. по апробации пучково-фольгового взаимодействия в области низких энергий ионов H^- с ориентацией на ожидаемый безразмерный параметр $\sigma_{-1d} \cdot \hat{t}$ на перезарядном участке ($E_{H^-} = 600 \text{ MeV}$) линейного ускорителя МEGАН (г. Троицк) [12].

Техника измерений

Схема экспериментов с пучками ионов энергией 2 и 7 MeV представлена на рис. 2. Пучок ионов H^- формировался на выходе секций 1 с пространственно однородной ($E_{H^-} = 2 \text{ MeV}$) и пространственно периодической ($E_{H^-} = 7 \text{ MeV}$) высокочастотными квадрупольными фокусировками линейного ускорителя. В качестве перезарядных мишеней использовалась фольга двух типов: полимерные пленки из коллоксилина $\{C_6H_7O_2(OH)(ONO_2)_2\}_n$, обладающие высокой прочностью при перепадах давления, и углеродная фольга толщиной $2 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ($\approx 100 \text{ \AA}$), нанесенная на Ni сетку с оптической прозрачностью 84% в ИАЭ им. И.В. Курчатова. Толщина углеродной фольги определялась с точностью $\pm 15\%$ по потерям энергии α -частиц из ^{241}Am источника ($E_\alpha = 5.486|_{85\%}, 5.443|_{13\%} \text{ MeV}$) с использованием описанной в работе [13] методики, учитывающей искажения измеряемых спектров (с мишенью и без нее),

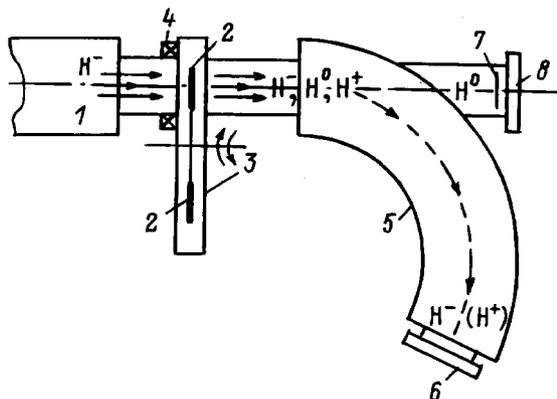


Рис. 2. Схема экспериментов по пучково-фольговому взаимодействию.

вносимые анализатором. Полимерные пленки изготавливались методом флотации на воде с последующим нанесением на металлическую сетку с оптической прозрачностью 98%. Различная толщина пленок получалась при изменении концентрации исходного материала в растворителе — ацетоне. Толщины полимерных пленок измерялись интерферометрическим способом и находились в пределах 500–2000 Å. Обоймы с различными мишенями 2, а также с используемыми сетками (для экспериментального определения их прозрачности по отношению к ионам H^-) помещались во вращающийся барабан 3. Эксперименты показали, что сетки без мишеней обеспечивают полное прохождение пучка ионов H^- без потерь при некотором изменении его зарядового состава и спектра по энергии. Поворачивая барабан на фиксированные углы, можно менять мишени в процессе эксперимента. Ток пучка ионов перед взаимодействием контролировался индукционным датчиком 4. После мишени поток из H^- , H^0 и H^+ частиц пространственно разделялся по заряду магнитом-сепаратором 5. Цилиндр Фарадея 6 регистрировал ионы H^- или протоны в зависимости от полярности магнитного поля. H^0 -компонента пучка после 100%-ной обдирки на заземленной Al фольге 7 толщиной $10 \mu\text{m}$ регистрировалась цилиндром Фарадея 8. Вторичная эмиссия с поверхности цилиндров 6 и 8, а также сопутствующие электроны из алюминиевой фольги эффективно подавлялись краевым магнитным полем сепаратора. Усиленные токовые сигналы с датчиков 4, 6 и 8 через аналого-цифровой преобразователь формы поступали на обработку в ЭВМ. Периодический контроль измерения потоков частиц осуществлялся по их общему балансу и равенству сигналов от датчиков в отсутствие мишени при включенном (датчики 4 и 6) и выключенном (4 и 8) поле сепаратора. Адекватность токовых сигналов датчика 6 при изменении полярности магнитного поля проверялась при 100%-ной обдирке ионов H^- в протоны на контрольной мишени 2 из Al фольги толщиной $10 \mu\text{m}$.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Результаты экспериментов при энергии 7 MeV показали, что коэффициент обдирки ионов H^- в нейтральные атомы на наиболее тонкой полимерной пленке составил $\approx 0.2\%$. Остальная часть пучка преобразовывалась в протоны. Ресурс пленки до разрушения при импульсной плотности тока пучка на поверхности $j_i \approx 20 \text{ mA}/\text{cm}^2$, длительности импульса $\tau_j \approx 20 \mu\text{s}$ и частоте $f = 0.5 \text{ Hz}$ составил $\approx 15 \text{ min}$. С увеличением толщины пленок коэффициент η_0 уменьшался в соответствии с экспоненциальной зависимостью (1). В экспериментах с энергией пучка 2 MeV достигалась практически полная обдирка ионов H^- в протоны, а ресурс пленок при тех же токовых характеристиках несколько уменьшался. Некоторой неожиданностью был тот факт, что в пучке

с фиксированными характеристиками время жизни испытываемых полимерных пленок увеличивалось с ростом их толщины. Анализ тепловых нагрузок и свойств коллоксилина, а также просмотр отработанных мишеней под микроскопом показывают, что причина этого, а также достаточно малого ресурса пленок, по-видимому, является их температурное разложение в местах соприкосновения с сеткой, нагреваемой до $T_c > 90^\circ\text{C}$ из-за потерь энергии попадающих на нее ионов. В этом случае можно ожидать значительного увеличения времени жизни подобных мишеней в релятивистских пучках с аналогичными токовыми характеристиками.

При проведении измерений с углеродной фольгой в течение нескольких дней она сохранила работоспособность в упомянутых выше экспериментальных условиях. Не обнаружено также каких-либо структурных изменений при изучении состояния поверхности фольги под микроскопом. В результате экспериментов получены следующие значения коэффициентов взаимодействия без развала ионов H^- , а также из обдирки в атомы H^0 и протоны на мишени с углеродной фольгой: $\eta_{-|r} = (3.8 \pm 0.2) \cdot 10^{-5}$, $\eta_{0|r} = (2.55 \pm 0.13) \cdot 10^{-2}$, $\eta_{+|r} = (9.75 \pm 0.50) \cdot 10^{-1}$ (2 MeV) и $\eta_{-|r} = (1.7 \pm 0.1) \times 10^{-2}$, $\eta_{0|r} = 0.28 \pm 0.01$, $\eta_{+|r} = 0.70 \pm 0.04$ (7 MeV). Измеренное значение прозрачности сетки для ионов без обдирки составляет 0.84 ± 0.04 . С учетом этого получаем относительное число частиц в различных зарядовых состояниях после взаимодействия пучка непосредственно с углеродной фольгой. При энергии ионов 2 и 7 MeV данные коэффициенты равны $\eta_- = (4.50 \pm 0.45) \cdot 10^{-5}$, $\eta_0 = (3.0 \pm 0.3) \cdot 10^{-2}$, $\eta_+ = 0.97 \pm 0.10$ и $\eta_- = (2.0 \pm 0.2) \cdot 10^{-2}$, $\eta_0 = 0.33 \pm 0.03$, $\eta_+ = 0.65 \pm 0.07$ соответственно. В работе [14] показано, что функциональные зависимости регистрируемых зарядовых состояний налетающих частиц с атомной структурой от толщины фольговой мишени аналогичны характерным зависимостям для газовой мишени вплоть до толщин, соответствующих переходу к равновесным зарядам. Для ионов H^- и атомов H^0 , взаимодействующих с углеродной фольгой, эта граничная толщина определяется значениями $\eta_- \approx 5 \cdot 10^{-8}$ и $\eta_0 \approx 10^{-3}$ соответственно. В связи с этим, используя концепцию парных столкновений и выражения (1), можно получить сечения σ_{-1d} и σ_{01} для углеродной фольги по измеренным коэффициентам η_- и η_0 . Для энергий 2 и 7 MeV эти сечения соответственно равны $\sigma_{-1d} = (1.00 \pm 0.16) \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$, $\sigma_{01} = (4.0 \pm 1.4) \cdot 10^{-17} \text{ cm}^2$ и $\sigma_{-1d} = (3.5 \pm 0.6) \times 10^{-17} \text{ cm}^2$, $\sigma_{01} = (1.5 \pm 0.6) \cdot 10^{-17} \text{ cm}^2$ и представлены на рис. 3. Для сравнения там же приведены сечения, полученные из экспериментов по пучково-фольговому взаимодействию при энергии 0.8 [14] и 800 MeV [11], а также теоретические данные [15,16] и результаты расчетов с использованием принципа суперпозиции сечений и известных экспериментальных результатов [5,17,18] для газовых углеродсодержащих мишеней. Хорошее согласие представленных данных между собой с учетом их аппроксимации зависимостью $\propto 1/\beta^2$ указывает на правомерность рассмотрения быстрого иона H^- в твердом

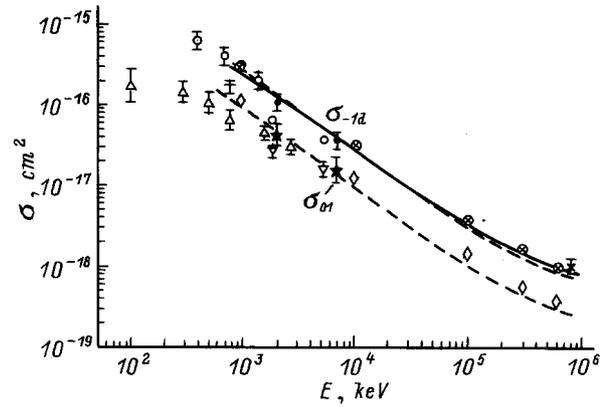


Рис. 3. Сечения обдирки ионов H^- ($\sigma_{-1d} \rightarrow \circ, \otimes, \bullet, +, *$, сплошная кривая) и атомов водорода ($\sigma_{01} \rightarrow \triangle, \nabla, \blacktriangle, \diamond$) на углероде. \circ, ∇ — результаты [5,17], полученные из принципа суперпозиции сечений и экспериментальных данных по обдирке ионов H^- и атомов H (1s) на CO_2 и O_2 ; \otimes, \diamond — теоретические результаты [15] для ионов H^- и атомов H (1s); $+, *$ — сечения, полученные из пучково-фольговых экспериментов [14] и [11]; \bullet, \blacktriangle — экспериментальные результаты данных исследований; \triangle — результаты, полученные в работе [18] из принципа суперпозиции измеренных сечений обдирки атомов водорода в основном состоянии на углеродсодержащих газах (ошибки соответствуют разбросу данных при комбинации разных молекул); сплошная кривая — кривая, построенная в соответствии с [16]; штриховая — аппроксимация представленных данных зависимостью $\propto 1/\beta^2$.

теле в виде самостоятельной атомной системы, испытывающей парные столкновения. В отличие от теоретических предсказаний работы [19] данная согласованность результатов позволяет также сделать вывод о малой роли каскадных процессов с участием промежуточных возбужденных атомов водорода при пучково-фольговой обдирке ионов H^- .

В заключение проанализируем систематические ошибки полученных результатов из-за неучета парциального вклада абсорбированных газов в измеренную толщину углеродной фольги. Величина данной абсорбции при различных методах получения углеродной фольги измерялась в работе [20]. В экспериментах использовались сечения упругого рассеяния быстрых α -частиц ($E_\alpha = 25 \text{ MeV}$) на заданный угол и зависимость их конечной энергии от массы ядра мишени. Полученные результаты показывают, что основными компонентами абсорбированных газов являются водород (≈ 13 –60% по числу атомов) и кислород (≈ 2 –5%), причем доминирующая часть атомов водорода находится в химически связанном с углеродом состоянии. Неучет вклада абсорбированных газов в потери энергии α -частиц приводит к завышению числа атомов углерода при определении толщины мишени. В то же время на атомах этих газов происходит дополнительная обдирка ионов H^- и атомов H^0 . Парциальные вклады этих двух каналов с учетом их разного знака определяют систематическую ошибку измеренных сечений из-за абсорбции в фольге.

В связи с тем что удельные потери энергии α -частиц на атомарном водороде составляют $\approx 23\%$ от потерь на углероде [21,22], получаем мнимую добавку величиной $\approx 3\text{--}14\%$ к углеродной толщине мишени из-за содержания в ней водорода. Парциальные сечения обдирки на атомах этого газа (см., например, [6]) примерно в девять раз меньше, чем на углероде. В результате систематическая ошибка из-за абсорбции водорода оценивается $\approx 1.5\text{--}7\%$ в сторону занижения сечений. Аналогичные рассуждения для абсорбированного кислорода приводят к практически полной компенсации ошибок по каналам потерь энергии и обдирки. Таким образом, при учете систематических ошибок, обусловленных ожидаемой абсорбцией водорода и кислорода в углеродной фольге, полученные сечения обдирки необходимо увеличить на $\leq 7\%$. Данная величина существенно меньше погрешности измерений и практически не влияет на представленные выше результаты.

Авторы выражают благодарность Л.В.Аринину, Ю.Л.Венгеру и другим коллегам за помощь в подготовке и проведении экспериментов.

Список литературы

- [1] Димов Г.И., Дудников В.Г. // Физика плазмы. 1978. Т. 4. № 3. С. 692–703.
- [2] Aaron W.S., Petek M., Zevenbergen L.A., Gibson J.R. // Nucl. Instr. Meth. A. 1989. Vol. 282. N 1. P. 147–152.
- [3] Isao Yamane // ICANS-11. Intern. Collabor. on Advanced Neutron Sources. KEK. Tsukuba, 1990. P. 224–234.
- [4] Adamson G.E., Borden M.J., Johnson R.N., Nicaise W.F. // Nucl. Instr. Meth. A. 1991. Vol. 33. N 1. P. 63–68.
- [5] Nakai Y., Shirai T., Tabata T., Ito R. // Atomic Data and Nuclear Data Tables. 1987. Vol. 37. N 1. P. 69–101.
- [6] Anderson L.W., Anderson C.J., Durand L., Riesselmann K. // Phys. Rev. A. 1991. Vol. 43. N 11. P. 5934–5945.
- [7] Andersen H.H., Ziegler J.F. Hydrogen Stopping Powers and Ranges in All Elements. New York: Pergamon Press, 1977.
- [8] Janni J.I. // Atomic Data and Nuclear Data Tables. 1982. Vol. 27. P. 147–339.
- [9] Ковалев В.П. Эффективный заряд иона. М.: Энергоатомиздат, 1991. 168 с.
- [10] Lu Hao-Lin, Sommer W.F., Borden M.J. // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. Vol. 362. N 2/3. P. 239–244.
- [11] Mohagheghi A.H., Bryant H.C. et al. // Phys. Rev. A. 1991. Vol. 43. N 3. P. 1345–1365.
- [12] Казарновский М.В., Курбангалиев Н.М. и др. // Тр. X Всесоюз. совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1987. Т. 2. С. 253–256.
- [13] Abele H.K., Glassel P. et al. // Nucl. Instr. Meth. 1976. Vol. 137. N 1. P. 157–167.
- [14] Cue N., de Castro Faria N.V. et al. // Nucl. Instr. Meth. 1980. Vol. 170. N 1–3. P. 67–72.
- [15] Каминский А.К., Мецеров Р.А., Николаев В.С. // Тр. радио-технического института. М., 1973. № 16. С. 330–335.
- [16] Gillespie G.H. // Phys. Rev. A. 1977. Vol. 16. N 3. P. 943–950.
- [17] Радченко В.И. // ЖЭТФ. 1994. Т. 105. Вып. 4. С. 834–852.
- [18] Toburen L.H., Nakai M.Y., Langley R.A. // Phys. Rev. 1968. Vol. 171. N 1. P. 114–122.
- [19] Kaminsky A.K., Mescherov R.A., Popova M.I. // Nucl. Instr. Meth. 1976. Vol. 137. N 1. P. 183–188.
- [20] Tait N.R.S., Tolfree D.W.L. // Nucl. Instr. Meth. 1980. Vol. 176. N 3. P. 433–438.
- [21] Пучеров Н.Н., Романовский С.В., Чеснокова Т.Д. Таблицы массовой тормозной способности и пробегов заряженных частиц с энергией 1–100 МэВ. Киев: Наукова думка, 1975. 295 с.
- [22] Hanke C., Laursen J. // Nucl. Instr. Meth. 1978. Vol. 151. N 1/2. P. 253–260.