

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

97-38

P9-97-38

А.С.Артемов, Ю.К.Байгачев, А.К.Геворков, А.О.Сидорин

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИОНОВ H^- С ФОЛЬГОВЫМИ
МИШЕНЯМИ ПЕРЕЗАРЯДНОГО УСТРОЙСТВА
КАНАЛА ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА

Направлено в «Журнал технической физики»

1997

1. 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 мегаэлектронвольт используются различные фольговые внутренние мишени (см., например, [2-4]). Материал и толщина мишени выбираются с учетом требуемого ресурса её 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 [см^2]; σ_{01} - усреднённое сечение ионизации рождающихся при обдирке атомов водорода [см^2], $\hat{t} = 6 \cdot 10^{23} t / A_0$, t и A_0 - толщина мишени [$\text{г}/\text{см}^2$] и её 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 её работы для данной интенсивности, длительности и частоты импульса пучка. При этом можно апробировать методики контроля над целостностью мишени, например, по её электронному или фотонному излучению. Возможность моделирования ресурса работы фольговой мишени основана на аналогичной зависимости σ_{-1d} и σ_{01} от энергии ионизации 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 её поверхности. Таким обра-

зом, 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 $\sigma_{-1d} \cdot \hat{t}$. Это особенно актуально для выбора оптимальных материала,

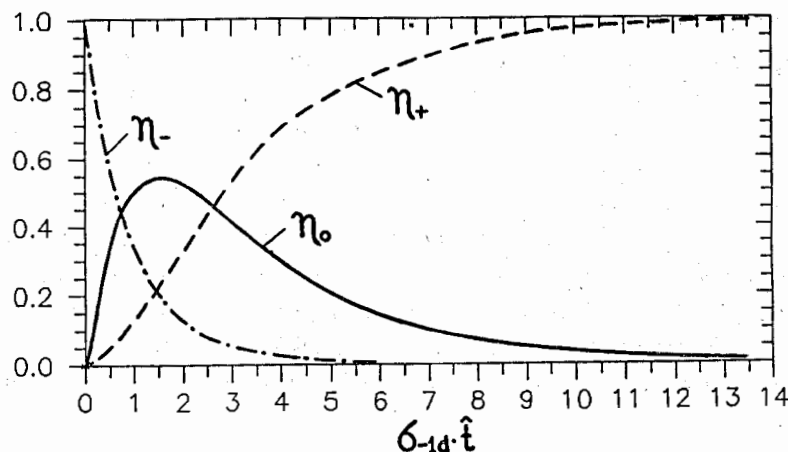
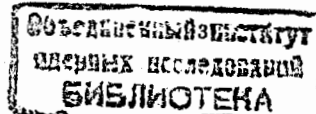


Рис.1. Зависимость зарядового состава пучка от параметра пучково-фольгового взаимодействия $\sigma_{-1d} \cdot \hat{t}$ при $\sigma_{-1d} / \sigma_{01} = 2,5$.

структуры и технологии изготовления фольговых мишеней для перезарядного участка канала транспортировки пучка высокой энергии [4,10]. 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 высоковозбуждённых 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 возбуждённых частиц в пучке, представляет интерес более детальное изучение их рождения и разрушения при различных энергиях и одинаковом времени взаимодействия пучка ионов H^- с "полем" вещества мишени.

В данной работе приведены результаты первого этапа экспериментов, проведенных в 1987-88 гг. 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



($E_{H^-} = 600$ МэВ) линейного ускорителя МЕГАН (г. Троицк) [12].

2. ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Схема экспериментов с пучками ионов энергией 2 и 7 МэВ представлена на рис.2. Пучок ионов H^- формировался на выходе секций 1 с пространственно-однородной ($E_{H^-} = 2$ МэВ) и пространственно-периодической ($E_{H^-} = 7$ МэВ) высокочастотными квадрупольными фокусировками линейного ускорителя. В качестве перезарядных мишеней использовались фольги двух типов - полимерные плёнки из коллоксилина $\{C_6H_7O_2(OH)(ONO_2)_2\}_n$, обладающие высокой прочностью при перепадах давления, и углеродная фольга толщиной 2 мкг/см² (≈ 100 Å), нанесённая 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 ²⁴¹Am-источника ($E_\alpha = 5,486_{185\%}; 5,443_{113\%}$ МэВ) с использованием описанной в работе [13] методики, учитывающей искажения измеряемых спектров (с мишенью и без неё), вносимые анализатором. Полимерные плёнки изготавливались

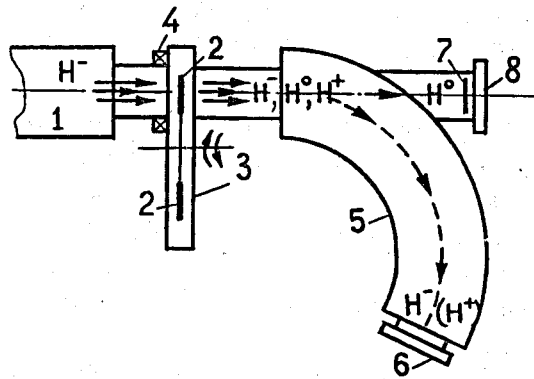


Рис.2. Схема экспериментов по пучково-фольговому взаимодействию при энергии ионов H^- 2 и 7 МэВ.

методом флотации на воде с последующим нанесением на металлическую сетку с оптической прозрачностью 98%. Различная толщина плёнок получалась при изменении концентрации исходного материала в растворителе-ацетоне. Толщины полимерных плёнок измерялись ин-

терферометрическим способом, они находились в пределах $500 \div 2000$ 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% обдирки на заземлённой Al-фольге 7 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 АЦП-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% обдирке ионов H^- в протоны на контрольной мишени 2 из Al-фольги толщиной 10 мкм.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментов при энергии 7 МэВ показали, что коэффициент обдирки ионов H^- в нейтральные атомы на наиболее тонкой полимерной плёнке составил $\approx 0,2\%$. Остальная часть пучка превращалась в протоны. Ресурс плёнки до разрушения при импульсной плотности тока пучка на поверхности $j_i \approx 20$ мА/см², длительности импульса $\tau_i \approx 20$ мкс и частоте $f = 0,5$ Гц составил ≈ 15 минут. С увеличением толщины плёнок коэффициент η_0 уменьшался в соответствии с экспоненциальной зависимостью (1). В экспериментах с энергией пучка 2 МэВ достигалась практически полная обдирка ионов H^- в протоны, а ресурс плёнок при тех же токовых характеристиках несколько уменьшался. Некоторой неожиданностью был тот факт, что в

пучке с фиксированными характеристиками время жизни испытываемых полимерных плёнок увеличивалось с ростом их толщины. Анализ тепловых нагрузок и свойств коллоксилина, а также просмотр обработанных мишеней под микроскопом показывает, что причина этого, а также достаточно малого ресурса плёнок, 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 неё 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 их обдирки в атомы H^o и протоны на мишени с углеродной фольгой: $\eta_{-|t} = (3,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-5}$, $\eta_{o|t} = (2,55 \pm 0,13) \cdot 10^{-2}$, $\eta_{+|t} = (9,75 \pm 0,50) \cdot 10^{-1}$ (2 МэВ) и $\eta_{-|t} = (1,7 \pm 0,1) \cdot 10^{-2}$, $\eta_{o|t} = 0,28 \pm 0,01$, $\eta_{+|t} = 0,70 \pm 0,04$ (7 МэВ). Измеренное значение прозрачности сетки для ионов без обдирки составляет $0,84 \pm 0,04$. С учетом этого получаем относительное число частиц в различных зарядовых состояниях после взаимодействия пучка непосредственно с углеродной фольгой. При энергии ионов 2 и 7 МэВ данные коэффициенты равны $\eta_- = (4,50 \pm 0,45) \cdot 10^{-5}$, $\eta_o = (3,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-2}$, $\eta_+ = 0,97 \pm 0,10$ и $\eta_- = (2,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-2}$, $\eta_o = 0,33 \pm 0,03$, $\eta_+ = 0,65 \pm 0,07$ 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^o , взаимодействующих с углеродной фольгой, эта граничная толщина определяется значениями $\eta_- \approx 5 \cdot 10^{-8}$ и $\eta_o \approx 10^{-3}$ соответственно. В связи с этим, используя концепцию парных столкновений и выражения (1), можно получить сечения σ_{-1d} и σ_{o1} для углеродной фольги по измеренным коэффициентам η_- и η_o . Для энергий 2 и 7 МэВ эти сечения соответственно равны $\sigma_{-1d} = (1,00 \pm 0,16) \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$, $\sigma_{o1} = (4,0 \pm_{0,8}^{1,4}) \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$ и $\sigma_{-1d} = (3,5 \pm 0,6) \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$, $\sigma_{o1} = (1,5 \pm_{0,4}^{0,6}) \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$ и представлены на рис.3. Для сравнения там же приведены сечения, полученные из

экспериментов по пучково-фольговому взаимодействию при энергии 0,8 МэВ [14] и 800 МэВ [11], а также теоретические данные [15,16] и

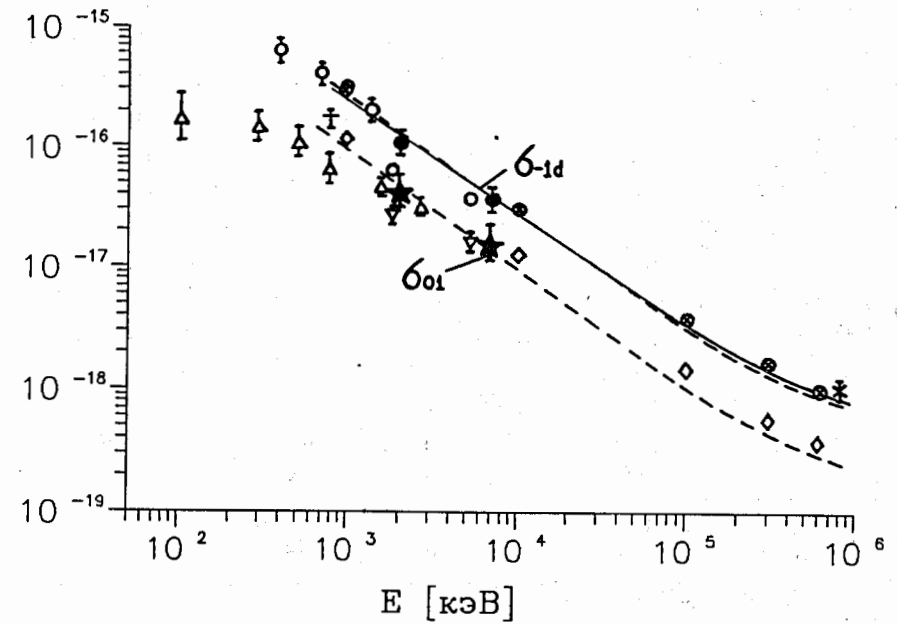


Рис.3. Сечения обдирки ионов H^- ($\sigma_{-1d} \rightarrow \circ, \otimes, \bullet, +, *$, сплошная кривая) и атомов водорода ($\sigma_{o1} \rightarrow \Delta, \nabla, \star, \diamond$) разных энергий на угледе [см²]:

- \circ, ∇ - результаты, полученные из принципа суперпозиции сечений и экспериментальных данных по обдирке ионов H^- и атомов $H(1s)$ на CO_2 и O_2 , представленных в работах [5,17];
- \otimes, \diamond - теоретические результаты работы [15] для ионов H^- и атомов $H(1s)$;
- $+, *$ - сечения, полученные из пучково-фольговых экспериментов работ [14] и [11] соответственно;
- \bullet, \star - экспериментальные результаты данных исследований;
- Δ - 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);
- (—) - кривая, построенная в соответствии с теоретическими результатами работы [16];
- (---) - аппроксимация представленных данных по σ_{-1d} и σ_{o1} зависимостью $\propto 1/\beta^2$.

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 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 неучёта парциального вклада абсорбированных газов в измеренную толщину углеродной фольги. Величина данной абсорбции при различных методах получения углеродных фольг измерялась в работе [20]. В экспериментах использовались сечения упругого рассеяния быстрых α -частиц ($E_\alpha = 25$ МэВ) на заданный угол и зависимость их конечной энергии от массы ядра мишени. Полученные результаты показывают, что основными компонентами абсорбированных газов являются водород ($\approx 13 \div 60$ % по числу атомов) и кислород ($\approx 2 \div 5$ %). Причём доминирующая часть атомов водорода находится в химически связанном с углеродом состоянии. Неучёт 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 ≈ 23 % от потерь на углероде [21,22], получаем мнимую добавку величиной $\approx 3 \div 14$ % 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 $\approx 1,5 \div 7$ % в сторону занижения сечений. Аналогичные рассуждения применительно к абсорбированному кислороду приводят к практически полной компенсации ошибок по каналам потерь энергии и обдирки. Таким образом, при учёте систематических ошибок, обусловленных ожидаемой абсорбцией водорода и кислорода в углеродной фольге, полученные сечения обдирки необходимо увеличить на ≤ 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.

Литература

1. Димов Г.И., Дудников В.Г. - Физика плазмы, 1978, Т.4, N.3, С.692-703.
2. Aaron W.S., Petek M., Zevenbergen L.A., Gibson J.R. - Nucl.Instr. and Meth.A, 1989, V.282, No.1, P.147-152.
3. Isao Yamane - ICANS-11, Intern.Collabor. on Advanced Neutron Sources (KEK, Tsukuba, October 22-26, 1990), P.224-234.
4. Adamson G.E., Borden M.J., Johnson R.N., Nicaise W.F. - Nucl.Instr. and Meth.A, 1991, V.303, No.1, P.63-68.
5. Nakai Y., Shirai T., Tabata T., Ito R. - Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1987, V.37, No.1, P.69-101.
6. Anderson L.W., Anderson C.J., Durand L., Riesselmann K. - Phys.Rev.A., 1991, V.43, No.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, V.27, P.147-339.
9. Ковалев В.П. Эффективный заряд иона.- Москва: Энергоатомиздат, 1991.
10. Lu Hao-Lin, Sommer W.F., Borden M.J. - Nucl.Instr. and Meth.A, 1995, V.362, Nos.2/3, P.239-244.
11. Mohagheghi A.H., Bryant H.C. et al. - Phys.Rev.A., 1991, V.43, No.3, P.1345-1365.
12. Казарновский М.В., Курбангалиев Н.М. и др. - Труды 10-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 21-23 октября, 1986 г.) ОИЯИ, Д9-87-105, Дубна, 1987, Т.2, С.253—256.
13. Abele H.K., Glassel P. et al. - Nucl.Instr. and Meth., 1976, V.137, No.1, P.157-167.
14. Cue N., N.V.De Castro Faria et al. - Nucl.Instr. and Meth., 1980, V.170, Nos.1-3, P.67-72.

15. Каминский А.К., Мещеров Р.А., Николаев В.С. - Труды радиотехнического института (Москва), 1973, N.16, С.330-335.
16. Gillespie G.H. - Phys.Rev.A., 1977, V.16, No.3, P.943-950.
17. Радченко В.И. - Журн.Эксп.и Теор.Физики, 1994, Т.105, Вып.4, С.834-852.
18. Toburen L.H., Nakai M.Y., Langley R.A. - Phys.Rev., 1968, V.171, No.1, P.114-122.
19. Kaminsky A.K., Mescherov R.A., Popova M.I. - Nucl.Instr. and Meth., 1976, V.137, No.1, P.183-188.
20. Tait N.R.S., Tolfree D.W.L. - Nucl.Instr. and Meth., 1980, V.176, No.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.
22. Hanke C., Laursen J. - Nucl.Instr. and Meth., 1978, V.151, Nos.1/2, P.253-260.