

10

## Угловые распределения ионов легких элементов после прохождения тонкой углеродной пленки

© П.Ю. Бабенко, С.С. Козловский, В.И. Афанасьев,  
М.И. Миронов, С.Я. Петров, А.В. Худолеев, Ф.В. Чернышев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург  
E-mail: babenko@npd.ioffe.rssi.ru  
С.-Петербургский государственный технический университет

Поступило в Редакцию 8 мая 2001 г.

Представлены результаты измерения углов рассеяния ионов, образовавшихся при прохождении моноэнергетического пучка атомов водорода, дейтерия и гелия-4 через углеродную пленку толщиной  $2.7 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ , в диапазоне энергий 5–230 keV — водород, 5–25 keV — дейтерий, 52–230 keV — гелий. Экспериментальные данные сравниваются с расчетом, выполненным с помощью программы численного моделирования SRIM-2000. Исследуется также изотопный эффект для ионов водорода (зависимость углового распределения от массы изотопа).

Одним из перспективных методов диагностики термоядерной плазмы является анализ потока атомов водорода, дейтерия, трития и гелия, испускаемых плазмой [1]. Этот метод в настоящее время рассматривается как основной для определения изотопного состава дейтериево-тритиевой топливной смеси будущего токамака-реактора [2]. В анализаторах нейтральных частиц, с помощью которых осуществляется анализ потока атомов из плазмы, часто в качестве обдирочной мишени для атомов используются тонкие пленки, а образовавшийся поток вторичных ионов анализируется по массе и энергии в магнитном и электрическом полях [3]. При этом для оптимизации конфигурации электрического и магнитного полей, а также для наиболее полного сбора частиц необходимо учитывать их рассеяние в обдирочной пленке. Наиболее интересным с этой точки зрения является диапазон энергии атомов от единиц до сотен килоэлектронвольт.

В данной работе измерялись угловые распределения ионов, образовавшихся при прохождении моноэнергетического пучка атомов водоро-

да, дейтерия и гелия-4 через углеродную пленку толщиной  $2.7 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ , в диапазоне энергий 5–230 keV — водород, 5–25 keV — дейтерий, 52–230 keV — гелий. Также исследовался изотопный эффект для ионов водорода (зависимость углового распределения от массы изотопа).

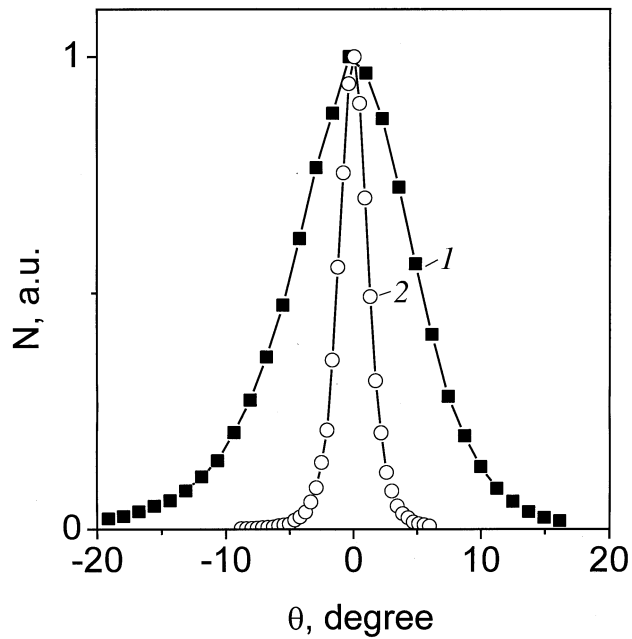
В эксперименте использовался моноэнергетический пучок ионов, который путем перезарядки на газовой мишени преобразовывался в пучок атомов. Коллимированный при помощи диафрагмы 2 mm моноэнергетический пучок атомов направлялся на тонкую углеродную пленку, установленную перпендикулярно его оси. Регистрация ионов, испытавших рассеяние, осуществлялась с помощью детектора (канального электронного умножителя с входной диафрагмой диаметром 2 mm), который перемещался в плоскости, перпендикулярной оси пучка. Расстояние между мишенью и детектором составляло 390 mm. Измеряя интенсивность сигнала с детектора как функцию расстояния от оси пучка, можно было получать угловые распределения рассеянных ионов, из которых с учетом реальной геометрии эксперимента определялся их угловой разброс.

Для сравнения экспериментальных и теоретических данных был выполнен расчет угловых распределений рассеянных ионов с помощью программы численного моделирования SRIM-2000.

Код SRIM (The Stopping Range of Ions in Matter) представляет собой группу программ для расчета торможения и пробегов ионов в веществе (в диапазоне энергий 10 eV/a.m.u. — 2 GeV/a.m.u.) [4]. Программа позволяет рассчитывать конечное трехмерное распределение ионов и события, сопровождающие процесс потери энергии ионом: разрушение мишени, распыление, ионизация и образование фононов.

На рис. 1 представлены типичные экспериментальные угловые распределения ионов, образовавшихся при прохождении моноэнергетического пучка атомов водорода (с энергией 5 и 25 keV) через углеродную пленку толщиной  $2.7 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ .

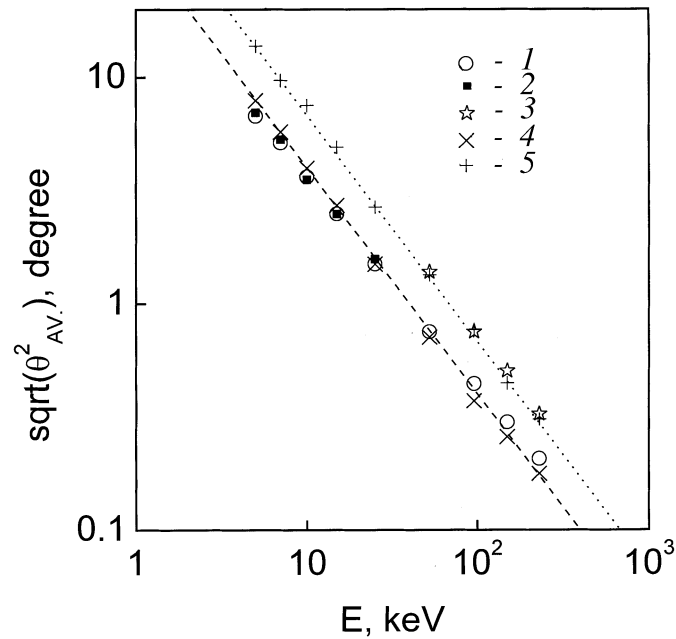
На рис. 2 представлены экспериментальная зависимость углового разброса для ионов водорода, дейтерия и гелия и расчетная зависимость для ионов водорода и гелия от исходной энергии частиц. По оси ординат отложен корень квадратный из среднеквадратичного отклонения частиц (параметр, введенный Вильямсом, в его теории многократного рассеяния на малый угол [5]). Из сравнения данных эксперимента видно, что в диапазоне энергий 5–25 keV угловые разбросы пучка атомов водорода и дейтерия с точностью 5% совпадают друг с другом.



**Рис. 1.** Угловые распределения ионов, образовавшихся при прохождении моноэнергетического пучка атомов водорода через углеродную пленку толщиной  $2.7 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ . Экспериментальные данные: 1 — пучок атомов водорода с энергией 5 keV, 2 — пучок атомов водорода с энергией 25 keV.

Вывод об отсутствии изотопного эффекта для водорода при рассеянии в тонких углеродных пленках делают также авторы работы [6], где аналогичные измерения были выполнены в энергетическом диапазоне 3–54 keV. Сравнение расчета и эксперимента для водорода и гелия демонстрирует согласие друг с другом соответственно с точностью 20 и 15% в диапазоне энергий до 230 keV.

Хорошее согласие результатов измерений и численного моделирования дало основание считать расчетные данные по рассеянию достоверными также и для других ионов легких элементов. В частности, результаты расчета можно использовать и для ионов трития. Эти данные необходимы при создании диагностической аппаратуры для исследования



**Рис. 2.** Угловой разброс пучка ионов в зависимости от исходной энергии частиц. Экспериментальные данные: 1 — водород, 2 — дейтерий, 3 — гелий-4 и результаты расчета: 4 — водород, 5 — гелий-4.

дейтериево-тритиевой плазмы, а эксперименты с тритиевым пучком являются дорогостоящими и трудоемкими.

Расчетные данные по угловому разбросу ионов водорода, дейтерия и трития в зависимости от энергии пучка атомов позволяют сделать вывод о том, что с точностью 12% различия в угловых разбросах всех трех изотопов водорода нет.

**Выводы:**

1. Сравнение экспериментальных данных по угловому разбросу ионов водорода и дейтерия после прохождения моноэнергетического пучка атомов через тонкую углеродную пленку показывает, что в диапазоне энергий 5–25 keV изотопный эффект рассеяния не наблюдается. Этот результат соответствует предсказаниям модели SRIM-2000.

2. Анализ сравнения экспериментов и расчетов для водорода, дейтерия и гелия позволяет сделать заключение о хорошем согласии результатов измерений и компьютерного моделирования. Это позволяет технически сложный эксперимент с тритием заменить компьютерным расчетом.

3. Сравнение расчетных угловых разбросов пучков атомов водорода, дейтерия и трития показывает, что в диапазоне энергий 5–230 keV изотопный эффект при рассеянии отсутствует.

В заключение авторы выражают свою благодарность И.Т. Серенкову, В.И. Сахарову и Э.М. Сергунько за помощь при проведении эксперимента, а также М.П. Петрову и А.И. Кислякову за обсуждение результатов.

## Список литературы

- [1] Извозчиков А.Б., Петров М.П. // Физика плазмы. 1976. Т. 2. № 2. С. 212–218.
- [2] ITER Physics Expert Group on Diagnostics // Nucl. Fus. 1999. V. 39. P. 2541–2575.
- [3] Худолеев А.В., Афанасьев В.И., Кисляков А.И. и др. // Физика плазмы. 1998. Т. 24. № 2. С. 1–9.
- [4] Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U. The Stopping and Range of Ions in Solids. New York: Pergamon Press, 1985.
- [5] Williams E.J. // Proc. Roy. Soc. 1938. V. 169. P. 531–572.
- [6] Hogberg G., Norden H., Berry H.G. // Nucl. Instr. And Meth. 1970. V. 90. P. 283–288.