

## ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 621.384.8+537.534.6

### ПЕРЕЗАРЯДНАЯ МИШЕНЬ НА ПАРАХ МАГНИЯ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО МАСС-СПЕКТРОМЕТРА

© 2009 г. В. Ф. Клюев, В. В. Пархомчук, С. А. Растигеев

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН  
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Лаврентьева, 11

E-mail: S.A.Rastigeev@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 22.07.2008 г.

Приведены конструкция мишени и результаты экспериментов по обдирке ионов углерода в парах магния. Предлагается использование такой мишени вместо газовых мишеней, применяемых на существующих ускорительных масс-спектрометрах, что уменьшит фоновую перезарядку ионов за пределами мишени.

PACS: 07.75.+h, 34.70.+e

#### ВВЕДЕНИЕ

Создаваемый в ИЯФ СО РАН ускорительный масс-спектрометр (у.м.с.) [1] предназначен для измерения изотопного состава вещества. Для регистрации редких и космогенных изотопов относительная чувствительность у.м.с. должна составлять  $10^{-12}$ – $10^{-15}$  [2]. Например, доля изотопа углерода массой 14 а.е.м. в углероде из современного образца составляет  $\sim 10^{-12}$  по отношению к  $^{12}\text{C}$ . Для обеспечения столь высокой чувствительности необходимо подавление ионного фона от атомов и молекул близких масс. Фоновые ионы различных масс могут преодолевать фильтры с магнитными и электрическими полями за счет взаимодействия с остаточным газом вакуумной камеры. За основу у.м.с. взят электростатический ускоритель тандемного типа. В такой системе отрицательные ионы вначале ускоряются до потенциала высоковольтного терминала. Далее ионы обдираются до положительного заряда и вновь ускоряются к потенциалу земли. К перезарядной мишени для у.м.с. предъявляются высокие требования по стабильности толщины, по времени работы и вакуумным условиям. Следует отметить, что при энергии пучка порядка 1 МэВ твердые мишени не используются по причине быстрой разрушаемости ионными пучками. В существующих у.м.с. используются газовые мишени. Для поддержания высокого вакуума в ускоряющих трубках используются системы с турбомолекулярными насосами, расположенными непосредственно в высоковольтном терминале.

Использование мишени на парах магния позволяет существенно упростить вакуумную систему в высоковольтном терминале у.м.с. Давление паров магния при комнатной температуре составляет менее  $10^{-10}$  Торр [3], поэтому нет необходи-

мости в высокопроизводительной системе газовой откачки. Кроме того, давление паров магния можно контролировать и стабилизировать, управляя температурой контейнера с магнием, что обеспечивает постоянство толщины мишени и упрощает оптимизацию работы у.м.с. Ранее подобную магниевую мишень использовали для перезарядки ионов водорода [4] в установке для изучения электронного охлаждения с вакуумом  $10^{-11}$  Торр.

#### ОПИСАНИЕ МИШЕНИ НА ПАРАХ МАГНИЯ

На рис. 1 показан внешний вид мишени на парах магния. Мишень состоит из центральной части, которая нагревается до температуры  $\sim 500^\circ\text{C}$ , и боковых отсеков, находящихся при температуре  $\sim 100^\circ\text{C}$  и необходимых для оседания паров магния. Мишень изготовлена из нержавеющей стали. Обдирочный канал мишени имеет внутренний диаметр 6 мм и длину 30 см. Фланцы приварены к мишени через сильфоны, что предотвращает деформацию трубки при колебаниях температуры. Снаружи канала, тоже в вакууме, располагается контейнер с твердым магнием. Магниевая мишень нагревается при прохождении электрического тока непосредственно через корпус мише-



Рис. 1. Мишень на парах магния.

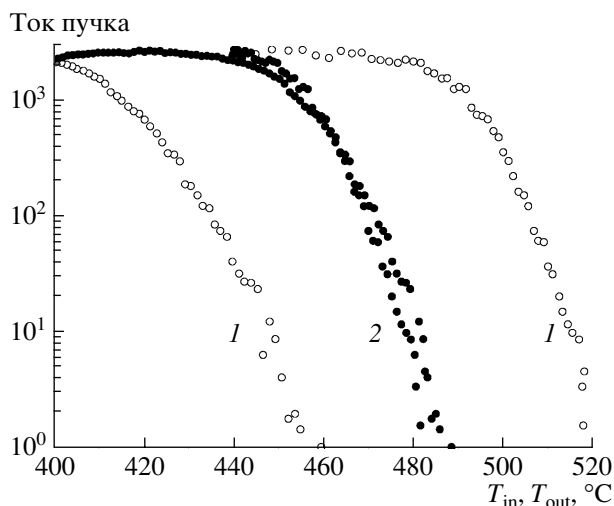


Рис. 2. Зависимость числа молекулярных ионов массы 14 а.е.м., прошедших мишень, от температуры контейнера (1) и магния (2).

ни. Когда контейнер нагревается, пары магния через три отверстия  $\varnothing 1$  мм проникают в обдирочный канал. Давление паров магния в обдирочном канале ниже, чем давление насыщенных паров магния в контейнере из-за ограниченной газовой проводимости отверстий. Таким образом предотвращается “зарастание” канала магнием в случае недостаточного нагрева канала. Для уменьшения тепловых потерь центральная часть мишени обернута асбестовой тканью, поверх которой намотаны слои стеклоткани и алюминиевой фольги. На поверхности слоя теплоизоляции температура не превышает  $100^\circ\text{C}$ . Для увеличения теплового сопротивления центральная часть мишени и боковые отсеки соединяются лабиринтом из трех концентрических, вложенных друг в друга труб. Вдоль корпуса мишени располагаются термодары, обеспечивающие контроль температуры. При этом термодар, расположенная по центру мишени, используется для стабилизации температуры магния. На краях корпуса мишени располагаются керамические вставки, обеспечивающие электрическую изоляцию, что позволяет контролировать попавший на мишень заряд пучка. Юстировка канала проводится по оптимальному прохождению пучка ионов через обдирочный канал.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Мишень на парах магния установлена в высоковольтном терминале ускорительного масс-спектрометра СО РАН. Нагрев мишени до требуемых температур занимает примерно 1 ч. Потребляемая мощность порядка 200 Вт. По показаниям термодар можно контролировать температуру поверхности контейнера с магнием, однако давление паров определяется степенью нагрева самого маг-

ния. Давление паров магния в данной конструкции мишени регулируется изменением температуры контейнера. В приведенном диапазоне температур магний нагревается, в основном, за счет теплопроводности от стенок контейнера. Изменение температуры магния пропорционально количеству подведенного тепла, т.е. пропорционально разности температур контейнера и магния. Коэффициент пропорциональности имеет размерность, обратную времени, и характеризует временную задержку в изменении температуры магния относительно температуры контейнера:

$$\frac{dT_{\text{in}}}{dt} = (T_{\text{out}} - T_{\text{in}})/\tau, \quad (1)$$

где  $T_{\text{out}}$  — температура контейнера,  $T_{\text{in}}$  — температура магния,  $\tau$  — время задержки.

Для определения времени задержки мы исследовали процесс разрушения молекулярных ионов (энергия ионов равна 250 кэВ). Инжектировался пучок отрицательных молекулярных ионов массы 14 а.е.м., и на выходе у.м.с. измерялся ток ионов массы 14 а.е.м. в зарядовом состоянии 2+. При взаимодействии с мишенью молекулярные ионы с зарядом 2+ разрушаются, при этом интенсивность пучка таких ионов уменьшается экспоненциально с толщиной мишени. Молекулярные ионы массы 14 а.е.м. состоят из атомов углерода и водорода:  $^{12}\text{CH}_2$ ,  $^{13}\text{CH}$ . Отметим, что отрицательные ионы азота нестабильны, поэтому вклад в интенсивность пучка массы 14 а.е.м. они не дают. На рис. 2 приведена зависимость числа молекулярных ионов от температуры контейнера мишени (кривая 1). При этом верхняя часть кривой соответствует нагреву мишени, а нижняя — охлаждению. Зависимость температуры контейнера мишени от времени приведена на рис. 3. Мишень из стационарного состояния с температурой  $440^\circ\text{C}$  нагревается до  $520^\circ\text{C}$  за  $\sim 10$  мин. В течение 5 мин температура поддерживается постоянной. Далее процесс нагрева прекращается, и мишень начинает охлаждаться. Время охлаждения контейнера определяется внешней тепловой изоляцией, в нашем случае корпус мишени охлаждается до  $440^\circ\text{C}$  примерно за 15 мин. Из рис. 2 видно, что зависимость числа молекулярных ионов от температуры контейнера имеет гистерезис. Ясно, что эта зависимость определяется характерным временем задержки между температурой магния и корпуса. Зависимость давления мишени от температуры магния не зависит от истории нагрева. Численно решая уравнение (1):

$$T_{\text{in } k+1} = T_{\text{in } k} + (T_{\text{out } k} - T_{\text{in } k})(t_{k+1} - t_k)/\tau, \quad (2)$$

для экспериментальной кривой нагрева и различных значений  $\tau$  получим, что гистерезис исчезает при времени задержки  $\tau = 430$  с. Результирующие зависимости числа молекулярных ионов и температуры магния от времени представлены на рис. 2

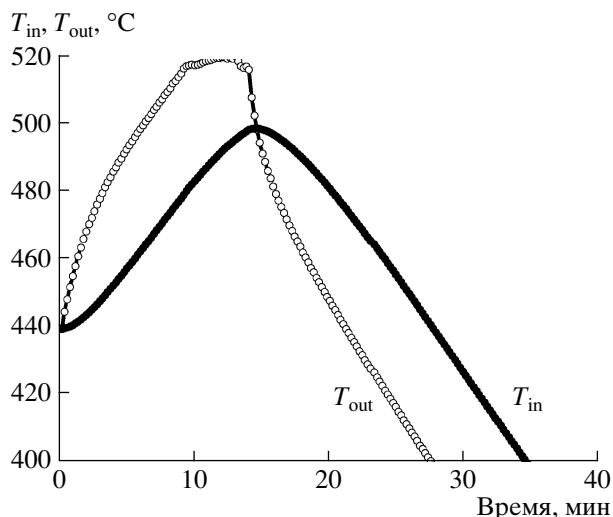


Рис. 3. Зависимость температура контейнера ( $T_{out}$ ) и расчетной температуры магния ( $T_{in}$ ) от времени.

(кривая 2) и рис. 3. Заметим, что время задержки нагрева магния не зависит от цикла нагрева, а определяется конструкцией мишени. Различные эксперименты по взаимодействию пучков ионов с атомами мишени показали, что время задержки можно считать неизменным. Таким образом, показана возможность использования мишени в процессах, где необходима вариация толщины мишени от времени.

На рис. 4 приведен результат измерения зарядового состава ионного (углеродного) пучка от температуры мишени. Данная зависимость соответствует прохождению отрицательных ионов углерода энергии 400 кэВ через магниевую мишень. Видно, что после достижения определенных температур распределение по зарядовым состояниям ионов практически не меняется. Равновесное распределение характерно для мишени любых типов. Дальнейший нагрев мишени нецелесообразен, так как приводит к увеличению эмиттанса пучка за счет рассеяния.

Опыт работы с магниевой мишенью показывает, что со временем давление паров магния уменьшается при заданной температуре контейнера. Так за год эксплуатации мишени температура контейнера была увеличена примерно на 50°C для получения той же толщины мишени. Толщина мишени контролируется по эффекту взаимодействия ионного пучка с атомами магния. Характерное время деградации мишени большое, поэтому нет необходимости в отслеживании данного процесса в период цикла измерений ускорительным масс-спектрометром. В нашем случае уменьшение давления паров, вероятно, происходит за счет окисления поверхности магния.

Абсолютное значение толщины мишени может быть оценено по процессу обдирки ионов во-

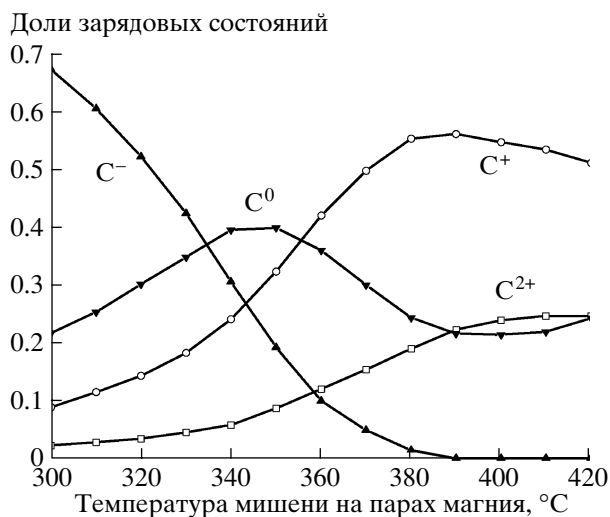


Рис. 4. Зависимость различных зарядовых состояний ионов углерода с энергией 400 кэВ от температуры мишени.

дорода, для которых известны сечения перезарядки на парах магния [5]. Из известных сечений можно рассчитать распределение по зарядам ионов водорода при прохождении мишени на парах магния и сравнить с экспериментальными данными на конкретном образце мишени. Для этого использовался пучок отрицательных ионов водорода с энергией 70 кэВ. Результат такого сравнения приведен на рис. 5, где сплошные линии соответствуют расчетным значениям, точки – экспериментальным данным. Толщина мишени для экспериментальных данных рассчитывается по известным соотношениям температура – давление [3] с последующим масштабированием, при-

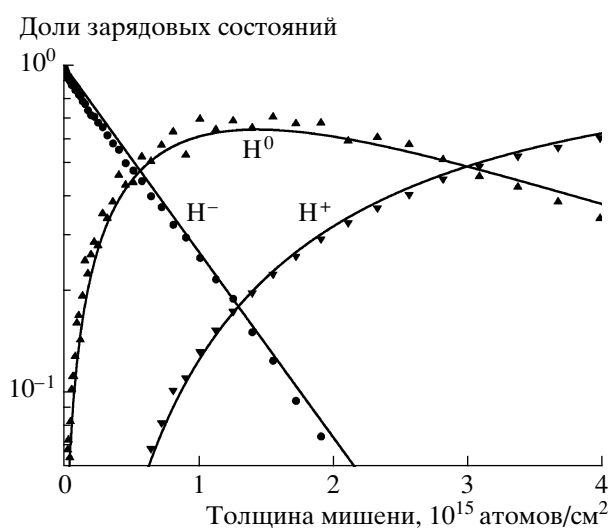


Рис. 5. Зависимость зарядового состава ионов водорода с энергией 70 кэВ от толщины мишени на парах магния.

водящим к наилучшему совпадению с расчетными данными. Для этого пришлось плотность паров уменьшить в 5 раз относительно табличного давления насыщенных паров.

Магний оседает на окружающие более холодные поверхности, поэтому пары мишени сконцентрированы непосредственно внутри мишени, что уменьшает фоновую перезарядку исследуемых ионов. Исключение составляет первый нагрев мишени после достижения вакуума в системе. Первый нагрев мишени сопровождается газовой выделением, при этом время обезгаживания составляет 2–3 ч. Последующие циклы нагрева мишени не дают видимого ухудшения вакуумных условий при рабочем вакууме  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  Торр.

При нагреве мишени на парах магния часть магния попадает в ускорительную трубку электростатического тандема. Толщина мишени в рабочем режиме равна  $5 \cdot 10^{15}$  атомов/см<sup>2</sup>. Достоверных данных по длине свободного пробега магния в парах магния найти не удалось, однако при заданной концентрации частиц длина пробега частиц для всех газов, приведенных в справочной литературе [6], превышает радиус канала используемой мишени. При таком соотношении длин влияние столкновений частиц на газовую проводимость каналов незначительно [7]. Для оценки количества магния, попадающего в ускорительную трубку, проводилось моделирование прохождения пробных частиц через магниевую мишень. Считалось, что направление движения частицы после взаимодействия со стенкой канала мишени меняется случайным образом с косинусоидальным распределением вероятности отклонения потока частиц от нормали к поверхности. Аналогичное распределение по направлению движения соответствовало начальным условиям моделирования. Частицы инжектировались в центре трубки с ее поверхности и не имели распределения по начальным координатам. Предполагалось, что скорость частиц постоянна и соответствует средней для атомарного магния при температуре 500°C. Полученный в результате моделирования расход магния составляет 5.4 г за 200 часов (это время примерно соответствует количеству рабочих часов в месяц). Для ограничения попадания магния в ускорительную трубку на расстоянии 140 мм от выхода обдирочного канала мишени расположена диафрагма Ø7 мм. Из 10000 тестовых частиц 27 прошли данную диафрагму, что соответствует

попаданию примерно 15 мг магния (при расходе 5.4 г) в месяц в ускорительную трубку.

Известно, что попадание металла в ускорительную трубку может снижать электрическую прочность вакуумных промежутков, однако нет четких критериев оценки данного процесса. За два года проведения различных экспериментов на тандемном ускорителе в режиме работы при напряжении высоковольтного терминала 250 кВ и близким к расчетным условиям эксплуатации мишени на парах магния не отмечено уменьшения электростатической прочности трубок. Следует отметить, что работы проводились с пучком ионов, проходящих электростатический фильтр в высоковольтном терминале, т.е. в режиме, чувствительном к стабильности напряжения высоковольтного терминала.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных экспериментов демонстрируют возможность применения мишени на парах магния в ускорительных масс-спектрометрах. Получены необходимые параметры мишени для обдирки пучка ионов углерода. Мишень не ухудшает вакуум за пределами своего корпуса, что благоприятствует уменьшению количества фоновых ионов при измерениях низких концентраций изотопов при небольших энергиях ионов.

Авторы выражают благодарность А.Ф. Байдаку и В.И. Исаченко за изготовление и наладку системы питания магниевой мишени.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Alinovsky N.I., Klyuev V.F., Konstantinov E.S. et al. // Proc. of EPAC. 2004. Lucerne, Switzerland. 2004. P. 2389.*
2. *Tuniz C., Bird J., Fink D., Herzog G. // Accelerator mass spectrometry: ultrasensitive analysis for global science. Boca Raton: CRC Press LLC, 1998. P. 3.*
3. *Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. Физические величины. М.: Энергатоиздат, 1991. С. 257.*
4. *Пархомчук В.В., Серый А.А. // ПТЭ. 1989. № 5. С. 59.*
5. *Berkner K.H., Pyle R.V., Stearns J.P. // Phys. Rev. 1969. V. 178. P. 248.*
6. *Lide D.R. CRC Handbook of chemistry and physics. Boca Raton: CRC Press LLC, 2004. P. 6–44.*
7. *Рыдник В.И. Справочник по ядерной физике. М.: Энергатоиздат, 1963. С. 183.*