

10;12

Прибор для анализа состава многокомпонентных ионных пучков

© Л.П. Вересов, О.Л. Вересов, М.И. Дзкуя, В.В. Дорохов, И.А. Цеквава

Сухумский физико-технический институт АН Республики Абхазия,
384914 Сухуми, Абхазия

(Поступило в Редакцию 28 декабря 1998 г.)

Описывается компактный многоканальный масс-анализатор, позволивший анализировать состав многокомпонентных ионных пучков.

Введение

В настоящее время в машиностроении все более широкое применение находят пучковые технологии. Разрабатываются новые ионные источники для этих целей, в том числе источники, у которых пучок ионов многокомпонентный (смешанный). К их числу относятся ионные распылительные источники, в пучках которых помимо металлических ионов имеются ионы рабочего газа. Для того чтобы определять состав ионных пучков, извлекаемых из такого типа источников, нами был создан и применен компактный многоканальный масс-анализатор. Небольшие габариты и масса прибора позволяют использовать его даже в малых вакуумных камерах. Благодаря многоканальности прибор позволяет определять массы ионов всех элементов таблицы Менделеева и их соотношения в пучке.

Принцип работы прибора

Как и у большинства масс-анализаторов, в основе работы прибора лежит зависимость радиуса поворота заряженных частиц в поперечном однородном магнитном поле в зависимости от их массы и энергии согласно уравнению

$$R = \frac{144 - \sqrt{WM}}{zB},$$

где R — ларморовый радиус (см), W — энергия частицы (eV), M — масса частицы (a.e.m.), z — зарядовое число, B — магнитная индукция (Gs) [1].

Особенность прибора заключается в том, что магнитное поле у него постоянное и в этом поле выбрано десять магнитных дорожек с заданными радиусами, каждая со своим приемным коллектором. Поэтому переменными являются только две величины: масса частиц и их энергия. Меняя энергию частиц, можно принимать струйку пучка и измерять ее ток в разных коллекторах, тем самым определяя массу частиц в пучке, или при фиксированной энергии пучка искать его компоненты с различными массами в разных коллекторах, что позволяет анализировать состав пучка, не меняя режим работы исследуемого ионного источника.

Конструкция прибора

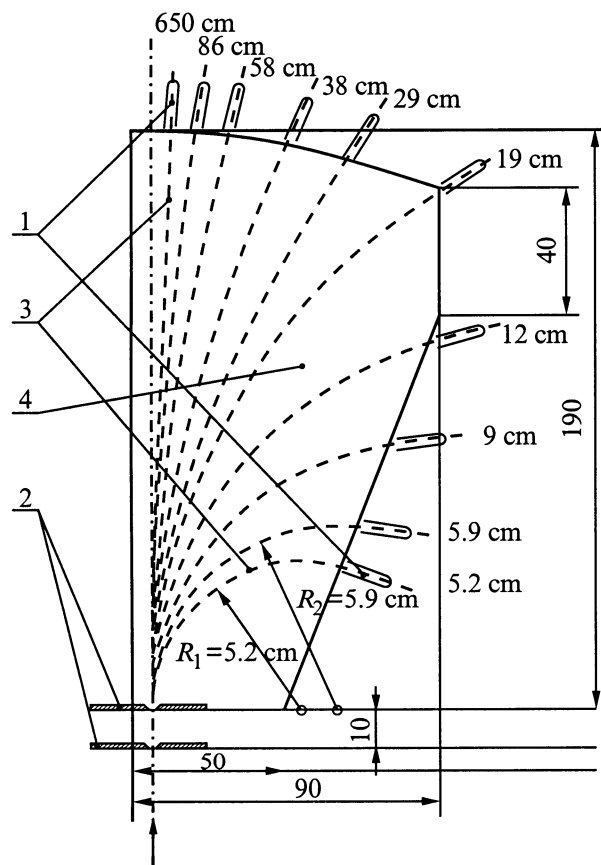
Однородное магнитное поле в приборе создается с помощью магнитных полюсов (см. рисунок). Магнитный зазор между полюсами принят равным 5 mm из тех соображений, что величина магнитного поля должна быть по возможности максимальной при приемлемом разрешении малых величин тока измерительным прибором. Магнитное поле реализовано с помощью постоянных возбудителей из самарий-кобальта размером $40 \times 40 \times 12$ mm с индукцией на поверхности ≈ 2 kGs. Между магнитным полюсом и ярмом магнитной системы, замыкающим внешний магнитный поток, с каждой стороны установлено пять столбиков возбудителей по два в каждом. Таким образом, на весь прибор использовано двадцать возбудителей. В рабочем магнитном зазоре величина магнитной индукции составляет $3500\text{Gs} \pm 1.5\%$. Оба магнитных полюса изготовлены из магнитомягкого железа толщиной 7 mm каждый.

Было решено использовать десять магнитных дорожек, т.е. радиусов, которые шли в следующей последовательности: $R_1 = 5.2$ cm, $R_2 = 5.9$ cm, $R_3 = 9$ cm, $R_4 = 12$ cm, $R_5 = 19$ cm, $R_6 = 29$ cm, $R_7 = 38$ cm, $R_8 = 58$ cm, $R_9 = 86$ cm, $R_{10} = 650$ cm. Такой выбор радиусов позволил, используя две-три дорожки в диапазоне энергий от 5 до 70 keV, определять массу какого-либо элемента. Радиус $R_{10} = 650$ cm был выбран для регистрации заряженных кластеров.

Все коллекторы каждой дорожки выполнены одинаково. Коллектор представляет собой пластину, согнутую в скобку с параллельными стенками. Зазор между стенками 3 mm, а толщина каждой стенки 0.3 mm. Коллекторы закреплены на изоляторах, позволяющих ориентировать их по касательной к заданному радиусу. Каждый коллектор расположен на расстоянии 1 mm от магнитных полюсов, рассеянное поле от которых величиной ≈ 200 Gs охватывает их. Это является достаточным для подавления влияния вторичной эмиссии электронов.

Сигналы с коллекторов измеряются микроамперметром типа М95 с многопредельным шунтом, позволяющим измерять токи величиной до 10^{-8} А.

Из ионного пучка двумя щелями, ориентированными горизонтально к оси пучка, вырезается струйка, входящая в магнитное поле анализатора. Ее размеры опре-



Магнитный полюс масс-анализатора: 1 — коллекторы, 2 — щели, вырезающие струйку пучка, 3 — траектории магнитных дорожек, 4 — магнитный полюс.

деляются зазором щелей и зазором между магнитными полюсами масс-анализатора (равный 5 мм). Зазор щелей может изменяться. Экспериментально он был выбран 0.4 мм. Расстояние между первой и второй щелями составляет 10 мм.

На лицевой части масс-анализатора расположена квадратная пластина — коллектор, изолированная от корпуса, размером 100 × 100 мм, прикрывающая лобовую часть прибора и принимающая весь пучок. Вторичная эмиссия электронов с нее подавляется рассеянным полем масс-анализатора и специально установленными магнитными полосками из феррит-бария. Ошибка измерения тока пучка этим коллектором не превышает 15%. На этой пластине на расстоянии 10 мм по горизонтали от первой щели масс-анализатора расположена вторая щель перпендикулярно первой размером 2 × 1 мм с коллектором за ней для измерения плотности тока пучка.

Весь прибор установлен на четырех вертикальных направляющих с двумя регулируемыми винтами, позволяющими производить юстировку оси прибора с осью пучка.

Настройка прибора

1. По точно вымеренным радиусам первой и второй магнитных дорожек ($R_1 = 5.2$ см, $R_2 = 5.9$ см) определялось реальное магнитное поле масс-анализатора.

2. Используя инертные газы He, Ne, Ar, Kr, Xe в качестве реперных масс, были точно определены все остальные радиусы, кроме последнего R_{10} .

3. Разрешающая сила масс-анализатора была оценена по азоту и кислороду из уравнения $\Delta m/m = 1/r$, где Δm — разность между измеряемыми массами, m — наибольшая масса, r — разрешающая сила [2], когда рабочим газом в источнике был атмосферный воздух. Она оказалась равной 8.

4. В некоторых случаях при измерении компонент пучка, обычно с тяжелыми массами, когда токи струек пучка очень маленькие, токовый прибор фиксировал отрицательный ток порядка $10^{-6} - 10^{-7}$ А. Такое показание прибора может быть объяснено уходом с коллектора положительных ионов или попаданием в него отрицательных частиц. Последнее исключено, поскольку отрицательные частицы не могут попасть в коллектор, проходя магнитное поле масс-анализатора. Уход с коллектора положительных ионов может происходить при ион-ионной эмиссии и отражении бомбардирующих ионов. Оба эти процесса незначительны по величине и в балансе с прилетающими на коллектор ионами не могут создать отрицательный ток через микроамперметр. Скорее всего, при образовании в коллекторе пристеночной плазмы вследствие процессов газовой выделенности, распыления, нейтрализации, рекомбинации, вторичной электронной эмиссии и других из нее эмиттируют низкоэнергичные положительные ионы и попадают на корпус масс-анализатора, тем самым образуя отрицательный ток, через токовый прибор. При этом правильные измерения струйки пучка микроамперметром становятся невозможными.

Можно преодолеть это препятствие двумя путями: увеличить ширину щелей масс-анализатора, тем самым увеличив ток струйки пучка, или использовать калориметрические измерения. Основной вклад в нагрев коллектора вносят намного более энергичные ионы, приходящие на него в струйке пучка. Их энергия на несколько порядков больше энергии ионов, уходящих из коллектора, что обеспечивает практически точное измерение энергии, а следовательно, тока струйки пучка согласно уравнению

$$I = \frac{cm\Delta T}{Ut},$$

где c — теплоемкость материала коллектора, m — масса коллектора, ΔT — разность температур, I — ток пучка, U — энергия частицы, t — время воздействия пучка на коллектор.

Поэтому при фиксированной энергии и времени воздействия пучка на коллектор (микрокалориметр) измеряется только разность температур. Опыт показал, что

для измерения разности температур наиболее приемлемым датчиком оказался транзисторный $p-n$ -переход база-эмиттер, у которого сохраняются линейность температурной характеристики в широком диапазоне и высокая чувствительность в отличие от термопар и терморезисторов.

Заключение

1. Прибор, установленный на перемещающейся каретке поперек оси пучка, позволил измерять общий ток пучка, распределение плотности тока пучка, массовый состав пучка, соотношения компонент пучка и их распределение по сечению пучка.

2. Небольшие размеры ($20 \times 18 \times 12$ см) и масса (17 kg) прибора делают доступным его применение в простых лабораторных условиях.

3. Регистрация токов, анализируемых масс-микроамперметром, позволяет быстро проводить анализ пучка и в ходе эксперимента воздействовать на работу источника. Калориметрический метод измерения также оперативен, поскольку разность температур в мостовой схеме сравнения измеряется также микроамперметром.

4. Опыт эксплуатации прибора показал, что разрешающая способность его может быть повышена как за счет повышения величины магнитного поля, так и за счет увеличения длины магнитной дорожки.

Описанный выше масс-анализатор оказался удобным прибором для исследований источников, создающих многокомпонентные пучки, на установках, не имеющих специальных сепарирующих магнитов.

Список литературы

- [1] Шпольский Э.В. Атомная физика. Т. 1. М.: Наука, 1984.
- [2] Арцимович Л.А., Лукьянов С.Ю. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. М.: Наука, 1972.