



МАСС-АНАЛИЗАТОР

Авторы: А. А. Сысоев

МАСС-АНАЛИЗАТОР, устройство для разделения ионов по величине отношения массы

m иона к его заряду

q . М.-а. является одним из элементов [масс-спектрометра](#). Осн. характеристика М.-а. — его разрешающая способность, равная отношению массы иона к погрешности её определения. В зависимости от способа разделения ионов М.-а. подразделяют на статические (использующие только постоянные магнитные и электр. поля) и динамические (использующие также переменные электр. поля или разделяющие ионы по времени пролёта).

В статич. М.-а. с магнитным полем (магнитный М.-а.) ионы разделяют пространственно на основе зависимости радиуса кривизны

ρ траектории ионов от величины

m/q :

$\rho = (1/B)\sqrt{2Vm/q}$, где

B — магнитная индукция,

V — ускоряющий потенциал. Обычно в таких М.-а. используют однородные магнитные поля и пучок ионов практически постоянной энергии. Применяются также аксиально-симметричные М.-а. с неоднородными полями. Для повышения разрешающей способности М.-а. пучок ионов фокусируют на выходе из М.-а. Применение М.-а. с телескопич. ионно-оптич. системой обеспечивает наилучшее отношение «сигнал/шум» за счёт исключения взаимодействия ионов со стенками вакуумной камеры.

магнитная индукция,

V — ускоряющий потенциал. Обычно в таких М.-а. используют однородные магнитные поля и пучок ионов практически постоянной энергии. Применяются также аксиально-

симметричные М.-а. с неоднородными полями. Для повышения разрешающей способности М.-а. пучок ионов фокусируют на выходе из М.-а. Применение М.-а. с телескопич. ионно-оптич. системой обеспечивает наилучшее отношение «сигнал/шум» за счёт исключения взаимодействия ионов со стенками вакуумной камеры.

Недостатком магнитных М.-а. является невозможность их использования для пучков ионов с большим энергетич. разбросом. Чтобы преодолеть этот недостаток, применяют схему, в которой на пучок последовательно воздействуют электрич. и магнитное поля, причём разделение ионов по величине m/q обеспечивается только магнитным каскадом. Секторные каскады электрич. и магнитного полей выбирают с таким расчётом, чтобы хроматич. абберация (расфокусировка, вызванная разбросом по энергиям) первого (или первого и второго) порядка в магнитном каскаде компенсировалась соответствующей абберацией в электрич. каскаде. Применяется также дополнит. фокусировка по углам расходимости ионных пучков; такие приборы называют М.-а. с двойной фокусировкой.

Динамич. М.-а. используют разл. способы разделения ионов и условно подразделяются на 4 группы: радиочастотные, резонансные, квадрупольные и времяпролётные. Действие радиочастотных М.-а. основано на изменении энергии ионов в переменном электрич. поле с частотой, лежащей в радиодиапазоне. При постоянной начальной энергии ионов эти изменения функционально связаны с соотношением

m/q . Ионы получают энергию от поля, причём среди ионов примерно постоянной скорости макс. энергию получают ионы определённой массы (входящие в поле при его оптимальной фазе). Ионы с макс. энергией выделяют при помощи энергетич. фильтра.

Резонансные М.-а. используют явление резонанса, возникающего при совпадении собств. частоты колебаний ионов с частотой колебаний вынуждающего поля. При этом амплитуда колебаний резонансных ионов возрастает, и они собираются на коллекторе, в то время как остальные ионы, имеющие меньшую амплитуду колебаний, коллектора не достигают. Существуют резонансные М.-а. с постоянным магнитным полем и без него. В М.-а. с однородным постоянным магнитным полем собств. частотой

колебаний ионов является циклотронная частота

$f_{\text{ц}}$ их вращения в магнитном поле. Соответственно М.-а. позволяет выделить ионы с $m/q = B/2\pi f_{\text{ц}}$. Резонансными называются также М.-а., которые базируются на ионно-циклотронном резонансе. Сигнал от колеблющихся ионных сгустков в этом случае регистрируется методом наведённого потенциала, а отношение m/q определяется при разложении сигнала в ряд Фурье. Резонансные М.-а. без магнитного поля используют колебания ионов в потенциальной яме электрич. поля, имеющего высокочастотную составляющую.

В квадрупольных М.-а. (КМА) создаются условия, при которых ионы с данным m/q в определённом интервале значений имеют ограниченную амплитуду колебаний, в то время как у остальных амплитуда не ограничена (ионы рекомбинируют). Классич. КМА представляет собой четыре стержня гиперболич. сечения, противоположные из которых попарно соединены. На эти стержни подаются постоянная и переменная составляющие электрич. напряжения. Ионы с заданным отношением m/q движутся по устойчивым траекториям, что позволяет собрать их на коллекторе. Разрешающая способность КМА достигает 10^4 и более.

На квадрупольном принципе разделения базируется ионная ловушка, в которой внутри замкнутой области создаются постоянное и переменное электрич. поля с помощью трёх гиперболич. электродов. Ионы либо вводятся внутрь ионной ловушки, либо создаются внутри неё. Ионы, движущиеся по стабильным траекториям, накапливаются и через определённые промежутки времени выталкиваются на коллектор. Преимущество ионной ловушки перед КМА – значительно меньшие размеры (при разрешающей способности 500 и выше).

Времяпролётные М.-а. (ВПМА) подразделяют на два типа: прямопролётные М.-а. и М.-а. с временной фокусировкой ионов по энергиям. В первом случае ВПМА состоит из импульсного источника ионов, формирующего короткие сгустки ионов, пространства дрейфа и высокоскоростного детектора ионов (в качестве которого обычно используется вторичный электронный умножитель). Сгустки ионов ускоряются в ускоряющей промежутке и попадают в пространство дрейфа, где разделяются по времени

t пролёта: , где

L – длина пространства дрейфа. Измерение времени пролёта позволяет определить отношение m/q соответствующих ионов.

Этот тип ВПМА применим лишь для источников, формирующих ионные сгустки с малым энергетич. разбросом. Для источников ионов с существенным энергетич. разбросом используют ВПМА с временной фокусировкой ионов по энергиям, в классич. варианте которого за пространством дрейфа располагается электростатич. зеркало (электрич. поле, в котором ионы претерпевают отражение). Ионы с более высокой энергией имеют меньшее время пролёта в пространстве дрейфа и большее – в отражающем электрич. поле. При оптимальном выборе длин участков этот тип ВПМА обеспечивает одинаковое время пролёта ионов, имеющих разброс по энергиям в пределах $\pm 10\%$. Отношение m/q определяют по времени пролёта ионов. Разрешающая способность ВПМА с временной фокусировкой по энергиям может достигать $5 \cdot 10^4$ и более.

М.-а. применяются в осн. в качестве разделительных элементов масс-спектрометров. Свойства и назначение масс-спектрометров в значит. степени определяются типом и характеристиками применяемого М.-а. В последнее время наибольшее распространение в масс-спектрометрах получили статич. М.-а., КМА, ВПМА.

Литература

Лит.: Сысоев А. А., Чупахин М. С. Введение в масс-спектрометрию. М., 1977; Кузема А. С., Савин О.Р., Чертков И. Я. Анализирующие системы магнитных масс-спектрометров. К., 1987.