

02;12
©1995 г.

ИСТОЧНИК ИОНОВ В СИЛЬНОМ ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Н.Н.Аруев, Е.Л.Байдаков

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН,
194021, Санкт-Петербург, Россия
(Поступило в Редакцию 11 июля 1994 г.)

Для увеличения чувствительности магнитного резонансного масс-спектрометра разработан источник ионов, в ионно-оптическую схему которого введена трехэлектродная щелевая скрещенная линза, фокусирующая пучок ионов в вертикальной плоскости. Сопряжение этой линзы с ионизационной камерой осуществляется с помощью разрезного клиновидного электрода, который является одним из электродов горизонтально фокусирующей линзы. Предложенная конфигурация ионно-оптической схемы и консольное крепление электродов позволили уменьшить размеры источника при сохранении однородности электростатических полей в зазорах между электродами.

Важными узлами масс-спектрометров являются источники ионов, параметры которых во многом определяют основные аналитические характеристики приборов — разрешающую способность и чувствительность. К ионным источникам для магнитных резонансных масс-спектрометров (МРМС) предъявляются особенно высокие требования, так как они должны работать в сильных однородных магнитных полях, ортогональных направлению движения пучка ионов, и обладать малыми геометрическими размерами.

Согласно принципу действия МРМС, который детально рассмотрен в ряде работ [1–3], траектория движения ионов в приборе представляет раскручивающуюся спираль, содержащую два оборота (рис. 1).

Ионы, вышедшие из щели ионного источника S_0 перпендикулярно физической оси прибора (на которой расположены также щель модулятора S_1 , щель дрейфа S_2 , выходная щель S_3), проходят пол оборота в магнитном поле \vec{B} и попадают в модулятор, состоящий из трех параллельных друг другу электродов. К центральному электроду модулятора приложено высокочастотное электрическое напряжение U_{\sim} , а крайние электроды заземлены. Проходя зазоры модулятора, ионы получают приращение скорости, а следовательно, и радиуса движения ($r_1 > r_0$), если частота и фаза высокочастотного напряжения U_{\sim} подобраны соответствующим образом. При полете к щели дрейфа

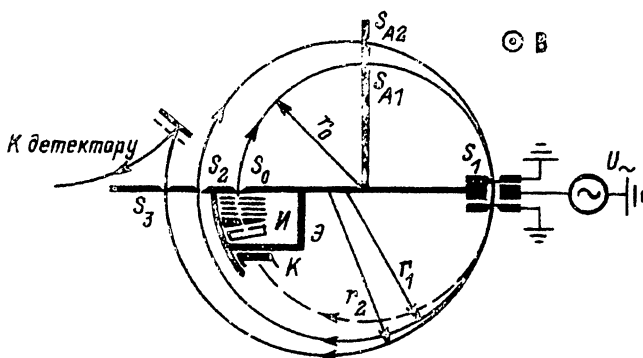


Рис. 1. Схема анализатора МРМС.

S_0 — выходная щель источника ионов I , S_1 — щели в электродах модулятора, S_2 — щель дрейфа, S_3 — выходная щель анализатора, S_{A1} и S_{A2} — апертурные щели, $Э$ — экран, $К$ — коллектор ионов.

S_2 , т. е. при завершении первого оборота движения в магнитном поле, ионы должны обогнуть ионный источник и окружающий его защитный экран. Как показывают исследования, расстояние между наружной поверхностью экрана и траекторией движения ионов должно составлять не менее 7–8 мм, чтобы контактные разности потенциалов и поверхностные электрические заряды не возмущали движение ионов по рабочей орбите. Необходимость установки экрана и огибания его ионным пучком приводит к тому, что пространство, предназначенное для монтажа источника и его размеры очень ограничены.

Так, в МРМС с разрешающей способностью ~ 350 тысяч ($r_0 \approx 93$ мм, $r_1 \approx 107$ мм) первое приращение диаметра орбиты ионов составляет ~ 28 мм. Поэтому габаритные размеры ионно-оптической системы источника без устройства крепления электродов в плоскости рис. 1 не могли превышать 30×30 мм. При расчетах создаваемого МРМС с разрешающей способностью $\geq 10^6$ ($r_1 \approx 200$ мм), проводимых на основе разработанной теории этих приборов [4], было получено, что вариации первого приращения диаметра орбиты ионов лежат в диапазоне 30–50 мм. Отсюда следует, что геометрические размеры ионного источника для этого прибора также малы и размер электродов в радиальном направлении не должен превышать 30–40 мм. Что касается размера источника в азимутальном направлении, то он обусловлен сложностью ионно-оптической системы и числом электродов в источнике.

В разрабатываемом МРМС длина траектории ионов в анализаторе составляет более 2.5 м, при вертикальной расходимости ионов в пучке $\pm 1^\circ$ только около 5% ионов, вышедших из источника, попадут в выходную щель S_3 . Поэтому для уменьшения потерь ионного тока и повышения чувствительности МРМС необходимо использовать источник ионов, обладающий одновременно вертикальной и горизонтальной фокусировкой, подобный тому, какой применен в приборе с разрешающей способностью ~ 350 тыс [5]. Он представляет собой источник Нира с ионизацией атомов электронным ударом, ионно-оптическая схема которого состоит из ряда плоских, параллельных друг другу щелевых электродов.

Фокусировка заряженных частиц в вертикальном и горизонтальном направлениях возможна только с помощью системы из несколь-

ких линз, собирающие и рассеивающие плоскости которых чередуются [6]. Введение в ионно-оптическую схему источника трехэлектродной щелевой линзы привело к образованию трех последовательно расположенных фокусирующих линз. Первая горизонтально фокусирующая линза включает ионизационную камеру, вытягивающий электрод и первый электрод скрещенной линзы. Скрещенная трехэлектродная линза фокусирует пучок в вертикальной плоскости. Вторая горизонтально фокусирующая линза включает третий электрод скрещенной линзы, горизонтально отклоняющие электроды и заземленный электрод, в котором расположена выходная щель S_0 . Такая ионно-оптическая схема источника позволила уменьшить потери ионного тока за счет фокусировки пучка в вертикальном и улучшения фокусировки пучка в горизонтальном направлениях. Однако трехэлектродная скрещенная линза значительно увеличила длину ионно-оптической схемы и размер источника в направлении, перпендикулярном физической оси анализатора.

Чтобы сократить этот размер и обеспечить фокусирующие свойства ионно-оптической схемы в вертикальной и горизонтальной плоскостях, был разработан и исследован ионный источник с клиновидным разрезным вытягивающим электродом. Схема источника дана на рис. 2. Так же как и в работе [5], мы использовали консольное крепление электродов с помощью струбцины.

В связи со сложностью сопряжения трех фокусирующих электростатических линз в присутствии постоянного магнитного поля и при возможном взаимном влиянии линз друг на друга нахождение оптимальных геометрических и электрических параметров источника производилось путем численного моделирования. При этом проводился расчет электростатического поля в зазорах между электродами при

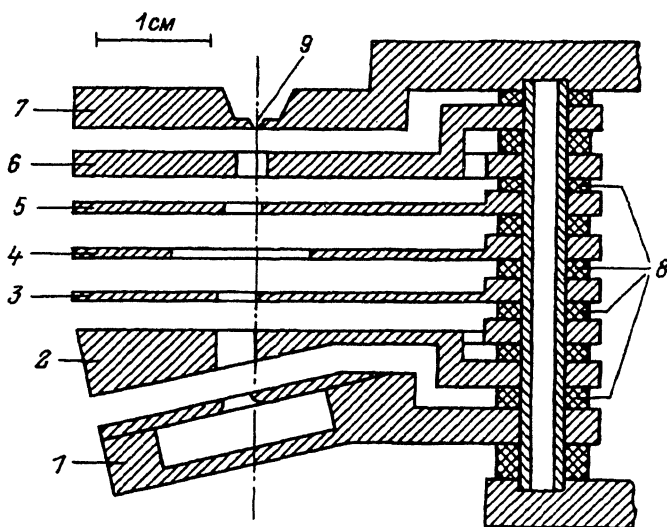


Рис. 2. Схема источника ионов.

1 — ионизационная камера; 2 — клиновидный разрезной вытягивающий электрод; 3–5 — первый, второй и третий электроды скрещенной щелевой линзы; 6 — отклоняющий разрезной электрод; 7 — выходной заземленный электрод; 8 — изолирующие элементы заданной толщины; 9 — выходная щель источника S_0 .

заданной конфигурации электродов, расчет траекторий движения ионов в скрещенных электрических и магнитном полях и оптимизация ионно-оптической схемы с целью формирования пучка частиц с требуемыми параметрами [7].

Траектория движения ионов в источнике представляет сложную кривую, состоящую из отрезков трохлоид и окружностей. На начальных участках движения ионов в источнике (внутри ионизационной камеры и в первой горизонтально фокусирующей линзе), где энергии и скорости ионов низкие, кривизна траекторий ионов большая. Это приводит к двум обстоятельствам. Во-первых, параксиальное приближение, для которого рассчитываются скрещенные линзы [8], не выполняется, так как частицы отклоняются от оси линзы при ее прохождении. Поэтому щели в электродах линзы необходимо смещать относительно оси для компенсации сноса пучка в магнитном поле. Во-вторых, скрещенная линза очень критична к углу входа ионов в нее, поэтому для компенсации отклонения ионов на начальном участке ускорения вытягивающий электрод был выполнен в виде клина. Образующие поверхности клина параллельны противоположащим поверхностям ионизационной камеры и первого электрода скрещенной линзы. Также для корректировки угла входа ионного пучка в скрещенную линзу клиновидный вытягивающий электрод был изготовлен из двух электрически независимых частей.

Величина угла раствора φ клинообразного электрода грубо оценивается из выражения

$$\varphi = \arcsin \left(\sqrt{DL}/R \right), \quad (1)$$

в котором D — расстояние от ионизационной камеры до второго электрода скрещенной линзы, L — общая длина ионно-оптической системы источника, R — радиус траектории пучка ионов на выходе из источника. Выражение (1) может быть получено при решении уравнений движения заряженной частицы в скрещенных электрическом и магнитном полях в предположении, что электрическое поле однородно на протяжении всей ионно-оптической схемы источника, т. е. он состоит всего из двух электродов, к которым приложена такая разность потенциалов U , что выполняется уравнение

$$R = \frac{1}{H} \sqrt{\frac{2mU}{q}}, \quad (2)$$

где H — величина магнитного поля, m и q — масса и заряд иона.

Численное моделирование различных вариантов ионно-оптической схемы источника показало, что угол раствора клина φ отличается от оценок, полученных согласно уравнению (1), не более чем на 20%. Для окончательного варианта источника оценка по формуле (1) дает $\varphi \simeq 9.4^\circ$, в то время как оптимальная величина, полученная численным моделированием, равна 11.3° .

Исследования фокусирующих свойств разработанного источника ионов проводились в различных режимах работы МРМС [3] путем измерения ионных токов на коллекторе K в статическом режиме или с помощью детектирующей системы [9] в динамическом режиме. Для измерения расходимости пучка ионов по углам в горизонтальной плоскости использовались апертурные диафрагмы S_{A1} различной ширины,

расположенные на угловом расстоянии 90° от выходной щели источника S_0 . Было найдено, что разброс ионов по углам в горизонтальной плоскости не превышает $\pm 0.15^\circ$. С помощью подвижной щели, изменяющей высоту пучка на угловом расстоянии $\sim 180^\circ$ от S_0 , было также найдено, что разброс ионов в вертикальной плоскости не превышает $\pm 0.3^\circ$.

Разброс ионов в пучке по энергиям обусловлен рядом причин: различиями тепловых энергий ионов, различиями вытягивающих электрических полей, контактных разностей потенциалов и объемных зарядов в местах зарождения ионов, различиями траекторий ионов на начальных участках движения в источнике и т. д. Измерение этой величины прямыми методами невозможно, поэтому для оценки использовался косвенный способ расчета через экспериментальное значение разрешающей способности подобно [3]. В различные периоды работы величина разброса ионов по энергии в пучке составляла $0.15 - 0.30$ эВ.

Еще одной характеристикой источника ионов, по-видимому, может считаться величина относительной чувствительности при работе прибора в статическом режиме, когда ток, вышедший из источника, не получает приращения энергии в модуляторе и измеряется на коллекторе. При ширине и высоте выходной щели $S_0 = 28$ и 4 мм соответственно относительная чувствительность по гелию-3 составила $\sigma \simeq \Delta I / \Delta P \simeq 2.5 \cdot 10^{-4}$ А/Тор в диапазоне давлений $1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-5}$ Тор.

Таким образом, рассмотренный источник ионов предназначен для работы в сильных однородных магнитных полях, в частности, он может быть использован в магнитных резонансных масс-спектрометрах. Консольная конструкция крепления электродов и применение клиновидного вытягивающего электрода позволяет существенно уменьшить размер источника в радиальном направлении без ухудшения однородности поля в зазорах между электродами и обходить источник пучком ионов при достаточно низких модулирующих напряжениях. Введение в ионно-оптическую схему источника трехэлектродной щелевой скрещенной линзы позволяет сфокусировать пучок ионов в горизонтальной и вертикальной плоскостях и увеличить чувствительность масс-спектрометра.

Список литературы

- [1] Шустров Б.Н. // ЖТФ. 1960. Т. 30. Вып. 7. С. 860-864.
- [2] Мамырин Б.А., Алексеенко С.А., Аруев Н.Н. // ЖЭТФ. 1981. Т. 80. Вып. 6. С. 2125-2131.
- [3] Аруев Н.Н., Байдаков Е.Л., Мамырин Б.А., Яковлев А.В. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 8. С. 181-187.
- [4] Аруев Н.Н., Байдаков Е.Л., Мамырин Б.А., Яковлев А.В. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 3. С. 502-510.
- [5] Аруев Н.Н., Байдаков Е.Л., Мамырин Б.А., Яковлев А.В. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 3. С. 536-541.
- [6] Баранова Л.А., Бубляев Р.А., Явор С.Я. // Научное приборостроение. 1991. № 2. С. 37-43.
- [7] Байдаков Е.Л. Препринт ФТИ. № 966. Л., 1985. 21 с.
- [8] Петров И.А. // ЖТФ. 1976. Т. 46. Вып. 5. С. 1085-1089.
- [9] Аруев Н.Н., Байдаков Е.Л., Мамырин Б.А. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 2. С. 300-305.