

УДК 537.534.5

ИСТОЧНИК ИОНОВ С ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ И ВЕРТИКАЛЬНОЙ ФОКУСИРОВКОЙ

Н. Н. Аруев, Е. Л. Байдаков, Б. А. Мамырин, А. В. Яковлев

Для фокусировки ионного пучка в вертикальном направлении в ионно-оптическую систему источника введена скрещенная щелевая трехэлектродная линза. Исследована работа источника и даны качественные объяснения экспериментально полученным нелинейным зависимостям ионного тока от давления и тока ионизирующих электронов. Эксперименты подтвердили, что в источнике осуществляется как горизонтальная, так и вертикальная фокусировка ионного пучка. Это позволило более чем на порядок повысить чувствительность магнитного резонансного масс-спектрометра.

Ионные источники с ионизацией электронным ударом, используемые в магнитных резонансных масс-спектрометрах (МРМС), отличаются от источников, работающих в других типах масс-спектрометров, тем, что они работают в сильных однородных магнитных полях и обладают малыми геометрическими размерами [1]. Большое влияние на чувствительность МРМС оказывает вертикальная расходимость ионного пучка, сформированного в ионном источнике. Так, при вертикальной расходимости ионного пучка $\pm 1^\circ$ и типичной длине траектории ионов ~ 1 м чувствительность анализатора МРМС падает более чем на порядок. Если в статических магнитных масс-спектрометрах вертикальная фокусировка ионных пучков может осуществляться, например, с помощью краевых полей секторных магнитов [2, 3], а в призмочных масс-спектрометрах с помощью электростатических и магнитных линз [4], т. е. вне ионных источников, то в МРМС как горизонтальная, так и вертикальная фокусировка ионных пучков практически могут осуществляться только внутри ионного источника.

В связи с задачей повышения чувствительности МРМС, обладающего разрешающей способностью более 300 тысяч [5], была проведена работа по созданию ионного источника, фокусирующего ионный пучок в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Основным отличием этого источника от существующих является наличие в ионно-оптической системе скрещенной щелевой трехэлектродной линзы [6], которая предназначена для фокусировки ионного пучка в вертикальной плоскости (рис. 1).

Численное моделирование ионно-оптической системы источника осуществлялось путем расчета электростатического поля и траекторий движения ионов при наличии постоянного однородного магнитного поля. Расчет горизонтально фокусирующей системы источника проводился в двумерном приближении для горизонтальной плоскости, перпендикулярной силовым линиям магнитного поля и проходящей через центры щелей в электродах источника [7]. В каждом отдельном расчете задавались геометрические размеры электродов и щелей в них, а также взаимное расположение электродов и электрические потенциалы на них. Изменяя геометрические и электрические параметры ионно-оптической системы, мы добивались наилучшей фокусировки пучка ионов в горизонтальной плоскости и максимальной площади сбора ионов в ионизационной камере.

Для осуществления вертикальной фокусировки ионного пучка разность потенциалов между средним и крайними электродами скрещенной линзы приближенно определялась по графикам, приведенным в [6]. Моделирование по-

казало, что изменение потенциала среднего электрода этой линзы на несколько десятков вольт не оказывает существенного влияния на фокусирующие свойства ионно-оптической системы источника в горизонтальной плоскости. При настройке источника это обстоятельство позволяет варьировать потенциал среднего электрода скрещенной линзы и добиваться оптимальной фокусировки ионного пучка в вертикальной плоскости, не нарушая фокусировки в горизонтальной плоскости. Отметим, что для корректного моделирования фокусирующих свойств ионно-оптической системы в вертикальной плоскости необходимо решать трехмерную задачу. Это чрезвычайно увеличило бы объем и время вычислений, а также затруднило бы поиск оптимальных параметров источника ионов.

Все электроды источника (рис. 1) были изготовлены из меди, и поверхность их отшлифована. Высота щелей была выбрана 12 мм. Электроды через фарфо-

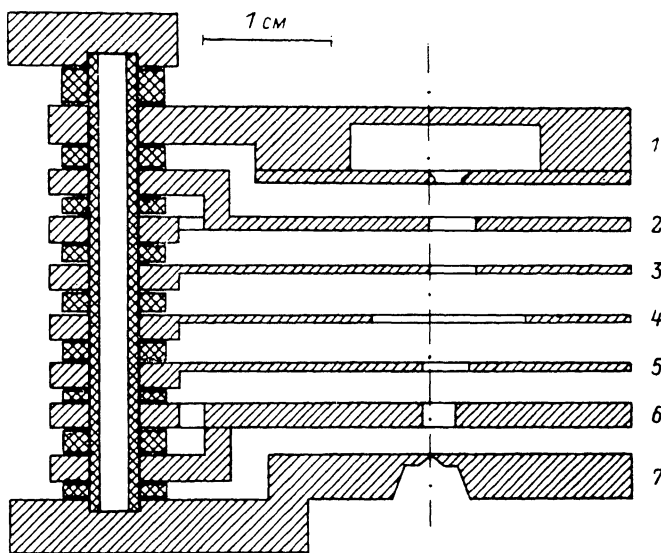


Рис. 1. Схематическое изображение источника ионов.

1 — ионизационная камера; 2 — вытягивающий электрод; 3—5 — первый, второй и третий электроды скрещенной щелевой линзы; 6 — отклоняющий электрод; 7 — выходной электрод.

ровые изоляторы зажимаются с помощью специальной струбины. Это позволяет улучшить однородность электрических полей в межэлектродных зазорах и повысить электрическую прочность источника по сравнению с конструкциями, в которых используются проходные металлические крепежные винты. Устройство узла ионизации и распределение потенциалов на его электродах в нашем источнике подобно [8].

Ионы, образовавшиеся в ионизационной камере при бомбардировке атомов и молекул газа электронным пучком с энергией электронов 100—150 эВ, движутся по направлению к вытягивающему электроду, который состоит из двух электрически изолированных частей. Изменяя напряжения на них, можно варьировать положение пучка на выходной щели источника. Предварительно сфокусированный в первой горизонтально фокусирующей системе (ионизационная камера—вытягивающий электрод—первый электрод скрещенной линзы), пучок попадает в скрещенную линзу. Она состоит из трех параллельных электродов, причем в первом и третьем электродах щели вытянуты в вертикальном направлении (высота 12, ширина 3.5 мм), а во втором электроде — в горизонтальном (высота 3 мм, ширина 12 мм). Ионы, сфокусированные по вертикали в скрещенной линзе, попадают во вторую горизонтально фокусирующую систему (третий электрод скрещенной линзы—отклоняющий электрод—выходной электрод), которая осуществляет окончательную фокусировку ионного пучка в горизонтальной плоскости. Таким образом удается сформировать достаточно узкий ленточный пучок с малой угловой расходимостью уже внутри ионного

источника. Отклоняющий электрод состоит из двух электрически изолированных деталей, так что, изменяя напряжения на них, можно корректировать угол выхода пучка ионов из источника через узкую выходную щель.

Обычно при работе МРМС в режиме высокого разрешения ширина выходной щели составляет 28 мкм. Поэтому большая часть исследований, касающихся работы источника, была выполнена именно при такой ширине выходной щели. Во всех измерениях коллектор ионов располагался на круговой орбите радиусом 93 мм сзади ионного источника.

В первом приближении траектории движения ионов в источнике можно рассматривать в виде кривых, состоящих из отрезков циклоид. В этом приближении сдвиги щелей в электродах относительно оси источника рассчитывались аналитически в предположении однородного электростатического поля в зазорах между электродами и было найдено, что они лежат в диапазоне от 0.65 до 1.75 мм в зависимости от электрода. При расчетах за ось источника был принят перпендикуляр к выходному электроду, проходящий через центр выходной щели. Чтобы ионный пучок выходил из источника перпендикулярно оси прибора, на которой расположены выходная щель источника, центральный электрод модулятора и выходная щель анализатора, необходимо развернуть источник относительно этой оси на угол, который составляет ось пучка ионов на выходе из источника с осью источника. В результате численного моделирования были уточнены сдвиги щелей в электродах источника, а также угол поворота источника, который составил 10.5° .

Электроды	Моделирование	Эксперимент
Ионизационная камера	2000	2000
Вытягивающий внутренний	1900	1800
Вытягивающий внешний	1910	1890
I электрод скрещенной линзы	1120	1120
II электрод скрещенной линзы	1140	1140
III электрод скрещенной линзы	1120	1120
Отклоняющий внутренний	630	655
Отклоняющий внешний	630	640
Выходной электрод	0	0

В таблице приведены значения потенциалов на электродах источника в вольтах, полученные в результате численного моделирования и в экспериментах. Для среднего электрода скрещенной линзы приведено экспериментальное значение потенциала, оптимальное для получения максимального ионного тока. Как видно из таблицы, все экспериментально полученные значения потенциалов, кроме потенциала на внутреннем вытягивающем электроде, практически совпадают с расчетными. Расхождение расчетного и экспериментального потенциалов на внутреннем вытягивающем электроде может быть объяснено неточностью при расчетах траекторий движения ионов внутри ионизационной камеры, что связано с влиянием поверхностных и объемных зарядов, которые не могут быть учтены. Причиной расхождения могут быть также неточности сборки электронного узла и вытягивающего электрода относительно ионизационной камеры.

Известно [9], что величина полного ионного тока J^+ , образующегося при бомбардировке электронным пучком газообразной пробы, может быть оценена согласно выражению

$$J^+ = \sigma PLJ^-,$$

где σ — вероятность ионизации при электронном ударе, P — давление газа в области ионизации, L — длина траектории электронов, J^- — величина тока ионизирующих электронов. Исходя из экспериментальных значений $P \approx 2 \cdot 10^{-6} / 0.19 \approx 1 \cdot 10^{-5}$ Тор (с учетом коэффициента 0.19 [10] для перевода показаний ионизационного манометра к давлению гелия), $L \approx 1$ см, $J^- \approx 3 \cdot 10^{-3}$ А и принимая для ${}^3\text{He}^+$, ${}^4\text{He}^+$, $\sigma \approx 1.4$ ион/(электрон·см·Тор) [11] при энергии

электронов 100—150 эВ, получим, что полный ионный ток J^+ , образующийся в нашем источнике, должен быть равен $4 \cdot 10^{-8}$ А.

На рис. 2, 3 приведены зависимости J^+ (J^-) и $J^+(P)$ при ширине выходной щели источника 28 мкм и размерах электронных щелей 0.6×4.0 мм. Увеличение ширины выходной щели вплоть до 0.5 мм не изменяет характера приведенных зависимостей. При низких плотностях тока ионизирующих электронов наблюдается линейный рост ионного тока J^+ от J^- и давления P . Дальнейшее увеличение тока J^- приводит к более быстрому возрастанию J^+ на графиках $J^+(J^-)$ (рис. 2). Это, по-видимому, связано с ростом отрицательной потенциальной ямы, обусловленной объемным зарядом электронов в области ионизации. Когда глубина потенциальной ямы становится больше средней кинетической энергии образующихся ионов, создаются условия сбора ионов в относительно небольшой объем ионизационной камеры, из которого происходит вытягивание ионов в ионно-оптическую систему источника. Результирующая конфигурация

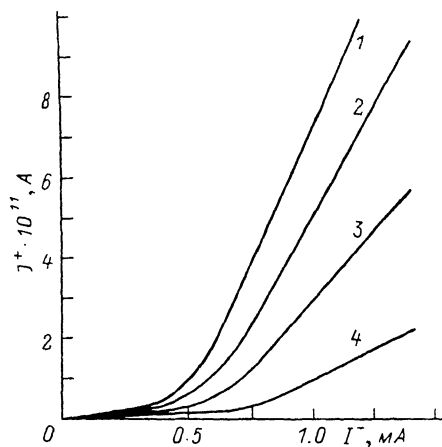


Рис. 2. Зависимости выходного ионного тока J^+ от тока ионизирующих электронов J^- при $P=7.5 \cdot 10^{-6}$ (1), $4.5 \cdot 10^{-6}$ (2), $2.5 \cdot 10^{-6}$ (3) и $0.9 \cdot 10^{-6}$ Торр (4).

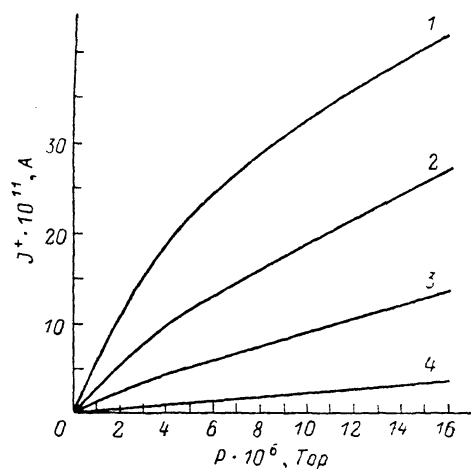


Рис. 3. Зависимости выходного ионного тока J^+ от давления гелия P при $J^-=3.0$ (1), 1.7 (2), 1.0 (3) и 0.6 мА (4).

электростатического поля в области ионизации определяется как объемными зарядами электронов и ионов, так и полем вытягивающего электрода. При заданной геометрии ионизационного узла и заданных потенциалах на его электродах электростатическое поле вытягивающего электрода дает возможность «наклонить» потенциальную яму в сторону выходной щели ионизационной камеры, практически не изменяя поперечные размеры ямы. Если величина провисающего поля вытягивающего электрода недостаточна, то «наклон» ямы получается малым и в ней накапливаются ионы, что приводит к частичной компенсации заряда электронов и уменьшению поперечных размеров ямы (области сбора ионов). Если величина провисающего поля вытягивающего электрода больше оптимальной, то это также приводит к уменьшению области сбора ионов, так как ионы, образовавшиеся на краях потенциальной ямы, не собираются в область «вытягивания». Таким образом, настройка источника ионов на максимум ионного тока включает в себя создание оптимальных условий для сбора ионов из максимального объема в ионизационной камере, определяемого размерами потенциальной ямы, в объем, из которого они затем вытягиваются в выходную щель источника ионов.

Изменением условий сбора ионов в ионизационной камере можно также объяснить отклонение зависимостей $J^+(P)$ от линейного закона при больших плотностях тока ионизирующих электронов (рис. 3). Поскольку с ростом давления анализируемого газа растет число образующихся ионов, то это приводит к частичной компенсации отрицательной потенциальной ямы и соответственно

к уменьшению области сбора ионов в камере ионизации, что ведет к относительному уменьшению ионного тока источника. Экспериментально также наблюдается уменьшение ионного тока при постоянном парциальном давлении изучаемой газовой компоненты с ростом давления других газовых компонент, что согласуется с представлением о компенсации электронно-потенциальной ямы ионами других компонент.

Был проведен ряд экспериментов, в которых распределение объемных зарядов в ионизационной камере ионного источника менялось путем изменения геометрических размеров электронных щелей, энергии ионизирующих электронов и вытягивающего потенциала. Все экспериментальные данные хорошо согласуются между собой в рамках предложенной модели изменения условий сбора и вытягивания ионов из области ионизации.

Эти обстоятельства следует учитывать при проведении количественных масс-спектрометрических измерений. Предельная величина плотности тока ионизирующих электронов, превышение которой приводит к отклонению зависимостей $J^+(P)$ и $J^+(J^-)$ от линейного закона, зависит в основном от конструкции ионизационного узла, потенциала вытягивающего электрода и вероятностей ионизации анализируемых газов.

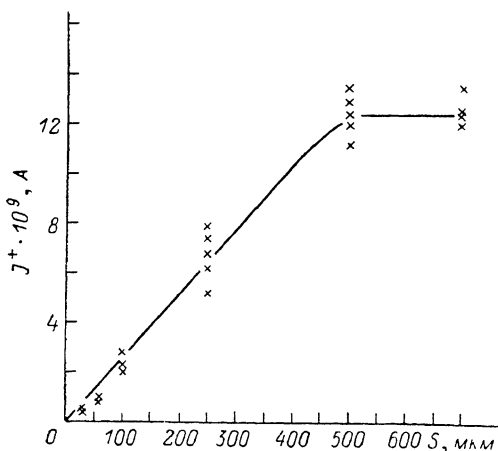


Рис. 4. Зависимость выходного ионного тока J^+ от ширины выходной щели источника S при давлении гелия $P=1 \cdot 10^{-5}$ Тор и $J^-=3$ А.

ной щели 0.5 мм выходной ток составлял $1.2 \cdot 10^{-8}$ А. Из этого рисунка следует, что ширина пучка на выходном электроде не превышает 500 мкм. Плотность ионного пучка в горизонтальном направлении равномерна в пределах погрешности измерений. Для определения угловой расходимости ионного пучка на круговой орбите на расстоянии 90° от источника устанавливалась апертурная диафрагма. Путем изменения ширины этой диафрагмы было найдено, что угловая расходимость пучка при оптимальной настройке источника не превышает $\pm 0.6^\circ$.

Для исследований вертикальной фокусировки ионного пучка использовалась клиновидная щель, расположенная на круговой орбите радиусом 93 мм диаметрально противоположно источнику ионов. Эта щель позволяла уменьшить высоту пучка ионов от 3.0 до 0.5 мм. Уменьшение высоты пучка в 6 раз приводит к уменьшению тока всего в 2—3 раза. При работе МРМС в режиме высокого разрешения, когда длина траектории ионов составляет 135 мм и ионы дважды на своем пути проходят клиновидную щель (делают два полных оборота), уменьшение высоты щели в 6 раз приводит к уменьшению выходного тока также в 2—3 раза. Эти измерения указывают на то, что распределение плотности ионов по высоте пучка неравномерно, наибольшая плотность ионов находится в центральной части ионного пучка и в источнике осуществляется вертикальная фокусировка пучка.

Использование ионного источника со скрещенной линзой в магнитном резонансном масс-спектрометре позволило повысить чувствительность прибора больше чем на порядок за счет осуществления фокусировки ионного пучка в вертикальной плоскости и улучшения фокусировки пучка в горизонтальной плоскости. Применение скрещенной линзы в ионно-оптических системах ионных

исследования фокусирующих свойств ионного источника со скрещенной линзой проводились посредством измерений выходного ионного тока при изменении горизонтального и вертикального размеров ионного пучка. На рис. 4 показана зависимость выходного ионного тока от ширины выходной щели источника (высота пучка 3 мм). Все измерения проводились при давлении гелия $P=1 \times 10^{-5}$ Тор и токе ионизирующих электронов $J^-=3$ А. При ширине выходной

щели 0.5 мм выходной ток составлял $1.2 \cdot 10^{-8}$ А. Из этого рисунка следует, что ширина пучка на выходном электроде не превышает 500 мкм. Плотность ионного пучка в горизонтальном направлении равномерна в пределах погрешности измерений. Для определения угловой расходимости ионного пучка на круговой орбите на расстоянии 90° от источника устанавливалась апертурная диафрагма. Путем изменения ширины этой диафрагмы было найдено, что угловая расходимость пучка при оптимальной настройке источника не превышает $\pm 0.6^\circ$.

Для исследований вертикальной фокусировки ионного пучка использовалась клиновидная щель, расположенная на круговой орбите радиусом 93 мм диаметрально противоположно источнику ионов. Эта щель позволяла уменьшить высоту пучка ионов от 3.0 до 0.5 мм. Уменьшение высоты пучка в 6 раз приводит к уменьшению тока всего в 2—3 раза. При работе МРМС в режиме высокого разрешения, когда длина траектории ионов составляет 135 мм и ионы дважды на своем пути проходят клиновидную щель (делают два полных оборота), уменьшение высоты щели в 6 раз приводит к уменьшению выходного тока также в 2—3 раза. Эти измерения указывают на то, что распределение плотности ионов по высоте пучка неравномерно, наибольшая плотность ионов находится в центральной части ионного пучка и в источнике осуществляется вертикальная фокусировка пучка.

Использование ионного источника со скрещенной линзой в магнитном резонансном масс-спектрометре позволило повысить чувствительность прибора больше чем на порядок за счет осуществления фокусировки ионного пучка в вертикальной плоскости и улучшения фокусировки пучка в горизонтальной плоскости. Применение скрещенной линзы в ионно-оптических системах ионных

источников, используемых в различных типах масс-спектрометров, независимо от способа ионизации вещества может существенно повысить чувствительность этих приборов.

Литература

- [1] Мамырин Б. А., Аруев Н. Н., Алексеенко С. А. ЖЭТФ, 1972, т. 63, № 7, с. 3—20.
- [2] Хургин Я. Л. ЖЭТФ, 1939, т. 9, № 7, с. 824—825.
- [3] Тауа S. Nucl. Instr. Meth., 1978, v. 152, p. 399—405.
- [4] Кельман В. М., Родникова И. В., Секунова Л. М. Статические масс-спектрометры. Алма-Ата: Наука, 1985, гл. VI, с. 158—215.
- [5] Мамырин Б. А., Алексеенко С. А., Аруев Н. Н. ЖЭТФ, 1981, т. 80, № 6, с. 2125—2131.
- [6] Петров И. А. ЖТФ, 1976, т. 46, № 5, с. 1085—1089.
- [7] Байдаков Е. Л. Препринт ФТИ, № 966. Л., 1985.
- [8] Redhead P. A. Can. J. Phys., 1967, v. 45, p. 1791—1812.
- [9] Барнард Дж. Современная масс-спектрометрия. М.: ИЛ, 1957.
- [10] Вакуумная техника. Справочник. М.: Машиностроение, 1985.
- [11] Галль Л. Н. Источники ионов с электронным ударом. Обзор. Приборы для научных исследований и автоматизации эксперимента. Л.: Наука, 1982, с. 10—20.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
28 января 1987 г.