



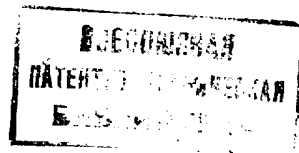
СОЮЗ СОВЕТСКИХ
СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ
РЕСПУБЛИК

(09) **SU** (11) **1600645** **A3**

(51)5 H 01 J 49/32

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ
ПО ИЗОБРЕТЕНИЯМ И ОТКРЫТИЯМ
ПРИ ГНТ СССР

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ



- (21) 3850145/24-21
(22) 25.01.85
(31) 8401332
(32) 27.01.84
(33) FR
(46) 15.10.90. Бюл. № 38
(71) Оффис Насьональ д'Этюд эде Решерш Ахроспасьяль О.Н.Э.Р.А. Университэ де Пари-Сюд (FR)
(72) Жорж Слodziан, Франсуа Коста де Боргард, Бернер Дэнз и Франсуа Жирап (FR)
(53) 621.384 (088.8)
(56) Сысоев А.А., Чупахин М.С.. Введение в масс-спектрометрию. М.: Атомиздат, 1977, с.73-77.
Патент Франции 2.056.163, кл. H 01 J 39/00, 1971.
(54) МАСС-СПЕКТРОМЕТР
(57) Изобретение касается масс-спектрометрии высокой яркости. Целью изобретения является повышение разрешающей и пропускной способности за счет уменьшения аберрации отверстий второго порядка. Масс-спектрометр содержит источник ионов с выходной щелью и блоком передающей оптики, электростатический секторный и магнитный анализаторы. Величины угла между

плоской входной границей магнитного анализатора и нормалью к ионно-оптической оси масс-спектрометра со стороны отклонения пучка и угла отклонения пучка в магнитном анализаторе удовлетворяют соотношению

$$\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \cdot \operatorname{tg}(\theta - \varepsilon) = 2.$$

Блок электрофокусирующей оптики содержит расположенные до выходной щели источника две электростатические линзы с фокусом в радиальной плоскости в области выходной щели и расположенную между ними шелевую линзу для создания параллельного в аксиальной плоскости пучка частиц в области выходной щели ионного источника. Блок электрофокусирующей оптики после выходной щели ионного источника содержит фокусирующую линзу послеускорения, в фокусе которой расположена шестиполюсная линза. Вторая шестиполюсная линза расположена после электростатического анализатора в точке его фокуса. Линза для подачи к магнитному анализатору параллельного в радиальной плоскости пучка частиц выполнена в виде квадрата. 4 з.п., ф-лы, 10 ил.

Изобретение относится к сепаратору заряженных частиц или масс-спектрометру высокой яркости, предназначенному для одновременного детектирования и измерения нескольких элементов.

Целью изобретения является повышение разрешающей и пропускной

способности за счет уменьшения аберрации отверстий второго порядка.

На фиг. 1 приведена схема спектрометра согласно данному изобретению, разрез в радиальной плоскости, на этом чертеже показаны два параллельных пучка, поступающих под разными углами падения на магнитный сектор и два пучка соответствующих различ.

(09) **SU** (11) **1600645** **A3**

ным энергиям $\pm \Delta V$, на фиг. 2 - вид устройства, похожий на фиг. 1, но иллюстрирующий отделение в одном и том же пучке частиц, обладающих двумя различными массами; на фиг. 3 - участок схемы, иллюстрирующий в вертикальном сечении форму пучка перед его входом в электростатический сектор; на фиг. 4 - проекция устройства по фиг. 1; на фиг. 5 - вертикальное сечение, иллюстрирующее форму пучка в направлении, которое он имеет после выхода из магнитного сектора; на фиг. 6 и 7 - то же, что и на фиг. 2 и 3 в увеличенном масштабе; на фиг. 8 дана более точная иллюстрация частного примера выполнения изобретения; на фиг. 9 для этого примера проиллюстрирована работа прибора с послеускорением; на фиг. 10 - то же, без послеускорения.

В противоположность масс-спектрографам, в которых в качестве конечного детектора применяется фотографическая пластина, масс-спектрометры не нуждаются в том, чтобы их зона детектирования, фокальная поверхность выхода магнитного сектора, была обязательно плоской.

На входе спектрометра имеется блок 1 передающей оптики. Характер передачи зависит от характеристик пучка частиц, подаваемого на вход или от "точечного источника" 2 частиц. Блок 1 передающей оптики заканчивается на уровне входной щели 3, которая и является входом спектрометра.

Как известно, спектрометр после входной щели 3 имеет электростатический сектор 4, а затем магнитный сектор 5, перед которым установлена щель отверстия 6. Весь этот комплекс средств предназначен для отклонения потока частиц в радиальной плоскости, перпендикулярной большому размеру входной щели 3. Этой радиальной плоскостью и является плоскость рисунков 1 и 2.

Известно, что основным элементом масс-спектрометра является его магнитный сектор 5, рассеивающее действие которого зависит одновременно и от массы частицы, и от ее энергии. Это рассеивающее действие выражается в том, что траектория частицы приобретает форму дуги окружности, радиус которой зависит от массы и энергии частицы. Известно также со-

четание магнитного сектора 5 с предшествующим электростатическим сектором 4. Электростатический сектор 4 также оказывает рассеивающее действие, но только в зависимости от энергии частиц. При одновременном действии обоих этих секторов электростатический сектор компенсирует рассеивающее действие магнитного сектора, зависящее от энергии частиц. Таким образом, в принципе на выходе магнитного сектора остается только рассеивающее действие, зависящее от массы частиц.

Магнитный сектор 5 снабжен плоской стороной входа 7, размещенной под углом к оси пучка частиц, и выходной стороной 8, также плоской и лежащей в плоскости, проходящей через пересечение 9 (фиг. 2) входной стороны 7 с осью пучка частиц. При таком расположении угол отклонения остается одним и тем же независимо от массы частиц. Этот угол вдвое больше угла между выходной стороной 8 и осью пучка частиц на входе магнитного сектора 6. Отсюда следует, что для пучка, параллельного на входе, фокусирование частиц на выходе магнитного сектора происходит в плоскости 10, которая также проходит через пересечение 9.

Для получения спектрометра с многочисленным детектированием и большой яркостью, а также с большой разрешающей способностью необходимо компенсировать различные aberrации, вызываемые элементами спектрометра и рассматриваемые каждая в отдельности или в их сочетании.

Первая aberrация известна под названием aberrации отверстия второго порядка магнитного сектора. Этот тип aberrации обусловлен тем, что две траектории, симметричные относительно центральной траектории на входе в магнитный сектор, после выхода из этого сектора пересекаются в точке, не находящейся на центральной траектории. Смещение этой точки относительно центральной траектории пропорционально квадрату углового отклонения а каждой секущей траектории относительно центральной траектории (откуда и появляется второй порядок a^2).

Первый аспект изобретения состоит в корригировании этого типа aberrации отверстия второго порядка на уровне

самого магнитного сектора. Обозначим через позицию 11 нормаль к оси пучка частиц в точке, где начинается изгиб траектории, получающейся под воздействием магнитного сектора 5. Буквой θ обозначим угол отклонения пучка частиц в магнитном секторе 5. Аберрация отверстия второго порядка, созданные магнитным сектором, для траекторий, расположенных в радиальной плоскости, уничтожаются, если эти углы удовлетворяют следующему соотношению:

$$\operatorname{tg} \theta / 2 \cdot \operatorname{tg} (\theta - \varepsilon) = 2$$

Изобретение относится к масс-спектрометру очень высокой яркости, иначе говоря к прибору, воспринимающему пучок, геометрическая протяженность которого очень велика, и способному к одновременному детектированию, благодаря чему коррекция аберраций становится очень сложной.

Согласно изобретению рекомендуется, чтобы входная сторона магнитного сектора имела соответствующий наклон, с тем, чтобы магнитный сектор был лишен аберраций отверстия второго порядка для всех масс (для всех траекторий пучка, расположенных в радиальной плоскости), конечно, при условии, что предварительно уже были ликвидированы аберрации электростатического сектора.

Угол ε наклона входной стороны в зависимости от угла θ отклонения магнитного сектора определяется по приведенному выше уравнению

$$\operatorname{tg} \theta / 2 \cdot \operatorname{tg} (\theta - \varepsilon) = 2$$

Так, для отклонения в магнитном секторе SM, равном 90° , получаем

$$\operatorname{tg} \varepsilon = 1/2, \text{ т.е. } \varepsilon = 26,56^\circ.$$

Это соотношение установлено исходя из коэффициентов аберраций, выявленных во время опытов с магнитными секторами различных конфигураций. Комбинируя некоторые коэффициенты, можно установить приведенное выше соотношение, при соблюдении которого оказываются скорректированными аберрации отверстий второго порядка магнитного сектора. Именно это и является основным положением, которое позволило корригировать эти аберрации при любых геометрических размерах пучка, что совершенно необходи-

мо, так как изобретение преследует целью охват возможно более широкого пучка частиц.

Существует вторичный эффект, который состоит в том, что наклон входной стороны вводит плоскость фокусирования (10) магнитного поля магнита (это было известно и раньше).

Использование приведенного выше соотношения дает возможность корригирования аберраций отверстий магнита для траекторий, расположенных в радиальной плоскости, так, что остаются только аберрации, введенные электростатическим сектором, которые можно корригировать при помощи расположенного перед магнитным сектором шестиполосника 12. Такая коррекция аберраций отверстий второго порядка, связанных с магнитным сектором, сама по себе очень важна и, естественно, может быть применена и в других видах спектрометров, отличающихся от детально описываемого здесь.

Пучок частиц, выходящий из электростатического сектора 4, имеет сужение в точке 13 (фиг.2). Для того, чтобы получить оптимальный эффект от первой коррекции, вслед за точкой 13 введены устройства, благодаря которым магнитный сектор получает пучок, параллельный в радиальной плоскости.

Это достигается при помощи одного или нескольких четырехполосников, таких как 14, установленных между электростатическим сектором 4 и магнитным сектором 5. Одним из способов введения одного четырехполосника 14 является такая установка, при которой его передний главный фокус совпадает с точкой 13 сужения. Положение четырехполосника 14 выбирается так, чтобы наклон каждого параллельного пучка, соответствующего различным энергиям, обеспечивал ахроматическое функционирование на уровне черт, расположенных в плоскости 10, одновременно для всех масс. Эта особенность проиллюстрирована на фиг.1, где два параллельных пучка, соответствующих энергиям $V \pm \Delta V$, сфокусированы в одной и той же точке плоскости 10 (для большей ясности ордината несколько растянута). Как это будет видно в дальнейшем, точка 13 является действительным изображением входной щели 3, создаваемым электростатическим сектором в радиальной плос-

кости. Точно также на фиг. 2 в радиальной плоскости показан параллельный пучок на его выходе из четырехполюсника 14.

На фиг. 4 показано, что четырехполюсник 14 в вертикальном сечении, наоборот, оказывает рассеивающее действие. Это рассеивающее действие, в свою очередь, компенсируется электростатической шелевой линзой 15. Таким образом, на выходе этой линзы появляется параллельный пучок частиц, который точно проходит через меньший размер щели отверстия 16.

Если теперь снова вернуться к рассмотрению фиг. 2, то можно увидеть, что параллельный пучок (изображенный для упрощения как единственный пучок, обладающий средней энергией), выдаваемый четырехполюсником 14 в радиальной плоскости, проходит без изменений через шелевую линзу 15, чтобы затем войти внутрь щели большого размера отверстия 16. Сравнение с фиг. 1 показывает, что большой размер отверстия 16 обеспечивает проход параллельных пучков с различным хроматическим отклонением, поступающих от четырехполюсника 14, с учетом дисперсии энергии, существующей между электростатическим сектором 4 и магнитным сектором 5.

В конце концов пучок частиц становится параллельным по двум его поперечным направлениям после шелевой линзы 15 и вплоть до входной стороны магнитного сектора 5.

Известно, что электростатический сектор 4 и магнитный сектор 5 обладают каждый своим центром хроматического вращения (прилагательное "хроматическое" применено здесь в связи с дисперсией энергии). Частицы, следующие по центральной траектории до их входа в электростатический сектор и обладающие энергией, слегка отличающейся от номинальной энергии пучка, будут выходить из электростатического сектора 4 по отклоненным траекториям. В зависимости от энергии частиц отклоненные траектории оказываются повернутыми вокруг некой точки, которая называется центром хроматического вращения.

Аналогично этому и магнитный сектор 5 обладает своим центром хроматического вращения, к которому должны сходиться под соответствующим

углом частицы, имеющие близкие одна другой энергии и одну и ту же массу, после завершения их отклонения, т.е. в той же точке фокальной плоскости 17 и под тем же углом (по совпадающим траекториям), какова бы ни была энергия в полосе $\pm \Delta V$. Таким образом, достигается полная компенсация (первого порядка) энергетической дисперсии магнитной призмы. Центров хроматического вращения имеется столько же, сколько различных масс.

Однако, если отклонение траекторий на входе сектора 5 просто пропорционально разнице энергии ΔV с коэффициентом пропорциональности, одинаковым для всех масс, и эти траектории все же сходятся в одной точке фокальной плоскости 17 для данной массы, то траектории частиц с различной энергией будут иметь различное отклонение.

Согласно другой характеристике изобретения предусматриваются средства для сопряжения двух центров хроматического вращения электростатического сектора 4 и магнитного сектора 5. Это можно легко осуществить путем соответствующего увеличения при помощи четырехполюсника 14, чем достигается полная коррекция хроматической или энергетической дисперсии пучка частиц одной массы, при этом четырехполюсник размещен так, чтобы придавать частицам других масс другие траектории с соответствующими отклонениями.

Теперь рассмотрим коррекцию аберраций отверстий второго порядка, которые появляются на уровне электростатического сектора 4. Эта коррекция в основном осуществляется при помощи первого шестиполюсника 18. Однако первый шестиполюсник 18 работает в тесном контакте с элементами спектрометра как такового, а также совместно с его блоком 1 передающей оптики.

Чтобы составить представление об оптической передаче и о входе спектрометра прежде всего обратимся к фиг. 1, 2, 3, 6, 7.

Пучок заряженных частиц, приложенный к входу в блок 1 передающей оптики, имеет сужение в точечном источнике 2. Этот пучок ионов состоит из частиц различной массы, обладающих разными кинетическими энергиями, не намного отличающимися одна от другой.

Среднее значение этой энергии, как и раньше, обозначим буквой V , выраженной в электроновольтах, а ее дисперсию — через $\pm \Delta V$.

Этот пучок в принципе обладает симметрией вращения в точке точечного источника 2 и может состоять из вторичных ионов, испускаемых образцом, подвергнутым воздействию пучка первичных ионов, сосредоточенного на поверхности образца.

Первая унипотенциальная электростатическая линза 19 дает изображение точки 2 в точке 20. Вокруг этой точки могут быть предусмотрены пластинки 21, позволяющие выполнять возможное рецентрирование пучка на оптической оси.

После первой линзы 19 и, если это требуется, после пластинок 21 центрирования устанавливается шелевая линза 22. На фиг. 2 и 6 показано, что шелевая линза не оказывает никакого влияния на траектории ионов, лежащих в радиальной плоскости. И наоборот, в вертикальном сечении (фиг. 3 и 7) шелевая линза 22 сводит эти траектории в точку 23 сужения.

Вторая электростатическая линза 24 установлена после шелевой линзы 22.

В радиальной плоскости (фиг. 2 и 6) линза 24 дает изображение точек "2" и 20 в точке 25, расположенной на уровне входной щели 3 и отцентрированной на ее оси.

В вертикальном сечении (фиг. 3 и 7) линза 26 размещена так, что ее фокус близок к точке 23. Следовательно, эта линза выдает параллельные лучи или траектории, развертываясь вдоль входной щели 3 по ее большому размеру (фиг. 7).

Таким образом, увеличение на уровне входной щели 3 радиальной плоскости получается путем влияния на потенциал возбуждения электростатических линз 19 и 26.

Независимое регулирование траекторий, расположенных в вертикальной плоскости (фиг. 3 и 7), достигается при помощи шелевой линзы 22.

На входе спектрометра перед входной щелью 3 установлены с одной стороны собирательная электростатическая линза 27, которая делает возможным управляемое послеускорение, а после нее — первый шестиполосник 18.

Линза 28 в вертикальном сечении пучка частиц служит для сужения потока частиц в точке, расположенной перед электростатическим сектором 4. Первый шестиполосник 18 отцентрирован на уровне этого сужения.

Шестиполосник 18 установлен для компенсации aberrаций отверстий второго порядка, создаваемых электростатическим сектором 4 для траекторий, расположенных в радиальной плоскости. Прежде всего, он не оказывает никакого влияния на траектории, расположенные в вертикальном сечении, и не вносит в них никаких изменений, в том числе aberrаций типа B^2 , благодаря тому факту, что сужение пучка в этом сечении находится в центре шестиполосника.

Линза 28 послеускорения играет другую роль, заключающуюся в изменении угла отверстия спектрометра как такового. Соответственно сужение пучка, производимое блоком передающей оптики, в точке 25 на уровне входной щели в радиальной плоскости, переносится в точку 27 линзой 28 послеускорения. Это позволяет увеличить яркость спектрометра после устранения наиболее существенных aberrаций. В результате послеускорения энергия ионов V превращается в энергию V_p .

На практике передняя главная плоскость линзы 28 послеускорения размещается в плоскости входной щели 4 так, что спектрометр видит входную щель, расположенную в точке 29 в задней главной плоскости линзы 28. Для такого спектрометра гауссовское изображение остается без изменений. Для данной разрешающей силы увеличивается только располагаемый угол отверстия на входе.

Как указывалось раньше, спектрометр устанавливают так, чтобы задний главный фокус линзы 28 послеускорения находился в центре шестиполосника 18, в точке 30.

Кроме того, послеускорение позволяет уменьшить энергетическую дисперсию соотношения V/V до отношения V/V_p , что, в свою очередь, приводит к уменьшению смешанных aberrаций и aberrаций в $(\Delta V/V_p)^2$.

С целью упрощения описания заявитель выбрали отношение V/V_p порядка одной четверти, что потребовало для редакции отрицательных ионов энергии

порядка ± 5 кВ и расчета всех проводов спектрометра в цепях, расположенных после линзы 28 послеускорения, на напряжение $+15$ кВ.

Спектрометр имеет второй шестиполлюсник 12, расположенный после электростатического сектора 4 и отцентрированный на действительном изображении входной щели 3, которое дает электростатический сектор 4 в радиальной плоскости. Это позволяет уменьшить смешанные aberrации отверстия и хроматические aberrации для траекторий, расположенных в радиальной плоскости, при обеспечении точной компенсации для выбранной массы. Центрирование шестиполлюсника 12 в точке 13 позволяет обеспечить коррекцию смешанных aberrаций, не регулируя для этого шестиполлюсник 18, который корректирует aberrации отверстия (независимость регулировок).

В описываемом здесь примере реализации изобретения фильтрование по энергии производится перед блоком передающей оптики.

В одном из вариантов оно выполняется на уровне второго шестиполлюсника 12. Таким образом, в этом варианте спектрометр имеет два шестиполлюсника, обрамляющих щель фильтрования по энергии (не показана).

После второго шестиполлюсника 12 находятся четырехполлюсник 31, входная линза 15, щель отверстия 6 и, наконец, магнитный сектор 5.

На фиг. 1, 2, 4 показаны некоторые детали магнитного сектора. Этот сектор имеет магнит (не показан), который взаимодействует с двумя полюсными наконечниками 32 и 33, форма которых показана на видах устройства в радиальной плоскости.

Независимо от получения различных коррекций, уже описанных выше, изобретение позволяет значительно облегчить эти коррекции, осуществляя их при помощи регулировок, которые не требуют перемещения отдельных элементов спектрометра и которые сделаны по возможности независимыми один от другого.

Для этого сборка и регулировка спектрометра производится в следующем порядке:

Прежде всего ставят на место электростатический сектор 4, относящийся к секторам сферического типа, так

же, как и магнитный сектор 5. После этого ставят на свое место четырехполлюсник 31, с тем чтобы заведомо создать условия для соответствующего наклона хроматических траекторий и получения параллельности пучка, входящего в магнитный сектор. Затем устанавливают щелевую линзу 15, служащую для корригирования расхождения четырехполлюсника 22 в вертикальном сечении. После этого устанавливают щель отверстия 16, а также второй шестиполлюсник 12, помещаемый в фокусе четырехполлюсника 14.

Перед электростатическим сектором 4 устанавливают навстречу пучку частиц шестиполлюсник 18, отцентрированный в выбранной заранее точке, как в фокусе, в вертикальном сечении, линзу 28 послеускорения, входную щель 3, вторую электростатическую линзу 26, щелевую линзу 22, пластинки 21 центрирования и, наконец, первую унипотенциальную электростатическую линзу 19.

Все эти элементы могут быть размещены в заранее определенных положениях, которые в дальнейшем изменяться не будут.

После этого производят дополнительные регулировки, выполняемые в следующем порядке: четырехполлюсник 31 регулируется так, чтобы дисперсным по энергии траекториям, выходящим из электростатического сектора 4, придавалось соответствующее отклонение.

Линзу после ускорения с ее элементами регулируют так, чтобы точка 13 сужения была в фокусе четырехполлюсника 14 и, следовательно, в центре шестиполлюсника 12. Эта регулировка обеспечивает параллельность в радиальной плоскости пучка, выходящего из четырехполлюсника 14, и позволяет компенсировать возможные дефекты положения, занимаемого четырехполлюсником 14.

Щелевую линзу 22 оптики передачи регулируют так, чтобы точка 30 сужения находилась в центре шестиполлюсника 18.

Специалист поймет, что прибор, таким образом, оказывается полностью отрегулированным без какого-либо изменения взаимного расположения его элементов.

Точно так же нет необходимости осуществлять сбор отклоненных частиц на выходе из магнитного сектора 5. Час-

тицы, имеющие различные массы, приходят на одну и ту же плоскость 10.

Сепаратор частиц согласно изобретению позволит по образцу спектрографа применять фотографическую пластинку для сбора отклонения частиц и анализа распределения масс.

Согласно изобретению предпочтение отдается размещению в фокальной плоскости 10 ряда отдельных коллекторов, например, таких, как электронные умножители, входная поверхность которых чувствительна к ударам заряженных частиц, выходящих из магнитного сектора 5.

Теперь приступим к описанию частного примера реализации изобретения, воспользовавшись фиг. 8 и последующими.

Входной пучок, отрицательные ионы средней энергии 5 кВ образуют пучок вращения, имеющий сужение в точке ионного источника 2. Полуугол при вершине имеет порядок 10^{-2} рад для разрешающей способности $M/\Delta M$ порядка 4000.

В блок передающей оптики входят: электростатическая линза 19 - три круглых электрода с центральными отверстиями диаметром 4 мм. Центральный электрод имеет потенциал 4670 В, а два других электрода, установленных по одну и по другую сторону от центрального электрода, имеют потенциал массы;

пластины 21 центрирования - четыре пластинки из нержавеющей стали, имеющие активную поверхность размером 18×2 мм, создающие канал квадратного сечения. Расстояние между противоположными пластинками равно 3 мм. Их центр расположен на уровне сужения пучка ионов;

щелевая линза 22 - три электрода с прямоугольными отверстиями, большая ось которых лежит в радиальной плоскости. Центральный электрод имеет размеры 6×64 , а два других электрода - 4×30 мм. Центральный электрод, получающий напряжение - 5 кВ, установлен на расстоянии 66,5 мм от оси линзы 22.

Электростатическая линза 22 идентична линзе 19, разница между ними лишь в том, что ее центральный электрод имеет потенциал - 4310 В. Этот электрод размещен на расстоянии 36 мм от центра щелевой линзы 22 и на расстоянии 30 мм от входной линзы 3, расположенный выше.

Масс-спектрометр 2:

входная щель 3 - прямоугольное отверстие размером $0,024 \times 0,8$ мм (с активным послеускорением), имеющее разрешающую способность по массе $M/\Delta M = 4000$. Большая ось щели перпендикулярна радиальной плоскости. Размеры щели регулируются по осям X и Y; электрод 28 послеускорения - диск толщиной 8 мм с отверстием, имеющим внутренний диаметр 14 мм, изолированный алюминиевым цилиндром. Этот диск имеет потенциал +10 кВ при работе в качестве послеускорителя, при этом элементы, расположенные в передней части, имеют опорное напряжение + 15 кВ;

шестипольсник 18 - шесть цилиндрических стержней диаметром 8 и длиной 36 мм. Их оси равномерно распределены по цилиндрической поверхности диаметром 24 мм. Разность потенциалов двух соседних стержней равна ± 36 В попеременно. Центр шестипольсника находится в 52 мм после электрода 28 и в 43 мм перед входной плоскостью электростатического сектора;

электростатический сектор 4 - угол отклонения 90° . Два концентрических участка сферы радиусами 94 и 106 мм. Разность потенциалов, приложенных к внутренней и наружной сферам, составляет +4819, в В. На входе и выходе имеются защитные щели, служащие для ограничения утечки электрического поля;

шестипольсник 12 - такой же, как и шестипольсник 18. Разница заключается только в том, что длина стержней равна 72 мм, а разность потенциалов равна $\pm 1702,5$ В. Центр шестипольсника находится в 77 мм после выходной стороны электростатического сектора 4;

четырепольсник 14 - четыре цилиндрических стержня диаметром 24 мм и длиной 100 мм. Оси этих стержней равномерно распределены по цилиндрической поверхности диаметром 46 мм. Разность потенциалов попеременно составляет $\pm 46,4$ В. Стержни с отрицательным потенциалом должны лежать в радиальной плоскости;

щелевая линза 15 имеет такую же конструкцию, как и линза 22. Центральный электрод имеет отверстие размером 14×70 мм, электроды, расположенные по краям, имеют отверстия

размером 10×60 мм. Потенциал центрального электрода соответствует фокусному расстоянию 173 мм. Он отстоит на 119 мм после центра четырехполюсника 14;

щель отверстия 16 имеет размеры 5×0,7 для разрешающей способности по массе $M/\Delta M = 4100$. Большая ось щели расположена в радиальной плоскости;

магнитный сектор 5 - магнитная цепь из мягкой стали U-образного сечения. Междужелезное пространство магнита - 8 мм. Полезный радиус траектории - от 70 до 350 мм. Магнитная индукция может регулироваться с точностью до 1 Тл.

Угол входной стороны $\varepsilon = 26^\circ 56'$ ($\operatorname{tg} \varepsilon = 1/2$).

Угол отклонения $\alpha = 90^\circ$.

Угол выходной стороны $Q/2 = 45^\circ$.

Угол плоскости 10 фокусирования $53^\circ 13'$.

Магнитная цепь имеет потенциал массы, но немагнитные электроды, размещенные внутри, имеют потенциал +15 кВ при работе в качестве послеускорителя. Магнитный шунт ограничивает утечку поля с входной стороны магнитного сектора. На верхней части плоскости 10 фокусировки находится узел мультиколлектора, состоящего из ионно-электронных преобразователей послеэлектронных умножителей.

Оптические элементы (за исключением магнита) установлены на детали конструкции, изготовленной из нержавеющей стали, которая фиксирует взаимное расположение различных устройств и служит вакуумной камерой. Группа криогенных насосов обеспечивает получение требуемого сверхвысокого вакуума. Магнит соединен с предшествующим устройством эластичной герметичной системой, в которую входят элементы механического выравнивания оптических осей по одной линии.

При последующем описании обращаться к фиг. 9, 10, которые иллюстрируют работу системы при наличии послеускорения и без него.

До щелевой линзы 22 траектории остаются такими же, как и раньше, и находятся в радиальной плоскости и в вертикальном сечении.

На фиг. 9 показано, что в радиальной плоскости траектории без ускоре-

ния проходят через щелевую линзу 22, чтобы сходиться к второй электростатической линзе 26 и фокусироваться в точке 25. Однако линза - электрод 28 послеускорения, имеющая потенциал до 10 кВ, создает мнимую фокусировку в точке 29 по ходу лучей в спектрометре. Таким образом, из этой точкиходят траектории, поступающие в шестиполюсник 18. Для конкретных числовых значений величин, описанных ранее, расстояние между точками 29 и 25 равняется 11 мм.

В вертикальном сечении (фиг. 9) эти траектории деформированы щелевой линзой 22. При этом остаются параллельными до плоскости 33 (фиг. 8), после которой они слегка сходятся, с тем чтобы пройти через щелевое отверстие 3 в плоскости 34 (фиг. 9) и, таким образом, получить окончательное направление, идущее к точке 30 сужения, в которой отцентрирован шестиполюсник 18.

Фокусные расстояния этих линз равняются, мм:

для линзы 19 $f_{11} = 15$

для линзы 22 $f_{13} = 9,44$

для линзы 24 $f_{14} = 19,88$

для линзы 28 $f_{21} = 97$

При работе без послеускорения (фиг. 10) имеет место только один эффект собирательной линзы, создаваемый линзой 28. Следовательно, точка 25 остается связанной с точкой 30, из которой как бы исходят траектории, которые находятся после линзы 28 в радиальной плоскости.

В вертикальном сечении 10 регулировка оптической передачи изменена так, чтобы траектории начинали сходиться тотчас же после выхода из второй электростатической линзы 26. Они проходят через входную щель 3, несколько раньше сходясь до уровня линзы 28 и окончательно сходясь в той же точке 29 сужения, что и в предыдущем случае.

Величины фокусных расстояний при этом:

f_{11} и f_{14} остаются такими же;

для линзы 22 $f_{13} = 8,30$ мм;

для линзы 28 $f_{21} = 139,09$ мм.

Если при работе с послеускорением увеличение на уровне входного отверстия равняется единице, то при работе без послеускорения между изображениями, расположенными в точке 29, и

изображением в точке 30 имеется увеличение в 1,32 раза.

Отсюда следует, что послеускорение, сопровождаемое эффектом сходимости, вызванным дополнительным электродом, соответствует особенностям независимой регулировки, которыми обладает устройство согласно изобретению, — изменяется только величина электрических напряжений.

Некоторые из элементов описанного выше спектрометра могут быть заменены эквивалентными элементами. Так, единственный четырехполюсник 14 может быть заменен двумя четырехполюсниками. Возможно использование и других элементов, эквивалентных четырехполюснику, а также шестиполюсникам, электростатическим линзам и шелевым линзам.

Ф о р м у л а и з о б р е т е н и я

1. Масс-спектрометр, содержащий источник ионов с выходной щелью, блок электрофокусирующей оптики, электростатический секторный анализатор, линзу для подачи к магнитному анализатору параллельного в радиальной плоскости пучка частиц и магнитный анализатор с входной щелью и плоской входной границей, неортогональной к ионно-оптической оси масс-спектрометра, причем плоская выходная граница расположена в плоскости, проходящей через пересечение входной границы с ионно-оптической осью масс-спектрометра, отличающийся тем, что, с целью повышения разрешающей и пропускной способности за счет уменьшения аберрации отверстия второго порядка, величины угла между входной границей магнитного анализатора и

нормалью к ионно-оптической оси масс-спектрометра со стороны отклонения пучка и угла θ отклонения пучка в магнитном индикаторе удовлетворяют соотношению

$$\operatorname{tg} \theta / 2 \cdot \operatorname{tg} (\theta - \epsilon) = 2.$$

2. Масс-спектрометр по п.1, отличающийся тем, что блок электрофокусирующей оптики содержит расположенные до выходной щели источника две электростатические линзы с фокусом в радиальной плоскости в области выходной щели ионного источника и расположенную между ними шелевую линзу для создания параллельного в аксиальной плоскости пучка частиц в области выходной щели ионного источника.

3. Масс-спектрометр по пп.1 и 2, отличающийся тем, что блок электрофокусирующей оптики после выходной щели ионного источника содержит фокусирующую линзу после ускорения, в фокусе которой расположена шестиполюсная линза.

4. Масс-спектрометр по пп.1-3, отличающийся тем, что он содержит вторую шестиполюсную линзу, расположенную после электростатического секторного анализатора в точке его фокуса.

5. Масс-спектрометр по п.1, отличающийся тем, что линза для подачи к магнитному анализатору параллельного в радиальной плоскости пучка частиц выполнена в виде квадрупольа, задний фокус которого совпадает с фокусом электростатического секторного анализатора в радиальной плоскости, причем после квадрупольа установлены средства для компенсации расхождения пучка в аксиальной плоскости.

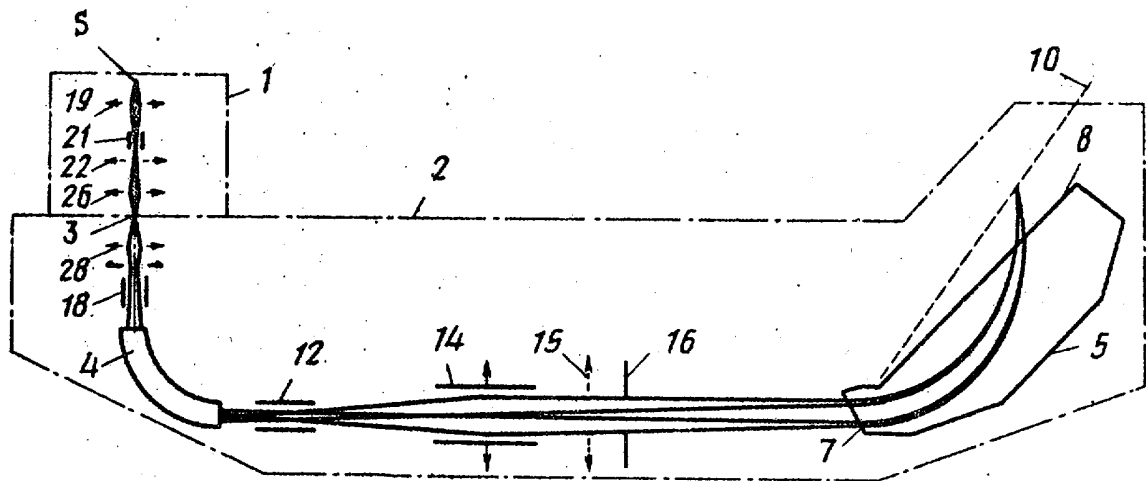
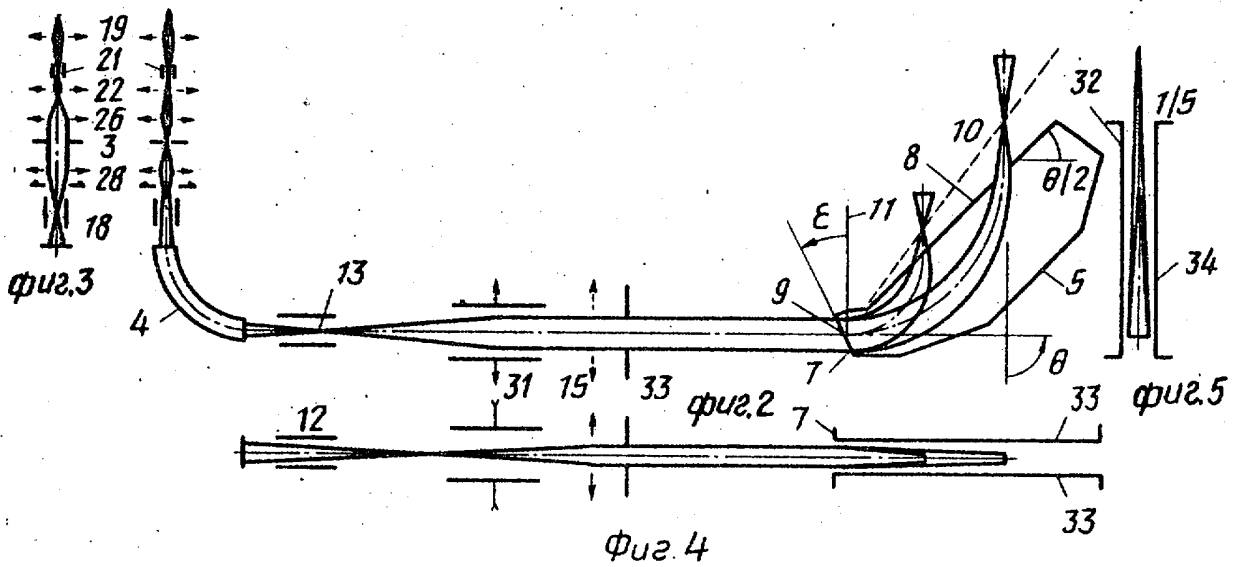
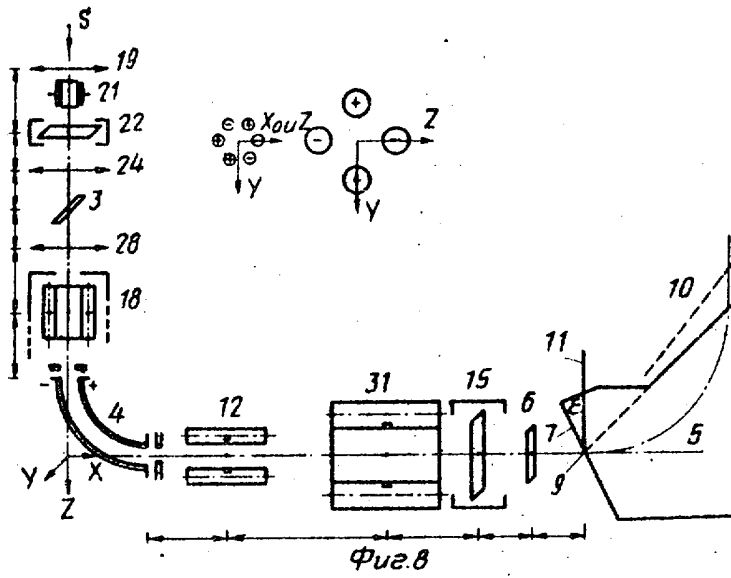
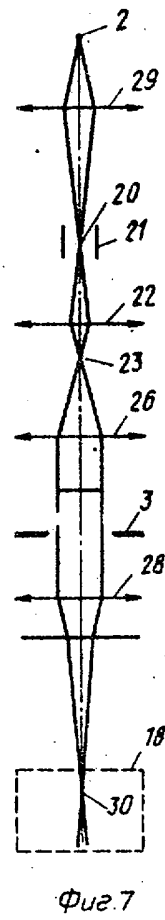
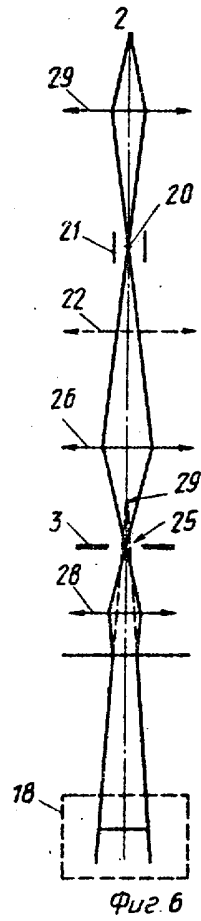
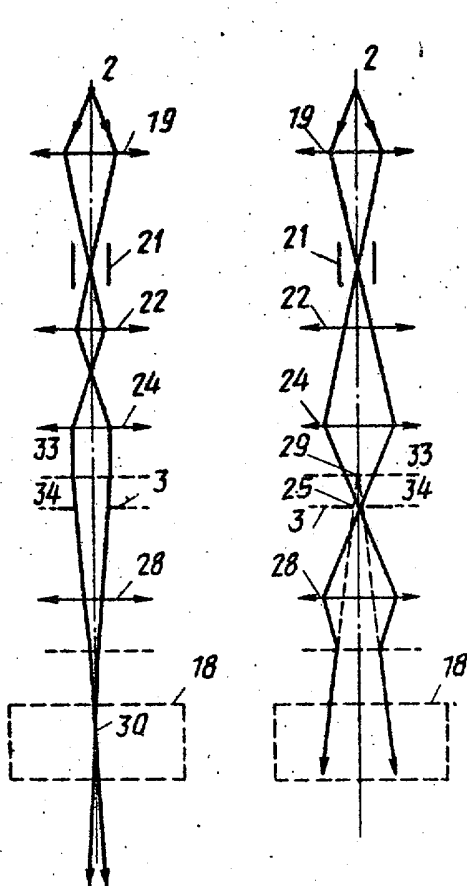


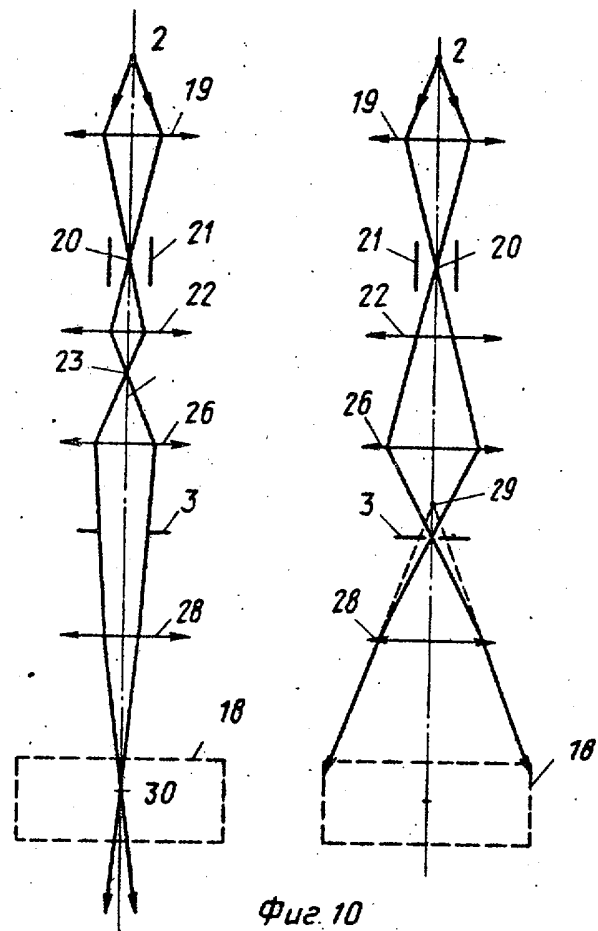
Fig. 1







Фиг. 9



Фиг. 10

Редактор А. Маковская Составитель Н. Катинова Техред Л. Сердюкова Корректор Н. Король
 Заказ 3153 Тираж 400 Подписное
 ВНИИПИ Государственного комитета по изобретениям и открытиям при ГКНТ СССР
 113035, Москва, Ж-35, Раушская наб., д. 4/5
 Производственно-издательский комбинат "Патент", г. Ужгород, ул. Гагарина, 101