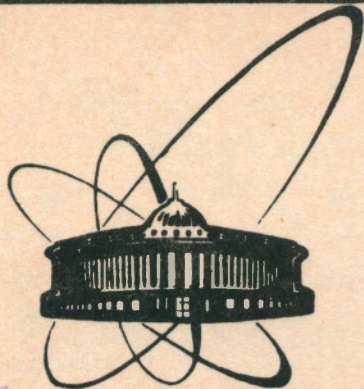


92-429



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

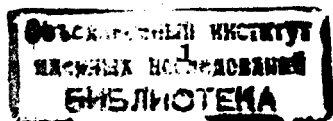
P13-92-429

С. И. Козлов

МАСС-СПЕКТРОМЕТР
ЦИКЛОТРОННОГО ТИПА

1992

Важный ряд задач в исследованиях атомной и ядерной физики - элементный и изотопный анализ вещества, прецизионное измерение масс атомных ядер, решается с помощью масс-спектрометров, анализаторов заряженных частиц. Широко распространены масс-анализаторы, использующие статические магнитные и электрические поля [1], в меньшей степени - анализаторы с высокочастотными электромагнитными полями. К последним можно отнести использование циклотронов в качестве масс-спектрометров заряженных частиц [2], где резонансное условие ускорения (либо замедления) иона с массой A и зарядом Z в магнитном поле B определяется условием: $\omega_{ВЧ} = h\omega_0$, где $\omega_0 = \frac{ZeB}{Amc}$ - угловая частота обращения частиц, $\omega_{ВЧ}$ - частота генератора, h - номер гармоники высокочастотного напряжения. Сдвиг фазы частицы относительно ВЧ-напряжения в процессе ускорения либо замедления за N оборотов пучка обусловлен отличием значения ω_0 от резонансного $\Delta \sin \varphi = 2\pi N h \frac{\Delta f}{f}$, что связано с отклонением распределения среднего магнитного поля от изохронного $\Delta B = B - B_{из}$, неточностью установки частоты ускоряющего напряжения, временной нестабильностью ведущего магнитного поля. Считая возможным поддержание точности этих величин на уровне $10^{-5} + 10^{-6}$, будем иметь сдвиг фазы частицы $\Delta \sin \varphi = 2\pi N h \frac{\Delta(Z/A)}{(Z/A)}$. Полное разрешение циклотрона (смещение частицы по фазе в пределах $\pm 90^\circ$) ионов с одинаковым зарядом Z равно $R = \frac{A}{\Delta A} = \pi h N$. Так, для изохронного циклотрона У-200 [3] разрешающая способность составляет свыше 1300 ($h=2$, $N=200$), что позволяет избирательно ускорять пучки ионов с близкими отношениями A/Z (He_4^{+1} , C_{12}^{+3} , O_{16}^{+4} , Ne_{20}^{+5}). Значение R может быть достаточно высоким при выборе соответствующих значений h и N , что было продемонстрировано в ряде работ. К примеру,



масс-анализатор [4] с высокочастотным напряжением $V=200\text{В}$ ($h=100$) и двумя оборотами пучка ($N=2$) в однородном магнитном поле обладает разрешающей способностью до 25000. В данной схеме число оборотов пучка ограничивается двумя ввиду резкого (быстрее $1/N$) падения интенсивности анализируемого пучка из-за отсутствия вертикальной фокусировки частиц. Введение последней позволит повысить чувствительность прибора. Так, существует предложение по созданию специального изохронного циклотрона для анализа частиц по массам (или A/Z) с разрешением до 30000 [2]. Также рассмотрен [5] циклотронный способ анализа пучков в сочетании с накоплением ионов на конечном радиусе ускорителя при использовании коаксиального резонатора, возбуждаемого на $3/4$ длины волны, причем нуль напряжения приходится на конечную орбиту. Численным моделированием движения ионов в магнитном поле изохронного циклотрона У-400 показано [5], что таким методом можно накопить до 200 оборотов пучка, который затем выводится из циклотрона импульсной системой отклонения частиц. Получение же ускоренных пучков радиоактивных частиц связано с предварительным облучением мишени на реакторе [6] либо ускорителе [7], выделением требуемого изотопа специальной ионно-оптической системой для дальнейшего использования. Данная работа посвящена разработке масс-спектрометра, использующего циклотронный способ анализа частиц. При этом анализируемый пучок с выбранным отношением $\frac{Am}{Ze}$ с энергией W циркулирует по магнитной дорожке с секторно-фокусирующим магнитным полем, радиус которой соответствует магнитной жесткости ионов. Последние извлекаются из дугового ионного источника открытого типа [8] (п.5, рис.1), находящегося под

положительным потенциалом относительно земли $V_u (W=ZeV_u)$, с помощью вытягивающей щели.

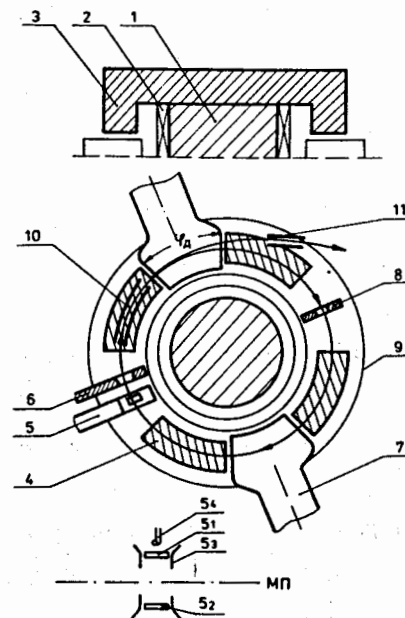


Рис. 1. Масс-спектрометр циклотронного типа:

1. Полюс электромагнита;
 2. Катушка возбуждения;
 3. Кольцевое ярмо;
 4. Секторные накладки;
 5. Дуговой ионный источник открытого типа: 5_1 - катод, 5_2 - антикатод; 5_3 - анодный конус, 5_4 - нить накаливания.
 6. Вытягивающий электрод;
 7. Дуанты;
 8. Ограничивающая щель;
 9. Вакуумная камера;
 10. Дефлектор;
 11. Магнитный канал;
- МП - медианная поверхность.

Дуговой ионный источник работает импульсно (~ 1 мсек), что означает использование импульсной подачи газа и ускоряющего напряжения V_u .

Исследуемое вещество подается в источник в виде газа в область анодного конуса (5_3 , рис.1), а с целью получения ионов из твердотельных веществ, например, анализа радиоактивных продуктов из предварительно облученных мишеней, последние могут быть установлены в разряд различными способами [9], например, в антикатод (5_2).

Возможно применение дугового ионного источника, открытого для прохождения анализируемого пучка, а одна из боковых стенок служит мишенью, на которую падает пучок от ускорителя, а противоположная - сборником продуктов ядерных реакций, которые затем поступают в разряд, ионизуются и вытягиваются на дорожку для анализа и последующего вывода импульсным дефлектором (рис.1) на детектор либо инжектируются в постускоритель. Ионный источник подобного типа использовался на электромагнитном масс-сепараторе [10] на пучке тяжелых ионов, обладая высоким коэффициентом использования веществ. Давление остаточного газа камеры масс-спектрометра должно быть на уровне $10^{-7} + 10^{-8}$ Тор, что потребует мощной системы дифференциальной вакуумной откачки области камеры, занимаемой ионным источником.

В рассматриваемом варианте дорожка масс-спектрометрии образована ярмом электромагнита с катушкой возбуждения, установленной на центральном сердечнике (рис.1).

Для целей численного моделирования движения частиц распределение магнитного поля по азимуту принималось в виде $B(\theta) = B_0(1 + fv \cdot \cos 4\theta)$, т.е. выбрана четырехкратная структура с постоянным полем по радиусу и $B_0 = 3,1$ кГс, $fv = 0,1$.

На рис.2 представлены траектории двух частиц на двадцатом обороте спектрометра, имеющих одинаковые заряды ($Z=10$, $W=1600$ кэВ, $\bar{R}=59$ см), но отличающихся по массе на единицу. Максимальная амплитуда когерентных колебаний неравновесных ионов ($A=102$) составляет около 6 мм, что и соответствует разнице масс. Последние могут быть отделены с помощью щели, устанавливаемой на полуобороте пучка.

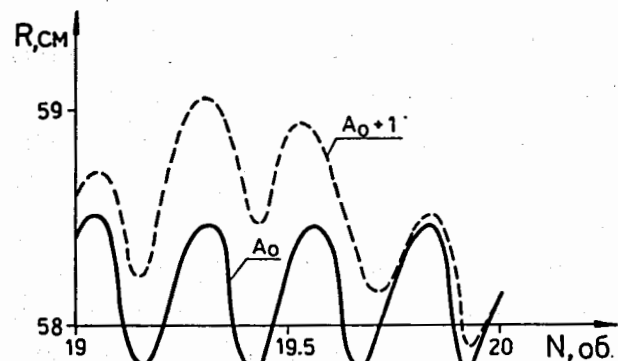


Рис. 2

Разрешение по массе в такой системе около 200.

Для увеличения разрешающей способности в противоположных долинах магнитной структуры спектрометра устанавливаются дуанты (7) с угловой протяженностью φ_δ , при этом гармоника высокочастотного напряжения h выбирается из условия - $h = 2k\pi/\varphi_\delta$, где $k=1, 2, \dots$ - целое, φ_δ (рад), когда резонансные ионы (чья частота обращения $\omega_0 = \omega_{в.ч.}/h$) при прохождении дуанта не изменяют своей энергии ($\Delta W = 2ZeV_g \sin \frac{h\varphi_\delta}{2} = 0$) и остаются на дорожке масс-спектрометра, в то время, как ионы с отличием по массе или заряду будут приобретать либо терять энергию, что приведет к возбуждению радиальных колебаний и, в дальнейшем, к потере их на радиально-ограничивающей диафрагме (8).

Число оборотов частиц, требуемое для потери пучка с отличием по массе на ΔA от изохронного на щели, отстоящей от равновесной орбиты на ΔR , приблизительно можно оценить из выражения - $N_m = \frac{\Delta R}{R} \frac{W}{ZVg} \frac{2}{h} \frac{A}{\Delta A}$. Проведено численное моделирование работы спектрометра циклотронного типа с вышеуказанными параметрами магнитной структуры. Азимутальная

протяженность дуантов выбрана равной 45° ($h=8$, $k=1$), напряженность электрического поля на дуантах - $V_g=5$ кВ.

Расчеты траекторий выполнены для ионов с одинаковыми зарядами ($Z=10$), поскольку частицы с другой зарядностью легко отделяются от основных.

На рис. 3,4,5 представлены зависимости радиусов частиц в месте установки ионного источника ($R_{и.и.}$) и на полуобороте пучка (R_m) от номера оборота (N) для изохронного иона ($A_0=101$) и ионов, имеющих различные отклонения ΔA по массе от A_0 .

Частицы, мало отличающиеся по массе от A_0 , медленно смещаются по фазе высокочастотного напряжения, приобретая либо теряя энергию по сравнению с изохронной, в то время как ионам с $\Delta A=2;3$ соответствуют значительные смещения по фазе, вызывая колебания радиуса частиц в указанных точках. Расчет огибающих пучков ионов с радиальным эмиттансом 25 мм.мрад показывает, что пучки частиц с массами $A_0=101$ и $A=101,1$

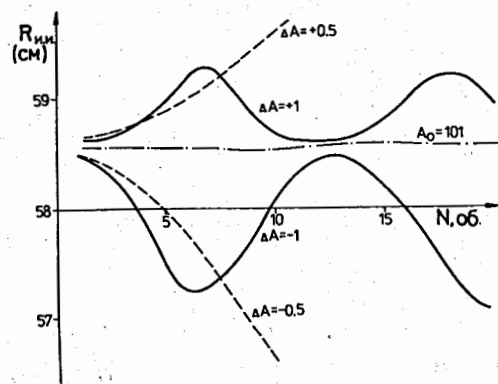


Рис. 3.

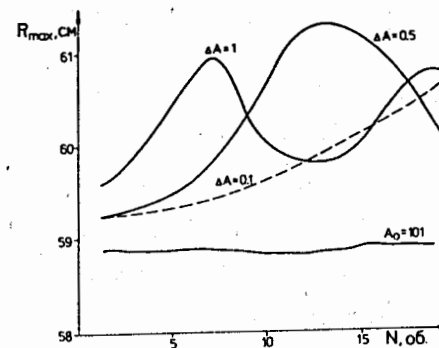


Рис. 4

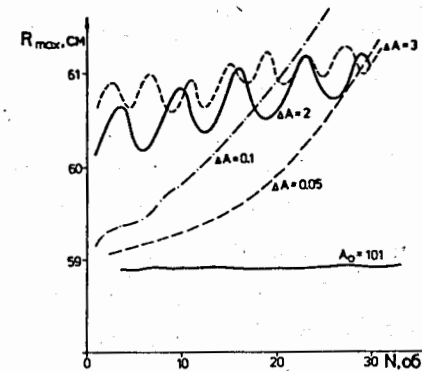


Рис. 5

практически полностью разделены уже к двадцатому обороту, что соответствует оценке значения N_m из вышеприведенного выражения.

В данной схеме в качестве одной из радиально-ограничивающей щели служит вытягивающий электрод ионного источника (п.6, рис.1), а другая - устанавливается на полуобороте от ионного источника. Здесь можно предусмотреть режимы работы спектрометра с низким разрешением при высокой интенсивности пучка и, наоборот, используя разные ширины ограничивающей щели. Перестройка анализатора под другие значения масс частиц осуществляется изменением резонансного условия, определяющего устойчивые орбиты пучка.

Представляется, что разрешающая способность рассматриваемого масс-спектрометра не ограничивается полученной величиной R на уровне 10^4 и может быть повышена за счет увеличения номера гармоники напряжения на дуантах, числа

оборотов пучка при соблюдении требований к стабильности параметров спектрометра (ΔV , ΔB , Δf) и вакуумных условий.

Литература

1. Н.И.Тарантин, Магнитные статические анализаторы заряженных частиц, М., Атомиздат, 1986.
2. D.J.Cleark, Tenth Inst.Conf. on Cycl., 1984, p.534, USA.
3. И.А.Шелаев и др., Препринт ОИЯИ 9-3988, Дубна, 1968.
4. C.D.Jeffris, Phys. Rev., 81, 1040 (1951).
5. С.И.Козлов, Сообщение ОИЯИ 9-87-896, Дубна, 1987.
6. J.L.Belmont et al., The Grenoble Project of radioactive beam facility, ISN 91-100.
7. I.Tanihata et al., Phys. Rev. Lett., 55, 2676 (1985).
8. M.Livingston, M.N.Roze, M.Namiac, Циклотрон, сб.статей, ОГИЗ, М., 1948, с.38.
9. В.Б.Кутнер и др., Сообщение ОИЯИ 9-11281, Дубна, 1978.
10. Н.С.Иванов и др. Препринт ОИЯИ P13-9645, Дубна, 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 октября 1992 года.

Козлов С.И.

P13-92-429

Масс-спектрометр циклотронного типа

Представлены результаты численного моделирования движения тяжелых ионов в многооборотном масс-спектрометре, который включает в себя магнитную дорожку с азимутальной вариацией магнитного поля, два дуанта и дуговой ионный источник открытого типа. Расчеты показывают, что разрешающая способность спектрометра — около 10^4 .

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1992

Перевод автора

Kozlov S.I.

P13-92-429

Cyclotron Type Mass Spectrometer

Results of numerical simulation of motion of the heavy ion beams in a multirevolution mass spectrometer are presented. It includes the magnet system with azimuthal variation of the magnetic field, two dees and open type arcdischarge ion source (PIG). The calculations have demonstrated that mass resolution of the ion beams is above 10^4 .

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1992