

- [5] Аврутин Е.А., Бутусов Д.М., Гоцадзе Г.Г. и др. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 5. С. 900-903.
- [6] Рывкин Б.С. // ФТП. 1981. Т. 15. В. 7. С. 1380-1384.
- [7] Толстихин В.И., Долманов И.Н. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 11. С. 1997-2005.
- [8] Inoue H., Himura K., Ishida K. e.a. // Appl. Opt. 1986. V. 25. N 9. P. 1484-1490.
- [9] Майер А.А. // КЭ. 1987. Т. 14. В. 8. С. 1596-1603.
- [10] Иванов А.Ю., Караванский В.А., Толстихин В.И. Тез. докл. 1 Всес. конф. „Физические основы твердотельной электроники“. Л., 1989. Т. А. С. 127-128.
- [11] Яри в А. В кн.: Введение в интегральную оптику. М.: Мир, 1977. С. 176-193.
- [12] Толстихин В.И., Долманов И.Н. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 2. С. 334-341.
- [13] Seraphin B., Bottka N. // Phys. Rev. 1965. V. 139. N 2. P. A560-A566.
- [14] Зи С. Физика полупроводниковых приборов // М.: Мир, 1984. Т. 1. 455 с.
- [15] Интегральная оптика. М.: Мир, 1978. 344 с.

Поступило в Редакцию
2 февраля 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 8

26 апреля 1990 г.

10; 12

© 1990

ПРИЗМЕННЫЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТР С МНОГОКРАТНЫМ ПРОХОЖДЕНИЕМ ИОНАМИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

С.П. Карецкая, В.М. Кельман, А.Г. Мить,
Е.М. Якушев

Разработкой масс-спектрометров с многократным прохождением ионами магнитного поля в течение длительного времени занимаются различные группы исследователей [1-5]. Причиной этого являются заманчивая перспектива получить более высокую разрешающую способность и светимость, не увеличивая габаритов и веса прибора, путем более эффективного использования магнитного поля. В таких приборах не только положительный фактор (линейная дисперсия по массе), но и отрицательные эффекты (расфокусировка пучка, связанная с разбросом энергий ионов и геометрическими aberrациями, большие потери в интенсивности потока ионов при отсутствии объем-

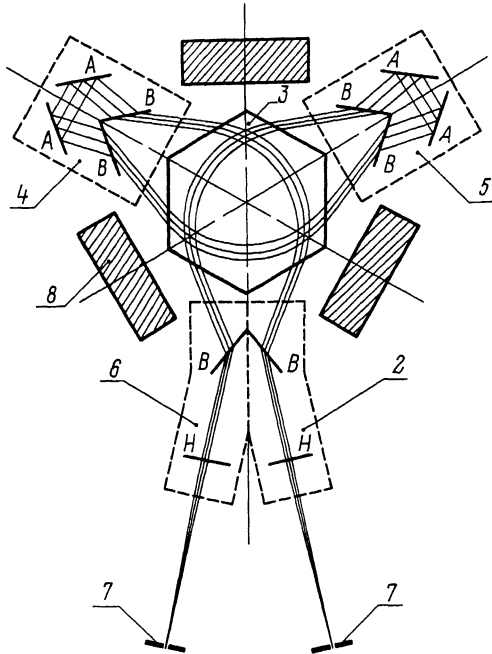


Рис. 1. Схема масс-спектрометра с трехкратным прохождением ионами магнитного поля. 1 – выходная щель источника ионов, 2 – входной электростатический блок, 3 – полюс магнита, 4 и 5 – поворотные электростатические блоки, 6 – выходной электростатический блок, 7 – входная щель приемника ионов, 8 – колонны магнитопровода.

ной фокусировки) растут с числом прохождений. Малостью отрицательных эффектов выгодно отличается от других приборов предложенный в [6] призмный масс-спектрометр с многократным прохождением ионами магнитного поля. Термин „призмный“, по аналогии со световой оптикой, мы употребляем только тогда, когда диспергирующий элемент (в данном случае – магнитное поле) оставляет параллельным входящий в него параллельный пучок заряженных частиц. В призмном масс-спектрометре [6] обеспечены объемная стигматическая фокусировка пучка, фокусировка его по энергии, все геометрические aberrации второго порядка могут быть легко устранены.

Схема масс-спектрометра такого типа (с трехкратным прохождением), макет которого построен и испытывается, показана на рис. 1. Полюса магнита 3 имеют форму правильных шестиугольников. При каждом прохождении магнитного поля пучок ионов пересекает, кроме однородного центрального, два противоположно расположенных краевых поля. В области движения ионов, которая достаточно удалена от вершин шестиугольника, эти краевые поля

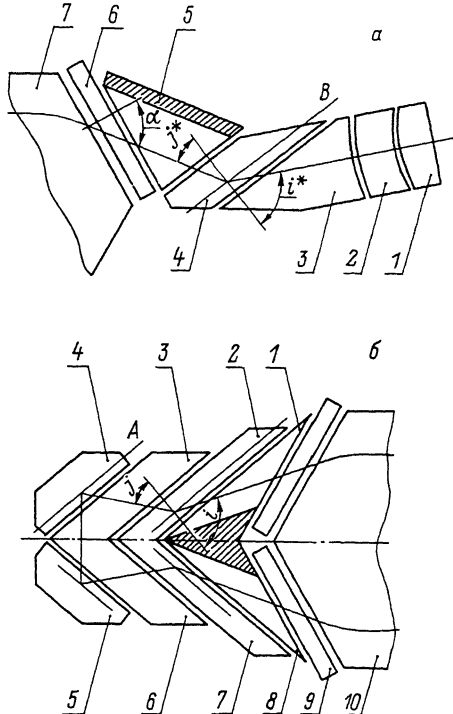


Рис. 2. Электродные системы электростатических блоков.

а) Входной (выходной) блок. 1-3 - электроды иммерсионной трансаксиальной линзы, 3-5 - электроды преломляющей системы, 6 - магнитный экран, 7 - полюса магнита.

б) Поворотный блок. 1-3, 6-8 - электроды преломляющих систем, 3-4, 5-6 - электроды зеркал, 9 - магнитный экран, 10 - полюса магнита.

могут считаться двумерными, причем направление, вдоль которого поле не изменяется, для них одинаково. Таким образом, каждый раз пучок ионов проходит через магнитную призму с параллельными краями [7]. Угол входа и выхода пучка из магнитной призмы $\alpha = 51^\circ$. При этих условиях объемный параллельный пучок, входящий в магнитное поле, сохраняет на выходе из него свою параллельность. Электростатическая часть масс-спектрометра состоит из четырех блоков: входного 2, выходного 6 и двух поворотных 4 и 5. На рисунке они обведены штриховыми линиями. Входной блок преобразует расходящийся пучок, выходящий из какой-либо точки источника 1, в параллельный. Выходной блок, идентичный входному, фокусирует объемный параллельный пучок в точку на плоскости, с которой совмещена щель приемника 7. Идентичные друг другу поворотные блоки возвращают параллельный пучок ионов

в магнитное поле, сохраняя его параллельность. Все электростатические блоки обладают угловой дисперсией по энергии и участвуют в фокусировке ионов по энергии. Входной (выходной) блок состоит из линзы и телескопической преломляющей системы, поворотный – из двух преломляющих систем. На рис. 1 линзы показаны главными плоскостями Н, преломляющие системы – эффективными плоскостями преломления. В зеркала – эффективными плоскостями отражения А.

Подробнее устройство электростатических блоков поясняет рис. 2. На рис. 2, а показана электродная система входного (выходного блока в сечении средней плоскостью, совпадающей с плоскостью симметрии электрического и антисимметрии магнитного полей. Каждый электрод состоит из двух одинаковых, электрически замкнутых пластин, расположенных симметрично относительно средней плоскости. Расстояние между ними одно и то же для всех электродов. Соседние электроды разделены концентрическими кольцевыми, либо прямыми щелями. На рис. 2, б показана электродная система поворотного блока. Каждый из его электродов также состоит из двух одинаковых пластин, равноудаленных от средней плоскости. Пластины соседних электродов разделены прямыми щелями.

Ядро электромагнита содержит три магнитопровода, по которым магнитный поток проходит от нижнего сердечника катушки возбуждения к верхнему (см. рис. 1).

Корпускулярно-оптические свойства магнитных призм и систем, входящих в состав электростатических блоков, хорошо изучены и подробно описаны в [7]. Основываясь на приведенных там результатах и опуская промежуточные выкладки, найдем, что в описываемом масс-спектрометре линейная дисперсия по массе

$$D_m = 3 \operatorname{tg} \alpha \frac{\cos j^*}{\cos^*} f ;$$

условием обеспечения фокусировки по энергии является выполнение равенства

$$3 \operatorname{tg} \alpha \left(\frac{\sin^2 i^*}{\sin^2 j^*} - 1 \right) \operatorname{tg} j^* + 2 \left(1 - \frac{\sin^2 i}{\sin^2 j} \right) \operatorname{tg} j ;$$

условием устранения геометрических aberrаций второго порядка – выполнение равенства

$$3 \operatorname{tg} \alpha = \left(\frac{1}{j^{*2}} - 1 \right) \operatorname{tg} j^* + 2(1 - j^2) \operatorname{tg} j.$$

Здесь f – фокусное расстояние предметного пространства иммерсионной трансаксиальной линзы входного блока; i^* – угол входа осевой траектории пучка в преломляющую систему входного блока, j^* – угол выхода из нее (см. рис. 2), j^* – ее верти-

кальное угловое увеличение (средняя плоскость предполагается расположенной горизонтально); i и j – углы входа и выхода осевой траектории из первой преломляющей системы поворотного блока (см. рис. 2), j' – ее вертикальное угловое увеличение; α – угол входа и выхода пучка из магнитной призмы.

В построенном приборе:

$\alpha = 51^\circ$, $f = 382$ мм, $i = 42.24^\circ$, $j = 68.76^\circ$, $j' = -0.72$, $i^* = 64.66^\circ$, $j^* = 31.25^\circ$, $j'^* = -0.57$. Радиус ионной траектории в однородной части магнитного поля $\rho = 120$ мм. Расстояние d между электродными пластинами для всех электростатических блоков одинаково и равно 6 мм. Дисперсия по массе $D_m = 2820$ мм. Обратим внимание на то, что при сравнительно малом ρ и небольших размерах магнита достигается очень высокое значение дисперсии по массе.

В настоящее время прибор испытан при одном и двух прохождении ионами магнитного поля. В первом случае выходной электростатический блок 6 устанавливался вместо поворотного блока 4, во втором – вместо поворотного блока 5. При ширине выходной щели источника $S_k = 0.1$ мм и входной щели приемника $S_n = 0.1$ мм для одного прохождения получена разрешающая способность на 10% от высоты пика $R = 4700$ ($D_m = 940$ мм), для двух прохождений $R = 9400$ ($D_m = 1880$ мм). Ток на коллекторе при переходе от одного к двум прохождениям практически не уменьшился.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] F o r t i n M., B a r i l M. // Rev. Sci. Instr. 1972. V. 43. N 8. P. 1140-1150.
- [2] C e l l e s M., B a r i l M., B o l d u c L. // Nucl. Instr. and Meth. 1975. V. 125. P. 535-544.
- [3] B a r i l M., B e r g e r C. // Adv. in mass spectrom. 1980. V. 8B. P. 1746-1753.
- [4] Т а р а н т и н Н.И. // Авт. свид. СССР № 1076983. Б.И. 1984. № 8.
- [5] B e r g e r C., B a r i l M. // Opt. 1985. V. 71. N 4. P. 179-183.
- [6] З е р н о в А.А. и др. // Авт. свид. СССР № 1101076, Б.И. 1984. № 24.
- [7] К е л ь м а н В.М., К а р е ц к а я С.П., Ф е д у л и н а Л.В., Я к у ш е в Е.М. Электронно-оптические элементы призмных спектрометров заряженных частиц. Алма-Ата: Наука. 1979. 232 с.

Институт ядерной физики
КазССР, Алма-Ата

Поступило в Редакцию
9 февраля 1990 г.