

Реализация неоднородного магнитного поля призменного масс-анализатора

А.С. Кузема^{1,*}, П.А. Кузема²

¹ Сумський національний аграрний університет, ул. Кірова, 160, 40021, Суми, Україна

² Інститут хімії поверхності ім. А.А. Чуйко НАН України,
ул. Генерала Наумова, 17, 03164, Київ, Україна

(Получено 26.04.2012; опубликовано online 04.06.2012)

Определена конфигурация полюсных наконечников магнита, формирующих в его зазоре неоднородное магнитное поле с аксиальной симметрией, и описана технология их изготовления. Показано, что при заданном значении угла раствора полюсных наконечников требуемую неоднородность магнитного поля можно обеспечить соответствующим выбором ширины межполюсного зазора магнита масс-анализатора.

Ключевые слова: магнитная индукция, магнитное поле, масс-анализатор, масс-спектрометрия, фокусировка ионов.

PACS number: 07.75. + h

Применение масс-анализаторов с неоднородным магнитным полем расширяет возможности оптимизации технических характеристик приборов и установок, в которых они используются, поскольку такие масс-анализаторы имеют больше независимых параметров, чем аналогичные системы с однородным полем.

В масс-спектрометрии, как правило, используют неоднородное магнитное поле с аксиальной симметрией, то есть поле, которое имеет только две составляющие вектора магнитной индукции \vec{B} : радиальную B_r и аксиальную B_z (рис. 1).

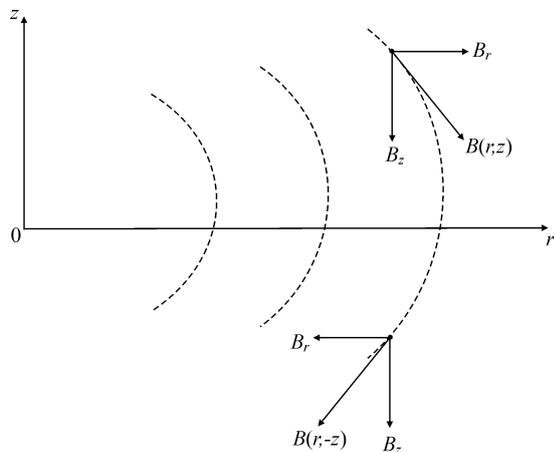


Рис. 1 – Конфигурация аксиально-симметричного магнитного поля (φ – произвольное)

Дисперсия ионов по массам в неоднородном магнитном поле выше, чем в однородном с таким же радиусом центральной траектории ионов. Кроме того, неоднородное магнитное поле с аксиальной симметрией фокусирует ионный пучок в аксиальной плоскости, что способствует улучшению транспортировки ионов от источника к приёмнику и повышает «светосилу» масс-анализатора. Аксиальная фокусировка осуществляется радиальной составляющей B_r вектора магнитной индукции, которая при $z < 0$ меняет знак.

Поэтому при ортогональном входе ионного пучка в магнитное поле сила $F_z = evB_r$ (здесь e и v есть заряд и скорость иона) всегда направлена к средней плоскости ($z = 0$), что и обеспечивает фокусировку ионного пучка в плоскости rz полем масс-анализатора.

Указанные особенности неоднородного магнитного поля с аксиальной симметрией позволяют повысить разрешающую способность и чувствительность масс-спектрометра без увеличения габаритов анализирующей системы [1-3].

В спектроскопии заряженных частиц и в некоторых статических масс-спектрометрах используют неоднородное аксиально-симметричное магнитное поле типа r^{-n} , то есть поле, индукция которого в средней плоскости изменяется по закону

$$B_z(r, 0) = B_0(r/r_m)^n, \quad (1)$$

где $B_0 = B_z(r_m, 0)$ – индукция магнитного поля при $r = r_m$; n – коэффициент неоднородности магнитного поля.

Прежде чем перейти к вопросу практической реализации такого поля, выясним физический смысл коэффициента неоднородности n . С этой целью разложим функцию (1) в ряд по степеням $\rho = (r - r_m)/r_m = \Delta r/r_m$. В первом приближении

$$B_z(r, 0) = B_0(1 + \rho)^n = B_0(1 - n\rho), \quad (2)$$

откуда получаем $(B_z(r, 0) - B_0)/B_0 = -n(r - r_m)/r_m$ или $\Delta B/B_0 = -n\Delta r/r_m$, следовательно,

$$n = -\Delta B r_m / (\Delta r B_0). \quad (3)$$

Таким образом, коэффициент неоднородности n есть отношение относительного изменения магнитной индукции к относительному изменению координаты r (в окрестности центральной траектории ионов). Знак «минус» означает, что магнитная индукция с увеличением радиуса убывает.

Практически поле (1) может быть получено между полюсными наконечниками конической формы (рис. 2). Действительно, поскольку магнитное поле

* nikonorov@ukr.net

стационарное, то $\text{rot } \vec{B} = 0$ и циркуляция вектора \vec{B} по любому замкнутому контуру, например СДКМ, равна нулю:

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = 0. \quad (4)$$

Из (4) с учётом (1) получаем равенство

$$B_0 l_0 = B_z(r, 0) l. \quad (5)$$

Кроме того, из рис. 2 видно, что

$$l_0 = 2(r_m + a) \text{tg}(\theta/2); \quad l = 2(r + a) \text{tg}(\theta/2), \quad (6)$$

где a – расстояние от оси симметрии масс-анализатора до точки пересечения образующих полюсных наконечников магнита; l_0 и l – ширина межполюсного зазора на радиусе центральной траектории r_m и радиусе r соответственно; θ – угол между образующими полюсных наконечников.

Следовательно, $B_z(r, 0)/B_0 = l_0/l = (r_m + a)/(r + a)$, откуда

$$B_z(r, 0) = B_0(r_m + a)/(r + a). \quad (7)$$

Подстановка в (7) значения $B_z(r, 0)$ из (2) даёт $1 - n\rho = (r_m + a)/(r + a)$ или $n(r - r_m)/r_m = (r - r_m)/(r + a)$, откуда

$$n = r_m l / (r + a) \approx r_m l / (r_m + a) = 2r_m \text{tg}(\theta/2) / l_0. \quad (8)$$

Полученное соотношение показывает, что неоднородность магнитного поля зависит от угла раствора полюсных наконечников и величины межполюсного зазора. При выбранном значении угла раствора θ величину коэффициента неоднородности n можно плавно регулировать путем изменения ширины зазора между полюсными наконечниками. Если образующие полюсных наконечников пересекаются на оси симметрии масс-анализатора, то есть если $a = 0$, то $n = 1$, а если $a > 0$, то $n < 1$. И, наконец, если образующие наконечников магнита пересекаются до оси симметрии масс-анализатора, то получим поле с коэффициентом неоднородности $n > 1$.

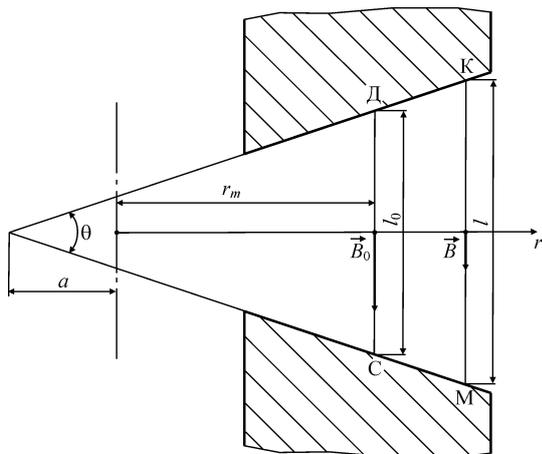


Рис. 2 – Формирование неоднородного магнитного поля коническими полюсными наконечниками

Нас будет интересовать случай, когда $n = 1$ и величина магнитной индукции в средней плоскости межполюсного зазора определяется соотношением

$$B_z(r, 0) = B_0 r_m / r, \quad (9)$$

то есть поле в окрестности центральной траектории ионов убывает с увеличением радиуса пропорционально r^{-1} .

Характерной особенностью этого типа поля является отсутствие радиальной фокусировки ионов по направлению. Иными словами, если входная и выходная границы магнитного поля прямые, то параллельный пучок ионов одинаковой массы при ортогональном входе и выходе из масс-анализатора остаётся параллельным после прохождения поля независимо от величины угла отклонения ионов, то есть поле выполняет роль призмы [4]. В отличие от анализирующих систем с секторными магнитными полями, которые разделяют ионы по массам и фокусируют их по направлению, в призматическом масс-анализаторе функции сепарации и фокусировки ионов разделены и выполняются различными элементами – магнитными призмами и электрическими линзами. Это обеспечивает масс-анализатору ряд преимуществ. Во-первых, величина дисперсии оказывается независимой от размеров отклоняющих и фокусирующих элементов и может быть достаточно большой при сравнительно небольших габаритах последних. Во-вторых, применение электрической фокусировки ионов по направлению вместо магнитной позволяет создать ионно-оптические системы с пространственной фокусировкой пучка и очень малыми абберациями. В-третьих, отпадает необходимость механической юстировки масс-анализатора и снижаются требования к строгости допусков и точности расположения узлов и элементов ионно-оптической системы, что способствует совершенствованию масс-спектрометра без усложнения производственной технологии [5, 6].

В призматических масс-спектрометрах с неоднородным полем применяются, как правило, секторные поля, поскольку источник и приемник ионов необходимо располагать за пределами отклоняющего магнита. При этом практическая реализация неоднородного магнитного поля масс-анализатора достигается путем использования обычных технологических приёмов механической обработки полюсных наконечников отклоняющего магнита. В качестве примера рассмотрим особенности изготовления профиля полюсных наконечников, формирующих в зазоре магнита призматическое неоднородное магнитное поле r^{-1} . Масс-анализатор с полем такого типа был применён для разделения ионов по массам в масс-спектрометре МХ-2301 [7]. Особенностью масс-анализатора является то, что он конструктивно совмещён с вымораживающей ловушкой таким образом, что полюсные наконечники образуют верхнюю и нижнюю стенки камеры, в которой происходит сепарация ионного пучка. Это обеспечивает низкий уровень фона рассеянных ионов и повышает чувствительность прибора к малым примесям.

Изготовление масс-анализатора выполнялось в следующей последовательности. К внешнему корпусу вымораживающей ловушки 1 (рис. 3) приваривался аргоно-дуговой сваркой магнитопровод 2, представляющий собой сплошной 270-градусный сектор. После термической и механической обработки в магнитопроводе 2 протачивается конусная канавка. Не-

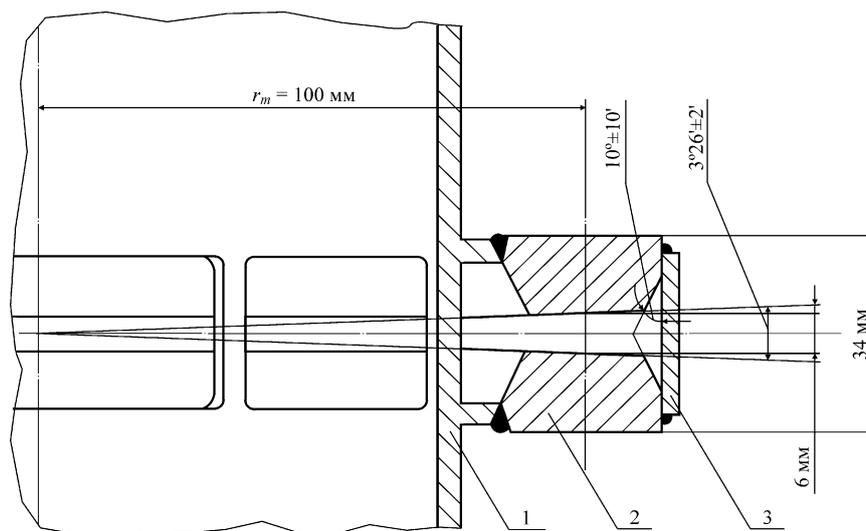


Рис. 3 – Геометрия межполюсного зазора призмного масс-анализатора

обходимая геометрия полюсных наконечников обеспечивалась путём доводки конусной канавки калиброванным резцом специальной формы. Затем к полюсным наконечникам приваривалось внешнее кольцо 3. Корпус вымораживающей ловушки 1 и внеш-

нее кольцо 3 изготавливались из нержавеющей стали, а магнитопровод – из сплава армко. Указанная технология обеспечивает необходимую точность изготовления всего узла в целом.

Realization of inhomogeneous magnetic field for prism-type mass analyzer

O.S. Kuzema¹, P.O. Kuzema²

¹ Sumy National Agrarian University, 160, Kirov Str., 40021 Sumy, Ukraine

² Chuiko Institute of Surface Chemistry of NAS of Ukraine, 17, General Naumov Str., 03164 Kyiv, Ukraine

The configuration of magnet polar tips, which form in its gap the inhomogeneous magnetic field with the axial symmetry, has been determined and the technology of their production has been described. It is shown that for the given value of the polar tip apex angle, the necessary heterogeneity of magnetic field can be provided by the corresponding choice of the inter-pole gap width of the mass analyzer magnet.

Keywords: Magnetic induction, Magnetic field, Mass analyzer, Mass spectrometry, Ion focusing.

Реалізація неоднорідного магнітного поля призмного мас-аналізатора

О.С. Кузема¹, П.О. Кузема²

¹ Сумський національний аграрний університет, вул. Кірова, 160, 40021, Суми, Україна

² Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка НАН України, вул. Генерала Наумова, 17, 03164, Київ, Україна

Визначено конфігурацію полюсних наконечників магніту, що формують в його зазорі неоднорідне магнітне поле з аксіальною симетрією, та описано технологію їх виготовлення. Показано, що при заданому значенні кута розхилу полюсних наконечників необхідну неоднорідність магнітного поля можна забезпечити відповідним вибором ширини міжполюсного зазору магніту мас-аналізатора.

Ключові слова: магнітна індукція, магнітне поле, мас-аналізатор, мас-спектрометрія, фокусування іонів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дж.Д. Уолдрон, *Успехи масс-спектрометрии* (Москва: Изд-во иностр. лит.: 1963).
2. К. Зигбан, *Альфа-, бета- и гамма спектроскопия* (Москва: Атомиздат: 1969).
3. И.Г. Козлов, *Методы энергетического анализа электронных потоков* (Москва: Атомиздат: 1971).
4. Н.А. Шеховцов, *Магнитные масс-спектрометры* (Москва: Атомиздат: 1971).
5. А.С. Кузема, О.С. Савин, И.Я. Чертков, *Анализирующие системы магнитных масс-спектрометров* (Киев: Наук. думка: 1987).
6. А.С. Кузема, С.А. Кузема, *Масс-спектрометрия* **3**, 181 (2006).
7. А.С. Кузема, А.Д. Погребняк, П.А. Кузема, *Ж. Нано-электрон. Физ.* **2** №1, 69 (2010) (O.S. Kuzema, A.D. Pogrebnyak, P.O. Kuzema, *J. Nano-Electron. Phys.* **2** No1, 38 (2010)).