

## ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНОГО ПРИЗМОВОГО МАС-АНАЛІЗАТОРА ІЗ ДОДАТКОВОЮ СИСТЕМОЮ ФОКУСУВАННЯ ІОННОГО ПУЧКА

О. С. Кузема, д.ф.-м.н., професор, Сумський національний аграрний університет

П. О. Кузема, к.х.н., Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка НАН України

*Визначено іонно-оптичні властивості і характеристики призмового мас-аналізатора із секторним неоднорідним магнітним полем  $r^{-1}$  за наявності двох електростатичних систем фокусування іонного пучка, одна з яких розміщена перед призмою, а інша – після неї. Показано можливість формування і фокусування паралельного пучка іонів у мас-аналізаторі, що в свою чергу дозволяє зменшити сферичні аберації додаткової фокусувальної системи.*

**Ключові слова:** іонний пучок, мас-аналізатор, фокусувальною системою, іонно-оптична система, матриця, електростатична лінза.

### Постановка проблеми

Іонно-оптичні властивості призмових мас-аналізаторів з магнітним полем  $r^{-1}$  добре вивчені, і визначені їх переваги у випадку як магнітного фокусування іонів за напрямком [1-3], так і електричного [4-6]. При цьому встановлено, що в призмових мас-аналізаторах з одинарним фокусуванням доцільно використовувати електричне фокусування іонів за напрямком їх руху, оскільки воно, в порівнянні з магнітним, дозволяє збільшити дисперсію мас-аналізатора, зменшити вплив крайових полів призми і заряду іонного пучка на характеристики мас-аналізатора, а також спростити вимоги до точності виготовлення магнітних полюсів призми і взаємного розташування вузлів іонно-оптичної системи. Практична реалізація мас-аналізатора із електричним фокусуванням іонів за напрямком здійснюється шляхом використання фокусувальної системи, розташованої між джерелом іонів і магнітною призмою. В той же час, функціональні можливості мас-аналізатора можуть бути розширені, якщо його іонно-оптичну систему обладнати додатковою фокусувальною системою, розміщеною між магнітною призмою і приймачем іонів. Такий пристрій досліджується в даній роботі.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Вивченню можливостей практичного застосування призмових мас-аналізаторів із секторним неоднорідним магнітним полем  $r^{-1}$  в останні роки приділено помітну увагу фізиків і конструкторів іонно-оптичних приладів і мікронзондової апаратури. В опублікованих роботах показано, що в такому магнітному полі фокусування іонів за напрямком можна здійснити кількома способами, а саме: за допомогою криволінійних границь магнітного поля призми [7, 8], або шляхом використання додаткового однорідного магнітного поля [9], або застосуванням електростатичної лінзи чи системи лінз у випадку, коли границі магнітної призми прямі [10]. Слід зауважити, що електричне фокусування іонів за напрямком розширює діапазон вибору фізичних і геометричних параметрів мас-аналізатора, що відкриває додаткові можливості оптимізації його основних характеристик. В системі з подвійним

фокусуванням завдяки використанню магнітного поля  $r^{-1}$  досягнуто рекордне значення роздільної здатності на теперішній час [9]. В роботі [11] вивчено вплив аберацій електростатичних фокусувальних систем на характеристики призмового мас-спектрометра і показано, що застосування багатолінзових фокусувальних систем із скорегованою сферичною аберацією суттєво підвищує роздільну здатність і чутливість мас-спектрометра. Таким чином, результати досліджень призмових магнітних мас-аналізаторів із електричним фокусуванням іонного пучка свідчать про те, що їх застосування в приладах і обладнанні для аналізу речовин і матеріалів є доцільним заходом.

Разом з тим, з огляду останніх досліджень і публікацій по розробці та застосуванню призмових мас-аналізаторів видно, що багатолінзові системи фокусування іонів, побудовані на базі квадрупольно-октупольних лінз [12], значно складніші у виготовленні і керуванні, ніж системи з одиночними осесиметричними електростатичними лінзами. Тому виникає потреба у застосуванні в мас-аналізаторах простих однолінзових фокусувальних систем, а сферичні аберації зменшувати шляхом формування паралельного іонного пучка, який після розділення в магнітній призмі за масами, фокусується додатковою електростатичною лінзою. Мета даної роботи полягає у визначенні іонно-оптичних властивостей і характеристик призмового мас-аналізатора з додатковою фокусувальною системою.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Удосконалений призмовий мас-аналізатор, іонно-оптична схема якого показана на рис. 1, працює наступним чином: із джерела іонів 1 іонний пучок 2, що має певний кут розходження, надходить в першу фокусувальну систему 3, яка з іонного пучка, що розходиться, формує паралельний іонний пучок. Далі цей пучок потрапляє у магнітне поле призми 4 і розділяється в ньому за масами на окремі компоненти, що відрізняються відношенням маси іона до величини його заряду. Після магнітної призми паралельний пучок іонів вибраної маси фокусується додатковою електростатичною системою 5 на колектор приймача іонів 6 і реєструється. Вибір іонів тієї чи іншої ма-

си, що надходять у додаткову фокусуєчу систему 5 після магнітної призми 4, здійснюється шляхом

зміни величини магнітного поля спеціальним пристроєм, який на рис. 1 не показано.

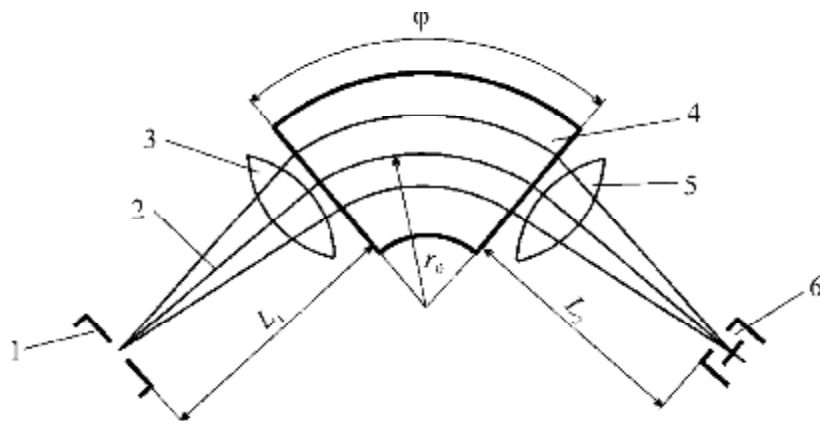


Рис. 1. Іонно-оптична схема мас аналізатора:  
1 – джерело іонів; 2 – іонний пучок; 3 – перша фокусуєча система; 4 – магнітна призма;  
5 – додаткова фокусуєча система; 6 – приймач іонів

Перш ніж перейти до визначення іонно-оптичних властивостей і характеристик мас-аналізатора зазначимо, що траєкторії руху іонів в іонно-оптичній системі, що розглядається, описуються лінійними диференціальними рівняннями, тому її можна розглядати як пристрій, що здійснює лінійне перетворення початкових параметрів траєкторії в кінцеві і застосувати для опису такого перетворення матричний апарат. Для цього траєкторію іонів необхідно розділити на окремі ділянки, кожній з яких відповідає матриця перетворення, а потім шляхом послідовного перемноження матриць для ділянок траєкторії іонів отримаємо повну матрицю перетворення для всієї іонно-оптичної системи мас-аналізатора і визначимо його властивості і характеристики. Враховуючи, що магнітне поле призми дисперсійними властивостями не володіє, ми визначимо іонно-оптичні властивості мас-аналізатора тільки в радіальній площині і в лінійному наближенні.

При знаходженні повної матриці перетворення параметрів траєкторії іона скористаємось наступними припущеннями: будемо вважати, що в якості фокусуєчих систем застосовані тонкі електромагнітні лінзи, оскільки протяжність їх електричних полів набагато менша фокусних відстаней, і обидві лінзи безпосередньо прилягають до границь магнітної призми. Магнітні поля розсіювання на вхідній і вихідній границях призми вирахуємо шляхом заміни реального магнітного поля ідеальним, еквівалентним куту відхилення іонів у призмі. Будемо також вважати, що границі призми прямі, а центральна траєкторія іонів перпендикулярна до них.

Тривимірне матричне перетворення, що описує зв'язок між початковими та кінцевими параметрами траєкторії іона в радіальній площині, можна подати у вигляді:

$$\begin{pmatrix} y_5 \\ y_5' \\ m_5 \end{pmatrix} = M_5 \cdot M_4 \cdot M_3 \cdot M_2 \cdot M_1 \begin{pmatrix} y_0 \\ y_0' \\ m_0 \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} y_0 \\ y_0' \\ m_0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

де  $y_0, y_0', m_0$  – початкові параметри траєкторії іона на виході з джерела іонів: початкове зміщення в одиницях радіуса центральної траєкторії  $r_0$ , напрямок і відносна зміна імпульсу іона відповідно;  $M_i$  – матриця перетворення для відповідної ділянки траєкторії іона;  $y_5, y_5', m_5$  – кінцеві параметри траєкторії іона в площині приймальної щілини приймача іонів.

Іонно-оптична система мас-аналізатора має дві ділянки вільного прольоту іона, матриці для яких мають вигляд

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1 & l_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad M_5 = \begin{bmatrix} 1 & l_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \text{де } l_1 = \frac{L_1}{r_0},$$

$$l_2 = \frac{L_2}{r_0} \quad (\text{див. рис. 1}).$$

Матриці для першої та додаткової лінз такі:

$$M_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad M_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

де  $f_1 = F_1/r_0, f_2 = F_2/r_0$  – фокусні відстані лінз в одиницях радіуса центральної траєкторії іонів.

Матрицю для призми з магнітним полем  $r^1$  одержано в [10], вона має вигляд

$$M_3 = \begin{bmatrix} 1 & j & \frac{j^2}{2} \\ 0 & 1 & j \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Повну матрицю  $M$  перетворення початкових параметрів траєкторії іона в кінцеві визначаємо

послідовним перемноженням матриць для окремих ділянок траєкторії іона

$$M = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\text{де } a_{11} = \left(1 - \frac{l_2}{f_2}\right) - \frac{1}{f_1} \left[ \left(1 - \frac{l_2}{f_2}\right) j + l_2 \right];$$

$$a_{12} = \left(1 - \frac{l_2}{f_2}\right) l_1 - \frac{l_1}{f_1} \left[ \left(1 - \frac{l_2}{f_2}\right) j + l_2 \right] + \left(1 - \frac{l_2}{f_2}\right) j + l_2;$$

$$a_{13} = \left(1 - \frac{l_2}{f_2}\right) \frac{j^2}{2} + l_2 j;$$

$$a_{21} = -\frac{1}{f_1} \left(1 - \frac{j}{f_2}\right) - \frac{1}{f_2};$$

$$a_{22} = -\frac{l_1}{f_2} \left(1 - \frac{j}{f_2}\right) - \frac{l_1}{f_2} + \left(1 - \frac{j}{f_2}\right);$$

$$a_{23} = j - \frac{j^2}{2f_2};$$

$$a_{31} = a_{32} = 0; \quad a_{33} = 1.$$

Знаючи матричні елементи  $a_{ij}$ , запишемо вираз для величини відхилення іона з довільними початковими умовами від центральної траєкторії в площині приймальної щілини і визначимо основні параметри іонно-оптичної системи мас-аналізатора. У відповідності з (1) і (2), величина відхилення іона з кінцевими параметрами траєкторії запишеться у вигляді

$$y_5 = a_{11}y_0 + a_{12}y'_0 + a_{13}m_0. \quad (3)$$

В одержаному співвідношенні матричні елементи  $a_{11}$ ,  $a_{12}$ ,  $a_{13}$  визначають відповідно геометричне збільшення, якість фокусування іонів і ефективність розділення іонів за імпульсами. Визначимо спочатку величину геометричного збільшення іонно-оптичної системи

$$\frac{y_5}{y_0} = a_{11} = \left(1 - \frac{l_2}{f_2}\right) - \frac{1}{f_1} \left[ \left(1 - \frac{l_2}{f_2}\right) j + l_2 \right]. \quad (4)$$

Враховуючи, що  $y_5 = Y_5/r_0$ ,  $y_0 = Y_0/r_0$ ,  $l_2 = L_2/r_0$ ,  $f_1 = F_1/r_0$ ,  $f_2 = F_2/r_0$ , будемо мати

$$\frac{Y_5}{Y_0} = \left(1 - \frac{L_2}{F_2}\right) - \frac{r_0}{F_1} \left[ \left(1 - \frac{L_2}{F_2}\right) j + \frac{L_2}{r_0} \right]. \quad (5)$$

На вхід у додаткову лінзу надходить паралельний іонний пучок, тому для того, щоб його сфокусувати на вхідну щілину приймача іонів, необхідно фокусну відстань  $F_2$  додаткової лінзи вибрати рівною відстані  $L_2$  приймача іонів до призми. Тоді із (5) одержуємо:

$$\frac{Y_5}{Y_0} = -\frac{L_2}{F_1}. \quad (6)$$

Умову фокусування іонів за напрямком визначимо, якщо співвідношення (3) не буде залежати від початкового кута розходження іонного пучка  $y'_0$ . Це можливо тоді, коли  $a_{12} = 0$ .

Отже ця умова буде такою

$$\left(1 - \frac{l_2}{f_2}\right) l_1 - \frac{l_1}{f_1} \left[ \left(1 - \frac{l_2}{f_2}\right) j + l_2 \right] + \left(1 - \frac{l_2}{f_2}\right) j + l_2 = 0. \quad (7)$$

Або:

$$\left(1 - \frac{L_2}{F_2}\right) \frac{L_1}{r_0} - \frac{L_1}{F_1} \left[ \left(1 - \frac{L_2}{F_2}\right) j + \frac{L_2}{r_0} \right] + \left(1 - \frac{L_2}{F_2}\right) j + \frac{L_2}{r_0} = 0. \quad (8)$$

Для того, щоб сформувати паралельний пучок іонів першою лінзою необхідно виконати умову  $F_1 = L_1$ , а для того, щоб сфокусувати цей пучок після призми додатковою лінзою необхідно, як зазначено вище, щоб  $F_2 = L_2$ . В цьому випадку матричний елемент  $a_{12} = 0$ , тобто в іонно-оптичній системі призмового мас-аналізатора здійснюється фокусування іонів за напрямком, і геометричне збільшення при симетричній конструкції пристрою ( $L_1 = L_2$ ) дорівнює одиниці.

Дисперсійні властивості мас-аналізатора визначає матричний елемент  $a_{13}$ . Дисперсія  $D = r_0 a_{13} / 2$ , тобто

$$D = \left(1 - \frac{L_2}{F_2}\right) \frac{r_0 j^2}{4} + \frac{L_2 j}{2}. \quad (9)$$

За умови фокусування іонів за напрямком додатковою лінзою перший доданок у співвідношенні (9) буде дорівнювати нулю, і дисперсія  $D = L_2 \varphi / 2$ . Якщо додаткова лінза відсутня, тобто  $F_2 = \infty$ , і фокусування іонів за напрямком здійснюється першою лінзою, то дисперсія  $D = r_0 \varphi^2 / 4 + L_2 \varphi / 2$ .

#### ВИСНОВКИ

Виходячи з аналізу проведених досліджень і одержаних результатів, можна стверджувати, що іонно-оптичні властивості і характеристики призмового мас-аналізатора із секторним магнітним полем  $r^1$  свідчать про доцільність застосування такого пристрою в мас-спектрометрах і мікрозондових приладах. Переваги, які надає мас-аналізатору електричне фокусування іонів за напрямком їх руху, відкривають можливість використання джерел іонів із значним вихідним струмом і кутом розходження пучка, що сприяє підвищенню чутливості і точності аналітичних приладів і устаткування, в якому використовують іонні пучки. Незважаючи на збільшення дисперсії у випадку відсутності додаткової фокусуючої системи, призмовий мас-сепаратор з паралельним іонним пучком може бути корисним при розробці і застосуванні простих іонно-оптичних приладів технологічного призначення.

#### Список використаної літератури:

1. Зигбан К. Альфа-, бета- і гамма спектроскопія / Зигбан К. — М.: Атомиздат, 1969. — 567 с.

2. Малов А. Ф., Суздалев В. А., Федосеев Е. П. Нелинейное исследование пространственной фокусировки в магнитных фокусирующих призмах с полями  $r^{-1}$  // Журнал технической физики. — 1965. — Т. 35, № 5. — С. 914—926.
3. Шеховцов Н. А. Магнитные масс-спектрометры / Шеховцов Н. А. — М.: Атомиздат, 1971. — 232 с.
4. Кузема А. С., Зинченко Н. С., Савин О. Р. Радиальная фокусировка ионного пучка в магнитном анализаторе с неоднородным полем и электростатической линзой // Журнал технической физики. — 1977. — Т. 47, № 11. — С. 2368—2371.
5. Кузема А. С., Погребняк А. Д., Кузема П. А. Влияние режимов работы источника ионов на характеристики призмного масс-спектрометра с неоднородным магнитным полем // Журнал нано- и электронной физики. — 2010. — Т. 2, № 1. — С. 69—73.
6. А. с. 270330 СССР, МПК G 01n. Масс-спектрометр / Н. А. Шеховцов, П. П. Барзилович, А. С. Кузема, О. Р. Савин, И. Я. Чертков, В. Ф. Шкурдода (СССР). — № 1116308/26—25; заявл. 29.11.66; опубл. 08.05.70, Бюл. № 16.
7. Федосеев Е. П. Магнитные фокусирующие призмы с полями  $r^{-1}$  для фокусировки широкоугольных пучков заряженных частиц // Журнал технической физики. — 1968. — Т. 38, № 8. — С. 1320—1329.
8. Сдвоенный масс-спектрометр с неоднородным магнитным полем / Н. А. Шеховцов, В. Ф. Шкурдода, А. С. Кузема, А. С. Колосков // Атомная энергия. — 1964. — № 22. — С. 506—509.
9. Matsuda H., Fucumoto S., Nojiri M. A new mass spectrograph with very large dispersion // Zeitschrift für Naturforschung A. — 1966. — V. 21, No 1. — P. 25—33.
10. Кузема А. С. Анализирующие системы магнитных масс-спектрометров / Кузема А. С., Савин О. Р., Чертков И. Я. — К.: Наукова думка, 1987. — 288 с.
11. Кузема А. С., Соловьева А. Е. Исследование влияния параметров ионного пучка на характеристики призмного масс-спектрометра с неоднородным магнитным полем // Вісник СНАУ. — 2008. — Т. 1, № 17. — С. 156—160.
12. Шпак Е. В., Явор С. Я., Савин О. Р., Кузема А. С. Триплет из электростатических квадрупольно-октупольных линз нового типа со скорректированной сферической аберрацией // Журнал технической физики. — 1969. — Т. 39, № 9. — С. 1720—1723.

**Кузема А.С., Кузема П.А. ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПРИЗМЕННОГО МАСС-АНАЛИЗАТОРА С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ФОКУСИРОВКИ ИОННОГО ПУЧКА**

*Определены ионно-оптические свойства и характеристики призмного масс-анализатора с секторным неоднородным магнитным полем  $r^{-1}$  при наличии двух электростатических систем фокусировки ионного пучка, одна из которых расположена перед призмой, а другая – после неё. Показана возможность формирования и фокусировки параллельного ионного пучка в масс-анализаторе, что, в свою очередь, позволяет уменьшить сферические аберрации дополнительной фокусирующей системы.*

**Ключевые слова:** ионный пучок, масс-анализатор, ионно-оптическая система, матрица, электростатическая линза.

**Kuzema O.S., Kuzema P.A. STUDY OF MAGNETIC PRISM MASS ANALYZER WITH ADDITIONAL ION BEAM FOCUSING SYSTEM**

*It has been determined the ion-optical properties and characteristics of prism mass analyzer with sector inhomogeneous magnetic field  $r^{-1}$  at presence of two electrostatic ion focusing systems one of which is situated before the prism, and another one – after it. It has been shown the possibility of formation and focusing of parallel ion beam in the mass spectrometer which, in turn, allows one to reduce spherical aberrations of the additional focusing system.*

**Keywords:** ion beam, mass analyzer, ion-optical system, matrix, electrostatic lens.

Стаття надійшла в редакцію: 12.09.2013р.

Рецензент: д.т.н., професор Павлюченко А.М.