

Про деякі удосконалення іонного мікрозондового аналізатора

О.С. Кузема^{1,*}, 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

(Одержано 15.04.2013; у відредагованій формі – 12.05.2013; опубліковано online 17.10.2013)

Розглянуто іонно-оптичні властивості і характеристики іонного мікрозондового аналізатора, в якому сепарацію первинного іонного пучка за масами виконує секторна магнітна призма, а в системі аналізу вторинних іонів у якості енергоаналізатора застосовано сферичний конденсатор, що формує паралельний іонний пучок на вході в мас-аналізатор. Це дозволило покращити параметри приладу і зменшити його габарити.

Ключові слова: Іонний зонд, Магнітна призма, Фокусування іонів, Енергоаналізатор, Мас-аналізатор, Електростатична лінза, Роздільна здатність.

PACS number: 07.75. + h

1. ВСТУП

Серед багатьох методів дослідження поверхні твердих матеріалів одне з перших місць займає іонний мікрозондовий аналіз [1, 2]. Чутливість цього метода перевищує чутливість Оже-електронної спектроскопії і електронного зондового аналізу, а роздільна здатність дає можливість спостерігати всі хімічні елементи та їх ізотопи. Метод дозволяє визначити профілі розподілу частинок по глибині зразка і одержати зображення розподілу домішок на його поверхні. В той же час, прилади і обладнання для практичної реалізації вказаного метода мають відносно великі габарити, вагу і вартість, що стримує їх широке застосування. Проблема може бути в деякій мірі вирішена, якщо в системі формування первинного іонного пучка і в системі аналізу вторинних іонів використати магнітні та електричні поля спеціальної геометрії, які дозволяють підвищити ефективність сепарації і фокусування іонів на відповідних ділянках їх траєкторії. В даній роботі викладено будову і характеристики такого приладу.

2. ІОННО-ОПТИЧНА СХЕМА І ПРИНЦИП ДІЇ УДОСКОНАЛЕНОГО ІОННОГО ЗОНДУ

У мікрозондовій апаратурі первинний іонний пучок необхідно сепарувати з метою забезпечення необхідного складу і заряду бомбардуєчих іонів. При цьому розширення пучка в радіальній площині, обумовлене розбіжністю початкових енергій іонів, усувають шляхом використання мас-сепаратора з ахроматичним фокусуванням, а для збереження локальності іонного пучка в аксіальній площині фокусування роблять стигматичним. Реалізація мас-сепараторів з такими властивостями здійснюється за допомогою секторних магнітних полів у поєднанні з електростатичними лінзами [3-5]. Роздільна здатність ахроматичного мас-сепаратора невелика, оскільки в таких системах використовується тільки половина магнітного поля для сепарації іонного пучка за масами, а інша половина здійснює реверсування дисперсії.

Ефективність сепарації первинного іонного пучка можна підвищити шляхом застосування в системі сепарації секторних магнітних призм з неоднорідним полем r^{-1} [6], дисперсія якого за однакових розмірів мас-сепаратора більша, ніж дисперсія однорідного магнітного поля. Це сприяє збільшенню роздільної здатності мас-сепаратора [7, 8]. Подальшого удосконалення іонного зонду можна досягти за рахунок використання системи аналізу вторинних іонів з паралельним іонним пучком між електричним і магнітним каскадами [9]. У цьому випадку шляхом відповідного вибору геометричних і фізичних параметрів аналізатора енергій і мас-аналізатора три з чотирьох оптичних плечей іонно-оптичної системи аналізу вторинних іонів можуть бути зменшені до нуля, і загальна схема іонного мікрозондового аналізатора матиме вигляд, показаний на рис. Розглянемо роботу приладу.

Із джерела іонів 1 первинний іонний пучок надходить до системи сепарації, де поступово проходить електричне поле колімаційної лінзи 2, першу половину сектора магнітного поля призми 3, отвір селекційної діафрагми 4, потім другу половину сектора магнітного поля призми 5 і електричне поле фокуруючої лінзи 6. В результаті дії на іонний пучок електричних і магнітних полів перелічених елементів здійснюється сепарація іонів за масами, і на отвір апертурної діафрагми 7, яка є входною діафрагмою системи формування мікропучка, потрапляє сфокусований іонний пучок однакових за масою іонів. Геометричні і фізичні параметри елементів мас-сепаратора вибираються такими, щоб дисперсія першої половини магнітної призми була скомпенсована дисперсією другої половини. В такому разі фокусування іонів буде ахроматичним, а при забезпеченні фокусування іонного пучка в аксіальній площині, ще й стигматичним.

Після колімації діафрагмою 7 іонний пучок фокусується об'єктивом 9 на поверхню досліджуваного зразка 10. За допомогою відхиляючої системи 8 та генератора розгортки 20 поверхня зразка сканується іонним мікропучком. Вибиті із опроміненої ділянки зразка вторинні іони прискорюються і фокушуються емісійною лінзою 11 на входну діафрагму 12 системи

* nikonorov@ukr.net

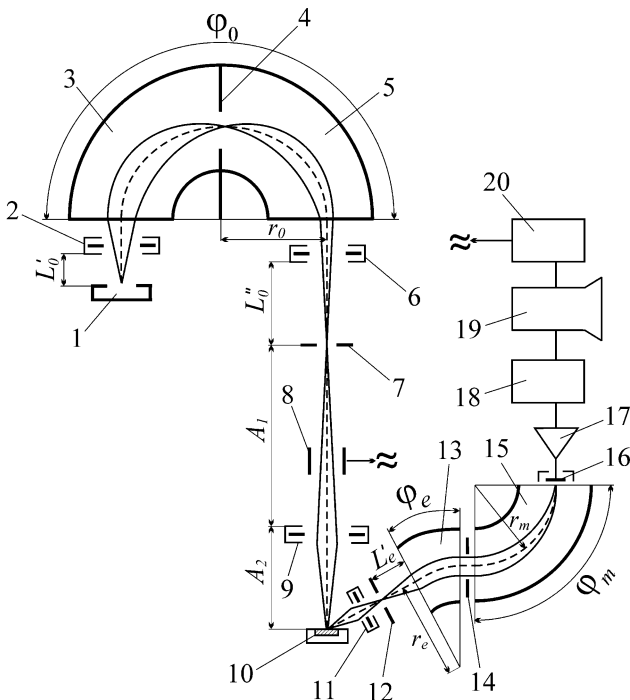


Рис. 1 – Іонно-оптична схема іонного мікрозондового аналізатора з магнітними призмами: 1 – джерело іонів; 2, 6, 9, 11 – електростатичні лінзи; 3, 5 – магнітні призми; 7 – вхідна діафрагма системи формування мікропучка; 8 – відхиляюча система; 10 – зразок; 12 – вхідна діафрагма системи аналізу вторинних іонів; 13 – енергоаналізатор; 14 – селекторна діафрагма; 15 – мас-аналізатор; 16 – колектор вторинних іонів; 17 – підсилювач іонного струму; 18 – система реєстрації спектра мас; 19 – система реєстрації зображень; 20 – генератор розгортки

аналізу вторинних іонів. Потім пучок вторинних іонів надходить до мас-спектрометра з подвійним фокусуванням, який складається з енергоаналізатора 13, селекторної діафрагми 14, мас-аналізатора 15, колектора вторинних іонів 16, підсилювача іонного струму 17 і системи реєстрації мас-спектрів 18. Мас-спектр, одержаний за допомогою мас-спектрометра, дає інформацію про якісний і кількісний склад іонів, вибитих із зразка. Вихідний сигнал мас-спектрометра використовується для модуляції яскравості кінескопу системи реєстрації зображень 19, розгортка якого синхронізується із системою сканування досліджуваного зразка первинним іонним пучком, в результаті чого можна спостерігати збільшене зображення поверхні зразка в іонах вибраного типу.

3. ІОННО-ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ І ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМИ ФОРМУВАННЯ ПЕРВИННОГО ІОННОГО ПУЧКА

Система формування первинного іонного пучка забезпечує одержання однорідного за масою і зарядом іонів пучка, просторово сфокусованого на апертурну діафрагму системи формування іонного мікропучка. Вона обладнана мас-сепаратором із стигматичним ахроматичним фокусуванням, яке здійснюється секторними магнітними призмами з полем r^{-1} і електростатичними лінзами. Оскільки магнітна призма з прямолінійними границями і ортогональним вхо-

дженням іонного пучка не фокусує іони в радіальній площині, а тільки в аксіальній, то фокусні відстані коліматорної і фокусувальної лінз у радіальній і аксіальній площинах будуть різні. У зв'язку з цим, іонно-оптичні властивості і характеристики системи сепарації первинного іонного пучка необхідно визначати як у радіальній, так і в аксіальній площинах.

Для випадку, коли електростатичні лінзи безпосередньо прилягають до магнітної призми, умови ахроматичного фокусування іонів у радіальній площині мають вигляд [7]:

$$l'_0 - \frac{l'_0 l''_0}{f''_r} - \frac{l'_0}{f'_r} \left[\left(1 - \frac{l'_0}{f'_r} \right) \varphi_0 + l'_0 \right] + \left(1 - \frac{l'_0}{f'_r} \right) \varphi_0 + l'_0 = 0, \quad (1)$$

$$\left(1 - \frac{l'_0}{f'_r} \right) \frac{\varphi_0^2}{2} + l'_0 \varphi_0 = 0, \quad (2)$$

де $l'_0 = L'_0 / r_0$, $l''_0 = L''_0 / r_0$ – оптичні плечі мас-сепаратора, виражені в одиницях радіуса центральної траєкторії іонів r_0 ; φ_0 – кут відхилення іонів у магнітній призмі; $f'_r = F'_r / r_0$, $f''_r = F''_r / r_0$ – фокусні відстані коліматорної і фокусувальної електростатичних лінз в одиницях радіуса центральної траєкторії r_0 .

Із системи рівнянь (1) і (2) визначаємо співвідношення для знаходження фокусних відстаней коліматорної і фокусувальної лінз у радіальній площині. Ці співвідношення мають вигляд

$$F'_r = \frac{r_0 \varphi_0 L'_0}{r_0 \varphi_0 + 2L'_0}, \quad F''_r = \frac{r_0 \varphi_0 L''_0}{r_0 \varphi_0 + 2L''_0}, \quad (3)$$

або

$$\frac{1}{F'_r} = \frac{1}{L'_0} + \frac{2}{r_0 \varphi_0}, \quad \frac{1}{F''_r} = \frac{1}{L''_0} + \frac{2}{r_0 \varphi_0}. \quad (4)$$

Одержані співвідношення визначають зв'язок між оптичною силою лінз і геометричними параметрами мас-сепаратора при ахроматичному фокусуванні іонного пучка. Як видно з (4), коліматорна лінза формує дійсне зображення щілини джерела іонів на відстані $r_0 \varphi_0 / 2$ від вихідної границі першої половини сектора магнітної призми, тому селекторна діафрагма повинна бути розташована у місці перетину центральної траєкторії іонів з радіусом, проведеним під кутом $\varphi_0 / 2$. На відстані L'_0 від другої половини сектора магнітної призми фокусувальною лінзою формує ахроматичне зображення щілини джерела іонів, яке містить іони тільки однієї маси. Тут розміщують апертурну діафрагму, яка є вхідною діафрагмою системи формування мікропучка. При значеннях параметрів мас-сепаратора $r_0 = 0,15$ м, $L'_0 = 0,1$ м, $L''_0 = 0,15$ м фокусні відстані коліматорної і фокусувальної лінз у радіальній площині будуть такими: $F'_r = 0,07$ м, $F''_r = 0,09$ м.

Для того, щоб не було розширення іонного пучка в аксіальній площині, необхідно забезпечити в мас-сепараторі стигматичне фокусування пучка. Враховуючи, що магнітна призма з полем r^{-1} змінює траєкторії іонів в аксіальній площині, аксіальні фокусні відстані коліматорної та фокусувальної лінз F'_z та F''_z можна визначити з умови фокусування іонів в аксі-

льній площині, яка має наступний вигляд [7]:

$$l_0' \left(1 - \frac{l_0''}{f_z''} \right) \cos \varphi_0 - l_0'' \sin \varphi_0 - \frac{l_0'}{f_z'} \left[\left(1 - \frac{l_0''}{f_z''} \right) \sin \varphi_0 + l_0'' \cos \varphi_0 \right] + \left(1 - \frac{l_0''}{f_z''} \right) \sin \varphi_0 + l_0'' \cos \varphi_0 = 0 \quad (5)$$

Для забезпечення більшої дисперсії доцільно вибрати кут відхилення іонів у магнітній призмі $\varphi_0 = \pi$. При цьому умова (5) буде виконана, коли $f_z' = l_0'$, а $f_z'' = l_0''$, тобто фокусні відстані коліматорної та фокусувальної лінз в аксіальній площині будуть такими: $F_z' = L_0'$; $F_z'' = L_0''$ або $F_z' = 0,1$ м, $F_z'' = 0,15$ м.

Величина дисперсії, яка визначає ефективність розділення іонів за масою, для даного варіанту іонно-оптичної системи буде [7]

$$D_c = \frac{r_0 \varphi_0^2}{16} = \frac{r_0 \pi^2}{16} \quad (6)$$

Тобто дисперсія призмового мас-сепаратора на 18% більша дисперсії мас-сепаратора з однорідним магнітним полем і таким же радіусом центральної траєкторії іонів. Це дозволяє підвищити роздільну здатність системи сепарації первинного іонного пучка. Оцінимо її величину. За означенням роздільна здатність мас-сепаратора дорівнює [10]

$$\frac{m}{\Delta m} = \frac{D_c}{2d} \quad (7)$$

де D_c – дисперсія мас-сепаратора, d – ширина іонного пучка в площині розташування селекторної діафрагми.

З урахуванням хроматичної аберації першого порядку визначаємо

$$d = S_1 + D_c \frac{\Delta U}{U} \quad (8)$$

де S_1 – розмір вихідного отвору джерела іонів, $\Delta U/U$ – відносна розбіжність енергій іонів у пучку.

Тоді формула для оцінки роздільної здатності мас-сепаратора прийме вигляд

$$\frac{m}{\Delta m} = \frac{D_c}{2 \left(S_1 + D_c \frac{\Delta U}{U} \right)} \quad (9)$$

При $r_0 = 0,15$ м, $S_1 = 1 \cdot 10^{-4}$ м, $\Delta U = 10$ еВ, $U = 5000$ еВ дисперсія призмового мас-сепаратора $D_c = 0,092$ м, а роздільна здатність $m/\Delta m = 160$.

Після мас-сепаратора іонний пучок надходить до системи формування іонного мікропучка. Вона має такі параметри: діаметр отвору вхідної діафрагми $D_1 = 1 \cdot 10^{-4}$ м, відстань від вхідної діафрагми до об'єктива $A_1 = 0,8$ м. У якості об'єктива може бути застосована електростатична одиночна лінза із фокусувальною відстанню $7,8 \cdot 10^{-4}$ м. При використанні плазмового джерела іонів із щільністю струму в пучку $1 \div 10$ мА/см² система формування іонного мікропучка забезпечує діаметр зонду приблизно 2 мкм.

4. ІОННО-ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ І ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМИ АНАЛІЗУ ВТОРИННИХ ІОНІВ

Враховуючи відносно велику розбіжність енергій вторинних іонів, для їх аналізу необхідно застосовувати систему з подвійним фокусуванням (за напрямком і швидкістю). При цьому в якості енергоаналізатора доцільно використати сферичний конденсатор, який має фокусувочі властивості і в радіальній, і в аксіальній площинах. Розглянемо спочатку радіальне фокусування іонного пучка. Для цього запишемо вираз для розширення іонного пучка в площині зображення системи з подвійним фокусуванням

$$y_k = \alpha_{11} y_0 + \alpha_{12} y_0' + \alpha_{13} e_0 + \alpha_{14} \mu_0 \quad (10)$$

де y_k – величина відхилення іона в площині зображення в одиницях радіуса центральної траєкторії іонів у мас-аналізаторі; y_0 , y_0' , e_0 , μ_0 – початкові параметри іонного пучка на виході джерела іонів: початкове зміщення в одиницях радіуса центральної траєкторії іонів у мас-аналізаторі, напрямок і відносна зміна енергії іона та його імпульсу. Співвідношення для коефіцієнтів α_{ij} , що входять у вираз (10), визначені в [9] за умови, що іонний пучок входить і виходить ортогонально до границь обох аналізаторів. Скористаємось результатами роботи [9] і визначимо параметри іонно-оптичної системи, що складається із сферичного конденсатора і мас-аналізатора з однорідним секторним магнітним полем. Будемо вважати, що енергоаналізатор формує паралельний іонний пучок на вході в мас-аналізатор. В такому разі умова фокусування іонів за напрямком матиме вигляд [10]

$$l_m'' = ctg \varphi_m \quad (11)$$

де l_m'' – значення вихідного плеча мас-аналізатора в одиницях r_m ; φ_m – кут відхилення іонів у магнітному полі мас-аналізатора. Із (11) видно, що при $\varphi_m = 90^\circ$ вихідне плече $l_m'' = 0$. Параметри сферичного конденсатора визначимо з умов фокусування іонів за напрямком і за швидкістю [9]

$$l_e' = ctg \varphi_e \quad (12)$$

$$\pm 2 \sin \varphi_e + 1 = 0 \quad (13)$$

де l_e' – значення вхідного плеча енергоаналізатора в одиницях радіуса центральної траєкторії r_e ; φ_e – кут відхилення іонного пучка в сферичному конденсаторі.

Із умови фокусування іонів за швидкістю (13), приймаючи до уваги, що в енергоаналізаторі і мас-аналізаторі іонний пучок повинен відхилятися в протилежних напрямках, знаходимо величину кута відхилення іонів у сферичному конденсаторі $\varphi_e = 30^\circ$, а із умови фокусування іонів за напрямком (12) одержуємо довжину вхідного плеча енергоаналізатора $L_e' = r_e \sqrt{3}$. Для випадку, коли $r_e = r_m = 0,1$ м параметри мас-спектрометра, що аналізує вторинні іони, будуть такими: $L_e' = 0,1732$ м, $\varphi_e = 30^\circ$, $L_e'' = 0$, $L_m'' = L_m' = 0$, $\varphi_m = 90^\circ$. При таких значеннях параме-

трів іонно-оптичної системи коефіцієнт a_{11} , а значить збільшення системи буде дорівнювати 0,5.

Визначимо тепер роздільну здатність мас-спектрометра. Величина дисперсії мас-аналізатора з паралельним пучком на вході, як відомо, дорівнює $D_m = r_m/2$, а ширина пучка в зоні розташування колектора іонів матиме у відповідності з (10) такий вигляд

$$d_m = 2a_{11}r_m y_0 + 2a_{12}r_m y'_0 + 2(2a_{13} + a_{14})\beta, \quad (14)$$

де $\beta = \Delta v/v$ – відносна зміна швидкості іона.

Оскільки у мас-спектрометрі з подвійним фокусуванням має місце фокусування іонів за напрямком і за швидкістю, тобто $a_{12} = 0$ і $2a_{13} + a_{14} = 0$, то $d_m = 2a_{11} r_m y_0$. Враховуючи, що $2y_0 = S_2/r_m$ (S_2 – ширина отвору вхідної діафрагми системи аналізу вторинних іонів), одержуємо: $d_m = a_{11} S_2$, і роздільна здатність без урахування аберацій другого порядку буде:

$$\frac{m}{\Delta m} = \frac{r_m}{2(2a_{11}S_2)}. \quad (15)$$

При $r_m = 0,1$ м, $a_{11} = 0,5$, $S_2 = 1 \cdot 10^{-4}$ м маємо $m/\Delta m = 500$.

Тепер розглянемо іонно-оптичні властивості мас-спектрометра вторинних іонів в аксіальній площині. Фокусування іонного пучка в цій площині виконує сферичний конденсатор. Запишемо вираз для величини аксіального відхилення іона з довільними початковими умовами від нейтральної траєкторії в площині розташування щілини колектора іонів

$$z_k = b_{11}z_0 + b_{12}z'_0, \quad (16)$$

де z_k – величина аксіального відхилення іона в площині зображення системи полів енергоаналізатора, виражена в одиницях r_m ; z_0 і z'_0 – початкові параметри іонного пучка: аксіальне зміщення в одиницях r_m і кут аксіального розходження іонів. Співвідношення для коефіцієнтів b_{11} і b_{12} одержані в [9] і мають вигляд

$$b_{11} = \frac{r_e}{r_m} \cos \varphi_e - \varphi_m \sin \varphi_e \quad (17)$$

$$b_{12} = \frac{r_e}{r_m} (l'_e \cos \varphi_e + \sin \varphi_e) + \varphi_m \cos \varphi_e - l'_e \varphi_m \sin \varphi_e. \quad (18)$$

У відповідності з (16), висота іонного пучка h_k у площині розташування колектора іонів буде

$$h_k = 2r_m \left(b_{11} \frac{h_0}{2r_m} + b_{12} z'_0 \right), \quad (19)$$

де h_0 – висота щілини вхідної діафрагми аналізу вторинних іонів.

Із (19) одержуємо:

$$h_k = b_{11}h_0 + 2r_m b_{12}z'_0. \quad (20)$$

Після обчислення коефіцієнтів b_{11} і b_{12} з використанням значень геометричних параметрів мас-спектрометра і враховуючи, що $h_0 = 1 \cdot 10^{-4}$ м, а $z'_0 = 0,008$, знаходимо висоту іонного пучка в площині розташування колектора $h_k = 1,76$ мм. Зауважимо, що за відсутності аксіального фокусування іонів висота пучка в площині зображення була б втричі більшою. Таким чином, аксіальне фокусування іонів необхідне, бо воно зменшує вплив аксіальних аберацій і дозволяє звузити ширину міжполюсного зазору магніту мас-аналізатора, що в свою чергу відкриває можливість збільшення магнітної індукції в зазорі і розширення діапазону реєстрації мас іонів.

5. ВИСНОВОК

Розглянуті фізико-технічні особливості іонного мікрозондового аналізатора з секторними магнітними призмами, а також результати виконаних теоретичних досліджень його основних характеристик свідчать про те, що запропоновані удосконалення будуть сприяти покращенню аналітичних та експлуатаційних можливостей приладу. Призмові мас-сепаратори та компактні системи для аналізу вторинних іонів можуть знайти застосування при розробці відносно простих мікрозондових приладів технологічного призначення.

О некоторых усовершенствованиях ионного микрозондового анализатора

А.С. Кузема¹, 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

Рассмотрены ионно-оптические свойства и характеристики ионного микрозондового анализатора, в котором сепарацию первичного пучка по массам осуществляет секторная магнитная призма, а в системе анализа вторичных ионов в качестве энергоанализатора использован сферический конденсатор, формирующий параллельный ионный пучок на входе в масс-анализатор. Это позволило улучшить параметры прибора и уменьшить его габариты.

Ключевые слова: Ионный зонд, Магнитная призма, Фокусировка ионов, Энергоанализатор, Масс-анализатор, Электростатическая линза, Разрешающая способность.

On Some Improvements of Ion Microprobe 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*

It has been considered the ion-optical properties and characteristics of ion microprobe analyzer in which the primary ion beam mass separation is realized by the magnetic prism, and the beam spherical capacitor is used in the secondary ion analyzing system as energy analyzer which form parallel ion beam at the mass analyzer inlet. It has allowed to improve the instrument parameters and to scale down its overall dimension.

Keywords: Ion probe, Magnetic prism, Ion focusing, Energy analyzer, Mass analyzer, Electrostatic lens, Resolution.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. В.Т. Черепин, *Ионный зонд* (Киев: Наук. думка: 1981).
2. И. Броудай, Дж. Мерей, *Физические основы микротехнологии*, Пер. с англ. (Москва: Мир: 1985).
3. А.А. Сысоев, М.С. Чупахин, *Введение в масс-спектрометрию* (Москва: Атомиздат: 1977).
4. С.Я. Явор, *Фокусировка заряженных частиц квадрупольными линзами* (Москва: Атомиздат: 1968).
5. J.W. Drummond, *Vacuum* **34**, 51 (1984).
6. Н.А. Шеховцов, *Магнитные масс-спектрометры* (Москва: Атомиздат: 1971).
7. С.О. Кузема, В.Т. Шаблия, *Укр. физ. журнал* **42** №1, 124 (1997) (U.S.O. Kuzema, T.V. Shablya, *Ukr. J. Phys.* **42**, No1, 124 (1997)).
8. А.С. Кузема, С.А. Кузема, *Масс-спектрометрия* **3**, 181 (2006).
9. С.А. Кузема, С.Н. Мордик, *ЖТФ* **71** №11, 124 (2001) (S.A. Kuzema, S.N. Mordik, *Tech. Phys.* **46** No11, 1470 (2001)).
10. А.С. Кузема, О.С. Савин, И.Я. Чертков, *Анализирующие системы магнитных масс-спектрометров* (Киев: Наук. думка: 1987).