

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Ребров Володимир Анатолійович

УДК 537.534.3

**ЗОНДОФОРМУЮЧА СИСТЕМА ЯДЕРНОГО
СКАНУЮЧОГО МІКРОЗОНДА НА БАЗІ ІНТЕГРОВАНИХ
ДУБЛЕТІВ МАГНІТНИХ КВАДРУПОЛЬНИХ ЛІНЗ**

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті прикладної фізики
Національної академії наук України.

Науковий керівник – кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Пономарьов Олександр Георгійович,
Інститут прикладної фізики
Національної академії наук України,
провідний науковий співробітник відділу
електростатичних прискорювачів.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор,
старший науковий співробітник
Цвик Олексій Іванович,
Інститут радіофізики та електроніки,
ім. О.Я. Усикова НАН України,
старший науковий співробітник відділу
дифракції і дифракційної електроніки;

доктор фізико-математичних наук, професор,
Погребняк Олександр Дмитрович,
Сумський державний університет,
професор кафедри електроніки і комп'ютерної техніки.

Захист відбудеться « » липня 2010 року о 14.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.02 у Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, ауд. 307, корпус БІУ.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.

Автореферат розісланий « » червня 2010 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В.О. Журба

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Серед широкого різноманіття фізичних методів, що дозволяють визначити розподіл елементів у приповерхневих шарах твердого тіла, існують методи мікроаналізу, які базуються на використанні ядерних скануючих мікрозондів, де застосовуються сфокусовані пучки легких іонів середніх (декілька MeV) енергій, і які відрізняються можливістю проведення неруйнівного кількісного мікроаналізу з високою просторовою роздільною здатністю.

Методи мікроаналізу мають великі потенційні можливості, що пов'язані з застосуванням у ядерних мікрозондах ряду ядерно-фізичних методів – це рентгенівський мікроаналіз, аналіз ядерних реакцій, зворотне резерфордівське розсіювання тощо. Відмінною рисою руху іонів у речовині на глибині до декількох десятків мікрометрів є їх достатньо прямолінійні траєкторії, що обумовлює практично незмінні поперечні розміри пучка. Тому локальність методу мікроаналізу, або просторова роздільна здатність ядерного мікрозонда, визначається розмірами сфокусованого пучка на поверхні досліджуваного зразка. З іншого боку, низький гальмівний фон від іонів та низькоенергетичних вторинних електронів і особливість фізичних процесів резонансних ядерних реакцій забезпечують чутливість методів мікроаналізу на рівні $1\div 10$ ppm.

Внаслідок того, що маса частинок іонного пучку та енергія їх прискорення у ядерному мікрозонді значно вищі від аналогічних характеристик електронного пучка в растрових електронних мікроскопах, розроблені методи формування електронного зонда неприйнятні для забезпечення необхідних параметрів (геометричні розміри і струм) іонного зонду. Для фокусування пучка іонів на поверхні зразка (мішені) в ядерному мікрозонді застосовуються зондоформуючі системи (ЗФС) на основі мультиплетів магнітних квадрупольних лінз (МКЛ), фізичні параметри яких являються визначальними у процесах формування іонного зонда. Крім цього, на вході в мікрозонд, прискорений пучок іонів формується за допомогою електростатичного прискорювача, стабільність енергії і величина яскравості пучка якого значно впливають на роздільну здатність мікрозонда.

На сьогоднішній день існує ряд нерозв'язаних задач, внаслідок чого параметри роздільної здатності ядерного мікрозонду поступаються аналогічним параметрам растрових електронних мікроскопів.

На основі викладеного, підвищення роздільної здатності ядерного мікрозонду за рахунок удосконалення ЗФС і застосування нових фокусуємих елементів актуально як з наукової, так і з практичної точки зору. Такі дослідження визначають напрям у розробленні і створенні нових приладів і апаратних комплексів для використання у різноманітних галузях науки і новітніх технологіях.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у відділі електростатичних прискорювачів Інституту прикладної фізики НАН України і є частиною робіт, які проводилися відповідно до таких проектів: "Розробка компактного скануючого іонного зонда

МеВ-х енергій для застосування в мікроаналізі та нанотехнологіях" (№ держ. реєстр. 0103U008609) (2003-2004 рр.); "Створення інтегрованої фокусувальної системи для ядерного мікрозонда та проведення експериментальних досліджень процесів формування мікропучка іонів мегаелектронвольтних енергій" (№ держ. реєстр. 0105U005965) (2005-2006 рр.); "Створення апаратури і розробка методик досліджень розподілу елементів і дефектів на міжзеренних границях конструкційних реакторних матеріалів" (№ держ. реєстр. 0107U004005) (2007-2008 рр.).

Мета і завдання досліджень. Мета даної роботи полягає у створенні математичних і фізичних моделей ЗФС з інтегрованими дублетами МКЛ, які при практичній реалізації здатні забезпечити фокусування пучків іонів водню і гелію з енергією до 2 МеВ у зонд з параметрами (геометричні розміри і струм), необхідними для проведення аналізу розподілу мікродомішок у твердому тілі.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких завдань:

- створення фізичної моделі фокусування пучка іонів в ЗФС ядерного мікрозонда з метою вибору оптимальних параметрів системи для розроблення загальної схеми установки прискорювач-мікрозонд;
- математичне моделювання конфігурації магнітних полів у новому прецизійному інтегрованому дублеті МКЛ з оптимізованою формою полюсних наконечників і проведення експериментальних досліджень структури магнітного поля дублета;
- розроблення комплексної методики юстування елементів і систем мікрозонда та узгодження фазових характеристик пучка і аксептансу ЗФС за допомогою оптимізації режимів живлення конденсорної системи;
- експериментальні дослідження процесу фокусування пучка іонів у ЗФС з інтегрованими дублетами МКЛ, проведення калібрування параметрів сфокусованого пучка в ядерному мікрозонді;
- порівнювальний аналіз розрахункових і експериментальних даних параметрів пучка на мішені.

Об'єкт досліджень - нелінійні процеси фокусування пучка заряджених частинок у зондоформуючих системах з інтегрованими дублетами магнітних квадрупольних лінз.

Предмет досліджень - роздільна здатність зондоформуючих систем і структура поля прецизійного інтегрованого дублета магнітних квадрупольних лінз.

Відповідно до поставлених задач використовувалися такі теоретичні і експериментальні **методи досліджень**: метод матрицантів для розв'язання нелінійних траєкторних рівнянь руху пучка в полі МКЛ; метод оптимізації іоно-оптичних параметрів зондоформуючої системи, що ґрунтується на критерії максимального аксептансу; метод математичної підгонки Левенберга-Маркуадта; метод сполучених градієнтів; метод відновлювання поля МКЛ; метод реєстрування електронів вторинної електронної емісії.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Знайшов подальший розвиток метод оптимізації системи формування пучка іонів, що базується на критерії максимуму аксептансу системи при

фіксованих розмірах зонда на мішені для ЗФС ядерного мікрозонда з інтегрованими дублетами магнітних квадрупольних лінз з урахуванням нелінійних процесів фокусування пучка.

2. Уперше розв'язано задачу точного позиціонування МКЛ у розподілених ЗФС ядерного мікрозонда завдяки застосуванню нових прецизійних інтегрованих дублетів магнітних квадрупольних лінз, у яких магнітопровід з полюсними наконечниками становить одне суцільне ціле, що зменшує аберації і дає можливість досягти співвісності лінз у межах ± 10 мкм.
3. Уперше результати теоретичних досліджень реалізовані у новій системі формування іонного зонда з двома інтегрованими дублетами магнітних квадрупольних лінз у експериментальній установці ядерного скануючого мікрозонда.
4. Шляхом порівняльного аналізу розрахункових і експериментальних значень параметрів просторової роздільної здатності ($2,3 \times 2,1$ мкм² при струмі 100 пА), які досягненні вперше у даному типі зондоформуючих систем, практично підтверджена справедливність запропонованої теоретичної моделі системи фокусування пучка іонів.

Практичне значення отриманих результатів. Результати, отримані в ході виконання дисертаційної роботи, можуть бути використані для створення систем формування зондів прискорених часток, побудованих з застосуванням фокуруючих елементів на базі принципово нового типу інтегрованого дублета магнітних квадрупольних лінз. Розроблена методика позиціонування дозволяє узгоджувати вісі всіх елементів розподіленої зондоформуючої системи між собою та з віссю пучка, що зменшує значення аберацій позиціонування до рівня, коли їх вплив не є визначальним.

Фундаментальне значення отриманих результатів полягає у тому, що розроблені автором основи створення фізичної моделі систем зондоформування, які дозволяють мати на мішені зонд необхідних параметрів, можуть бути використані як в установці ядерного мікрозонду прискорювально-аналітичного комплексу Інституту прикладної фізики НАН України (м. Суми), так і в інших організаціях, що працюють над проблемою фокусування пучків заряджених часток.

Особистий вклад здобувача. Результати, викладені у дисертаційній роботі, отримано здобувачем самостійно чи за його безпосередньої участі. Чисельне моделювання нелінійних процесів фокусування пучка частинок у ЗФС з інтегрованими дублетами МКЛ виконано здобувачем у частині проведення розрахунків. Розвинуто метод оптимізації системи формування пучка іонів для ЗФС ядерного мікрозонда, в якому було враховано додаткові параметри. У результаті моделювання отримано оптимізовані іонно-оптичні параметри ЗФС ядерного мікрозонда, які наведені в роботах [1,7], що написані автором особисто. У роботах [2,6] було виконано розрахунки фізичних та геометричних параметрів нового інтегрованого дублета МКЛ і проведено експериментальні дослідження співвісності лінз дублета у різних варіантах живлення збуджуючих котушок полюсів. Особисто автором написані розділи

3,4,5 у роботі [2]. У роботах [3], де здобувачем написано розділ "Прецизійна магнітна квадрупольна лінза" та [8] – розділ "Зондоформуєча система", здобувачем розраховано фізичні параметри прецизійних МКЛ для ядерного скануючого мікрозонда на базі електростатичного перезарядного прискорювача ЕПП-10, також наведено результати стендових експериментальних досліджень лінз, у яких здобувач брав участь. У роботах [4], де автором написано розділи "Оптимізація оптики зондоформуєчої системи" і "Особливості конструкції мікрозонда" та [5] – розділи 1,3,4, а у роботах [9-11] викладено особливості розробленої здобувачем разом із науковим керівником ЗФС ядерного скануючого мікрозонда з інтегрованими дублетами МКЛ, наведено отримані результати експериментальних досліджень процесу фокусування пучка і порівняльного аналізу експериментальних і розрахункових даних параметрів зонда.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались і обговорювались на таких конференціях і семінарах:

XV Международной конференции по электростатическим ускорителям и пучковым технологиям (Росія, Обнінськ, 2003 р.); XVI Международной конференции по электростатическим ускорителям и пучковым технологиям (Росія, Обнінськ, 2006 р.); VIII Всероссийском семинаре "Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики" (Росія, Москва, 2007 р.); Международном совещании "Микро и нанотехнологии с использованием пучков ионов, ускоренных до малых и средних энергий" (Росія, Обнінськ, 2007 р.); VI Конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям (Україна, Харків, 2008 р.); X Міждержавному семінарі "Плазмова електроніка та нові методи прискорення" (Україна, Харків, 2008 р.).

Публікації. Основні матеріали дисертації опубліковано в 11 наукових працях, із яких 5 статей опубліковано у спеціалізованих журналах, які входять до переліку ВАК України, один патент України, 5 тез доповідей в матеріалах науково-технічних конференцій.

Структура і зміст роботи. Дисертаційна робота містить вступ, чотири розділи, висновки, список використаної літератури і додаток. Загальний обсяг роботи становить 146 сторінок, в тому числі 58 рисунків, 4 таблиці. Список використаної літератури складається зі 109 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми і необхідність виконання дисертаційної роботи, сформульовано мету й основні завдання досліджень, визначено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, зв'язок роботи з науковими програмами і темами, наведено інформацію про апробацію результатів, внесок здобувача в основні публікації, а також інформацію про кількість публікацій і структуру дисертаційної роботи.

У **першому розділі** "Фізичні принципи функціонування зондоформуєчих систем ядерних скануючих мікрозондів", який має оглядовий характер,

розглянуто основні типи пучків заряджених частинок, що використовуються в методах елементного мікроаналізу твердого тіла. Розглянуто загальні фізичні принципи ядерного скануючого мікрозонда, де пучок легких іонів (H^+ , H_2^+ , He^+) прискорюється до енергії декількох МеВ електростатичним прискорювачем і надходить на вхід ЗФС.

Основні фактори, що визначають роздільну здатність мікрозонда (мінімальні розміри зонда на мішені при заданому значенні струму):

- яскравість джерела іонів;
- стабільність високої напруги на кондукторі прискорювача;
- процеси розсіювання частинок пучка на стінках об'єктного і кутового коліматорів;
- структура поля елементів фокусування і системи сканування;
- вибір оптимальних параметрів ЗФС;
- вплив зовнішніх паразитних електромагнітних полів;
- значення вакууму, вібрації тощо.

Таким чином, збільшення роздільної здатності мікрозонда є комплексною задачею оптимізації процесу зондоформування з урахуванням усіх приведених факторів і параметрів пучка, які забезпечує прискорювач.

У ЗФС ядерного мікрозонда (рис.1) застосовуються, як мінімум, два коліматори: об'єктний і кутовий. Об'єктний – обмежує поперечні координати частинок пучка (x , y), а кутовий – із набору частинок, які пройшли через об'єктний коліматор, відсікає частинки з розбіжностями (x' , y'), що перевищують допустимі значення.

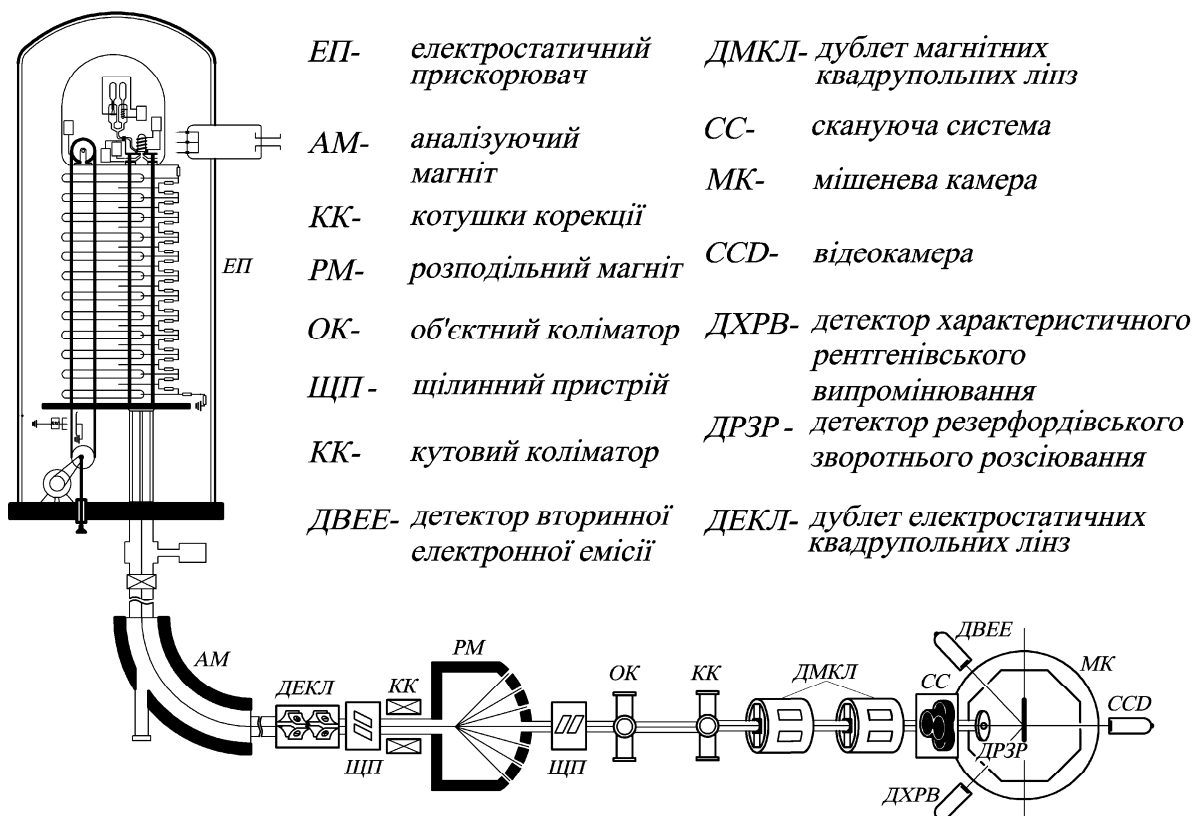


Рис. 1. Схема розміщення елементів і вузлів ядерного мікрозонда

В якості лінзових пристроїв для фокусування іонних пучків з енергією порядку декількох МеВ використовуються МКЛ, які мають основну складову поля, перпендикулярну до осі іонного пучка і які створюють сильну фокусуючу дію.

У зв'язку з тим, що квадрупольна лінза фокусує пучок в одному напрямку і дефокусує в іншому, перпендикулярному до першого, для фокусування в обох напрямках застосовується система із декількох лінз.

У розділі розглянуто експериментальні мікрозондові установки, які цікаві з точки зору застосування нових ЗФС та їх елементів або відображають досягнення певного етапу розвитку цього напрямку в науці. У кінці проведеного огляду пропонується перелік досліджень, спрямованих на розв'язання задачі підвищення просторової роздільної здатності мікрозондових установок.

На початку **другого розділу** "Зондоформуюча система ядерного скануючого мікрозонда з оптимізованими іонно-оптичними параметрами" розглянуто метод дослідження нелінійної динаміки пучків іонів з енергією декількох МеВ у ЗФС на базі мультиплетів МКЛ, який ґрунтується на розв'язанні задачі Коші для нелінійних траєкторних диференціальних рівнянь у вигляді

$$\begin{cases} x'' = \frac{q}{p_0(1+\delta)}(y'B_z - B_y - x'^2B_y + x'y'B_x)\sqrt{1+x'^2+y'^2}, \\ y'' = \frac{q}{p_0(1+\delta)}(B_x - x'B_z - x'y'B_y + y'^2B_x)\sqrt{1+x'^2+y'^2}, \\ (x, x', y, y')|_{z=z_0} = g_0, \end{cases} \quad (1)$$

де x, x', y, y' – фазові координати іона; q, p_0, δ – заряд, середній імпульс і відносне відхилення імпульсу іона від середнього значення; B_x, B_y, B_z – складові магнітного поля в МКЛ; g_0 – початкова фазова множина пучка.

Вектор магнітної індукції в області проходження пучка визначається відомим співвідношенням $\vec{B} = -grad(w)$, де скалярний магнітний потенціал у локальній системі координат, зв'язаною з віссю лінзи і площинами антисиметрії, має вигляд

$$\begin{aligned} w(x, y, z) = & 2W_2(z)xy + U_3(z)x^3 + 3W_3(z)x^2y - 3U_3(z)xy^2 - W_3(z)y^3 + \\ & + U_4(z)x^4 + (4W_4(z) - W_2''(z)/6)x^3y - 6U_4(z)x^2y^2 - \\ & - (4W_4(z) + W_2''(z)/6)xy^3 + U_4(z)y^4 + \dots, \end{aligned}$$

де $W_2(z)$ – розподіл уздовж осі МКЛ основної квадрупольної компоненти; $W_3(z), U_3(z)$ – паразитні секступольні та $W_4(z), U_4(z)$ – октупольні основна і оберտальна компоненти відповідно.

Розв'язок системи рівнянь (1) побудовано на переході до розширеного простору фазових моментів, що дозволяють апроксимувати в ньому початкові нелінійні рівняння розширеною системою лінійних рівнянь. Такий підхід відомий в оптиці пучків заряджених частинок як метод матрицантів. Базисний вектор фазових моментів вибрано у вигляді

$$\vec{Q} = (x, x', y, y', x\delta, x'\delta, y\delta, y'\delta, x^2, xx', x'^2, y^2, yy', y'^2, xy, x'y, xy', x'y', x^3, x^2x', xx'^2, x'^3, xy^2, xyy', xy'^2, x'y^2, x'yy', x'y'^2, y^3, y^2y', yy'^2, y'^3, yx^2, yxx', yx'^2, y'x^2, y'xx', y'x'^2)^T,$$

що дозволяє апроксимувати початкову задачу (1) з третім порядком малості за фазовими координатами.

У результаті формальної процедури в методі матрицантів задача Коші (1) перетворюється на диференціальну задачу для матричної функції – матрицанту у вигляді

$$\frac{d\mathfrak{R}(z/z_i)}{dz} = \mathbf{P}(z) \cdot \mathfrak{R}(z/z_i), \quad \mathfrak{R}(z_i/z_i) = \mathbf{E}, \quad (2)$$

де \mathbf{E} - одинична матриця; $\mathbf{P}(z)$ – квадратна матриця, яка визначається осьовим розподілом мультипольних компонент поля МКЛ ($W_2(z)$, $W_3(z)$, $U_3(z)$, $W_4(z)$, $U_4(z)$); $\mathfrak{R}(z/z_i)$ - матрицант, який забезпечує перетворення координат фазових моментів кожної частинки із площини, перпендикулярної до осі з координатою z_i на вході в лінзу, в площину $z \leq z_{i+1}$, де z_{i+1} - площина на виході із лінзи у вигляді

$$\vec{Q}(z) = \mathfrak{R}(z/z_i) \cdot \vec{Q}(z_i). \quad (3)$$

Загальний матрицант ЗФС визначає іонно-оптичні властивості системи і на основі співвідношення (3) може бути поданий добутком матрицантів кожної МКЛ і дрейфових проміжків між лінзами у вигляді

$$\mathfrak{R}(z_t/z_0) = \mathbf{S}(z_{2n+1}/z_{2n}) \prod_{i=0}^{n-1} [\mathfrak{R}(z_{2i+2}/z_{2i+1}) \cdot \mathbf{S}(z_{2i+1}/z_{2i})],$$

де \mathbf{S} – матрицант дрейфового проміжку; n – кількість МКЛ у ЗФС; z_0 і z_t - координати об'єктного коліматора і мішені відповідно.

У ЗФС осі МКЛ сумісні з оптичною віссю, і розподіл магнітного поля вздовж осі залежить від ряду параметрів, що визначають параметричний мультиплет МКЛ. Апроксимація розподілу мультипольних компонент у МКЛ взята у вигляді кусково-постійної функції з ефективною довжиною поля L_{eff} , що дозволяє отримати аналітичний розв'язок задачі (2). Такий розподіл поля вздовж осі схематично зображено на рис. 2, тоді параметрами мультиплету є: n – число

МКЛ у ЗФС; a_i – дрейфові довжини; g - робоча відстань; $L_{eff,i}$, β_i – довжина ефективного поля і збудження МКЛ відповідно.

Параметри параметричного мультиплету і розміри коліматорів визначають процес формування зонда, тому з метою отримання найкращої роздільної здатності й чутливості мікрозонда ці параметри необхідно оптимізувати. Застосований метод оптимізації базується на критерії максимуму

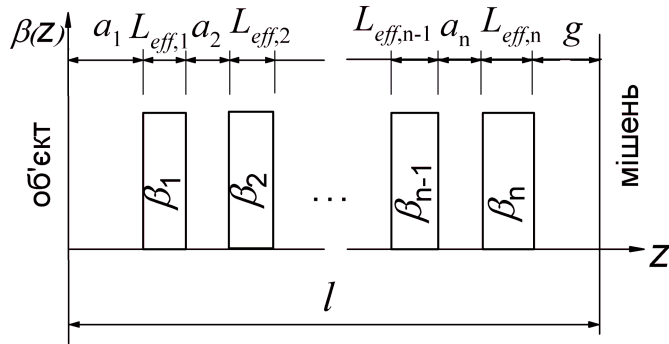


Рис. 2. Схема розподілу квадрупольної компоненти поля ЗФС, що складається із n лінз ($|\beta_i| = \sqrt{2|q \cdot W_{2,i}| / p_0}$, $i=1,2,\dots,n$; l – довжина ЗФС)

аксептансу системи при фіксованих розмірах зонда на мішені й належить до класу задач нелінійного програмування.

Розв'язок оптимізованої задачі дозволяє вибрати параметри мультиплету, забезпечуючи максимальний струм пучка на мішені, пропорційний величині аксептансу ЗФС, що забезпечує необхідну чутливість під час роботи мікрозонда в режимі мікроаналізу.

На основі проведеного аналізу різних типів ЗФС, в яких застосовуються мультиплети

МКЛ, було встановлено, що збільшення кількості лінз у системі не приводить до значного зростання її аксептансу. Тому, ґрунтуючись на цих положеннях і зважаючи на більш жорсткі вимоги до юстування для систем із п'ятьма і шістьма лінзами, була вибрана ЗФС із чотирма лінзами в розподіленій конфігурації лінз у системі, яка має кращі іонно-оптичні властивості, ніж класичні мультиплети. Однак практичне використання таких систем також може бути обмежене внаслідок складності юстування МКЛ, що впливає із відсутності фізичних принципів суміщення осі поодиноких квадрупольних лінз із віссю пучка. Тому було показано, що розв'язанням цієї задачі може бути об'єднання квадруполів у жорсткі конструкції у вигляді дублетів. Це дозволяє однозначно визначити геометричні й фізичні параметри позиціонування і живлення лінз у системі.

Для забезпечення стигматичного фокусування у квадрупольних ЗФС необхідно мати мінімум два незалежних джерела живлення лінз, тому замість n змінних β_i , $i=1,\dots,4$, розглянуто лише дві змінні β_1 і β_2 , які доповнюються топологічним вектором $\{v_i\}$ $i=1,\dots,4$, що визначає варіант живлення лінз від двох незалежних джерел живлення. При цьому $v_i \in \{C_1, D_1, C_2, D_2\}$, де C_j означає підключення до j -го ($j=1,2$) джерела з прямим напрямком струму, а D_j означає підключення до j -го ($j=1,2$) джерела з інверсним напрямком струму. Умова стигматичності ЗФС буде виконана, якщо відповідні елементи блоків матрицанту $\mathfrak{R}(z_t/z_0)$ дорівнюють нулю

$$\Re_{1,1} = h_x(\beta_1, \beta_2; \{a_i\}, \{L_{eff,i}\}, \{v_i\}) = 0, \quad (4)$$

$$\Re_{3,3} = h_y(\beta_1, \beta_2; \{a_i\}, \{L_{eff,i}\}, \{v_i\}) = 0. \quad (5)$$

Розв'язок рівнянь (4) і (5) щодо невідомих збуджень β_1 і β_2 при фіксованих параметрах мультиплету і розрахунок матрицанту $\Re(z_t/z_0)$, перший і третій рядки якого містять у собі іонно-оптичні властивості ЗФС, реалізовано в програмі ProbForm, розробленій у ІПФ НАН України.

У дисертаційній роботі узагальнюється вибір параметрів робочої відстані $g=0,235$ м і довжини системи $l=(4, 6, 8)$ м, дрейфових відстаней у дублетах $a_2=a_4=0,039$ м і варіантів живлення лінз останнього дублета $v_3=D_1$ і $v_4=C_2$. Відмічається, що ЗФС із розподіленим розміщенням лінз уздовж оптичного тракту мають більш високий аксептанс, ніж класичні системи з компактним розміщенням лінз поблизу мішені. Водночас відсутність фізичних принципів суміщення осі поодинокі МКЛ з віссю пучка при фіксуванні зображення лінії фокусів на екрані призводить до значних похибок позиціонування лінз та, як наслідок, викликає деградацію параметрів зонда. Для розв'язання цієї задачі

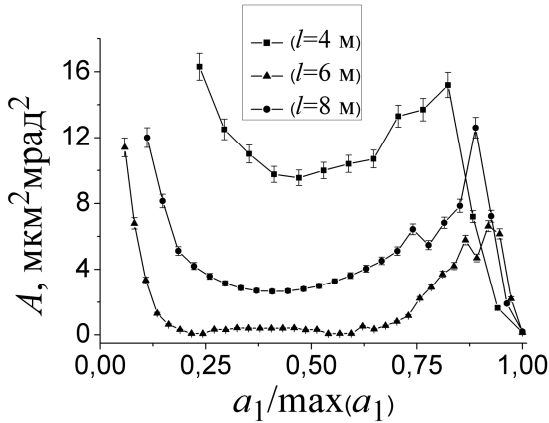


Рис. 3. Залежність аксептанса від параметрів a_1 і l для конфігурації живлення квадруплету $D_2C_1D_1C_2$

$\max(E)=2$ МеВ для сорту іонів He^+ .

Для шістнадцяти можливих варіантів живлення лінз квадруплету від двох незалежних джерел живлення, що наведено у додатках до дисертаційної роботи, досліджені аксептанс \mathcal{A} , оптимальні напіврозміри об'єктного (r_x, r_y) і кутового (R_x, R_y) коліматорів, коефіцієнти зменшення, максимальні аберації залежно від відносного значення параметра a_1 для трьох значень параметра довжини системи l . У розрахунках враховувалися характеристики пучка на вході в ЗФС, які забезпечує ЕСП "Сокил" – це максимальний енергетичний розкид частинок у пучку $\Delta E/E=10^{-3}$ і привісьова яскравість пучка $b \approx 7$ пА/(мкм² мрад²).

З урахуванням впливу паразитних аберацій 2-го і 3-го порядків на величину аксептансу для відносних значень паразитних компонентів

запропоновано об'єднати кожену пару МКЛ у жорстку конструкцію з високою точністю позиціонування лінз одна відносно іншої. За вільні параметри квадруплету обрані дрейфові відстані a_1 , варіанти живлення лінз першого дублета $v_i \in \{D_1, C_1, D_2, C_2\}$, $i=1,2$, і довжини ефективного поля лінз $L_{eff,j}^*$, $j=1,2$, які є додатковими параметрами та обирались ітераційним уточненням з метою визначення їх мінімально можливих значень для фіксованих параметрів параметричного квадруплету ($\{a_j\}, l, g, \{v_j\}$), $j=1, \dots, 4$ із області їх визначення і значеннях $\max(B_{p,j})=0,45$ Тл,

$U_3/W_2=W_3/W_2=0,004 \text{ см}^{-1}$, $U_4/W_2=W_4/W_2=0,001 \text{ см}^{-2}$ було визначено, що тільки система з антисиметричним варіантом живлення лінз $D_2C_1D_1C_2$, яка має назву «Російський квадруплет», володіє аксептансом, що перевищує задану нижню межу (рис.3). Причому тільки коротка версія з $l=4 \text{ м}$ та інтервалом зміни параметра a_1 в межах $2,4 \text{ м} \leq a_1 \leq 2,8 \text{ м}$ має необхідний аксептанс $\mathcal{A} > 14 \text{ мкм}^2 \text{ мрад}^2$ і такі оптимізовані параметри: $l=3,85 \text{ м}$; $L_{\text{eff},1}=0,071 \text{ м}$; $L_{\text{eff},2}=0,051 \text{ м}$; $a=1,945 \text{ м}$; $a_1=2,504 \text{ м}$; $a_2=a_4=0,039 \text{ м}$; $g=0,235 \text{ м}$; $2r_x=39 \text{ мкм}$; $2r_y=43 \text{ мкм}$; $2R_x=420 \text{ мкм}$; $2R_y=80 \text{ мкм}$.

У **третьому розділі** "Прецизійний інтегрований дублет магнітних квадрупольних лінз" подано фізичні особливості прецизійного дублета МКЛ нового типу. Особливість конструкції магнітопроводу дублета полягає в тому, що ярмо і полюсні наконечники становлять одне нероздільне ціле (рис.4 а). Магнітопровід дублета виготовлено із одного куска магнітом'якої електротехнічної сталі з використанням високоточного електроерозійного вирізного обладнання. Точність позиціонування полюсів кожної із лінз при такому способі обробки металу знаходиться на рівні $\pm 5 \text{ мкм}$.

Усі електротехнічні параметри лінз у дублетах визначені на основі розрахунків з урахуванням реальної залежності магнітної індукції від напруженості поля для обраної магнітом'якої сталі ЕШ. Форма полюсних наконечників вибрана із умови максимального відношення напруженості поля на вершині полюса до напруженості в точках мінімального зближення із сусідніми полюсами. Обраний профіль полюсних наконечників МКЛ з гіперболічною твірною в центральній частині є компромісом між намаганням отримати поле з мінімальними паразитними складовими і максимальним градієнтом. Загальний вигляд дублета зображено на рис.4 б.

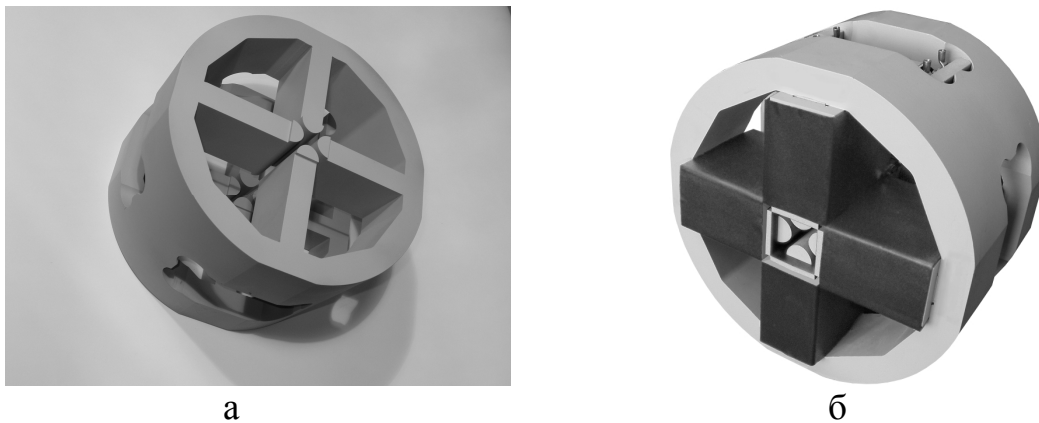


Рис. 4. Прецизійний інтегрований дублет МКЛ: а - магнітопровід; б - загальний збірний вигляд дублета

Стендові дослідження прецизійних інтегрованих дублетів МКЛ показали добре узгодження експериментальних і розрахункових даних, для яких розходження максимальної магнітної індукції в лінійній області залежності від струму в котушках становить 9 %, максимальний градієнт поля на осі лінзи для лінійної області зміни магнітної індукції $0,65 \text{ Тл/см}$. Дослідження взаємного

впливу лінз одна на одну в інтегрованому дублеті показали, що при збільшенні чи зменшенні струму в одній лінзі індукція лінзи, що не має живлення, практично не змінювалася, залишаючись на рівні 0,2% величини максимальної індукції на полюсі, що визначається значенням залишкової намагніченості.

Експериментальні дослідження неспіввісності лінз дублета, які базуються на методиці відтворення поля, показали, що фізична вісь кожної лінзи переміщується не більше ніж на ± 10 мкм при зміні напрямку струму в котушках кожної із лінз. Таким чином, максимальна неспіввісність лінз у дублеті не перевищує 20 мкм, що практично не впливає на процес зондоформування в ядерному мікрозонді. За результатами відтворення поля в лінзах дублетів максимальні паразитні компоненти поля становили: секступольна $< 0,004 \text{ см}^{-1}$, октупольна $< 0,001 \text{ см}^{-2}$, що є допустимими величинами.

У **четвертому розділі** "Експериментальні дослідження процесу фокусування пучка в ядерному скануючому мікрозонді" розглянуто всі основні складові ЗФС експериментальної установки ядерного скануючого мікрозонда прискорювально-аналітичного комплексу ПФ НАН України, яка побудована відповідно до проведених оптимізаційних розрахунків і з застосуванням розроблених інтегрованих дублетів МКЛ.

Важливим є вибір режимів живлення електростатичних квадрупольних лінз конденсорної системи, який забезпечує узгодженість фазових характеристик пучка з аксептансом ЗФС. Це пов'язано з тим, що кросовер пучка у вертикальній площині yOz знаходиться на відстані ~ 1 м від виходу прискорювальної трубки, а останній кросовер пучка перед входом у ЗФС у горизонтальній площині xOz розміщений у районі стабілізаційної щілини. Тому фазові контури емітансу пучка в площинах xh' і yh' на вході в ЗФС мають форму витягнутих паралелограмів у першому і третьому квадрантах системи фазових координат. Аналогічні фазові контури аксептансу формуються оптимальними розмірами об'єктного і кутового коліматорів та знаходяться у другому й четвертому квадрантах. Фазова густина іонів пучка нерівномірна, з більшою концентрацією поблизу центрів паралелограмів, тому за рахунок підбору живлення лінз конденсорної системи здійснюється узгодженість фазових контурів емітансу пучка й аксептансу ЗФС. При напрузі на електродах обох лінз $U=5,5$ кВ для протонів з енергією 1 МеВ отримано збільшення струму пучка вдвічі.

Експериментальне дослідження процесу формування зонда показали залежність його розмірів від іонно-оптичних властивостей ЗФС, які визначаються лінійними властивостями та власними абераціями системи. З іншого боку, аберації, що пов'язані з неспіввісністю оптичної осі ЗФС або окремих її елементів з оптичною віссю пучка, значно збільшують розмір зонда при фіксованому значенні струму пучка. Тому була розроблена необхідна послідовність дій, яка узгоджує осі всіх елементів ЗФС між собою та з віссю пучка, враховуючи фізичні особливості кожного елемента системи (рис.5).

На заключному етапі процесу стигматичного фокусування пучка на мішені зміна струму в одному джерелі живлення котушок лінз приводить до

зміни розмірів зонда як у x - так і у- напрямках, що ускладнює процес фокусування пучка. У зв'язку з цим була визначена залежність зміни струмів у двох джерелах живлення МКЛ дублетів, при яких змінюється розмір зонда тільки в одному напрямку - x або y .

У розділі подано дослідження впливу зовнішніх факторів на просторову роздільну здатність мікрозонда, до яких належать механічні вібрації та зовнішні електромагнітні поля. В результаті проведеного аналізу можливих шляхів зменшення цих факторів було розроблено магнітний екран, яким захищено іонопровід. За допомогою антивібраційного фундаменту та допоміжних демпферів опор каналу мікрозонда величина вібрацій була зведена до мінімуму.

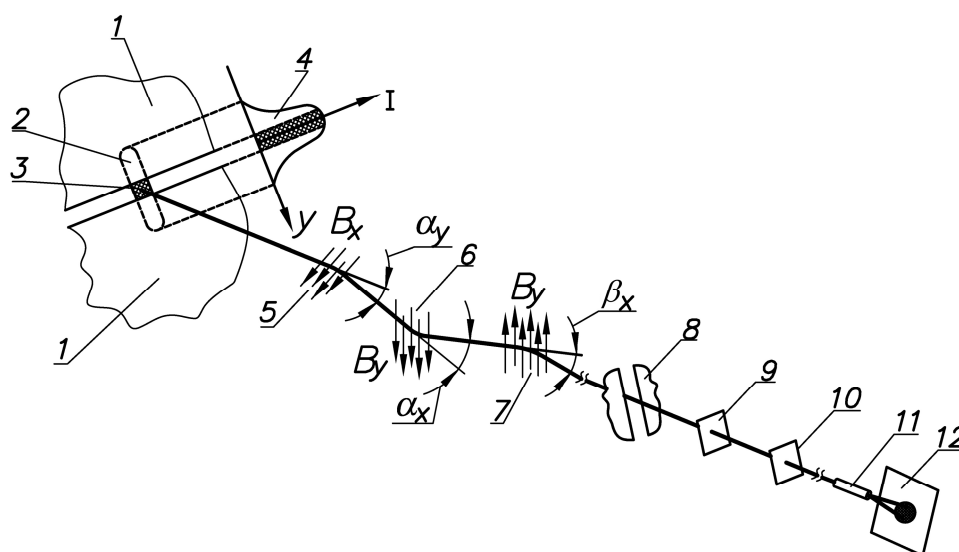


Рис. 5. Схема проведення пучка в каналі мікрозонда: 1 – вхідна щілина; 2 – форма плями пучка після аналізуючого магніту і стабілізуючої щілини; 3 – частина пучка, яка пройшла через задану щілину; 4 – розподіл густини струму в пучку; 5 – поле котушки зі струмом вертикального коректора; 6 – поле котушки зі струмом горизонтального коректора; 7 – поле роздавального магніту; 8 – запобіжна щілина; 9,10 – колімаційні вікна об'єктного і кутового коліматорів відповідно; 11 – діафрагма на виході із скануючої системи; 12 – кварцовий екран

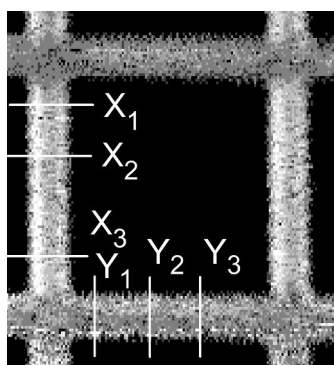


Рис. 6. Зображення у вторинних електронах калібрувальної мідної сітки

Калібрування параметрів зонда здійснювалося у процесі сканування за рахунок детектування вторинних електронів, які утворюються при взаємодії сфокусованого пучка іонів з калібрувальними мідними сітками розміром 157 комірок/мм (рис. 6).

У результаті сканування зондом калібрувальної мідної сітки вздовж ліній X_j і Y_j , $j=1\dots 3$, були отримані експериментальні профілі інтенсивності виходу вторинних електронів (рис. 7 а, б). Обробка профілів

проведена із застосуванням розрахованих розподілів густини струму пучка на мішені і стандартного підходу математичної підгонки з припущенням нормального розподілу густини струму.

На рис. 7 показані теоретичні розрахункові профілі з гаусовим розподілом густини струму в пучку, яка дає розміри зонда $2,72 \times 2,04 \text{ мкм}^2$ (1); із застосуванням розрахованих розподілів густини струму пучка на мішені, що дає розміри зонда $2,30 \times 2,09 \text{ мкм}^2$ (2).

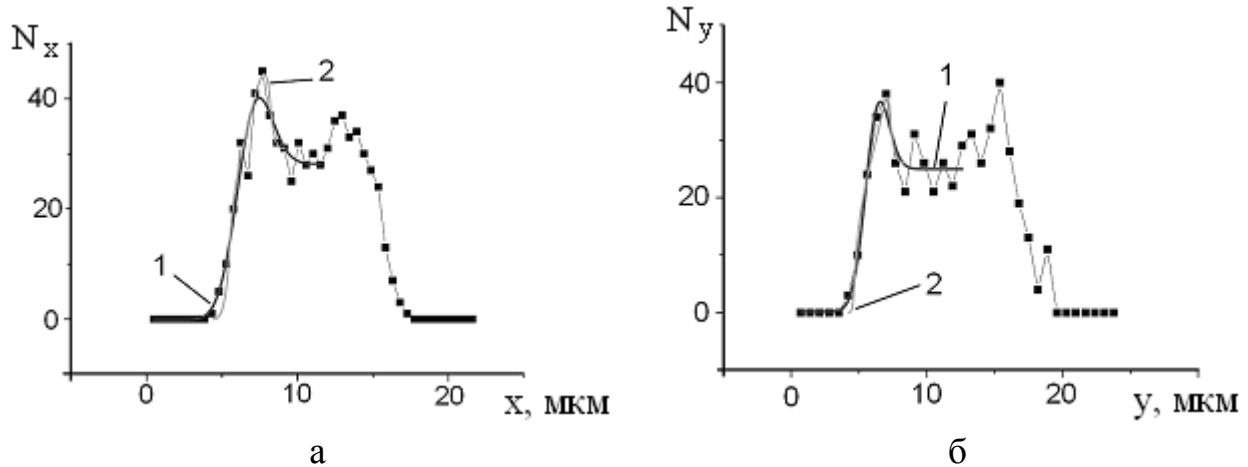


Рис. 7. Експериментальні характерні профілі інтенсивності виходу вторинних електронів: а – сканування в x – напрямі; б - сканування в y - напрямі

На основі проведеного порівняльного аналізу експериментальних даних і результатів чисельного моделювання необхідно зробити висновок, що створена модель, яка описує нелінійні процеси фокусування пучка заряджених частинок в ЗФС з інтегрованими дублетами МКЛ адекватна. Розрахункові параметри зонда відповідають параметрам, отриманим експериментально з точністю до 10 %.

ВИСНОВКИ

У результаті проведених у дисертаційній роботі теоретичних та експериментальних досліджень нелінійних процесів фокусування пучків іонів у зондоформуючій системі з інтегрованими дублетами магнітних квадрупольних лінз нового типу можна зробити такі висновки:

1. На основі створеної фізичної моделі фокусування пучка іонів у зондоформуючих системах ядерних мікрозондів обґрунтовано вибір типу ЗФС з розподіленими вздовж оптичного тракту дублетами МКЛ, розв'язано оптимізаційну задачу, де як цільову функцію вибрано величину аксептансу системи при заданих розмірах зонда на мішені, і визначено фізичні та геометричні параметри оптимізованої ЗФС з урахуванням яскравості пучка на рівні $7 \text{ пА}/(\text{мкм}^2 \text{мрад}^2)$ і величини енергетичного розкиду іонів в пучку $\Delta E/E = 10^{-3}$.

2. На підставі математичного моделювання конфігурації магнітних полів у новому прецизійному інтегрованому дублеті МКЛ з оптимізованою формою

полюсних наконечників, і проведених експериментальних досліджень структури магнітного поля лінз дублету встановлено, що співвісність лінз знаходиться у межах ± 10 мкм, однорідність максимального градієнта магнітного поля в зоні проходження пучка $\sim 10^{-4}$, при цьому паразитні мультипольні компоненти стосовно основної квадрупольної становлять: секступольна – не більш $0,004 \text{ см}^{-1}$, октупольна – не більш $0,001 \text{ см}^{-2}$, що є допустимим рівнем паразитних компонент і не є визначальним у процесі формування зонда.

3. Розроблена методика комплексного юстування елементів і систем мікрозонда та забезпечено узгодження фазових контурів аксептансу ЗФС і емітансу пучка в площині об'єктного коліматора за допомогою конденсорної системи, що складається з дублета електростатичних квадрупольних лінз. Експериментально визначені параметри живлення електростатичних лінз дублета, і відпрацьовані режими функціонування мікрозонда зі струмом ~ 100 пА при фіксованих розмірах зонда.

4. Результати теоретичних та експериментальних досліджень реалізовані в новій розподіленій системі формування іонного зонду на базі двох інтегрованих дублетів магнітних квадрупольних лінз з оптимізованими параметрами, яка є зондоформуючою системою в експериментальній установці ядерного скануючого мікрозонда.

5. За рахунок детектування виходу вторинних електронів в режимі сканування калібрувальної мідної сітки з періодом 157 комірок/мм визначено параметри просторової роздільної здатності ($2,3 \times 2,1$ мкм² при струмі 100 пА), які досягненні вперше у даному типі зондоформуючих систем, чим підтверджена справедливність на рівні 10% створеної теоретичної моделі системи фокусування пучка іонів. Порівняльний аналіз проведено на основі співставлення експериментальних інтегральних профілів інтенсивності виходу вторинних електронів і аналогічних розрахункових профілів, які обчислювались з використанням теоретичних розподілів густини струму пучка на мішені з урахуванням отриманих оптимізованих параметрів базової ЗФС.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Пономарев А.Г. Оптимизация параметров зондоформирующей системы ядерного сканирующего микронзонда на базе электростатического ускорителя «Сокол» / А.Г. Пономарев, **В.А. Ребров**, В.И. Мирошниченко, В.Е. Сторишко // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения (6). - 2008. - №4. - С. 269-273.

2. **Rebrov V.A.** The new design of magnetic quadrupole lens doublet manufactured from a single piece / V.A. Rebrov, A.G. Ponomarev, V.K. Palchik, N.G. Melnik // Nucl. Instr. and Meth. B. - 2007. – V. 260. - P. 34-38.

3. **Ребров В.А.** Прецизионная магнитная квадрупольная линза для ядерного сканирующего микронзонда на базе электростатического перезарядного ускорителя ЭГП-10 / В.А.Ребров, А.Г. Пономарев, Д.В. Магилин,

И.А. Белошапка, А.Б. Дудник, С.Н. Абрамович, Н.В. Завьялов, А.Г. Звенигородский, Е.В. Зимин // ЖТФ. – 2007.- Т. 77, Вып.3. - С. 76-79.

4. Пономарев А.Г. Протонный сканирующий микрозонд с интегрированной зондоформирующей системой / А.Г. Пономарев, **В.А. Ребров**, Н.А.Сайко, А.Б. Дудник, П.А. Павленко, А.А. Дрозденко, В.И. Мирошниченко, В.Е. Сторижко // Прикладная физика. – 2008. - №2. - С. 28-33.

5. Magilin D.V. Performance of the Sumy nuclear microprobe with the integrated probe-forming system / D.V. Magilin, A.G. Ponomarev, **V.A. Rebrov** et al. // Nucl. Instr. and Meth. B. - 2009. – V. 267. - P. 2046-2049.

6. Пономарьов О.Г. Патент України UA 75687, H01J 3/20, H01J 3/22 (2006.01). Мультиплет квадрупольних лінз / О.Г. Пономарьов, **В.А. Ребров**, Д.В. Магілін,; заявник та патентовласник ІПФ НАН України. - № 2004021145 (15.05.2006 Бюл. №5).

7. **Ребров В.А.** Особенности зондоформирующей системы ядерного сканирующего микрозонда на базе малогабаритного электростатического ускорителя «СОКОЛ» ИПФ НАН Украины: труды XVI Международной конференции по электростатическим ускорителям и пучковым технологиям, 6-8 июня, 2006 года, Обнинск, Россия / В.А. Ребров, А.Г. Пономарев, В.И. Мирошниченко, В.Е. Сторижко. - 2006. - С. 122-127.

8. Игнатьев И.Г. Ядерный сканирующий микрозонд на базе электростатического перезарядного ускорителя ЭПП-10 ВНИИЭФ: труды XV Международной конференции по электростатическим ускорителям и пучковым технологиям, 25-27 ноября, 2003 года, Обнинск, Россия / И.Г. Игнатьев, Д.В. Магилин, К.И. Мельник, С.Н. Мордик, А.Г. Пономарев, **В.А. Ребров**, А.И. Чемерис, С.Н. Абрамович, Н.В. Завьялов, А.Г. Звенигородский, Е.В. Зимин, Н.И. Москвин. - 2003. - С. 166-170.

9. Пономарев А.Г. Калибровка параметров пучка в ядерном сканирующем микрозонде ИПФ НАНУ: тезисы докладов Международного совещания «Микро и нанотехнологии с использованием пучков ионов, ускоренных до малых и средних энергий», 16-18 октября 2007 г., Обнинск, Российская Федерация / А.Г. Пономарев, **В.А. Ребров**, Н.А. Сайко, В.И. Мирошниченко, В.Е. Сторижко. – Москва, 2007. - С. 66.

10. Пономарев А.Г. Протонный сканирующий микрозонд с интегрированной зондоформирующей системой: тезисы докладов 8-го Всероссийского семинара «Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики», 29-31 мая 2007 года, Москва, Российская Федерация / А.Г. Пономарев, **В.А. Ребров**, Н.А. Сайко, А.Б. Дудник, П.А. Павленко, А.А. Дрозденко, В.И. Мирошниченко, В.Е. Сторижко. – Москва, 2007. - С. 76-77.

11. Пономарев А.Г. Характеристики ядерного сканирующего микрозонда с интегрированной зондо-формирующей системой: тезисы докладов VI Конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, 25-29 февраля, 2008 года, Харьков, Украина / А.Г. Пономарев, **В.А. Ребров**, Н.А. Сайко, Д.В. Магилин, К.И. Мельник, В.И. Мирошниченко, В.Е. Сторижко. – Харьков, 2008. - С. 24.

АНОТАЦІЯ

Ребров В.А. Зондоформуюча система ядерного скануючого мікрозонда на базі інтегрованих дублетів магнітних квадрупольних лінз. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем. – Сумський державний університет, Суми, 2010.

Дисертація присвячена дослідженню нелінійних процесів фокусування пучка заряджених частинок у зондоформуючій системі ядерного скануючого мікрозонда з інтегрованими дублетами магнітних квадрупольних лінз.

Локальність аналізу мікрозонда обумовлена роздільною здатністю системи і задається геометричними розмірами і величиною струму зонда, які визначили критерій і напрямок досліджень при оптимізації іонно-оптичних параметрів ЗФС мікрозонда. На основі чисельного моделювання нелінійних процесів фокусування заряджених частинок визначені фізичні й геометричні параметри оптимізованої ЗФС з урахуванням яскравості пучка і величини енергетичного розкиду іонів у пучку, який забезпечує електростатичний прискорювач.

Розроблено прецизійний інтегрований дублет магнітних квадрупольних лінз нового типу. Ядро і полюсні наконечники лінз дублета складають одне ціле, що дозволяє значно зменшити аберації, пов'язані з помилками юстування ЗФС у цілому. Проведені експериментальні дослідження структури магнітного поля лінз дублета, які показали необхідну співвісність лінз і те, що величина паразитних мультипольних компонент перебуває на допустимому рівні.

Експериментальне дослідження процесу фокусування пучка ґрунтується на детектуванні вторинних електронів при скануванні мідних каліброваних сіток. Порівняльний аналіз проведено на зіставленні експериментальних інтегральних профілів інтенсивності виходу вторинних електронів і аналогічних розрахункових профілів, які визначалися з використанням теоретичних розподілів густини струму пучка на мішені з урахуванням отриманих оптимізованих параметрів базової ЗФС. У результаті порівняльного аналізу показана адекватність теоретичної моделі, прийнятої для розрахунків зондоформуючої системи з інтегрованими дублетами магнітних квадрупольних лінз.

Ключові слова: пучок заряджених частинок, аксептанс, зондоформуюча система, ядерний скануючий мікрозонд, інтегрований дублет магнітних квадрупольних лінз, роздільна здатність, паразитні мультипольні компоненти поля.

АННОТАЦИЯ

Ребров В.А. Зондоформирующая система ядерного сканирующего микронзонда на базе интегрированных дублетов магнитных квадрупольных линз.– Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – физика приборов, элементов и систем. – Сумский государственный университет, Сумы, 2010.

Диссертация посвящена исследованию нелинейных процессов фокусировки пучка заряженных частиц в зондоформирующей системе ядерного сканирующего микронзонда с интегрированными дублетами магнитных квадрупольных линз.

Метод исследования нелинейной динамики пучков заряженных частиц в магнитных квадрупольных линзах, позволяет представить ионно-оптические свойства ЗФС в виде параметрической зависимости. Задача оптимизации на множестве определенных параметров принадлежит к классу задач нелинейного программирования, в которой ионно-оптические свойства ЗФС входят в ограничивающие условия. В качестве целевой функции выбрана величина аксептанса системы при заданных размерах зонда. Оптимизация процесса фокусировки пучка в ЗФС на базе двух прецизионных интегрированных дублетов МКЛ нового типа позволяет определить физические и геометрические параметры системы с учетом яркости пучка и величины энергетического разброса ионов, который обеспечивает электростатический ускоритель.

Интегрированный дублет магнитных квадрупольных линз новой конструкции позволяет уменьшить паразитные абберрации, связанные с ошибками юстирования ЗФС в целом. Проведенные экспериментальные исследования структуры магнитного поля линз дублета показали, что соосность линз находится в пределах величины 20 мкм, которая не приводит к ухудшению параметров зонда, а величина паразитных мультипольных компонент не превышает допустимых расчетных значений.

Определение размеров зонда осуществлялось в результате детектирования эмиссии вторичных электронов в режиме сканирования калиброванной медной сетки. Сравнительный анализ проведен на основании сопоставления экспериментальных интегральных профилей интенсивности выхода вторичных электронов и аналогичных расчетных профилей, которые вычислялись с использованием теоретических распределений плотности тока пучка на мишени с учетом полученных оптимизированных параметров базовой зондоформирующей системы. В результате показана адекватность теоретической модели, принятой для расчетов зондоформирующей системы с интегрированными дублетами магнитных квадрупольных линз.

Ключевые слова: пучок заряженных частиц, аксептанс, зондоформирующая система, ядерный сканирующий микронзонд, интегрированный дублет магнитных квадрупольных линз, разрешающая способность, паразитные мультипольные компоненты поля.

ABSTRACT**Rebrov V.A. Probe-forming system of scanning nuclear microprobe on the base of integrated doublets of magnetic quadrupole lenses– Manuscript.**

Thesis for a candidate of physics and mathematics sciences degree, by specialty 01.04.01 – physics of devices, elements and systems. – Sumy State University, Sumy, 2010.

The thesis is devoted to investigation of nonlinear processes of charged particle beam focusing in the probe-forming system of scanning nuclear microprobe with integrated doublets of magnetic quadrupole lenses.

A locality of microprobe analysis is directly related to the probe-forming system resolution and assigned by probe dimensions and its current which defined of merit function in the optimization task of ion-optical parameters of probe-forming system of nuclear microprobe and aims of investigation in this direction. The physical and geometrical parameters of optimized probe-forming system are obtained on the base of numerical simulation of nonlinear processes of charged particle beam focusing. The simulation is carried out taking into account of the beam brightness and the momentum spread which are provided for electrostatic accelerator “SOKOL”.

The integrated doublet of magnetic quadrupole lenses of new design is developed. The yoke and poles of doublet lenses were manufactured from a single piece of soft iron by means of wire cutting of electro-discharged machining. This design permits parasitic aberration enormously to be decreased related to alignment errors of probe-forming system in general. In result of the performed experimental investigations of magnetic field structure of doublet lenses are shown that lenses have required coincidence of lens axes and parasitic multipole components have tolerance limits.

The experimental investigations of beam focusing processes are based on the detecting of secondary electron emission under scanning of copper calibrated grids. Comparative analysis is carried out by means of comparing of experimental integral intensity profiles of secondary electron emission and analogous simulated profiles which are calculated with using theoretical beam current density distributions on the target with allowance for optimized parameters of base probe-forming system. In result of comparative analysis the adequacy of theoretical model taking in simulation of probe-forming system with integrated doublets of magnetic quadrupole lenses is shown.

Keywords: charged particle beam, acceptance, probe-forming system, scanning nuclear microprobe, integrated doublet of magnetic quadruple lenses, resolution, parasitic multipole field components.