

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

МОРДИК СЕРГІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

ОПТИМІЗАЦІЙНІ ДОСЛІДЖЕННЯ  
ІСННОГО ДЖЕРЕЛА ТА СКАНУЮЧОЇ СИСТЕМИ  
ЯДЕРНОГО МІКРОЗОНДУ

спеціальність 01.04.04 - фізична електроніка  
+ 01.04.01 - фізика приладів,  
елементів і систем

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Суми - 1997



Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті прикладної фізики  
Національної Академії наук України.

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук,

Лебідь Сергій Олексійович

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,

професор Куліш Володимир Васильович

кандидат фізико-математичних наук,

професор Муратов Володимир Іванович

Провідна організація: НТЦ Харківський фізико-технічний  
інститут

Захист дисертації відбудеться "22" травня 1997 р.  
о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої  
ради К22.01.01 при Сумському Державному університеті  
за адресою: 244007, м.Суми, вул. Римського-  
Корсакова, 2, ауд. 216 корп. ЕТ.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Сумського  
державного університету.

Автореферат розісланий "17" квітня 1997 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради

кандидат фізико-математичних наук

доцент

Опанасюк А.С.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми даної роботи зобумовлюється тим, що скануючий ядерний мікросонд (ЯМЗ), завдяки поєднанню високої просторової роздільної здатності (50 нм - 5 мкм), високої чутливості (0.1 - 1 ppm) з можливістю здійснення локального неруйнуючого аналізу структури та елементного складу матеріальних мікрооб'єктів, є одним з найбільш перспективних аналітичних інструментів як для мікроаналітичних досліджень в різних галузях людської діяльності, так і для сприяння розвитку сучасних іонно-пучкових технологій. Зокрема поєднання таких діагностичних методик ЯМЗ, як рентгенівське випромінювання збуджених часток (PIXE) для вимірювання концентрації неорганічних елементів, зворотнього Резерфордівського розсіювання (RBS) для дослідження органічної матриці та скануючої трансмісійної іонної мікроскопії (STIM) для отримання інформації про густину та структуру зразку, дозволило проводити комплексні дослідження як твердих тіл, так і біооб'єктів. Основною необхідною умовою для проведення більшості мікроаналітичних досліджень є забезпечення струму пучка на мішені ЯМЗ не нижче 100пА. Це приводить до того, що більшість дослідницьких колективів світу, які використовують ЯМЗ для проведення комплексного аналізу (зокрема PIXE аналізу), змушені обмежувати роздільну здатність приладу (розміри іонного пучка на мішені) на рівні 1 - 5 мкм. В зв'язку з цим актуальними стають оптимізаційні дослідження систем ЯМЗ з метою підвищення роздільної здатності та струму пучка на мішені ЯМЗ. Одним з перспективних напрямків вирішення цієї задачі є оптимізація традиційних та розробка нових високояскравих джерел іонів, оскільки яскравість та енергетична роздільна

ЛІБ ім. В. Стефаника  
АН України

здатність іонного джерела є одними з основних факторів, які обмежують просторову роздільну здатність ЯМЗ. При експлуатації сучасних скануючих ЯМЗ існує також проблема збільшення геометричних розмірів пучка на мішені при скануванні за рахунок неоднорідності керуючих полів скануючої системи, що приводить до погіршення роздільної здатності приладу. Тому задача оптимізації скануючої системи з точки зору підвищення роздільної здатності ЯМЗ є також однією з актуальних тем для дослідження.

Метою даної роботи було на основі оптимізаційних досліджень джерела іонів та скануючої системи ЯМЗ з'ясувати можливості підвищення роздільної здатності та струму пучка на мішені ЯМЗ.

Досягнення цієї мети потребувало вирішення таких задач:

- моделювання та розробка високоякісних ВЧ-джерел іонів для ЯМЗ;
- розробка автоматизованої вимірювальної системи іонно-оптичних характеристик іонного джерела та скануючої системи;
- проведення оптимізаційних досліджень традиційного та модернізованого на його основі ВЧ-джерела іонів;
- розробка та дослідження феромагнітної скануючої системи ЯМЗ.

Наукова новизна та практична цінність дисертації:

Розроблена, розрахована за допомогою ЕОМ та реалізована в ВЧ-джерелі іонів нова ефективна конфігурація маг-

нітного поля "дзеркального" типу. Застосування даної конфігурації в традиційному ВЧ-джерелі іонів дозволило значно (більш ніж в 3 рази) підвищити яскравість протонного пучка. Дане модернізоване ВЧ-джерело іонів може бути використане як інжектор ЯМЗ для подолання бар'єру 100 пА струму протонного пучка на мішені при роздільній здатності 1 мкм.

Проведені оптимізаційні дослідження традиційного та модернізованого ВЧ-джерела іонів з метою пошуку стабільних високояскравих режимів, для послідуячого їх використання в ЯМЗ.

Розроблена нова високошвидкісна феромагнітна скануюча система ЯМЗ з підвищеною однорідністю керуючого магнітного поля. Застосування даної системи в ЯМЗ дозволить покращити роздільну здатність приладу при скануванні пучка протонів по мішені.

Розроблена, виготовлена та введена в дію автоматизована вимірювальна система іонно-оптичних характеристик джерела іонів та скануючої системи. Дана система дозволяє проводити експресне тестування джерел іонів, які використовуються в ядерних мікрозондах та прискорювачах іонів.

На захист виносяться такі положення:

- модернізоване ВЧ-джерело іонів з підвищеною яскравістю пучка;
- результати оптимізаційних досліджень високояскравих режимів роботи традиційного та модернізованого ВЧ-джерел іонів;
- високошвидкісна феромагнітна скануюча система ЯМЗ;
- автоматизована вимірювальна система іонно-оптичних характеристик іонного джерела та скануючої системи ЯМЗ.

Основні результати роботи апробовані на: Міжнародній нараді МАГАТЕ по токамакам (Відень, 1988), Конференції по інженерним проблемам термоядерних реакторів (Ленінград, 1989), 10 нараді по ЗСУ (Обнінськ, 1991), Науково-технічній конференції "Техника и физика электронных систем и устройств" (Суми, 1995), Міжнародній конференції по технології та використанню ЯМЗ ICNMTA'96 (Альбукерк, 1996).

Особистий внесок дисертанта полягає в постановці, проведенні та обговоренні результатів оптимізаційних досліджень ВЧ-джерела іонів з "магнітною пасткою", високошвидкісної феромагнітної скануючої системи ЯМЗ, в розробці автоматизованої вимірювальної системи іонно-оптичних характеристик іонного джерела та скануючої системи ЯМЗ.

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 6 наукових праць.

Структура і об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох глав, заключення і переліку літератури (147 стор., 17 рис., 2 табл., 113 найм. цит. літ.).

#### ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ РОБОТИ

У першій главі на основі огляду теоретичних та експериментальних робіт по ядерно-мікрозондовій тематиці проведено аналіз вимог до іонного джерела та скануючої системи

ЯМЗ.

В 1-му параграфі розглянуті фактори, які визначають просторову роздільну здатність ЯМЗ. Існує багато факторів, які визначають просторову роздільну здатність ЯМЗ:

- колімація пучка;
- оптичні властивості фокусуєчої системи (коефіцієнти зменшення, хроматичні, сферичні, паразитичні аберації);
- характеристики іонного джерела та прискорювальної техніки (обмеження по яскравості та енергетичній роздільній здатності прискорювача);
- стабільності електротехнічних параметрів прискорювача в часі, точності виготовлення конструкції.

У випадку, коли відсутні втрати яскравості пучка по тракту прискорення основним параметром, який визначає просторову роздільну здатність та величину струму пучка на мішені ЯМЗ є яскравість іонного джерела. При заданному аксептансі фокусуєчої системи  $A$  та енергії пучка  $E$ , підвищення яскравості  $B$  в даному випадку приводить до пропорційного підвищення струму на мішені ЯМЗ  $I = B A E$ . Для зменшення розмірів пучка на мішені (підвищення роздільної здатності) в 10 разів потрібно підвищити яскравість в  $10^n$  разів ( $2 < n < 4$ ), в залежності від вкладу в розширення пучка тієї чи іншої аберації. Так наприклад, при реалізації проекту нового Гейдельбергського ЯМЗ виникла проблема малої яскравості ( $B < 0.2 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{рад}^{-2} \cdot \text{еВ}^{-1}$ ) іонного джерела (джерела Пеннінга). Не зважаючи на те, що даний ЯМЗ в режимі STIM має просторову роздільну здатність на рівні  $0.5 \times 0.5 \text{ мкм}^2$ , в режимі PIXE аналізу при струмі протонного пучка 100 пА вдається реалізувати роздільну здатність тільки на рівні  $3 \times 3 \text{ мкм}^2$ . Просторову роздільну здатність на рівні  $1.1 \times 0.9 \text{ мкм}^2$  реалізувати

лізовано при струмі пучка 1.5 пА. Таким чином для реалізації роздільної здатності 1 мкм в режимі РІХЕ аналізу, необхідно підвищувати яскравість джерела іонів для цього ЯМЗ як мінімум в 60 разів.

В 2-му параграфі розглянута можливість підвищення просторової роздільної здатності ЯМЗ за рахунок підвищення яскравості іонного джерела. Як інжектори електростатичних прискорювачів (ЕСП) в існуючих ЯМЗ найбільш часто використовуються ВЧ-джерела іонів. Цей тип джерела іонів має цілий ряд достоїнств: значний термін використання (більше 500 годин), стабільність іонно-оптичних параметрів, високий ступінь іонізації газу (до 85%), компактність. Сучасні ВЧ-джерела мають яскравість  $B = 1 - 8 \cdot 10^{-2} \cdot \text{рад}^{-2} \cdot \text{еВ}^{-1}$ . За допомогою таких стандартних (комерційних) ВЧ-джерел іонів, які працюють в режимі  $B = 5 \cdot 10^{-2} \cdot \text{рад}^{-2} \cdot \text{еВ}^{-1}$  в сучасному ЯМЗ можна отримати протонний пучок на мішені діаметром 1 мкм при струмі 100 пА. Існують реальні можливості підвищення яскравості ВЧ-джерела, оскільки теоретична межа яскравості при оптимальних параметрах джерела становить величину  $B = 450 \cdot 10^{-2} \cdot \text{рад}^{-2} \cdot \text{еВ}^{-1}$ , що на два порядки вище макси-мальної експериментально вимірної яскравості данного джерела іонів. Теоретична межа яскравості зумовлена тим, що при напрузі витягуючого електрода  $V_e > 2.5$  кВ зростають нестабільності плазми та зі зменшенням прискорюючого проміжка зростає ризик електричного пробоя. Втрати яскравості ВЧ-джерела обумовлені високим рівнем втрат і перезарядкою іонів в області витягуючого електрода та стіжок розрядної камери. Ці втрати можна значно знизити за допомогою модернізації існуючих ВЧ-джерел іонів ЯМЗ за рахунок використання в них спеціальних магнітних систем.

Задачу підвищення просторової роздільної здатності ЯМЗ можна також вирішувати за допомогою оптимізованих сучасних стандартних ВЧ-джерел іонів (критерій оптимальності - максимальна яскравість пучка іонів для стабільних режимів роботи джерела). Пошук високояскравих режимів роботи стандартного ВЧ-джерела може бути здійснений за допомогою установок для тестування джерел іонів. Просторову роздільну здатність ЯМЗ можна підвищити за рахунок зниження енергетичної роздільної здатності джерела іонів ЯМЗ (для ЕСП з великою стабільністю прискорюючої напруги  $\Delta U / U \sim 10^{-5}$ ).

В 3-му параграфі на основі принципів високошвидкісного збору та обробки інформації розглянуті перспективні напрямки розвитку скануючих систем ЯМЗ. Визначені можливості підвищення просторової роздільної здатності ЯМЗ за рахунок вдосконалення системи сканування. Специфікою використання скануючих систем в ЯМЗ є те, що із-за малої відстані між останньою лінзою фокусуючої системи та мішенню ЯМЗ (15 - 20 см), для забезпечення розміру кадра сканування (на рівні  $1 \times 1 \text{ мм}^2$ ) протонного пучка з енергією  $\sim 2.5 \text{ МеВ}$ , потрібні сильні однорідні магнітні чи електричні поля. Неоднорідність керуючого пучком поля приводить до погіршення просторової роздільної здатності ЯМЗ. Одним із найбільш перспективних напрямків розвитку скануючих систем ЯМЗ є розвиток феромагнітних скануючих систем (ФМСС). ФМСС мають ряд переваг перед альтернативними магнітними системами з "повітряними" осердями, електростатичними та механічними системами. ФМСС, завдяки сильному керуючому пучком магнітному полю, забезпечують розмір кадра сканування не менше ніж  $1 \times 1 \text{ мм}^2$  та частоту сканування від 1 Гц до 5 кГц (швидке сканування зводить до мінімуму теплове пошкодження

зразку). При цьому ФМСС можуть розміщуватися після останньої лінзи фокусувочної системи ЯМЗ (завдяки малим лінійним по осі Z розмірам).

У другій главі приведені результати оптимізаційних досліджень одного з стандартних ВЧ джерел іонів, яке використовується як інжектор ЕСП ЕГ-2.5 (м.Обнінськ) в області Мев енергій.

В 1-му параграфі описана установка для тестування джерел іонів, яка дозволяє здійснювати експресні вимірювання яскравості, енергетичної роздільної здатності, масового складу пучка іонів, який витягується із іонного джерела. Дана установка дозволяє проводити тестування джерел іонів, які використовуються в ЯМЗ, прискорювачах іонів, літографах. Дана установка дозволяє, зокрема, вирішувати задачу вибору найбільш перспективних для ЯМЗ високояскравих режимів роботи ВЧ-джерела іонів, який традиційно використовується як інжектор ЕСП ЯМЗ.

В 2-му параграфі описана автоматизована вимірювальна система емітансу пучка (АВСЕП), яка є однією з основних складових частин установки для тестування джерел іонів. Розроблена АВСЕП має ряд переваг перед альтернативними вимірювальними системами іонно-оптичних характеристик пучка. Дана система, завдяки автоматизованому збору і обробці даних та простоті конструкції емітансометра, дозволяє проводити експресні (за проміжок часу менший ніж 10 сек) вимірювання фазових характеристик, профілю струму, кутового розходження, емітансу та яскравості пучка іонів, який витягнутий з джерела іонів. Автоматичне інтегрування по Y та Y' частинок дротяним детектором, розгляд відносно малої кількості пікселів (640) поперечного січення пучка в поєднанні з автоматизованим збором та обробкою даних дозволя-

ють оперативно визначати емітанс та яскравість пучка.

В 3-му параграфі розглянута методика визначення емітанса та яскравості. Емітансні вимірювання проведено у відповідності з добре відомою методикою визначення емітанса пучка. У цьому випадку нормалізований емітанс  $\epsilon_{2n}$  визначається як:

$$\epsilon_{2n} = (v/c) \{1 - (v/c)^2\}^{-1/2} S, \quad \text{м рад} \quad (1)$$

де  $v$  - швидкість пучка іонів;

$c$  - швидкість світла;

$S$  - площа перерізу фазового об'єму, який зайнятий частками пучка.

Тоді нормалізована яскравість  $B_n$  визначається як:

$$B_n = 2I / (\epsilon_{2n})^2, \quad \text{А} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{рад}^{-2} \cdot \text{еВ}^{-1} \quad (2)$$

де  $I$  - 85,6% повного іонного струму пучка.

Для іонного пучка, який рухається в  $Z$ -напрямку з постійною нерелятивістською швидкістю, можна використовувати такі визначення енергетично нормалізованої яскравості  $B$  та енергетично нормалізованого емітансу:

$$B = 2I / (\epsilon_n \chi \epsilon_n \eta), \quad \text{А} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{рад}^{-2} \cdot \text{еВ}^{-1}, \quad (3)$$

$$\epsilon_n \chi = \pi \chi \chi' E^{1/2} \quad \text{и} \quad \epsilon_n \eta = \pi \eta \eta' E^{1/2}, \quad \text{А} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{рад}^{-2} \cdot \text{еВ}^{-1}, \quad (4)$$

В літературі  $B$  і  $\epsilon_n$  для простоти звичайно називають

"яскравістю" та "емітансом". Таким чином нормалізована яскравість  $B_n$  відрізняється від енергетично нормалізованої яскравості  $B$  на константу  $1/2 mc^2$ , де  $m$  - маса іона.

Площа перерізу фазового об'єму, який зайнятий частками  $S$  (а точніше проекції фазового об'єму пучка на площину  $XX'$ , для випадку аксіально-симетричного пучка) визначалася методом діафрагмування з частковим інтегруванням (методом вимірювання емітансу з багатощільовою діафрагмою та дротяним зондом).

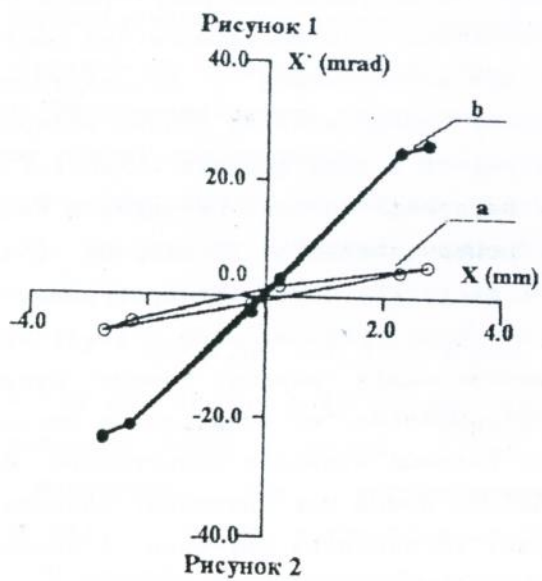
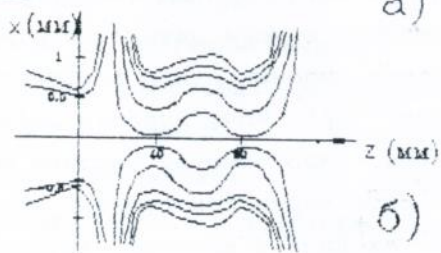
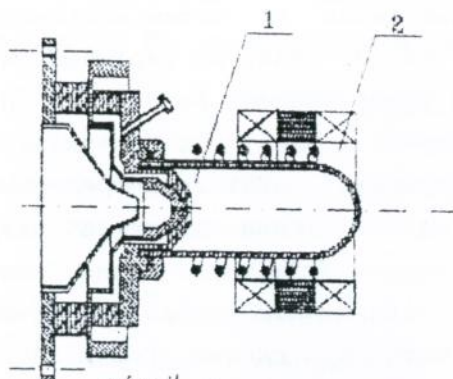
В 4-му параграфі описані результати досліджень стандартного ВЧ-джерела іонів. Експериментальні дослідження стандартного ВЧ-джерела, що проведені за допомогою описаної вище АВСЕП, показали, що існують слабострумні (1 - 10 мкА) стабільні високояскраві режими роботи стандартного ВЧ-джерела іонів з величиною енергетично нормалізованої яскравості протонного пучка  $B = 1 - 5.6 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{рад}^{-2} \cdot \text{еВ}^{-1}$ . Очевидно, що такі слабострумні режими роботи ВЧ-джерела мають певні переваги як більш економічні при роботі прискорювача в режимі ЯМЗ, коли на мішені необхідно зформувати мікропучок іонів з повним струмом 100 пА. На рис.1а наведена емітансна діаграма одного з таких режимів:  $B_n = 2.64 \cdot 10^9 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{рад}^{-2}$ ,  $B = 5.6 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{рад}^{-2} \cdot \text{еВ}^{-1}$  при  $\varepsilon_{2n} \approx 3.4 \cdot 10^{-8} \text{ м} \cdot \text{рад}$ ,  $I = 3.3 \text{ мкА}$ ,  $V = 10 \text{ кВ}$ ,  $V_e = 1.5 \text{ кВ}$ ,  $n_+ \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ Торр}$ ,  $R_{вч} \approx 40 \text{ Ом}$  (де  $p$  - тиск робочого газу в колбі,  $V_e$  - потенціал витягуючого електрода,  $R_{вч}$  - випромінювана ВЧ-потужність генератора). Даний режим був реалізований в стандартному ВЧ-джерелі в результаті попереднього спе-

ціального тренування та оптимізаційного пошуку значень величин  $I$ ,  $V$ ,  $V_e$ ,  $p$ ,  $P_{вч}$ , що варіювалися.

В третьій главі описані результати оптимізаційних досліджень ВЧ-джерела з магнітною "дзеркальною пасткою".

В 1-му параграфі приведені результати моделювання, розрахунків на ЕОМ і реалізації у ВЧ-джерелі іонів спеціальної конфігурації магнітного поля "дзеркального" типу. Пропонується підвищувати яскравість ВЧ-джерела за допомогою введення магнітної пастки ("дзеркального" типу) всередині розрядної камери джерела і створення спеціальної форми магнітних силових ліній в області витягуючого електрода (див. рис. 1б). Конфігурація магнітного поля розрахована таким чином, щоб основна частина магнітних силових ліній, що проходять через центральний меридіональний переріз індуктора, входила в апертуру витягуючого електрода. Така конфігурація магнітного поля була промодельована і розрахована на ЕОМ. За результатами розрахунків була запроєктована та виготовлена спеціальна магнітна система (див. рис. 1а, поз.2) для застосування в стандартному ВЧ-джерелі. Згадана система реалізована на основі чотирьох самарій-кобальтових магнітів і двох феритів кільцевої форми.

В 2-му параграфі описані результати експериментальних досліджень модернізованого ВЧ-джерела іонів з магнітною "дзеркальною пасткою". Основні випробування модернізованого ВЧ-джерела (див. рис. 1а, поз. 1, 2) були проведені в режимах відносно малих довгих іонних струмів ( $I = 1-10$  мкА). Було встановлено, що існує деяке оптимальне положення магнітної системи відносно витягуючого електрода, при якому яскравість пучка має значення, близьке до максимального. На рис. 2б наведена емісійна діаграма для одного з оптимізованих режимів роботи ВЧ-джерела з оптимальним роз-



міщенням магнітної системи:  $B_p = 9.5 \cdot 10^9 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{рад}^{-2}$ ,  $B = 20 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{рад}^{-2} \cdot \text{еВ}^{-1}$  при  $\epsilon_{2n} = 3.2 \cdot 10^{-8} \text{ м} \cdot \text{рад}$ , з  $I = 5.54 \text{ мкА}$ ,  $V = 9 \text{ кВ}$ ,  $V_e = 2.1 \text{ кВ}$ ,  $H^+$ ,  $p \sim 3 \cdot 10^{-3} \text{ Торр}$ ,  $P_{вч} \sim 40 \text{ Вт}$ ). Результати досліджень показали, що модернізоване ВЧ-джерело для режимів стабільної роботи при відносно малих повних струмах (1-10 мкА) є більш прийнятним для використання в ЯМЗ, оскільки у нього вища яскравість (більш ніж у 3 рази), ніж у стандартного ВЧ-джерела при тих же умовах експлуатації.

В 3-параграфі розглянуте багатокомпонентне ВЧ-джерело іонів з магнітною "дзеркальною пасткою", як можливий варіант подальшого розвитку високояскравих джерел іонів.

Завдяки введенню в ВЧ-джерело іонів з магнітною "дзеркальною пасткою" багатоканальної системи дозованої подачі газів (СДГ) та системи керування частотою, фазами і амплітудою ВЧ-поля (СУВЧ), можуть бути розширені його функціональні можливості в напрямку створення багатокомпонентних іонних пучків з регульованою яскравістю пучка та розбігу по імпульсу  $\Delta p/p$  іонів пучка за рахунок збудження в магнітній пастці джерела альфвенівських та іонно-циклотронних резонансних коливань для відповідної компоненти плазми.

В четвертій главі описані результати оптимізаційних досліджень високошвидкісної ФМСС ЯМЗ з підвищеною однорідністю керуючого магнітного поля.

В 1-му параграфі приведені результати моделювання і реалізації ФМСС. Завдяки конструктивним особливостям запропонованої ФМСС (спеціальної форми магнітопроводу, місцю розташування "робочого" отвору в феритових кільцях, формі "робочого" отвору, способу намотування та з'єднання кату-

шок зі струмом), вдається реалізувати ефект додавання магнітних потоків в магнітопроводі осердя, а також ефект підсилення напруженості магнітного поля всередині циліндричного зазора осердя. За рахунок підсилення центрального керуючого пучком магнітного поля за допомогою феромагнітного матеріалу забезпечується задане (не менше ніж 1 мм) відхилення пучка на мішені у варіанті реалізації післялінзової ФМСС. Матеріалом магнітопроводу вибраний ферит, оскільки у нього висока частота передачі струмних сигналів і висока магнітна індукція насичення ( $\sim 0.3$  Тл).

В 2-му параграфі описана експериментальна техніка, яка використовувалася для тестування ФМСС. Ступінь однорідності керуючого пучком магнітного поля ФМСС був досліджений за допомогою модифікованої установки для тестування джерел іонів. Після модифікації вище згадана установка дозволяє вимірювати основні іонно-оптичні параметри не тільки джерел іонів, але і систем сканування. Вимірювання розсіяних магнітних полів проводились за допомогою добре відомого магніто-зондового методу, амплітудні та фазочастотні характеристики за допомогою стандартних методик.

В 3-му параграфі описані результати експериментальних досліджень ФМСС. За допомогою вище згаданої установки були проведені вимірювання залежностей величини керованого відхилення  $dX_1$  та  $dX_2$  двох протонних пучків, які були вирізані із основного пучка за допомогою щільової діафрагми, від величини струму в котушках ФМСС. По цим залежностям визначалися величина індукції  $B$  та ступінь однорідності керуючого пучком магнітного поля  $u$ .

$$u = (B - B_0) / (B_0 \cdot x_2) = (dX_2 - dX_1) / (dX_1 \cdot x_2), \quad (5)$$

де  $x_2$  - відстань між центрами пучків на вході в ФМСС.

Як показали результати вимірювання, в зазорі циліндричної форми феритового осердя ( $r = 5$  мм) вдається отримати величину магнітного поля на рівні 0.04 - 0.1 Тл. Встановлено, що використання в ФМСС циліндричного зазору та магнітопроводу з фериту спеціальної форми дозволило знизити по відношенню до альтернативних ФМСС розсіяні магнітні поля по осі розповсюдження пучка не менш ніж 90%/мм та підвищити однорідність центрального керуючого пучком поля не менш ніж 0.1%/мм.

### ЗАКЛЮЧЕННЯ

В дисертації отримані наступні основні результати.

1. Розроблене високояскраве ВЧ-джерело іонів з магнітною "дзеркальною пасткою" для використання в ЯМЗ;

- розрахована на ЕОМ і реалізована у ВЧ-джерелі іонів нова, ефективна конфігурація магнітного поля, яка реалізує всередині розрядної камери ВЧ-джерела іонів магнітну пастку "дзеркального" типу, забезпечує мінімальну взаємодію замагнічених іонів, витягнутих з плазми, з витягуючим та прискорюючим електродом іонно-оптичної системи ВЧ-джерела, а також контрагування плазми в області витягуючого електрода;

- встановлено, що використання даної конфігурації в стандартному ВЧ-джерелі іонів дозволило значно (більш ніж у 3 рази) підвищити яскравість протонного пучка;

- встановлено, що ВЧ-джерело іонів з магнітною "дзеркальною пасткою" може бути використане в якості інжектора ЯМЗ для здолання бар'єру 100 пА струму протонного пучка при роздільній здатності 1 мкм;

- запропоновано до розгляду багатокomпонентне ВЧ-джерело іонів з магнітною " дзеркальною пасткою", як можливий варіант подальшого розвитку високояскравих джерел іонів з регульованою яскравістю та енергетичною роздільною здатністю.

2 Проведені оптимізаційні експериментальні дослідження стандартного та модернізованого на його основі ВЧ-джерела іонів з магнітною " дзеркальною пасткою":

- визначені слабострумні (1 - 10 мкА) стабільні високояскраві режими роботи модернізованого ВЧ-джерела іонів з величиною енергетично нормалізованої яскравості протонного пучка  $B = 1 - 20 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{рад}^{-2} \cdot \text{еВ}^{-1}$ ;

- визначені слабострумні (1 - 10 мкА) стабільні високояскраві режими роботи стандартного ВЧ-джерела іонів з величиною енергетично нормалізованої яскравості протонного пучка  $B = 1 - 5.6 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{рад}^{-2} \cdot \text{еВ}^{-1}$ ;

- визначені основні іонно-оптичні характеристики стандартного та модернізованого ВЧ-джерела іонів, які необхідні для розрахунку оптимального узгодження систем ЯМЗ.

3 Проведені оптимізаційні дослідження високошвидкісної ферромагнітної скануючої системи ЯМЗ з підвищеною однорідністю керуючого магнітного поля:

- встановлено, що використання в ФМСС циліндричного зазору та магнітопроводу із ферита спеціальної форми дозволяє суттєво знизити розсіяні магнітні поля по осі розповсюдження пучка та підвищити однорідність центрального керуючого пучком магнітного поля.

- встановлено, що розроблена ФМСС задовольняє основним вимогам, які ставляться до післялінзових скануючих систем ЯМЗ (забезпечує потрібний розмір кадру сканування (не менше ніж 1024x1024 пікселей); частоту сканування мік-

ропучка від 1 Гц до 5 кГц; можливість отримання потрібного закону відхилення мікропучка на мишені у відповідності з принципами високошвидкісного збору та обробки експериментальних даних ЯМЗ).

4 Розроблена, виготовлена та налагоджена автоматизована вимірвальна система емітансу пучка, яка дозволяє проводити експресні (за проміжок часу менший ніж 10 сек) вимірювання фазових характеристик, профіля струму, кутового розходження, емітансу та яскравості пучка іонів.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні скануючих ядерних мікрозондів з роздільною здатністю на рівні 1 мкм.

Головні результати дисертаційної роботи опубліковані у таких роботах:

1. Kalinichenko A.G., Khomenko V.G., Lebed S.A., Mordik S.N., Voznij V.I. Optimization of a RF ion source for production of a high-energy ion microbeam// Nuclear Instrument and Methods in Physics Research - 1997. - B122. - P. 274 - 277.

2. Возний В.І., Калініченко О.Г., Лебідь С.А., Мордик С.М., Хоменко В.Г.. Оптимізоване ВЧ-джерело іонів для ядерного мікрозонда// УФЖ. - 1997. - Т.42 ,N2. - С. 250 - 253.

3. Киров А.Д., Ручко Л.Ф., Мордик С.Н. и др. ТМР-токамак для исследования альфвеновского нагрева и ВЧ-поддержания тока// ВАНТ.- Сер. Термоядерный синтез. - 1989. - вып. 4. - С. 12 - 19.

4. Бражник В.А., Дымников А.Д., Лебедь С.А., Мордик

С.Н., Хоменко В.А., Сторишко В.Е.. Программа совместных исследований Сумского (Украина) и Мельбурнского (Австралия) микроаналитических центров//Труды X совещания по электростатическим ускорителям, 26-28 ноября 1991 г. - Обнинск, 1992. - С. 98 - 106.

5. Возный В.И., Калиниченко А.Г., Лебедь С.А., Мордик С.Н., Хоменко В.А.. Установка для тестирования и модернизации источников ионов//Тез. докл. н.-т. конф. "Техника и физика электронных систем и устройств", 19 мая 1995г. - Суми, 1995. - С. 107 - 109.

6. Заявка N B3B07536/02/2104 України, МПК<sup>5</sup> H01J27/16, Високочастотне джерело іонів/С.О.Лебідь, С.М.Мордик (Україна) - N 93007625; Заявлено 28.12.93; Пріоритет 28.12.93.

Роботу виконано при фінансовій підтримці ДКНТ України, грант № 6.7.3.

### АННОТАЦИЯ

Мордик С.Н. Оптимизационные исследования ионного источника и сканирующей системы ядерного микронзонда. На правах рукописи. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 - физическая электроника, 01.04.01 - физика приборов, элементов и систем. Сумской государственной университет, г.Сумы, 1997.

На основе оптимизационных исследований источника ионов и сканирующей системы ЯМЗ определены и реализованы некоторые возможности усовершенствования существующих ВЧ-ис-

точников и ферромагнитных сканирующих систем, позволяющие повысить разрешающую способность и ток пучка на мишени ЯМЗ. Рассчитана на ЭВМ и реализована в ВЧ-источнике ионов новая, эффективная специальная конфигурация магнитного поля, реализующая внутри разрядной камеры ВЧ-источника ионов магнитную ловушку "зеркального" типа. Установлено, что применение данной конфигурации в стандартном ВЧ-источнике ионов позволило значительно (более чем в 3 раза) повысить яркость протонного пучка. Установлено, что ВЧ-источник ионов с магнитной "зеркальной ловушкой" может быть использован в качестве инжектора ЯМЗ для преодоления барьера 100 пА тока протонного пучка при разрешающей способности 1 мкм. Проведены оптимизационные исследования стандартного и модернизированного на его основе ВЧ-источника ионов с магнитной "зеркальной ловушкой", с целью поиска стабильных высокояркостных режимов, для последующего их использования в ЯМЗ. Проведены оптимизационные исследования высокоскоростной ферромагнитной сканирующей системы ЯМЗ с повышенной однородностью управляющего магнитного поля с целью увеличения разрешающей способности сканирующего ядерного микрозонда. Разработана, изготовлена и отлажена автоматизированная измерительная система эмиттанса пучка, позволяющая производить экспрессные измерения фазовых характеристик, профиля тока, угловой расходимости, эмиттанса и яркости пучка ионов, извлекаемого из источника ионов.

#### ABSTRACT

Mordik S.N. Optimization research of the ion source and scanning system of the nuclear microprobe. Thesis for a Candidate's degree of Physical and Mathematical Sciences

on speciality 01.04.04 - physical electronics. Sumy State University, Sumy, 1997.

A magnet system ("mirror" type) consisting of permanent magnet and ferrite materials has been used in the modified RF ion source. Standard and modified RF ion sources have been investigated and optimized. It has been established that the addition of a mirror magnet system to the standard RF ion source provides a considerable (more than 3 times) increase in brightness. The modified RF ion source may be used in nuclear MP to overcome the barrier of 100 pA of proton current at 1  $\mu\text{m}$  resolution. Ferrite-cored magnetic scanning system with increased uniformity of the controlling magnetic field and small fringing magnetic fields has been developed and tested. Using FMSS of the proposed design allows MP resolution to be increased. A digitally controlled emittance measurement device has been designed, implemented and used expressly to determine emittances and brightness of the ion beam extracted from an ion source. This device has been used for investigation of the main ion optical characteristics of standard and modified RF ion sources and scanning system.

#### КЛЮЧОВІ СЛОВА

Ядерний мікрозонд, ВЧ-джерело іонів, феромагнітна скануюча система, яскравість, емітанс, емітансометр, магнітна пастка.

183 (H-1)

THE BANK OF AMERICA

MEMPHIS, TENNESSEE  
BRANCH OF THE BANK OF AMERICA  
MEMPHIS, TENNESSEE

MEMPHIS, TENNESSEE, MAY 1951  
MEMPHIS, TENNESSEE, MAY 1951  
MEMPHIS, TENNESSEE, MAY 1951

MEMPHIS, TENNESSEE

13560

Ав 37.413

МОРДИК СЕРГІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

ОПТИМІЗАЦІЙНІ ДОСЛІДЖЕННЯ  
ІОННОГО ДЖЕРЕЛА ТА СКАНУЮЧОЇ СИСТЕМИ  
ЯДЕРНОГО МІКРОЗОНДУ

---

Підписано до друку 17 квітня 1997 р.  
Формат набору 60x90 1/16 умов. арк.  
Тираж 100 екз.

---

СумДУ 244007, Суми, Р.-Корсакова, 2

---

Друкарня ВО "Електрон"

244007, Суми, Р.-Корсакова, 2