

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Пономарьова Ганна Олександрівна

УДК 537.534.3

**КВАДРУПОЛЬНІ ЗОНДОФОРМУЮЧІ СИСТЕМИ
ІЗ ВІЛЬНИМИ ПАРАМЕТРАМИ
ФОКУСУЮЧИХ ПОЛІВ**

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Сумському державному університеті

Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор фізико-математичних наук, професор
Воробйов Геннадій Савелійович,
Сумський державний університет,
професор кафедри наноелектроніки.

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

доктор технічних наук, професор
Писаренко Леонід Дмитрович,
Національний технічний університет України «КПІ»,
завідувач кафедри електронних приладів та
пристроїв.

Захист відбудеться «_____» _____ 20__ р. о ____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.02 Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корпус _____, ауд. _____.

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

Автореферат розісланий «_____» листопада 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

О. О. Рибалко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Підвищення функціональних можливостей і швидкодії систем електронної техніки може досягатися за рахунок збільшення щільності розміщення і зменшення розмірів їх деталей. Тому на даний момент елементна база, що ґрунтується на використанні різноманітних низькорозмірних структур, є найбільш перспективною для електронної техніки нових поколінь і мікроелектромеханічних систем (MEMS). Такі компоненти не можуть бути отримані за допомогою планарних технологій, в основу яких покладено процес літографії (фотолітографії), що пов'язано з принциповими обмеженнями, викликаними розсіюванням фотонів на поверхневих шарах матеріалів. Тому необхідно шукати інші шляхи реалізації такого типу поставленого завдання, створюючи нові види апаратурних комплексів, які могли б забезпечити якісну, швидку та порівняно дешеву технологію виготовлення нанорозмірних структур. У результаті раніше проведених досліджень була встановлена перспективність застосування нового апаратурного комплексу – ядерного скануючого мікрозонда (ЯСМЗ) як альтернативної заміни фотолітографії.

Серед фізичних принципів, які можуть бути покладені в основу розвитку літографічної технології фабрикації тривимірних мікро- та нанорозмірних структур, на даний час розглядається принцип експонування резистивних матеріалів сфокусованими пучками протонів мегаелектронвольтних енергій. Пучкова протонна літографія, в якій застосовується ЯСМЗ, у зарубіжній літературі має назву proton beam writing (PBW). Особливий інтерес до розвитку цієї технології можна пояснити властивостями взаємодії прискорених протонів із речовиною. По-перше, розсіяння протонів у даному випадку є значним порівняно з електронами в процесі проникнення на одну й ту саму глибину. По-друге, глибина їх проникнення в матеріал може контролюватися за допомогою зміни енергії протонів. Рівномірна віддача енергії від протонів до електронів атомів матеріалу, що опромінюється, незначний ефект близькості внаслідок низької енергії вторинних електронів дозволяють створювати тривимірні малорозмірні структури з високим аспектним співвідношенням і гладкими вертикальними стінками. Завдяки цим особливостям технологія PBW має необхідні умови продуктивності та точності наноштампувальної літографії, яка застосовується для масового виробництва низькорозмірних структур, розміщених на великій площі з високою щільністю. Із застосуванням цієї технології можливе вирішення завдань виготовлення відбивних, стрічкових, нанесених на шар діелектрика дифракційних решіток із заданим періодом для терагерцового діапазону частот. На цей час відпрацьовані технологічні процеси для створення малорозмірних структур у мікрооптиці, мікрофотоніці, приладах

MEMS, мікроструминних системах для детектування та вивчення біологічних клітин із високою чутливістю.

Прогрес у розвитку технології РВW пов'язаний із забезпеченням високої густини струму сфокусованого пучка протонів і зменшенням його розмірів на поверхні експонованого матеріалу. У зв'язку з великою магнітною жорсткістю протонного пучка для його фокусування в ЯСМЗ використовують зондоформуючі системи (ЗФС) на основі мультиплетів магнітних квадрупольних лінз (МКЛ). Дослідження, спрямовані на поліпшення характеристик ЯСМЗ, були в основному пов'язані з оптимізацією процесів формування пучка в квадрупольних зондових системах за рахунок вибору геометричних параметрів розміщення МКЛ уздовж осі системи та збільшення кількості лінз у ЗФС. При цьому кількість застосованих незалежних джерел живлення МКЛ залишалася незмінною – такою, що дорівнює двом, це відповідає мінімальній їх кількості для забезпечення стигматичного фокусування. Для такого класу ЗФС зменшення розмірів сфокусованого пучка супроводжується значним зниженням густини струму. Підвищення значення густини струму дозволяє прискорити процес фабрикації малорозмірних структур, що безпосередньо пов'язано з ефективністю технології та її вартістю. Тому дослідження нових ЗФС із вільними параметрами фокусуєчих полів, які задаються додатковими джерелами живлення МКЛ і застосуванням нових типів квадруполів із змінним профілем поздовжнього розподілу магнітного поля, спрямованих на підвищення густини струму сфокусованого пучка, є актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана в науково-дослідній лабораторії «Нові технології у фізиці та техніці НВЧ» кафедри наноелектроніки Сумського державного університету. Тематика роботи відповідає науковим програмам Міністерства освіти і науки України з фундаментальних досліджень. Основні результати роботи увійшли до звітів держбюджетних тем:

- «Фізика формування потоків заряджених частинок у приладах для діагностики матеріалів атомної енергетики» (2009–2011 рр.). Державний реєстраційний номер теми 0109U001378;

- «Електромагнітні явища у низьковимірних планарних періодичних металодіелектричних системах міліметрового-інфрачервоного діапазонів хвиль» (2012–2014 рр.). Державний реєстраційний номер теми 0112U001379.

Мета і завдання дослідження. Метою досліджень є визначення впливу вільних параметрів фокусуєчих полів у вигляді додаткових джерел живлення магнітних квадрупольних лінз і кутів конусності апертури квадруполів на густину струму в зонді для систем формування прецизійних пучків іонів MeV-х енергій.

Для досягнення поставлених цілей у роботі вирішені наступні завдання:

- розвинено теорію нелінійної динаміки пучків іонів у зондоформуючих системах квадрупольних лінз із конусною апертурою;
- розвинено метод оптимізації процесу формування пучка іонів MeV-х енергій у квадрупольних зондоформуючих системах із вільними параметрами фокусуємих полів на основі критерію максимального зведеного аксептанса;
- визначено вплив кількості квадрупольних лінз, геометрії їх розміщення та величини робочої відстані на густину іонного струму в зонді для запропонованих нових типів ЗФС;
- проведено порівняльний аналіз величини густини іонного струму в зонді для конвенціональних зондоформуючих систем і систем із вільними параметрами фокусуємих полів;
- проведено експериментальні дослідження процесу формування прецизійного пучка протонів MeV-х енергій за допомогою квадруплета магнітних квадрупольних лінз із індивідуальними джерелами живлення та визначено кореляцію теоретичних розрахунків відносно експериментальних результатів.

Об'єкт дослідження – фізичні процеси формування пучків заряджених частинок у квадрупольних зондоформуючих системах.

Предметом дослідження є розподіл густини струму зонда у квадрупольних системах із вільними параметрами фокусуємих полів.

Методи дослідження. Для розв'язання нелінійних траєкторних рівнянь руху заряджених частинок застосований матричний метод – метод матрицантів. Поздовжнє розподілення крайового магнітного поля у квадрупольних лінзах подається у вигляді моделі з різкою відсічкою, що дозволяє отримати аналітичне розв'язання рівнянь руху заряджених частинок у матричному методі. При розв'язанні задачі оптимізації процесу формування пучка іонів MeV-х енергій у квадрупольних зондоформуючих системах із вільними параметрами фокусуємих полів застосований модифікований числовий метод градієнтного спуску. Для вимірювання струму пучка застосовують циліндр Фарадея й інтегратор струму. Розподіл густини струму визначається на підставі детектування виходу вторинних електронів під час сканування протонним зондом каліброваних мікрометричних мідних сіток. Обробка профілів виходу вторинних електронів при визначенні параметрів розподілу густини струму в зонді здійснюється за допомогою методу математичної підгонки Левенберга-Марквардта.

Наукова новизна одержаних результатів:

- запропоновано нові квадрупольні зондоформуючі системи із вільними параметрами, які відрізняються застосуванням додаткових джерел живлення лінз і квадруполів із конусною апертурою;

- розвинено теорію нелінійної динаміки пучків іонів у зондоформуючих системах квадрупольних лінз із конусною апертурою;
- уперше теоретично досліджено залежність густини іонного струму в зонді від вільних параметрів у вигляді додаткових джерел живлення і кутів конусності лінз у системах із декількох квадрупольних лінз і показано існування максимуму густини струму, яка в кілька разів перевищує аналогічну величину в конвенціональних системах;
- уперше експериментально показано трикратне збільшення густини струму в зонді при формуванні пучка протонів у системі з чотирьох магнітних квадруполів з індивідуальними джерелами живлення лінз.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Зондоформуюча система із чотирьох магнітних квадрупольних лінз із індивідуальними джерелами живлення застосована в установці протонної літографії в Інституті прикладної фізики Національної академії наук України (ІПФ НАНУ), м. Суми.

2. Системи із трьох і п'яти магнітних квадрупольних лінз із додатковими джерелами живлення можуть бути використані в лабораторіях, де розробляється технологія протонної літографії: Центр іонно-пучкових застосувань – CIBA (Сінгапур); Інститут ядерних досліджень (Дебрецен, Угорщина); Інститут технологій – Shibaura Institute of Technology (Токіо, Японія). Застосування зондоформуючих систем із вільними параметрами дозволяє в кілька разів прискорити процес фабрикації мікро- та наноструктур, що пропорційно зменшує енерговитрати та здешевлює кінцевий виріб.

3. Застосування магнітних квадрупольних лінз із конусною апертурою в системах формування зонда відкриває можливість розроблення квадруполів на постійних магнітах, оскільки зміна кута конусності призводить до зміни оптичної сили лінзи та забезпечує можливість юстування системи, що в кінцевому підсумку дає можливість відмовитися від джерел струму живлення лінз і також знижує енергетичні витрати.

Особистий внесок здобувача. Результати дисертаційної роботи були отримані як особисто здобувачем, так і у співпраці з колегами (Воробйов Г. С., Дрозденко О. О., Барсук І. В., Магілін Д. В., Мірошніченко В. І. та ін.). Автор брала участь у постановці завдання, виборі методів дослідження, теоретичних та експериментальних дослідженнях, обговоренні результатів, написанні статей; вирішувала завдання, поставлені керівником, вносила свої корективи та доповнення. Отримані результати обговорювалися та аналізувалися спільно з науковим керівником проф. Воробйовим Г. С. Результати дисертаційної роботи, опубліковані у співавторстві або особисто здобувачем, подані в таких статтях [1–5] і тезах доповідей [6–11]. Роботи [6; 10] присвячені огляду перспектив розвитку методу отримання нанорозмірних структур PBW, де автором проведено аналіз літературних джерел у даному напрямку. У роботах [1; 2; 7; 8]

особисто здобувачем було проведено порівняльний аналіз ЗФС ЯСМЗ ПФ НАНУ з квадруплетом МКЛ, який має індивідуальні джерела живлення лінз, і було показано, що запропонована оптимізація процесу зондоформування в квадруплеті МКЛ з індивідуальними джерелами живлення може істотно поліпшити параметри такої ЗФС; проведено теоретичні розрахунки експериментальної установки на базі квадруплета МКЛ із індивідуальними джерелами живлення лінз та зроблено аналіз результатів. У статті [3] автором виконано викладки в матричному методі розв'язання диференціальних рівнянь руху іонів у магнітній квадрупольній лінзі з конусною апертурою та проведено порівняння іонно-оптичних властивостей еквівалентних квадрупольних лінз із конічною і циліндричною апертурами, оброблено результати та зроблено висновки. У роботах [4; 9] здобувач сформулювала та розв'язала оптимізаційну задачу формування іонного пучка в зондових системах, що належить до задачі нелінійного програмування, із застосуванням мультиплетів магнітних квадрупольних лінз із додатковими джерелами живлення у вигляді вільних параметрів; установила залежність густини струму в зонді від геометричних параметрів та кількості лінз у ЗФС із вільними параметрами. У роботах [5; 11], де подані результати експериментального дослідження формування прецизійного пучка протонів у зондовій системі з індивідуальними джерелами живлення чотирьох МКЛ і встановлена кореляція числових та експериментальних результатів, автор брала участь в експерименті та обробці результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати доповідалися на таких національних і міжнародних конференціях, семінарах і форумах: XVIII Міжнародній конференції з електростатичних прискорювачів та пучкових технологій (м. Обнінськ, 2008 р.); II Міжнародній науковій конференції «Електронна компонентна база. Стан та перспективи розвитку» (м. Кацивелі, 2009 р.); Дев'ятому всеросійському семінарі «Проблеми теоретичної та прикладної електронної й іонної оптики» (м. Москва, 2009 р.); 6-й Міжнародній молодіжній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій РТ-2010» (м. Севастополь, 2010 р.); III Міжнародній науковій конференції «Функціональна компонентна база мікро-, опто- та наноелектроніки» (м. Кацивелі, 2010 р.); The 12th and 13th international conferences on nuclear microprobe technology and application (Leipzig, 2010; Lisbon, 2012); науково-технічній конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету електроніки та інформаційних технологій (м. Суми, 2010 р., 2012 р., 2013 р.); Міжнародній конференції молодих учених та аспірантів «ІЕФ-2011» (м. Ужгород, 2011 р.); IX конференції з фізики високих енергій, ядерної фізики та прискорювачів (м. Харків, 2011 р.); XVI Міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті» (м. Харків, 2012 р.); Міжнародній конференції студентів і молодих

науковців із теоретичної та експериментальної фізики «ЕВРИКА-2012» (м. Львів, 2012 р.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи відображені в 11 публікаціях: 5 статтях у провідних фахових наукових журналах [1–5], 3 з яких входять до науко-метричної бази даних Scopus [1; 2; 5]; та в 6 тезах доповідей на національних і міжнародних конференціях.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Вона містить 146 сторінок, із яких 113 сторінок основного тексту, 48 рисунків та 3 таблиці, у тому числі 16 рисунків та 3 таблиці на окремих 14 сторінках, список використаних джерел із 126 найменувань на 14 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено аргументи щодо актуальності дисертаційної роботи, сформульовано мету й основні завдання дослідження, визначено об'єкт і предмет дослідження, показано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено зв'язок роботи з науковими програмами і темами, висвітлено особистий внесок здобувача, наведено інформацію про апробацію результатів, публікації та загальну структуру дисертації.

Перший розділ «Системи формування прецизійних пучків заряджених частинок у літографічних технологіях високої роздільної здатності» присвячено аналізу джерел літератури за темою дисертації.

Розглянуто процеси опромінення резистивних матеріалів сфокусованими пучками заряджених частинок. Основні переваги експонування пучками легких іонів порівняно з електронами та важкими іонами полягають у такому. Рівномірний розподіл дози за глибиною визначається властивостями іона практично рівномірної віддачі енергії під час свого руху. Із втратою енергії та зменшенням швидкості руху іона ймовірність взаємодії з ядрами атомів матеріалу підвищується, що призводить до викривлення траєкторії іона в кінці свого шляху. Головною перевагою пучків легких іонів з енергією в декілька МеВ порівняно зі сфокусованими пучками електронів є практична відсутність ефекту близькості. Енергія іона є одним із головних параметрів, які впливають на їх глибину проникнення для певного матеріалу. Це є важливою властивістю, яка дозволяє створювати багаторівневі тривимірні об'єкти в резистивних матеріалах із високою якістю бічних поверхонь.

Сучасні апаратурні комплекси ЯСМЗ можуть бути застосовані в технології РВW, в якій за допомогою прецизійного пучка протонів створюють наноструктури. Перспективність розвитку такого нового методу полягає у збільшенні густини струму в зонді та роздільної здатності ЯСМЗ, які забезпечать істотне прискорення процесу та точність нанофабрикації.

На основі фізичних принципів формування прецизійних пучків протонів MeV-х енергій як фокусуєчих елементів у зондових системах на даний час найбільш прийнятними є МКЛ. На їх основі створюються різні конфігурації ЗФС, які є основним предметом багатьох досліджень. Проте до цього часу не знайдений однозначний метод оптимізації процесів формування пучка в нелінійних квадрупольних ЗФС ЯСМЗ. Питання збільшення густини струму та роздільної здатності пов'язані із суперечливою задачею, яка полягає в тому, що при зростанні значень коефіцієнтів зменшення ЗФС значно збільшуються коефіцієнти аберацій.

Сучасні шляхи удосконалення ЗФС на основі мультиплетів МКЛ ґрунтуються на збільшенні додаткових параметрів, а саме: кількості лінз у системі та вибору оптимального їх розміщення уздовж оптичної осі. Однак раціональність такого підходу ставиться під сумнів через те, що розрахунок таких систем ускладнюється та призводить до додаткових труднощів при керуванні всіма фізичними процесами та експериментальній їх реалізації. Тому в цій роботі пропонується використовувати у вигляді додаткових параметрів незалежні джерела живлення лінз. Інший шлях удосконалення ЯСМЗ полягає у створенні ЗФС із малою робочою відстанню, які можуть забезпечити великі значення коефіцієнтів зменшення при допустимих абераціях. Вирішення такого завдання може бути реалізоване за рахунок модернізації МКЛ, в якій змінюється поздовжнє розподілення градієнта магнітного поля. Такого результату можна досягти при зміні конструкції полюсних наконечників МКЛ за допомогою додаткового параметра у вигляді кута конусності апертури лінзи.

Другий розділ «Розвиток методів моделювання процесів формування пучка іонів у зондових системах магнітних квадрупольних лінз із вільними параметрами фокусуєчих полів» присвячений питанню розподілу магнітних полів та їх впливу на заряджені частинки в різних типах квадрупольних лінз: із циліндричною та конічною апертурами. Запропоновано удосконалення методу оптимізації процесу формування пучка іонів у зондоформуючих системах із вільними параметрами фокусуєчих полів.

Магнітне поле у квадрупольній лінзі в області проходження пучка може бути подано скалярним магнітним потенціалом у вигляді

$$u(x, y, z) = 2W_2(z)xy - W_2''(z)x^3y/6 - W_2''(z)xy^3/6 - \dots,$$

де $W_2(z)$ – головна квадрупольна компонента розподілу поля уздовж оптичної осі МКЛ.

Зазначимо, що потенціал виражається у вигляді розкладання в ряд за поперечними координатами відхилення іонів пучка від осі. Залежність від поздовжньої координати пов'язана з розподілом основної квадрупольної компоненти, яка визначається профілем розподілу і величиною поперечного градієнта магнітного поля.

Для подальшого аналізу процесів формування пучків у системах магнітних квадрупольних лінз розглянуті модельні розподіли полів у вигляді прямокутної моделі для лінз із циліндричною апертурою та модель обернено-ступінчастої функції з різкою відсічкою для лінз із кінчною апертурою.

Конвенціональні типи магнітних квадрупольних лінз являють собою чотириполюсні електромагніти, твірна полюсів яких паралельна осі лінзи. Схематично геометрія полюса в такій лінзі подана на рис. 1 а. Із цього рисунка бачимо, що крайня точка полюса на всій геометричній довжині довжини лінзи L у будь-якому поперечному перерізі до осі z знаходиться на однаковій відстані r_a , яка визначає радіус апертури лінзи в цьому перерізі. Функціональна залежність поздовжнього розподілу поля для прямокутної моделі має вигляд

$$\varphi(z, z_s, L_{eff}) = [\theta(z - z_s) - \theta(z - z_s - L_{eff})],$$

де z_s, L_{eff} – координата початку ефективного поля і довжина ефективного поля МКЛ відповідно;

$$\theta(z) = \begin{cases} 0, & z < 0 \\ 1, & z \geq 0 \end{cases} \text{ – ступінчаста функція.}$$

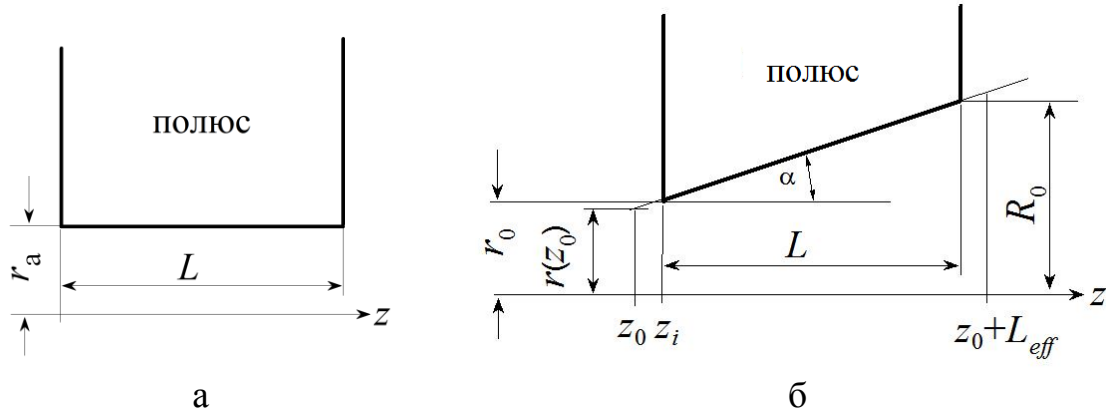


Рис. 1. Поздовжня геометрія полюса квадрупольної лінзи: а – із циліндричною апертурою; б – із кінчною апертурою

Поздовжня геометрія квадрупольної лінзи з кінчною апертурою показана на рис. 1 б, де r_0, R_0 – радіуси апертури лінзи на вході та виході. Розподіл градієнта поля на осі лінзи можна подати у вигляді модельної аналітичної залежності:

$$g_1(z, z_i) = G \cdot \varphi(z, z_i),$$

де G – величина поперечного градієнта поля, що пов'язана з величиною струму котушок, які живлять полюси;

$$\varphi(z, z_i) = \frac{1}{[1 + b(z - z_i)]^2};$$

$$b = (R_0 - r_0) / (L \cdot r_0) = \text{tg}(\alpha) / r_0;$$

α – кут конусності апертури лінзи.

Траєкторні рівняння руху пучка заряджених частинок у магнітному полі з прямолінійною осью траєкторією мають вигляд:

$$x'' = \frac{q}{p_0(1+\delta)} (y'B_z - B_y - x'^2 B_y + x'y'B_x) \sqrt{1+x'^2+y'^2},$$

$$y'' = \frac{q}{p_0(1+\delta)} (B_x - x'B_z - x'y'B_y + y'^2 B_x) \sqrt{1+x'^2+y'^2},$$

де q – заряд частинки; p_0 – середній імпульс у пучку; δ – відхилення імпульсу частинки від середньої величини; B_x , B_y , B_z – складові магнітного поля; x , y – координати частинки, які задають її відхилення від осі z ; x' , y' – кутові координати, які задають напрямок руху частинки відносно осі z .

Для розв'язання цих рівнянь траєкторний метод є більш універсальним, але вимагає великих часових витрат. Тому найбільш прийнятним методом у задачах оптимізації процесів формування пучка в квадрупольних зондоформуєчих системах із вільними параметрами фокусуєчих полів є матричний метод. Для розв'язання нелінійних траєкторних рівнянь руху заряджених частинок матричним методом для вибраної моделі поздовжнього розподілу поля в МКЛ із кінчною апертурою отримано аналітичний вигляд матриці перетворення фазових координат частинок пучка – матрицанта.

Ураховуючи умови створення наноструктур, критерій якості ЗФС повинен ґрунтуватися на принципах забезпечення максимального струму пучка при заданих розмірах зонда на мішені. Відповідно до цього найбільш прийнятним методом оптимізації є метод, що ґрунтується на критерії максимального аксептанса системи. Ґрунтуючись на цьому критерії, формалізована задача оптимізації процесу формування пучка в квадрупольних системах із вільними параметрами фокусуєчих полів, пов'язаними з додатковими джерелами живлення та кутами конусності магнітних квадрупольних лінз, записується у такому вигляді:

$$\Omega^*(d) = \max_{r_x, r_y, R_x, R_y, \tau} (\Omega(\tau, d)), \quad \Omega(\tau, d) = \text{vol}(\Theta(\tau, d)), \quad |G_i| \leq G_{i\max}, \quad |\alpha_j| \leq \alpha_{j\max},$$

$$h_x(G_{K-1}, G_K, \tau) = 0, \quad h_y(G_{K-1}, G_K, \tau) = 0, \quad \Theta = \{(x_0, y_0, x'_0, y'_0, \delta_0)\},$$

$$|x_0| < r_x, \quad |y_0| < r_y, \quad \frac{-R_x - x_0}{a_0} \leq x'_0 \leq \frac{R_x - x_0}{a_0}, \quad \frac{-R_y - y_0}{a_0} \leq y'_0 \leq \frac{R_y - y_0}{a_0},$$

$$\{|F_x(z_t)| \leq d/2, \quad |F_y(z_t)| \leq d/2, \quad |\delta_0| \leq \delta_{\max}/2\},$$

де Ω – аксептанс системи; d – розмір квадратної плями на мішені, в яку сфокусований пучок; r_x , r_y – розміри прямокутного об'єктного коліматора; R_x , R_y – розміри прямокутного кутового коліматора; $\tau = \{G_{K-1}, G_K, a_1, \dots, a_N, g, L_{1,eff}, \dots, L_{N,eff}, \gamma\}$ – вектор параметрів, від яких залежить формування пучка квадрупольною ЗФС; N – кількість МКЛ у

системі; K – кількість джерел живлення; $a_{1,\dots,N}$ – відстань між лінзами; g – робоча відстань (відстань від межі поля останньої лінзи до поверхні мішені); $\gamma = \{G_i, \alpha_j\}$, $i = 1, \dots, K-2$ – кількість вільних параметрів, пов'язаних із додатковими джерелами живлення; $j = 1, \dots, N$ – кількість вільних параметрів, пов'язаних із кутом конусності лінз; $\Theta(\tau, d)$ – фазова множина іонів пучка, сформована за допомогою об'єктного та кутового коліматорів; h_x, h_y – коефіцієнти стигматизму; $F_x(z) = x(z_t)$, $F_y(z) = y(z_t)$ – перетворення фазових координат іонів; δ_{\max} – максимальний розкид за імпульсом іонів у пучку.

У третьому розділі «Оптимізація процесу формування пучка різними типами зондових систем магнітних квадрупольних лінз» подані результати теоретичного аналізу іонно-оптичних характеристик різних типів ЗФС на основі мультиплетів магнітних квадрупольних лінз із вільними параметрами фокусуєчих полів. У першому випадку вільними параметрами є додаткові джерела живлення лінз підсистеми узгодження, які забезпечують процес формування пучка за допомогою системи коліматорів і підсистеми фінального фокусування. У другому випадку розглянуто вплив конусності МКЛ на фокусуєчі властивості ЗФС на базі дублета та триплету.

У ЗФС, яка складається з декількох МКЛ, мінімальна кількість джерел живлення дорівнює двом, що пов'язано із забезпеченням стигматичного фокусування. Додаткові джерела живлення дозволяють ввести вільні параметри фокусуєчих полів. На рис. 2 показана схема розміщення МКЛ у мультиплеті, що складається з N лінз і має в загальному випадку K додаткових джерел живлення, де $K \leq N-2$. Тут визначена геометрія розміщення основних

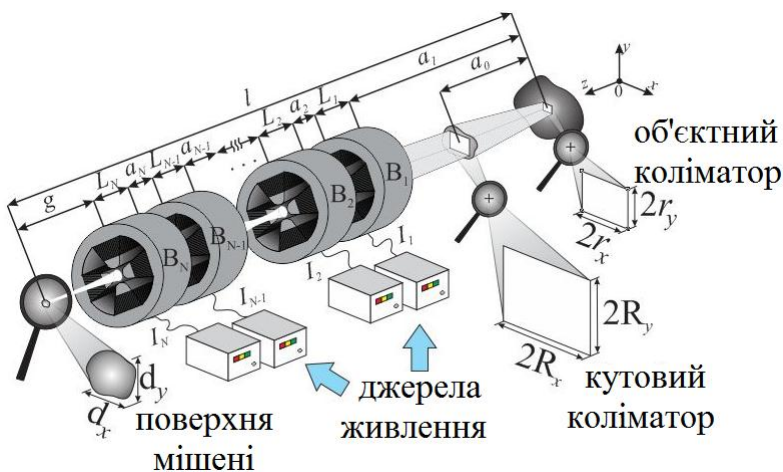


Рис. 2. Схема ЗФС із застосуванням мультиплету МКЛ із вільними параметрами фокусуєчих полів, які забезпечують додаткові джерела живлення лінз

елементів ЗФС, де a_0 – об'єктна відстань (відстань між об'єктним і кутовим коліматорами); a_i – відстань між лінзами; L_i – геометрична довжина лінзи, $i = 1, \dots, N$. Формування пучка в такій зондовій системі умовно можна поділити на три етапи. На першому етапі відбувається первинне формування пучка за допомогою прямокутних об'єктного і кутового

коліматорів. Конструктивно прямокутне колімаційне вікно тут створюється двома схрещеними щілинами. На цьому етапі формується пучок із максимальним фазовим об'ємом, який може бути сфокусований мультиплетом МКЛ на поверхні мішені в квадратну пляму із заданими розмірами. Такий фазовий об'єм пучка називається колімованим аксептансом, що зведений до заданого розміру плями, або зведеним колімованим аксептансом.

На другому етапі перша підсистема, що складається із M лінз ($M \geq K$), забезпечує узгодження первинних фазових характеристик пучка з іонно-оптичними характеристиками другої підсистеми з $N - M$ лінз, задіяних на третьому етапі фінального фокусування пучка. Лінзи підсистеми фінального фокусування пучка під'єднані до одного з двох джерел живлення, величини струму яких є зв'язаними параметрами, що забезпечують стигматичне фокусування у двох поперечних площинах.

Оптимізація процесу формування пучка у зондовій системі на базі триплету МКЛ з індивідуальними джерелами живлення лінз проводилася із застосуванням формалізму, розробленого у попередньому розділі. Для різних значень геометричних параметрів a_1 і g вирішувалося завдання з визначення найбільшого зведеного колімованого аксептанса ЗФС. Тут варто відзначити, що для триплету існує дві області розв'язань, коли реалізується стигматичне фокусування. У першому випадку, коли $G_1 > 0$, коефіцієнти зменшення будуть $D_x > 0$ та $D_y < 0$, що відповідає існуванню проміжного кросовера пучка у площині xOz у процесі його формування від об'єктного коліматора до мішені. У цій області розв'язань спостерігається значний дисбаланс коефіцієнтів зменшення, коли величина $|D_y|$ на порядок більша від $|D_x|$. Для іншого варіанта живлення першої лінзи $G_1 < 0$ коефіцієнти зменшення $D_x < 0$ та $D_y > 0$, що відповідає наявності кросовера у площині yOz . Дисбаланс між D_x і D_y не настільки великий. У цьому випадку спостерігається зростання коефіцієнтів зменшення із зменшенням робочої відстані g .

Залежно від варіювання геометричних параметрів a_1 , g і величини градієнта поля у перших двох лінзах вирішувалося завдання оптимізації процесу формування пучка у зондовій системі на базі квадруплету МКЛ з індивідуальними джерелами живлення лінз, що забезпечує знаходження найбільшого зведеного колімованого аксептанса. Для досліджуваного квадруплету є три види розв'язань, що описують процеси формування пучка у квадруплеті з індивідуальними джерелами живлення, пов'язаних із наявністю кросоверів у двох поперечних площинах, які визначаються трьома непересічними підобластями S_i , $i = 1, \dots, 3$, значень градієнтів $\{G_1, G_2\}$. Для першої підобласті S_1 значень градієнтів реалізуються ЗФС із коефіцієнтами

зменшення $D_x > 0$, $D_y < 0$. Для підобласті S_2 значень градієнтів лінз підсистеми узгодження реалізуються ЗФС, коли забезпечується кросовер у площині yOz із коефіцієнтами зменшення $D_x < 0$ і $D_y > 0$. Аналіз підобласті S_3 значень градієнтів лінз підсистеми узгодження показав можливість реалізації таких ЗФС, коли забезпечується кросовер у двох площинах xOz і yOz із коефіцієнтами зменшення $D_x > 0$ і $D_y > 0$. У результаті проведених розрахунків було визначено, що найкращі характеристики ЗФС можуть бути отримані в разі реалізації коефіцієнтів зменшення з підобласті S_1 при $g = 0,06$ м, $a_1 = 1,27$ м, коли аксептанс системи досягає $44 \text{ мкм}^2\text{мрад}^2$.

Завдання оптимізації процесу формування пучка у ЗФС на базі пентуплета МКЛ із додатковими двома джерелами живлення лінз, яка забезпечує знаходження найбільшого зведеного колімованого аксептанса, вирішувалася залежно від варіювання геометричних параметрів a_1 , g і величини градієнта поля в перших двох лінзах G_1 , G_2 . Було розглянуто три конфігурації збудження лінз: $\{\pm G_1, \pm G_2, +G_3, +G_3, -G_4\}$, $\{\pm G_1, \pm G_2, +G_3, -G_4, +G_3\}$ і $\{\pm G_1, \pm G_2, +G_3, -G_3, +G_4\}$. Для кожної із цих конфігурацій існує три різновиди розв'язань $D_x < 0, D_y > 0$; $D_x > 0, D_y > 0$ і $D_x > 0, D_y < 0$, що описують процеси формування пучка в пентуплеті з індивідуальними джерелами живлення, які пов'язані з наявністю кросоверів у двох поперечних площинах. Позначимо непересічні підобласті S_i , $i = 1, \dots, 3$ значень градієнтів $\{G_1, G_2\}$, в яких реалізуються три різновиди розв'язань. Тут варто відзначити, що характер розміщення підобластей зміни градієнтів аналогічний ЗФС на базі квадруплета з додатковими джерелами живлення лінз. Перша підобласть S_1 має систему збудження лінз $\{\pm G_1, \pm G_2, +G_3, +G_3, -G_4\}$. Збільшення аксептанса до $60 \text{ мкм}^2\text{мрад}^2$ можна досягти саме в цьому варіанті при $D_x > 0, D_y < 0$. Підобласті розв'язань S_2 належить конфігурація збудження лінз $\{\pm G_1, \pm G_2, +G_3, -G_4, +G_3\}$. У третьому випадку, коли живлення лінз пропонувалося за схемою $\{\pm G_1, \pm G_2, +G_3, -G_3, +G_4\}$, не було знайдено розв'язків. Такі результати були отримані внаслідок обмежень за градієнтом поля для лінз у системі в межах $-0,5384 \text{ Тл/см} \leq G_{\max} \leq 0,5384 \text{ Тл/см}$. Збільшення значень G_{\max} до $0,8461 \text{ Тл/см}$ забезпечує наявність розв'язань, яким відповідають ЗФС із коефіцієнтами зменшення порядку 10^3 . Для таких систем характерні надзвичайно високі коефіцієнти аберацій, тому величина аксептанса тут близька до нуля.

Загальні результати проведеного аналізу фокуруючих властивостей ЗФС на базі мультиплетів МКЛ із додатковими джерелами живлення подані на

рис. 3 а у вигляді залежності аксептанса від розташування лінз підсистеми погодження для найменшої робочої відстані $g = 6$ см. Для порівняння на рис. 3 б наведено аналогічні залежності аксептанса для відповідних мультиплетів лише з двома джерелами живлення.

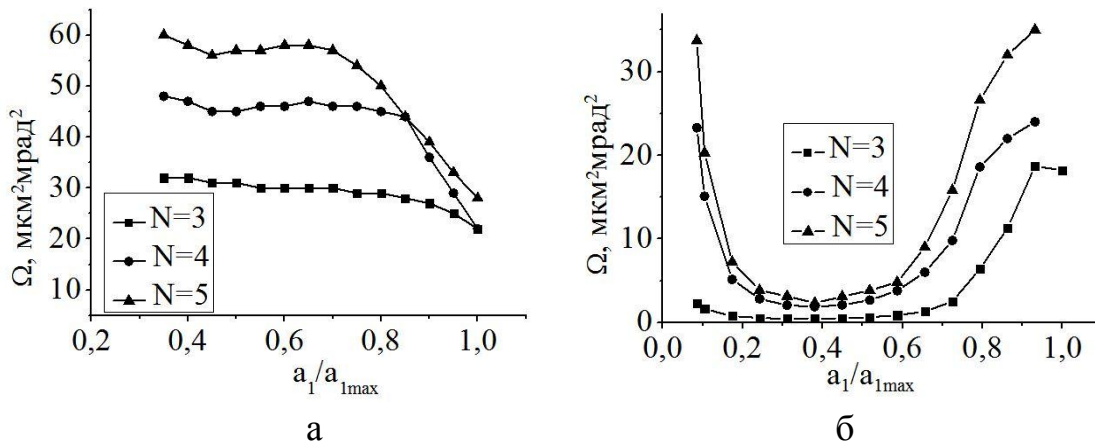


Рис. 3. Фокуруючі властивості мультиплетів МКЛ: а – із додатковими джерелами живлення лінз; б – із двома джерелами живлення лінз

Порівнюючи дані, які приведені на рис. 3 а та рис. 3 б можна зазначити, що для триплету введення додаткового живлення лінз призводить до зростання аксептанса більше ніж на 50 %, аксептанс квадруплету з індивідуальними джерелами живлення перевищує аксептанс розподіленого «російського» квадруплету більше, ніж у два рази, аналогічний результат спостерігається і для пентуплету.

Відмінність МКЛ із конусною апертурою від лінз із циліндричною апертурою полягає в тому, що вільні параметри фокуруючих полів реалізуються тут в одній лінзі за рахунок можливості змінювати як величину градієнта за допомогою варіювання струму живлення збуджувальних котушок, так і за рахунок зміни кутів конусності. Тому для реалізації вільних параметрів фокууючих полів немає необхідності додавати в ЗФС додаткові лінзи. Виходячи з цього, оптимізація процесів формування пучка в зондових системах із поздовжнім градієнтом поля, що забезпечується конусною апертурою, проводилася на базі дублета та триплету МКЛ. Схематично такі ЗФС показані на рис. 4.

У лінзах із конусною апертурою профіль функції розподілу поздовжнього градієнта залежить від кута конусності й у загальному випадку при незмінному живленні струмових котушок лінз або якщо полюси являють собою постійні магніти можливе забезпечення стигматичного фокусування лише за рахунок зміни кутів конусності апертури. Розглянуто зондові системи з фіксованими геометричними параметрами L , g , a_2 , у той час як кут конусності лінз α і β змінювався у межах $-0,322 \text{ рад} \leq \{\alpha, \beta\} \leq 0,322 \text{ рад}$, що відповідає

мінімальному та максимальному розмірам радіусів апертури на вході та виході з лінзи 3,75 і 25 мм відповідно при ефективній довжині лінзи 70 мм. При цьому враховувалися максимально досяжні розрахункові градієнти поля.

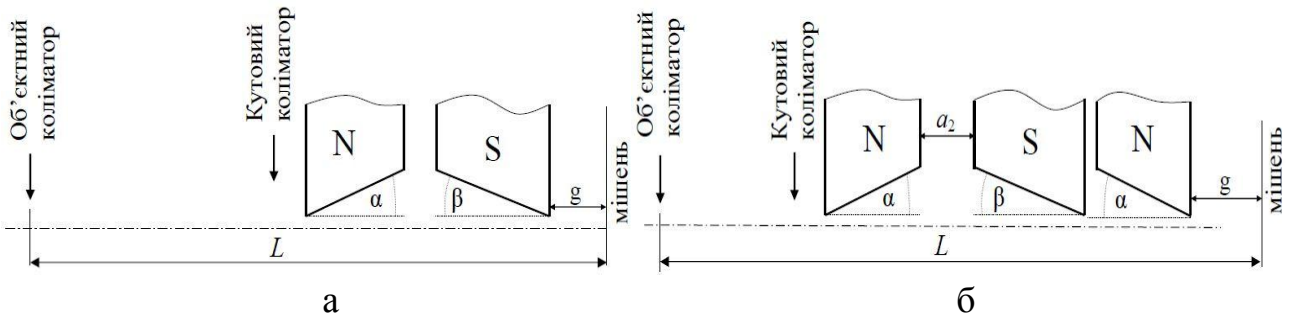


Рис. 4. Схематичне зображення мультиплетів МКЛ із кінчною апертурою: а – дублет; б – триплет

Проведений аналіз для ЗФС на базі дублета та триплету МКЛ із додатковими параметрами у вигляді кутів конусності лінз показав, що величина максимального зведеного колімованого аксептанса для конвенціональних систем поступається системам із МКЛ із конусною апертурою у разі дублета в півтора раза, а для триплету більше, ніж у два рази.

У **четвертому розділі** «Експериментальне дослідження процесу формування пучка протонів у квадруплеті магнітних квадрупольних лінз із індивідуальними джерелами живлення» подані результати експериментальних досліджень визначення параметрів прецизійного пучка протонів у ЗФС з індивідуальними джерелами живлення квадруплету МКЛ, які корелюють із теоретичними розрахунками.

Результати, наведені у цій роботі, були отримані на експериментальній установці ЯСМЗ ПФ НАНУ, що являє собою окремий канал аналітичного прискорювального комплексу. Створення прискореного пучка протонів забезпечується за допомогою компактного електростатичного прискорювача, максимальна напруга на високовольтному терміналі якого становить 2 МВ. Основні елементи ЯСМЗ: об'єктний і кутовий коліматори, інтегровані дублети МКЛ із механізмами позиціонування, скануюча система, мішенева камера, до складу якої входять детектувальні пристрої, оптичний мікроскоп із CCD-камерою, механізм позиціонування мішеней.

Особливу увагу приділено оптимізації параметрів квадруплету з індивідуальними джерелами живлення (КІДЖ) для такої установки. В оптимізаційній задачі як параметри були обрані: N – кількість лінз у системі; g – робоча відстань; $\{a_i\}$ – відстань між межами ефективного поля лінз; l – довжина системи; $\{L_{eff,i}\}$ – довжини ефективного поля лінз; $\{v_i\}$ – вектор, що описує варіант під'єднання лінз до двох незалежних джерел живлення, а також розміри коліматорів r_x, r_y, R_x, R_y , що входять до визначення цільової функції.

У задачі оптимізації розглядався пучок протонів з енергією 1,4 MeV і розкидом за імпульсом $\delta = 5 \cdot 10^{-4}$, а величина аксептанса Ω наведена до розміру обвідної в площині мішені $d = 1,0$ мкм. При розрахунку іонно-оптичних характеристик, які включають коефіцієнти зменшення, хроматичні і власні аберації 3-го порядку, застосовувався матричний метод – метод матрицантів. При різних значеннях G_1 і G_2 задача забезпечення стигматичного фокусування (за рахунок вибору G_3 і G_4) має кілька розв'язань. Кожне розв'язання характеризується своєю кількістю кросоверів пучка: КІДЖ-11 – системи з проміжними кросоверами у площинах xOz і yOz ; КІДЖ-01 – системи з проміжним кросовером у площині yOz ; КІДЖ-10 – системи з проміжним кросовером у площині xOz . Таким чином, можна реалізувати різні типи ЗФС, які відрізняються кількістю кросоверів пучка. Для всіх трьох типів систем КІДЖ існують оптимальні значення магнітного поля на полюсах перших двох квадрупольних лінз, які реалізують ЗФС із максимальним наведеним аксептансом. Проведені розрахунки показують, що всі три оптимальні системи КІДЖ мають приблизно однакові параметри, але КІДЖ-01 має незначну перевагу, тому саме ця система була досліджена експериментально.

На розміри плями сфокусованого пучка на мішені впливає безліч факторів, основні з них – іонно-оптичні характеристики ЗФС. Наявність власних і паразитних аберацій впливає на збільшення розміру зонда на мішені. Паразитні аберації є наслідком неспіввісності оптичної осі елементів ЗФС із оптичною віссю пучка, яка може викривлятися завдяки наявності в експериментальному приміщенні розсіяних магнітних полів різного походження. Тому існує певна методика юстування, яка дозволяє узгодити оптичні осі всіх іонно-оптичних елементів із віссю пучка з досить високою точністю. Із метою зменшення впливу паразитних аберацій була відпрацьована методика юстування квадруплета МКЛ з індивідуальними джерелами живлення з оптичною віссю пучка.

Головною метою проведення експерименту була перевірка даних теоретичного аналізу фокуруючих властивостей КІДЖ і визначення величини густини струму в зонді при його площі $S \approx 4$ мкм². Для цього були проведені попередні розрахунки щодо визначення розмірів об'єктного і кутового коліматорів, які забезпечують максимальний струм пучка і дозволяють сфокусувати пучок у зонд із заданою площею. Розрахунки ґрунтувалися на визначеному експериментально нерівномірному розподілі іонів у фазовому просторі, що займає пучок. У результаті отримані розрахункові розміри коліматорів $r_x \times r_y = 90 \times 220$ мкм² $R_x \times R_y = 160 \times 180$ мкм², які забезпечують формування зонда $d_x \times d_y = 2,0 \times 1,8$ мкм² (*FWHM*) із струмом $I = 700$ пкА.

В експерименті з формування пучка протонів з енергією 1,4 МеВ розміри об'єктного і кутового коліматорів були встановлені відповідно до розрахункових значень. Струм пучка після колімування вимірювався за допомогою циліндра Фарадея та інтегратора струму впродовж 10 с, результати величини струму записувалися на жорсткий диск комп'ютера, після чого проводилася обробка тимчасової залежності струму, у результаті чого отримані середнє значення і середньоквадратичне відхилення струму пучка $I = I_{сер} \pm \Delta I_{rms} (719 \pm 69)$ пкА.

У результаті сканування калібрувальної мікрометричної сітки з періодом 25,4 мкм і розмірами перемички близько 7 мкм у двох поперечних напрямках x і y проводилася реєстрація вторинної електронної емісії (SEE). Профілі виходу SEE оброблялися системою збору даних у режимі online, що дозволяє визначати розміри зонда за величиною повної ширини на піввисоті розподілу густини струму. Математична підгонка функції виходу SEE для експериментальних даних лінії сканування здійснюється за допомогою нелінійного методу Левенберга-Марквардта. Оскільки вихід SEE має статистичний характер, тому було проведено вимірювання виходу SEE із серій 20 лінійних вибірок сканування в x і y напрямках. Результати процедури підгонки лінійних вибірок виходу SEE в x і y напрямках наведено на рис. 5, де показані найменші розміри зонда на піввисоті розподілу густини струму пучка, отримані при ручному юстуванні зондової системи КІДЖ.

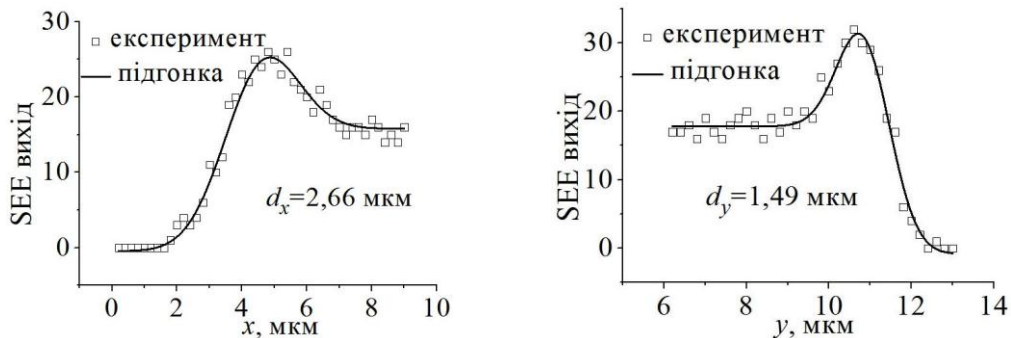


Рис. 5. Результати підгонки профілів виходу вторинної електронної емісії після сканування калібрувальної сітки

У результаті обробки профілів виходу для кожної із серій та одержаних у результаті цього даних були отримані такі розміри зонда: $\bar{d}_x (FWHM) = (2,72 \pm 0,29)$ мкм; $\bar{d}_y (FWHM) = (1,51 \pm 0,14)$ мкм.

Обчислення показують, що середня густина струму в зонді для КІДЖ становить $j_{КІДЖ} = 123$ пкА/мкм², у той час як для зондової системи розподіленого «російського» квадруплету (РПК) ця величина дорівнює $j_{РПК} = 37$ пкА/мкм², де враховано, що для КІДЖ у зонді зосереджено 70 %

повного струму пучка, а для РРК ця величина дорівнює 90 %. Отримані результати підтверджують теоретичні розрахунки, у результаті яких робили висновок, що густина струму в зонді для системи КІДЖ перевищує аналогічну величину для широко поширеної ЗФС, розподіленого «російського» квадруплета, у три рази.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дисертаційної роботи було встановлено вплив вільних параметрів фокусуєчих полів різних конфігурацій, які були подані у вигляді додаткових джерел живлення магнітних квадрупольних лінз і кутів конусності апертури, на густину струму в зонді. Основні результати дисертаційної роботи полягають у такому:

1. На основі введення вільних параметрів фокусуєчих полів запропоновано нові ЗФС, які дозволяють збільшити просторову роздільну здатність ЯСМЗ. Особливістю таких систем є наявність додаткових джерел живлення лінз і використання нових типів квадрупольних лінз із кінчною апертурою, які дозволяють ввести вільні параметри в процес формування прецизійного пучка протонів мегаелектронвольтних енергій із метою збільшення густини струму в зонді.

2. У результаті розв'язання нелінійних траєкторних рівнянь руху заряджених частинок матричним методом для моделі поздовжнього розподілу поля в МКЛ із кінчною апертурою отриманий аналітичний вигляд матриці перетворення фазових координат частинок пучка – матрицанта.

3. Результати проведеного чисельного моделювання ЗФС на базі мультиплетів МКЛ із додатковими джерелами живлення лінз показали, що оптимізація процесу формування пучка, яка базується на знаходженні найбільшого зведеного колімованого аксептанса, може забезпечувати покращення іонно-оптичних характеристик ЗФС, зокрема для триплету МКЛ з індивідуальними джерелами живлення величина аксептанса збільшується більше ніж на 50 %, для квадруплета і пентуплета – в два рази.

4. Аналіз впливу кількості квадрупольних лінз, геометрії їх розміщення та величини робочої відстані на густину іонного струму показав, що зі зменшенням робочої відстані величина аксептанса системи зростає, у той час як положення лінз системи узгодження неістотно впливає на характеристики ЗФС.

5. У результаті проведеного аналізу для ЗФС на базі дублета і триплету МКЛ із додатковими параметрами у вигляді кутів конусності лінз встановлено, що величина максимального зведеного колімованого аксептанса для конвенціональних систем поступається системам із МКЛ із конусною апертурою у разі дублета в півтора рази, а для триплету – більше ніж у два рази.

6. У результаті теоретичних розрахунків і експериментальних досліджень показано більше ніж трикратне збільшення густини струму в зонді при формуванні пучка протонів у системі з чотирьох магнітних квадруполів з індивідуальними джерелами живлення лінз порівняно з розподіленим «російським» квадруплетом.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Праці, в яких опубліковані основні наукові результати:

1. Ponomarev A. G. Optimization of the quadrupole probe-forming system with individual power supplied for lenses / A. G. Ponomarev, G. S. Vorobjov, **A. A. Ponomarova** // *Radioelectronics and Communications Systems*. – 2010. – Vol. 53, № 2. – P. 113–118.

2. **Ponomarova A. A.** One-stage-forming systems with quadrupole lenses excited by individual power supplies / **A. A. Ponomarova**, K. I. Melnik, G. S. Vorobjov, A. G. Ponomarev // *Nuclear instruments and methods in physics research B*. – 2011. – Vol. 269. – P. 2202–2205.

3. Пономарев А. Г. Ионно-оптические свойства квадрупольных линз с конической апертурой / А. Г. Пономарев, Д. В. Магилин, В. И. Мирошниченко, **А. А. Пономарева** // *Прикладная физика*. – 2011. – № 3. – С. 117–124.

4. **Пономарева А. А.** Оптимизация фокусирующих свойств зондовых систем формирования ионных пучков мультиплетами магнитных квадрупольных линз со свободными параметрами / **А. А. Пономарева** // *Прикладная радиоэлектроника*. – 2012. – Т. 11, № 4. – С. 522–526.

5. **Ponomarova A. A.** The precision proton beam formation in the probe system with individual power supplies of magnetic quadrupole lenses (experimental results) / **A. A. Ponomarova**, D. V. Magilin, G. S. Vorobjov, A. G. Ponomarev // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. – 2013. – Vol. 5, № 1. – P. 01030-1–01030-5.

Праці апробаційного характеру:

6. Воробьев Г. С. Применение сфокусированных протонных пучков МэВ-ных энергий в технологии изготовления электронных и оптических микро- и наноконструкций / Г. С. Воробьев, А. А. Дрозденко, А. Г. Пономарев, **А. А. Пономарева** // II Международная научная конференция : сборник научных трудов [«Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития»]. – Харьков-Кацивели, 2009. – С. 142–145.

7. Пономарев А. Г. О возможности усовершенствования ядерного сканирующего микронзонда для технологии протонной пучковой литографии / А. Г. Пономарев, Г. С. Воробьев, **А. А. Пономарева** // III Международная

научная конференция : сборник научных трудов [«Функциональная компонентная база микро-, опто- и наноэлектроники»]. – Харьков-Кацивели, 2010. – С. 34-36.

8. **Ponomarova A. A.** One-stage-forming systems with quadrupole lenses excited by individual power supplies / **A. A. Ponomarova**, K. I. Melnic, G. S. Vorobjov, A. G. Ponomarev // The 12th international conference on nuclear microprobe technology and application : book of abstracts, (Leipzig, 26–30 July 2010). – Leipzig, 2010. – P. 62.

9. **Пономарева А. А.** Возможности усовершенствования ядерного сканирующего микронзонда, применяемого в создании наноконструкций / **А. А. Пономарева** // XVI Международный молодежный форум : материалы форума [«Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке»], (Харьков, 17–19 апреля 2012 г.). – Харьков, 2012. – С. 85–86.

10. **Пономарева А.** Моделирование процессов прохождения пучков заряженных частиц в материальных средах с помощью численного кода SRIM / **А. Пономарева**, И. Барсук // Международная конференция студентов и молодых ученых по теоретической и экспериментальной физике «ЭВРИКА-2012» : тезисы докладов, (Львов, 19-22 апреля 2012 г.). – Львов, 2012. – С. В4.

11. Воробьев Г. С. Экспериментальное исследование формирования пучка протонов в зондоформирующей системе с индивидуальными источниками питания четырех магнитных квадрупольных линз / Г. С. Воробьев, **А. А. Пономарева**, А. В. Резник // Научно-техническая конференция : материалы и программа конференции [«Физика, электроника, электротехника»], (Сумы, 22-27 апреля 2013 г.). – Сумы, 2013. – С. 85.

АНОТАЦІЯ

Пономарьова Г. О. Квадрупольні зондоформуючі системи із вільними параметрами фокусуєчих полів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем. – Сумський державний університет, Суми, 2013.

Дисертаційна робота присвячена визначенню впливу вільних параметрів фокусуєчих полів на густину струму в зонді для систем формування прецизійних пучків іонів МеВ-х енергій у ядерному скануючому микронзонді (ЯСМЗ). Як вільні параметри запропоновані додаткові джерела живлення магнітних квадрупольних лінз і кути конусності апертури.

Результати проведеного числового моделювання зондоформуючої системи (ЗФС) на базі мультиплетів магнітних квадрупольних лінз (МКЛ) показали, що оптимізація процесу формування пучка з додатковими джерелами живлення лінз, яка ґрунтується на знаходженні найбільшого зведеного колімованого аксептанса, може забезпечувати значне поліпшення іонно-оптичних характеристик ЗФС. Для ЗФС на базі дублета і триплету МКЛ із додатковими параметрами у вигляді кутів конусності показано, що величина максимального зведеного колімованого аксептанса для конвенціональних систем поступається системам із МКЛ із конусною апертурою у разі дублета в півтора раза, а для триплету – більше, ніж у два рази.

Отримані експериментальні результати підтверджують теоретичні розрахунки, у результаті яких робили висновок, що густина струму в зонді для системи квадруплета з індивідуальними джерелами живлення лінз перевищує аналогічну величину для широко поширеної ЗФС, розподіленого «російського» квадруплета, у три рази.

У результаті можна зробити висновок про те, що процес експонування сфокусованим протонним пучком при внесенні фіксованої дози опромінення у разі застосування нової зондоформуючої системи може бути прискорений більше ніж у три рази. Це становить певний прогрес у застосуванні літографічної технології proton beam writing.

Ключові слова: мікрозонд, зондоформуюча система, мультиплет магнітних квадрупольних лінз, вільні параметри, додаткові джерела живлення лінз, кут конусності, зведений аксептанс, густина струму.

АННОТАЦІЯ

Пономарева А. А. Квадрупольные зондоформирующие системы со свободными параметрами фокусирующих полей. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – физика приборов, элементов и систем. – Сумский государственный университет, Сумы, 2013.

Диссертационная работа посвящена определению влияния свободных параметров фокусирующих полей на плотность тока в зонде для систем формирования прецизионных пучков протонов МэВ-х энергий в ядерном сканирующем микронзонде (ЯСМЗ). В качестве свободных параметров предложены дополнительные источники питания магнитных квадрупольных лінз (МКЛ) и углы конусности апертуры.

Проведен анализ методов решения нелинейных траекторных уравнений движения заряженных частиц в магнитных квадрупольных зондоформирующих системах (ЗФС) со свободными параметрами фокусирующих полей, в результате которого было установлено, что наиболее приемлемым методом является матричный метод. Для решения нелинейных траекторных уравнений движения заряженных частиц матричным методом выбрана модель продольного распределения поля в МКЛ с конической апертурой. Получен аналитический вид матрицы преобразования фазовых координат частиц пучка – матрицанта.

Учитывая условия создания наноструктур с помощью технологии proton beam writing (PBW), было предложено, что критерий качества ЗФС должен основываться на принципах обеспечения максимального тока пучка при заданных размерах зонда на мишени. Согласно этому наиболее приемлемым методом оптимизации является метод, который основан на критерии максимального аксептанса системы.

Результаты проведенного численного моделирования ЗФС на базе мультиплетов МКЛ показали, что оптимизация процесса формирования пучка с дополнительными источниками питания линз, которая основана на нахождении наибольшего приведенного коллимированного аксептанса, может обеспечивать значительное улучшение ионно-оптических характеристик ЗФС. Для триплета МКЛ с индивидуальными источниками питания величина аксептанса больше на 50 %, для квадруплета и пентуплета – в два раза. На основании проведенного анализа можно утверждать, что с уменьшением рабочего расстояния величина аксептанса системы возрастает, в то время как положение линз системы согласования несущественно влияет на характеристики ЗФС.

Анализ влияния числа квадрупольных линз, геометрии их расположения и величины рабочего расстояния на плотность ионного тока показал, что с уменьшением рабочего расстояния величина аксептанса системы увеличивается, в то время как положение линз системы согласования несущественно влияет на характеристики ЗФС.

Для ЗФС на базе дублета и триплета МКЛ с дополнительными параметрами в виде углов конусности показано, что величина максимального приведенного коллимированного аксептанса для конвенциональных систем уступает системам с МКЛ с конусной апертурой для дублета в полтора раза, а для триплета – более, чем в два раза. Применение магнитных квадрупольных линз с конусной апертурой в системах формирования зонда открывает возможность к разработке квадруполей на постоянных магнитах, так как

изменение угла конусности приводит к изменению оптической силы линзы и обеспечивает возможность юстировки системы, что в конечном итоге дает возможность отказаться от источников тока питания линз, а также снижает энергетические затраты.

Полученные экспериментальные результаты подтверждают теоретические расчеты, в результате которых делалось заключение, что плотность тока в зонде для квадруплета с индивидуальными источниками питания превышает аналогичную величину для широко распространенной ЗФС, распределенного «русского» квадруплета, в три раза. Средняя плотность тока в зонде для квадруплета с индивидуальными источниками питания составляет 123 пкА/мкм^2 , в то время как для зондовой системы распределенного «русского» квадруплета эта величина равна 37 пкА/мкм^2 , где учтено, что для первой системы в зонде сосредоточено 70 % полного тока пучка, а для второй эта величина равна 90 %.

Таким образом, процесс экспонирования сфокусированным протонным пучком при внесении фиксированной дозы облучения в случае применения новой зондоформирующей системы может быть ускорен более чем в три раза. Это представляет определенный прогресс в применении литографической технологии РВW.

Ключевые слова: микрозонд, зондоформирующая система, мультиплет магнитных квадрупольных линз, свободные параметры, дополнительные источники питания линз, угол конусности, приведенный аксептанс, плотность тока.

ABSTRACT

Ponomarova A. A. Quadrupole probe-forming systems with free parameters of focusing fields. – Manuscript.

Thesis for a candidate degree in physics and mathematics sciences on speciality 01.04.01 – Physics of Devices, Elements and Systems. – Sumy State University, Sumy, 2013.

The thesis reveals the questions about the free parameters of the focusing fields influence on the current density in the probe for the precision MeV energies proton beams in the nuclear scanning micro-probe (NSMP). Additional power supplies of the magnetic quadrupole lenses (MQL) and the aperture cone angles were proposed as free parameters.

The results of the probe-forming systems (PFS) numerical simulations, which were based on the multiplets of the MQL, showed that the optimization process beam forming with the additional power supplies of the lenses can provide a significant improvement of the ion-optical characteristics of the PFS. This optimization process bases on finding the largest reduced collimated acceptance. For the PFS, which was based on the doublet and triplets of the MQL with the additional parameters in the form of the cone angles, it was shown that the magnitude of the maximum reduced collimated acceptance for the conventional systems is less than for the systems with MQL of the conical aperture. In the case of the doublet this magnitude is 1,5 times more, and for the triplets it is more than 2 times.

The experimental results confirm the theoretical calculations, which result in the conclusion that the current density in the probe for the quadruplet of the magnetic quadrupole lenses with the individual power supplies exceed three times than a similar magnitude for the widespread worldwide PFS, distributed "russian" quadruplet.

As a result, we can conclude that the process of writing by the focused proton beam with making a fixed dose in the case of using new probe-forming system can be hasten more than three times. This represents some progress in the application of a lithographic technology proton beam writing.

Key words: microprobe, probe-forming system, magnetic quadrupole lenses, free parameters, additional lenses power supply, cone angle, reduced acceptance, current density.

Підписано до друку 10.10.2013.
Формат 60×90/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.