

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЇ ФІЗИКИ

**РОМАНЕНКО Олександр Вікторович**

УДК 537.533.3

**ФОРМУВАННЯ ІОННОГО МІКРОПУЧКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ  
РАДІАЦІЙНО-СТИМУЛЬОВАНОЇ МІГРАЦІЇ ДОМІШОК У ТВЕРДОМУ  
ТІЛІ**

01.04.20 — фізика пучків заряджених частинок

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Суми — 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті прикладної фізики Національної академії наук України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Пономарьов Олександр Георгійович**,  
Інститут прикладної фізики НАН України,  
в. о. завідувача відділу фізики пучків заряджених частинок.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Кушнір Володимир Абрамович**,  
Національний науковий центр „Харківський  
фізико-технічний інститут“ НАН України,  
начальник лабораторії НДК „Прискорювач“;  
кандидат фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Ільєнко Костянтин Володимирович**,  
Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова  
НАН України,  
старший науковий співробітник відділу вакуумної  
електроніки.

Захист відбудеться «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 р. о \_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К55.250.01 Інституту прикладної фізики НАН України за адресою: 40000 м. Суми, вул. Петропавлівська, 58.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту прикладної фізики НАН України за адресою: 40000 м. Суми, вул. Петропавлівська, 58.

Автореферат розісланий «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Недорешта В. М.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Під дією іонізуючого випромінювання в матеріалі формується велика кількість дефектів, які викликають прискорення дифузійних і сегрегаційних процесів. Так, наприклад, виникнення в напівпровідниках вакансій стимулює дифузію легуючих домішок, що призводить до зміни електричних характеристик виробу. У сплавах на основі металів у результаті радіаційно-стимульованої сегрегації на границях зерен підвищується концентрація одних елементів і одночасно з цим протікає протилежний процес для інших елементів. Таким чином, радіаційно-стимульовані процеси викликають міграцію домішкових атомів в опромінюваному зразку, в результаті чого змінюються властивості матеріалу. У зв'язку з цим необхідно розробити установки і методи, які дозволяють спостерігати перерозподіл домішок у матеріалах під дією опромінення на ранніх етапах. Такі експериментальні роботи дадуть можливість верифікувати наявні теорії радіаційно-стимульованої міграції домішок, а також можуть допомогти в розробці нової теорії щодо даного явища.

Одним із методів, які здатні виявити зміни в структурі зразка є мікроаналіз на іонних пучках. Перевага використання іонних пучків у таких задачах обумовлена рекордною чутливістю деяких ядерно-фізичних методів, яка недосяжна для електронних пучків. Так, наприклад, метод *particle induced X-ray emission* має чутливість на рівні 1 ppm, що на два порядки краще, ніж у растрового електронного мікроскопа з енергодисперсійним спектрометром. Глибина проникнення легких іонів МеВ-них енергій досягає десятки мкм, дозволяючи досліджувати товсті мішені, які найбільш точно відповідають реальним зразкам. Ядерні сканувальні мікрозонди (ЯСМЗ) використовуючи сфокусовані іонні пучки дозволяють отримувати карти розподілу хімічних елементів. Таким чином, створивши умови для опромінення мішеней на установці ЯСМЗ, з'являється можливість досліджувати радіаційно-стимульовану міграцію домішок у твердому тілі в режимі *in situ*. Однак принципи формування пучків, що використовуються для мікроаналізу та створення тривимірних структур у протонно-променевої літографії, не є оптимальними для задач опромінення матеріалів. У першому випадку всі зусилля спрямовані на отримання зонда мінімальних розмірів, тоді як у другому випадку метою є внесення рівномірно розподілених по площі і глибині дефектів в обраній області зразка за мінімальний час. Внесення рівномірної по площі дози опромінення зазвичай досягають за рахунок процедури сканування заданої області мішені. Це збільшує час опромінення і знижує ефективність використання сфокусованих пучків. Оскільки концентрація згенерованих дефектів прямо пропорційна енергії, яка передається пучком мішені, то її максимальна величина буде розташовуватись у кінці шляху іонів, в області Бреґівського піку. У зв'язку з

чим для отримання рівномірно розподілених дефектів по глибині необхідно змінювати енергію падаючих іонів зі збереженням розмірів пучка на мішені. Для цих цілей використовують калібровані мікрометричні сітки, які зміщують у позицію мішені кожного разу при зміні енергії пучка. Такий метод не завжди прийнятний у задачах опромінення. Тому проведення досліджень щодо формування іонних пучків придатних для використання в задачах радіаційно-стимульованої міграції домішок у твердому тілі є актуальними як з наукової, так і з практичної точок зору.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана у відділі фізики пучків заряджених частинок Інституту прикладної фізики НАН України і є частиною робіт, які проводилися відповідно до проєктів: „Розроблення методик та проведення досліджень радіаційно-індукованої еволюції мікроструктури і складу реакторних матеріалів з застосуванням ядерного скануючого мікрозонду“ (№ держ. реєстр. 0109U004796) (2009–2010 рр.); „Розроблення установки протонної літографії з субмікровою роздільною здатністю“ (№ держ. реєстр. 0110U004115) (2010–2012 рр.); „Формування прецизійних іонних пучків МеВ-них енергій в режимах високої густини струму та поодиноких іонів“ (№ держ. реєстр. 0111U010610) (2012–2016 рр.)

**Мета і завдання дослідження.** Мета роботи полягає в тому, щоб на підставі проведених теоретичних та експериментальних досліджень знайти умови формування іонного мікрозонду, що має оптимальні параметри для опромінення матеріалів у задачах радіаційно-стимульованої міграції домішок у твердому тілі.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення наступних завдань:

- проведення аналізу зондоформуючої системи (ЗФС) на базі мультиплетів магнітних квадрупольних лінз (МКЛ), які забезпечують максимальну густину струму іонного пучка на мішені;
- удосконалення інтегрального методу, який дозволяє отримати розподіл частинок у макропучку і визначити привісьову яскравість пучка іонів;
- проведення чисельного моделювання по формуванню сфокусованого пучка іонів з рівномірним розподілом густини струму в площині мішені з урахуванням нерівномірного розподілу частинок у пучку на вході ЗФС;
- проведення експериментальної перевірки отриманих теоретичних результатів;
- розробка підходу, що дозволяє зберігати розмір сфокусованого пучка при зміні енергії без необхідності зміщення опромінюваного зразка;

- експериментальне дослідження якості підготовлених зразків для задач радіаційно-стимульованої міграції домішок у твердому тілі.

*Об'єкт дослідження* — процеси формування сфокусованих пучків заряджених частинок МеВ-них енергій у квадрупольних ЗФС у режимах високої густини струму.

*Предмет дослідження* — густина струму і її розподіл у сфокусованому пучку на мішені.

*Методи дослідження.*

- метод матриcantів для розв'язання нелінійних траєкторних рівнянь руху пучка в полі МКЛ;
- метод оптимізації іонно-оптичних параметрів ЗФС, що базується на критерії максимального зведеного аксептансу;
- метод оптимізації параметрів сфокусованого пучка;
- метод математичної підгонки Левенберга-Марквардта;
- методи реєстрації продуктів взаємодії частинок пучка з атомами мішені.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Удосконалено інтегральний метод визначення розподілу яскравості пучка на вході в ЗФС, що дозволяє визначити параметри розподілу не тільки в привісьовій області, а й у всьому пучку, і розрахувати привісьову яскравість макropучку.
2. Розроблено новий підхід щодо фокусування пучка в режимі великих струмів з рівномірним розподілом густини струму в площині мішені. Отримано теоретичні профілі виходу вторинної електронної емісії при скануванні таким пучком мішені ножового типу. Експериментально доведена адекватність розробленого підходу за допомогою порівняння експериментальних профілів виходу вторинної електронної емісії з теоретичними.
3. Встановлено, що густина струму, виражена через густину зведеного колімованого аксептансу, для ЗФС на базі триплету і розподіленого «російського квадруплету» МКЛ має виражені максимуми, величина котрих залежить від робочої відстані і розмірів зонду, тоді як для ЗФС на базі дублету МКЛ величина максимуму обмежується радіусом іонопроводу на ділянці МКЛ.
4. Вперше розроблено підхід, що дозволяє зберігати розміри сфокусованого іонного зонду при зміні енергії пучка без зміщення опромінюваного зразка.

**Практичне значення одержаних результатів.** Проведені дослідження дозволяють оптимізувати експериментальні роботи з вивчення впливу опромінення на зміну властивостей матеріалів. Результати роботи дозволяють скоротити час опромінення, задавати область опромінення з мікронною точністю, створювати розподілені дефекти по глибині в області зерен мікронних розмірів, а також спостерігати перерозподіл елементів у матеріалі в процесі опромінення в режимі реального часу. Розроблені методи формування сфокусованих пучків іонів у режимі високих струмів можуть бути використані у всіх лабораторіях світу, які займаються мікроаналізом на іонних пучках з метою впровадження нових досліджень, пов'язаних з опроміненням матеріалів. Запропонований новий метод отримання розподілу частинок дозволяє отримувати параметри розподілу і привісьову яскравість макропучку, які можуть бути використані для кількісного порівняння характеристик пучка іонно-пучкових установок.

**Особистий внесок здобувача.** Результати, викладені в дисертаційній роботі, отримані здобувачем самостійно або за його безпосередньої участі. В роботах, опублікованих у співавторстві, здобувач брав участь у теоретичних розрахунках і самостійно проводив експериментальні дослідження. В роботах [1–3] автор провів чисельне моделювання для знаходження параметрів ЗФС, які дозволяють отримати сфокусований пучок на мішені з рівномірним розподілом щільності струму, а також провів експериментальні роботи по апробації отриманих результатів. У цих же роботах автором була проведена експериментальна перевірка вдосконаленого методу, що дозволяє визначати параметри розподілу частинок у макропучку і його привісьову яскравість. У роботах [4, 5] дисертант спільно з науковим керівником розробив підхід, що дозволяє виконувати перефокусування пучка іонів при зміні енергії зі збереженням розміру зонду без необхідності зміщення опромінюваного зразка. В роботі [6], виконавши теоретичні розрахунки, здобувач встановив залежність густини струму, виражену через густину зведеного колімованого аксептансу, від розмірів пучка на мішені для ЗФС на базі дублету, триплету і розподіленого «російського квадруплету» МКЛ для різних робочих відстаней і провів порівняльний аналіз отриманих результатів. У роботі [7] автор підготував зразки для вивчення радіаційно-стимульованої міграції домішок у твердому тілі і провів експерименти з розподілу хімічних елементів як у самому матеріалі, так і в осадженій плівці сірки на його поверхні. В роботах [8–12] дисертант брав участь в експериментальних роботах. У роботі [13] здобувачем розраховано параметри ЗФС на базі розподіленого «російського квадруплету» МКЛ, які живляться від двох джерел живлення.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідалися на наступних міжнародних та національних конференціях і семінарах: 3 Міжнародній конференції з сучасних питань в ядерній фізиці та атомній енергетиці, 2010 р. Україна; 12,13,14 Міжнародних конференціях по технології і застосуванню ядерних мікрозондів (ICNMTA), 2010 р. Німеччина, 2012 р. Португалія, 2014 р. Італія; XIX Міжнародній конференції з фізики радіаційних явищ і радіаційного матеріалознавства, 2010 р. Україна; IX Міжнародній конференції по взаємодії випромінювання з твердим тілом, 2011 р. Білорусь; X і XII Конференціях з фізики високих енергій, ядерної фізики і прискорювачів, 2012 і 2014 рр. Україна; XII і XIII Міжнародних семінарах з плазмової електроніки та нових методів прискорення, 2013, 2015 рр. Україна.

**Публікації.** Основні результати дисертації викладені в 13 наукових працях, із яких 5 статей [1, 3, 5–7] — у спеціалізованих журналах, які входять до переліку ДАК МОН України, 6 тез доповідей [2, 4, 8, 9, 12, 13] і 2 статті у збірниках конференцій [10, 11].

**Структура дисертації.** Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків. Обсяг дисертації становить 142 сторінки машинописного тексту, у тому числі 27 рисунків, 3 таблиці і 1 додаток. Список використаних джерел містить 150 найменувань на 19 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та основні задачі дослідження, показано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено зв'язок роботи з науковими програмами і темами та інформацію щодо апробації роботи, особистого внеску здобувача, публікацій, загальної структури дисертації.

**Перший розділ** «Застосування прискорених пучків іонів для дослідження радіаційної стійкості матеріалів» присвячено аналізу літературних джерел, у яких розглядаються тенденції розвитку експериментального дослідження змін, які протікають у матеріалах внаслідок дії іонізуючого випромінювання.

При розробці нових матеріалів, які працюватимуть в умовах радіаційного навантаження, головною задачею є забезпечення змін характеристик матеріалу в допустимих межах. Радіаційно стійкі матеріали в першу чергу розробляються для атомної енергетики, де в якості основного джерела іонізуючого випромінювання виступають нейтрони. Після того як було показано, що іонні пучки можуть бути використані для імітації результатів нейтронного опромінювання, прискорювачі заряджених частинок почали активно використовувати в задачах дослідження процесів, які протікають у матеріалах внаслідок опро-

мінення. Це пов'язано в першу чергу з тим, що фінансові затрати проведення таких експериментів на кілька порядків менші у порівнянні з дослідницькими реакторами. До переваг використання іонних пучків можна віднести широке розповсюдження прискорювачів заряджених частинок, а також високий контроль таких параметрів експерименту як температура, швидкість пошкодження та внесена доза. При використанні іонних пучків швидкість накопичення дози на 4 порядки більша ніж у дослідницьких реакторах. Іонно-пучкові установки, які використовуються для опромінення матеріалу можна розділити на одно-, дво- та багатопучкові. Широке використання однопучкових установок для проведення подібних експериментів обумовлене тим, що для цього можна використовувати установки, головним призначенням яких є аналіз матеріалів ядерно-фізичними методами з використанням іонів MeV-них енергій. Вони дозволяють вивчити вплив конкретного виду пошкодження на поведінку матеріалу. У свою чергу багатопучкові установки дають можливість досліджувати синергетичні ефекти опромінення.

Зазвичай для експериментального дослідження радіаційно-стимульованих змін матеріалу використовують тонкі мішені. У випадку опромінення товстих мішеней, їх у подальшому піддають обробці для аналізу. Це пов'язано з тим, що в якості основного інструменту для виявлення змін у матеріалі використовують растровий просвічувальний електронний мікроскоп. Досить часто він не сполучений в одну установку з каналом опромінення іонним пучком, через що зразок зазнає впливу змін навколишнього середовища при переміщенні з однієї установки в іншу. Тож винайдення способу експериментального дослідження радіаційно-стимульованих процесів у товстих зразках зі збереженням постійних зовнішніх умов є актуальною задачею. ЯСМЗ завдяки ядерно-фізичним методам аналізу з високою чутливістю виявлення хімічних елементів і можливості побудови карт їх розподілу здатний бути надійним інструментом для дослідження міграції домішок викликаною опроміненням. При цьому для опромінення можна використовувати той самий пучок іонів, що й для аналізу. Але до пучків іонів, які використовуються для аналізу і опромінення пред'являють різні вимоги. І якщо в першому випадку методи формування вже досить розвинені, то методи формування іонних пучків MeV-них енергій для задач мікроопромінення матеріалів є актуальною задачею яка потребує вирішення.

**Другий розділ** «Методи моделювання формування пучка в магнітних квадрупольних зондоформуючих системах» присвячений вирішенню задачі оптимізації процесів формування пучка в ЗФС, які використовують мультиплети МКЛ в якості системи фокусування.

Особливість магнітного поля МКЛ полягає в тому, що силові лінії нап-



равлені поперек вісі пучка, але в різні напрямки. Це призводить до того, що частинки, які рухаються всередині лінзи, фокусуються в одній площині й одночасно з цим дефокусуються в іншій, перпендикулярній до першої, площині. Для опису поля в яких радіус апертури  $r_a$  на порядок менший за їх довжину  $L$  можна використовувати модель розподілення мультипольних компонентів поля в якій реальне поздовжнє розподілення замінюється ефективним полем зі ступінчастими краями на вході і виході лінзи. На практиці ефективну довжину МКЛ знаходять експериментально і визначають як  $L_{eff} = L + Cr_a$ , де зазвичай  $0,9 < C < 1,1$ . Така прямокутна модель дозволяє отримати наближене аналітичне рішення рівняння руху заряджених частинок у МКЛ.

Рух заряджених частинок у МКЛ описується нелінійними диференціальними рівняннями. Для отримання наближених лінійних диференціальних рівнянь використовується перехід до розширеного простору фазових моментів. Матриця, що здійснює перетворення фазових моментів із поперечної площини до вісі пучка на вході в лінзу до відповідної площини на виході іменується матрицантом. Можливість побудувати матрицант для системи лінійних диференціальних рівнянь відносно фазових моментів у МКЛ дає можливість проводити моделювання процесів руху пучків заряджених частинок у нелінійних ЗФС, які містять декілька квадруполів.

Критерій оптимізації ЗФС витікає з вимог задач, які вирішуються за допомогою ЯСМЗ. У зв'язку з цим фізично обґрунтованим є отримання максимального струму пучка сфокусованого в пляму заданих розмірів. У якості цільової функції береться зведений колімований аксептанс ЗФС, який прямо пропорційний струму пучка. Формалізація оптимізаційної задачі являє собою задачу нелінійного програмування

$$\begin{aligned}
 \alpha_C^*(s_0, d) &= \max_{r_x, r_y, R_x, R_y, s_A, \mathbf{S}} (\alpha_C(s_0, d)), \\
 \alpha_C(s_0, d) &= vol(\mathcal{A}_C(s_0, d)), \\
 \mathcal{M}_{1,3} &= \langle x/x' \rangle = h_x(B_{1v}, B_{2v}, \mathbf{S}) = 0, \\
 \mathcal{M}_{2,4} &= \langle y/y' \rangle = h_y(B_{1v}, B_{2v}, \mathbf{S}) = 0, \\
 B_{1v} &\leq B_{1\max}, \quad B_{2v} \leq B_{2\max}, \\
 \mathcal{A}_C(s_0, d) &= \left\{ (x_0, y_0, x'_0, y'_0) \mid |x_0| < r_x, |y_0| < r_y, \right. \\
 &\quad |F_x(x_0, y_0, x'_0, y'_0, \delta_0, s_A)| \leq R_x, \quad |F_y(x_0, y_0, x'_0, y'_0, \delta_0, s_A)| \leq R_y, \\
 &\quad |F_x(x_0, y_0, x'_0, y'_0, \delta_0, s_t)| \leq d/2, \quad |F_y(x_0, y_0, x'_0, y'_0, \delta_0, s_t)| \leq d/2, \\
 &\quad \left. [F_x(x_0, y_0, x'_0, y'_0, \delta_0, s_v)]^2 + [F_y(x_0, y_0, x'_0, y'_0, \delta_0, s_v)]^2 \leq [\rho(s_v)]^2 \right\},
 \end{aligned}$$

$$\forall s_v \in [s_0, s_t], |\delta_0| \leq \delta_{\max}/2 \}$$

$$\text{де } F_x(x_0, y_0, x'_0, y'_0, \delta_0, s_v) = \sum_{j=1}^{39} \mathcal{M}_{1,j}(s_v \leftarrow s_0) \cdot \Phi_{0j},$$

$$F_y(x_0, y_0, x'_0, y'_0, \delta_0, s_v) = \sum_{j=1}^{39} \mathcal{M}_{2,j}(s_v \leftarrow s_0) \cdot \Phi_{0j} \text{ — перетворення фазових ко-}$$

ординат із площини об'єктного коліматору ( $s_0$ ) до довільної площини ( $s_v$ );

$\mathbf{S} = \{a_i, L_i, g, B_i\}$  — вектор вільних параметрів ЗФС від яких залежить матрицант  $\mathcal{M}$ ;

$L_i$  — довжина лінзи;

$a_i$  — розташування лінз вздовж оптичної вісі;

$B_i$  — величина магнітної індукції на полюсах лінз;

$i = 1 \dots N$ ,  $N$  — кількість лінз у системі;

$g$  — робоча відстань;

$2d$  — розмір віртуальної фазової діаграми в площині досліджуваного зразка;

$\delta_{\max}$  — максимальний розкид по імпульсу іонів у пучку;

$\rho(s_v)$  — радіус апертури іонопроводу;

$B_{1\max}, B_{2\max}$  — максимально допустима величина магнітної індукції на полюсах МКЛ;

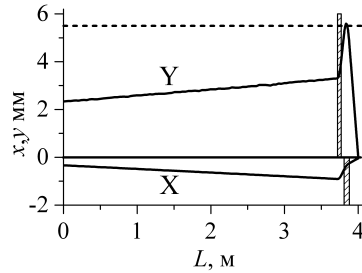
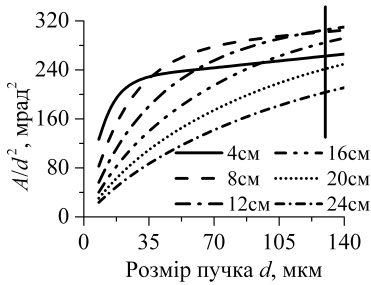
$s_A, s_t$  — площа кутового коліматору і площа мішені відповідно.

На основі зазначеного критерію оптимізації було проведено порівняльний аналіз ЗФС на базі дублету, триплету і розподіленого «російського квадруплету» МКЛ, а саме встановлення залежності густини струму від розмірів пучка на мішені. При обчисленні задавались параметри ЗФС діючої установки ЯСМЗ Інституту прикладної фізики НАН України. Розрахунки проводились для пучків протонів енергією 1 MeV і максимального енергетичного розкиду частинок  $10^{-3}$ .

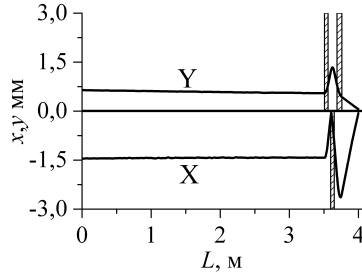
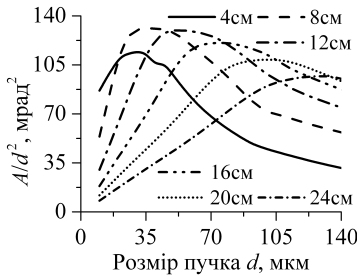
Результати обчислень приведені на рис. 1. Можна побачити, що густина зведеного колімованого аксептансу для ЗФС на базі триплету і розподіленого «російського квадруплету» МКЛ має виражені максимуми, величина котрих залежить від робочої відстані. Для ЗФС на базі дублету МКЛ максимум густини зведеного аксептансу обмежується радіусом іонопроводу, який визначається розміром апертури МКЛ в області їх розміщення.

У **третьому розділі** «Формування мікрозонду з рівномірним розподілом густини струму» показана теоретична можливість отримання сфокусованого пучка іонів з розподілом частинок у площині мішені близьким до рівномірного, а також проведені експериментальні роботи для верифікації отриманих результатів.

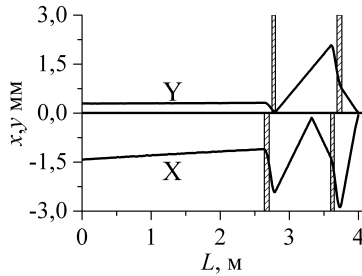
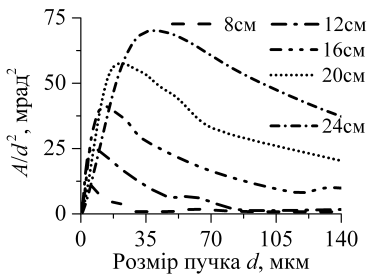
В оптимізаційних задачах отримання пучків на мішені передбачається,



а)



б)



в)

Рис. 1. Залежність густини зведеного акцептансу від розмірів пучка на мішені для різних робочих відстаней та обвідні лінії пучка протонів у ЗФС на базі: а) дублету МКЛ (обвідна пучка для робочої відстані  $g=12$  см і зі стороною пучка на мішені  $d=130$  мкм); б) триплету МКЛ ( $g=24$  см і  $d=140$  мкм); в) розподіленого «російського квадруплету» ( $g=24$  см і  $d=140$  мкм).

що фазовий об'єм сформований об'єктним і кутовим коліматорами повністю заповнений пучком. Однак на практиці можуть бути випадки коли це не відбувається. Так, якщо іонний пучок має малу кутову розбіжність, а розміри кутового коліматору значно більші за об'єктний, то фазовий об'єм аксептансу не буде повністю заповнений. Таким чином порушується умова узгодженості емітансу пучка з аксептансом ЗФС. Для того, щоб запобігти подібним випадкам, при рішенні оптимізаційної задачі треба вказувати реальний розподіл частинок у пучку на вході ЗФС. Використання емітансометру не завжди доцільне, оскільки потребує демонтаж частини іонопроводу, а також не дозволяє виміряти розподіл частинок у привісній області у зв'язку зі значним вкладом розсіяних частинок на краях щілин. Тому в дисертаційній роботі вдосконалено метод отримання розподілу частинок у пучку за допомогою коліматорів ЗФС. Розроблений метод дозволяє запобігти вкладом розсіяних частинок на краях щілин, а також визначити привісню яскравість макропучку.

Визначення розподілу яскравості пучка на вході в канал ЯСМЗ аналітичного прискорювального комплексу Інституту прикладної фізики НАН України проводилося для пучка протонів енергією 1 МеВ. При цьому пучок був попередньо сформований дублетом електростатичних квадрупольних лінз конденсорної системи для забезпечення оптимальних умов опромінення мішені з метою дослідження радіаційно-стимульованої міграції домішок у твердому тілі. Цей дублет розміщений до об'єктного коліматору і дозволяє змінювати розподіл яскравості пучка на вході в ЗФС ЯСМЗ. Це дозволяє сфокусувати іонний пучок із током у десятки нА в пляму на мішені розмірами в десятки мкм. Перед проведенням вимірювань вісь коліматорів суміщували з віссю пучка. Після вимірювання й обчислення отриманих даних були встановлені параметри розподілу пучка на вході ЗФС ЯСМЗ:

$$b_0 = (6,7 \pm 1,1) \text{ пкА}/(\text{мкм}^2 \cdot \text{мрад}^2);$$

$\sigma_x = 0,621 \text{ мм}; x_0 = -0,049 \text{ мм}; \sigma_{x'} = 0,088 \text{ мрад}; x'_0 = -0,016 \text{ мрад}; k_x = -0,4;$   
 $\sigma_y = 0,667 \text{ мм}; y_0 = -0,011 \text{ мм}; \sigma_{y'} = 0,098 \text{ мрад}; y'_0 = -0,001 \text{ мрад}; k_y = -0,9.$   
 де  $b_0$  — осьова яскравість пучка,  $\sigma_{x(y)}, \sigma_{x'(y')}$  — стандартні відхилення,  $x(y)_0, x'(y')_0$  — похибки позиціювання коліматорів,  $k_{x(y)}$  — кореляційні коефіцієнти між  $x_0(y_0)$  та  $x'_0(y'_0)$ .

Використовуючи метод визначення розподілу густини струму, який базується на багаточастинковому представленні пучка і враховуючи отримані параметри розподілу яскравості пучка на вході ЗФС ЯСМЗ визначалась можливість формування пучка на мішені з розподілом густини струму близького до рівномірного. Для цього потрібне виконання наступного співвідношення:  $I_{\text{FWHM}}/I_0 > 90\%$ , де  $I_{\text{FWHM}}$  — частка струму, що зосереджена в центральній частині пучка, а  $I_0$  — повний струм пучка. Рішення оптимізаційної задачі

зводилось до пошуку таких розмірів коліматорів, які б для заданої ЗФС з її системою фокусування дозволили б задовольнити вказане співвідношення.

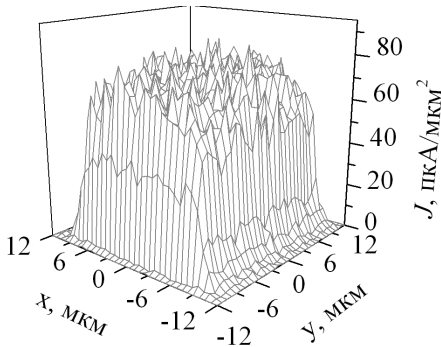
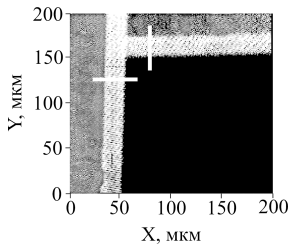
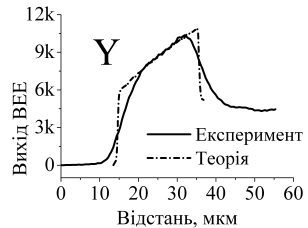
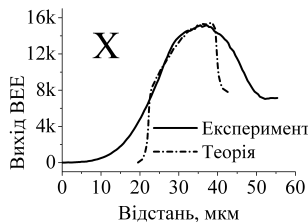


Рис. 2. Розподілення густини струму пучка в площині мішені з повним током 40 нА. Відношення  $I_{FWHM}$  до  $I_0$  складає 95%.

сельний код який моделює сканування зондом із заданим розподілом густини струму краю напівнескінченної пластини. Експериментальний профіль було отримано за рахунок сканування протонним пучком країв лез.



а)



б)

Рис. 3. Краї лез: а) карта виходу електронної емісії (білі відрізки показують лінії сканування); б) порівняння теоретичного і експериментального профілів виходу.

Порівнюючи експериментальні профілі виходу електронної емісії з теоретичними (рис. 3) можна помітити хорошу узгодженість результатів у цен-

тральній частині. Відмінність на краях профілів пов'язана в першу чергу з тим, що в теоретичній моделі краї мішеней мали строго прямокутну форму, тоді як на практиці цього домогтись складно.

**Четвертий розділ** «Оптимізація параметрів іонних пучків для дослідження радіаційно-стимульованої міграції домішок у твердих тілах» присвячено вдосконаленню експериментального дослідження міграції домішок у матеріалі під дією опромінення з використанням ЯСМЗ.

У деяких задачах опромінення матеріалів виникає необхідність отримувати розподілені дефекти по глибині. При використанні іонних пучків максимум енергії передається в кінці шляху частинки. Саме тут і генерується найбільша концентрація дефектів. У зв'язку з цим для отримання рівномірно розподілених дефектів по глибині необхідно змінювати енергію пучка падаючого на мішень. Це можна зробити двома способами: використовувати фольги в якості поглиначів енергії або змінювати енергію самого пучка. При опроміненні зразка треба контролювати одночасно як струм пучка так і його розміри, оскільки зміна кожного з них призводить до відхилення густини струму. Під час мікроопромінення сфокусованим пучком іонів використання фольги не доцільне, оскільки це призводить до розсіювання пучка. У свою чергу зміна енергії самого пучка теж викликає додаткові труднощі при опроміненні зразка. Вони пов'язані з необхідністю перефокусування пучка при зміні енергії для збереження його розмірів у заданих межах. Зазвичай фокусування пучка відбувається за допомогою каліброваної мікрометричної сітки. Тож кожного разу при зміні енергії калібровану сітку треба змішувати на місце опромінюваної мішені, а потім, після фокусування, повертати мішень у початкове положення. Така процедура не завжди є прийнятною з практичної точки зору. В дисертаційній роботі запропоновано спосіб, який дозволяє проводити перефокусування пучка зі збереженням його розмірів без необхідності зміщення опромінюваного зразка.

При зміні енергії розміри сфокусованого пучка на поверхні мішені не зміняться, якщо виконуватиметься умова  $B_2 = B_1 \sqrt{E_2/E_1}$ . Залежність магнітної індукції на полюсі лінзи від струму в збуджуваній котушці визначається експериментально. В МКЛ, які використовуються в ЯСМЗ Інституту прикладної фізики НАН України ця залежність близька до лінійної в межах до 12 А. При цьому для фокусування пучків протонів ( $E_{\max} = 1,8$  MeV) і іонів гелію ( $E_{\max} = 1,6$  MeV) використовуються струми, що не перевищують 10,5 А. Тож для збереження розмірів пучка при зміні енергії можна скористатися відношенням:  $I_2 = I_1 \sqrt{E_2/E_1}$ .

В експериментальній роботі залишкову магнітну індукцію усували методом ходіння по частинним петлям гістерезису зводячи її до нуля. На першому

етапі знаходились реперні струми живлення лінз, які забезпечували точне фокусування пучка протонів енергією 1,6 МєВ (рис. 4 а). Далі енергію пучка зменшували на 200 кеВ і задавали перерахований струм живлення лінз, попередньо розмагнітивши лінзи. Після визначення розмірів пучка на мішені для

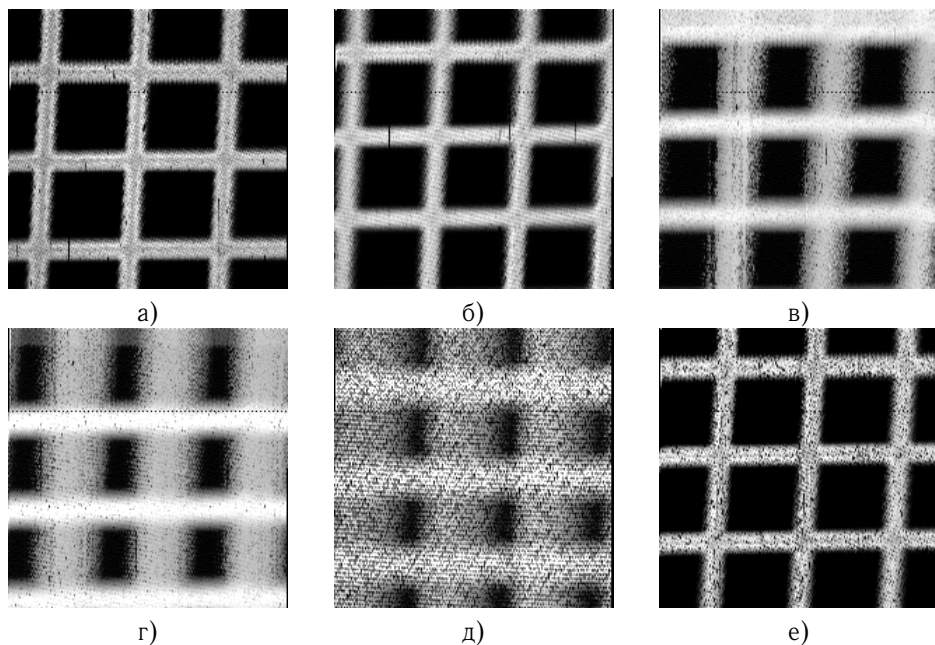


Рис. 4. Карти вторинної електронної емісії каліброваної мікрометричної сітки, отримані при скануванні сфокусованим протонним пучком: а)  $E = 1,6$  МєВ (розмір пучка:  $x \times y = 3,7 \times 4,0$  мкм<sup>2</sup>); б)  $E = 1,4$  МєВ ( $x \times y = 4,2 \times 4,3$  мкм<sup>2</sup>); в)  $E = 1,2$  МєВ ( $x \times y = 11 \times 6,4$  мкм<sup>2</sup>); г)  $E = 1$  МєВ ( $x$  — не встановлений,  $y$  — 8,4 мкм); д)  $E = 0,8$  МєВ ( $x, y$  — не встановлені); е)  $E = 1,6$  МєВ ( $x \times y = 3,9 \times 4,0$  мкм<sup>2</sup>).

енергії 0,8 МеВ, була виставлена початкова енергія протонів і задані реперні струми (рис. 4 е). Аналізуючи отримані дані було встановлено, що перерахунок струмів живлення лінз не дозволяє зберегти розміри пучка на мішені при зміні енергії. Причин цьому може бути декілька: неточність виставлення енергії на прискорювачі; залишкова магнітна індукція не зводиться до нуля; залежність магнітної індукції від струму в котушках не достатньо лінійна для даної задачі. Перевіривши названі фактори було встановлено, що саме

останній із них впливає на результат. У зв'язку з цим спосіб, який дозволяє зберігати розміри сфокусованого пучка на мішені при зміні його енергії без зміщення опромінюваного зразка полягає в наступному. Перед проведенням опромінення встановити реперні струми живлення лінз, які забезпечують точне фокусування, для кожної енергії, яка буде використовуватися в експерименті. А потім під час опромінення мішені задавати ці струми при зміні енергії, попередньо розмагнітивши лінзи.

Для експериментального дослідження впливу опромінення на процес міграції домішок у матеріалі необхідно виконання наступних умов: пучки з високою густиною струму для набору потрібної дози за короткий проміжок часу; метод, що дозволяє будувати карти розподілу елементів; при опроміненні, аналізі і в проміжку між ними зразок повинен перебувати у сталих умовах. До методу аналізу висувається також вимога мати низький рівень виявлення домішкових атомів з метою зафіксувати міграцію домішок на ранньому етапі. Всім цим вимогам добре відповідає ЯСМЗ з використанням методу *particle induced X-ray emission*. До того ж така установка дозволяє забезпечити високу якість не тільки самого експерименту по дослідженню радіаційно-стимульованої міграції домішок у твердому тілі, а й контролю підготовлюваних зразків.

В якості матеріалу для відпрацювання експериментальних робіт по вивченню міграції домішок викликаную опроміненням готувались мідні зразки, а в якості домішки використовувалась сірка осаждена на поверхню зразка двома методами. Контроль якості підготовки зразків здійснювався за рахунок оптичного мікроскопу і ЯСМЗ. За допомогою побудованих карт розподілу елементів вдалося виявити хаотичні вклучення частинок кремнію, які потрапили в зразок під час механічної обробки (рис. 5). Інші підготовлені зразки вияви-

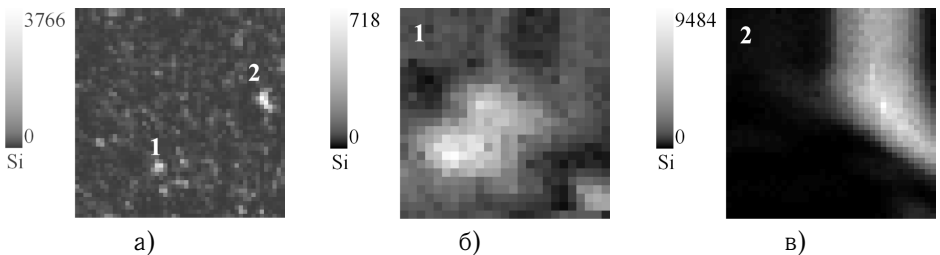


Рис. 5. Карта розподілу кремнію: а) розмір растру —  $250 \times 250 \text{ мкм}^2$ ); б), в) збільшені фрагменти вклучень (розмір растру 1 —  $25 \times 25 \text{ мкм}^2$ , розмір растру 2 —  $38 \times 38 \text{ мкм}^2$ ).



лися чистими. Саме вони і були використані для наступного етапу підготовки зразків — осадженню сірки.

На рис. 6 а показано розподіл сірки осадженої за допомогою терморозпилення у ВУП. Збільшений фрагмент демонструє нерівномірність плівки (рис. 6 б). Плівка ж, яку осадили за допомогою крапельного методу має хорошу рівномірність (рис. 6 в). Саме ці зразки і будуть у подальшому використані для дослідження радіаційно-стимульованої міграції домішок у матеріалі.

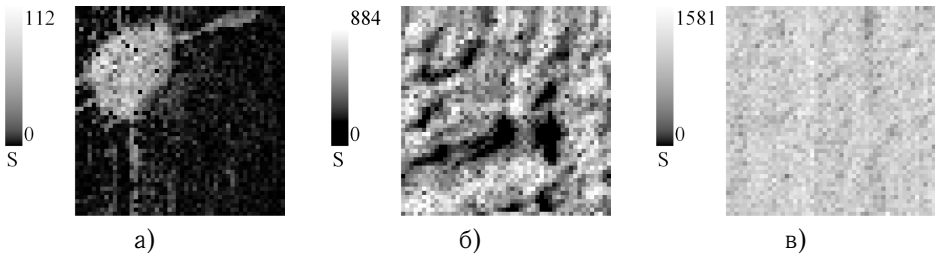


Рис. 6. Карти розподілу сірки: а) осаджена у ВУП (розмір растру —  $1 \times 1 \text{ мм}^2$ ); б) збільшена центральна частина плівки (розмір растру —  $100 \times 100 \text{ мкм}^2$ ); в) осаджена крапельним методом (розмір растру —  $200 \times 200 \text{ мкм}^2$ ).

## ВИСНОВКИ

У результаті проведених у дисертаційній роботі теоретичних і експериментальних досліджень процесів формування пучка для вдосконалення мікроопромінення матеріалів і використання ЯСМЗ для вивчення радіаційно-стимульованої міграції домішок у твердому тілі можна зробити такі висновки:

1. Аналіз ЗФС на базі мультиплетів МКЛ, які використовуються для формування пучків з великою густиною струму, показав, що для триплету і розподіленого «російського квадруплету» МКЛ максимальне значення густини струму досягається при певній робочій відстані і розміру пучка на мішені. У випадку дублету МКЛ максимальна густина струму обмежена розмірами апертури лінз.
2. Розгляд процесів формування пучка іонів із неоднорідною фазовою густиною нелінійними ЗФС показав, що задача оптимізації отримання сфокусованого мікропучка полягає в пошуку таких розмірів коліматорів, які забезпечують максимальний струм пучка в зонді заданого розміру для ЗФС у якої всі іонно-оптичні параметри заздалегідь визначені.

3. Вдосконалений метод отримання параметрів розподілу частинок у пучку дозволяє встановити привісьову яскравість макропучку використовуючи для цього стаціонарні вузли ЯСМЗ, а також нівелювати вплив розсіяних на краях коліматорів частинок.
4. Експериментальні роботи по отриманню мікрозонду з рівномірним розподілом густини струму в режимі великих струмів підтвердили теоретичні розрахунки, які базувались на багаточастинковому зображенні пучка з урахуванням нерівномірного розподілу частинок на вході ЗФС.
5. Розроблений спосіб збереження розмірів зонду при зміні енергії пучка дає можливість проводити фокусування пучка без зміщення опромінюваної мішені, що дозволяє отримувати рівномірно розподілені дефекти по глибині в строго заданій області.
6. Отримані за допомогою методу мікро-PIXE двовимірні карти розподілу елементів у конструкційному матеріалі показали ефективність використання ЯСМЗ не лише для дослідження радіаційно-стимульованої міграції домішок у твердому тілі, а й для контролю якості підготовлюваних зразків для цих задач.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. **Romanenko A. V.** Ion microbeam formation for study of radiation-induced segregation at grain boundaries in construction materials / A. V. Romanenko, A. A. Ponomarev, A. G. Ponomarev // Problems of atomic science and technology. — 2015. — Vol. 98, no. 4. — P. 338–341.
2. **Romanenko A. V.** Formation of ion beam with high current density for micro irradiation techniques / A. V. Romanenko, A. G. Ponomarev // 14-th International conference on nuclear microprobe technology and applications (ICNMTA2014), July 7-11, 2014: book of abstracts. Padova, Italy. — 2014. — P. 49.
3. **Romanenko A. V.** Formation of ion beam with high current density for micro irradiation techniques / A. V. Romanenko, A. G. Ponomarev // Nucl. Instr. and Meth. B. — 2015. — Vol. 348. — P. 115–118.
4. **Романенко А. В.** Влияние гистерезиса магнитных квадрупольных линз на процесс фокусировки пучка при изменении его энергии в ядерном сканирующем микроразноде / А. В. Романенко, А. Г. Пономарев // X Конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям: 27 февраля–2 марта 2012 г.: тезисы докладов. Харьков, Украина. — 2012. — С. 81.
5. **Романенко А. В.** Влияние гистерезиса магнитных квадрупольных линз на процесс фокусировки пучка при изменении его энергии в ядерном ска-

- нирующем микрозонде / А.В. Романенко, А.Г. Пономарев // Письма в ЖТФ. — 2013. — Т. 39, №7. — С. 1–8.
6. **Romanenko A. V.** Formation of MeV energy ion beams with high current density for materials micro-irradiation / A. V. Romanenko, A. G. Ponomarev, V. I. Miroshnichenko // Problems of atomic science and technology. — 2013. — Vol. 86, no. 4. — P. 30–33.
  7. **Romanenko A. V.** The use of nuclear scanning microprobe to study radiation-induced migration of impurities at the grain boundaries in construction materials / A. V. Romanenko, A. G. Ponomarev // Journal of nano- and electronic physics. — 2016. — Vol. 8, no. 1. — P. 01014-1–01014-4.
  8. Scanning nuclear microprobe application in studying of element distribution in structural materials / A. G. Ponomarev, D. V. Magilin, K. I. Melnik, **A. V. Romanenko**, V. I. Miroshnichenko, V. E. Storizhko // 3 International Conference «Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy»: 7–12 June 2010: book of abstracts. Kyiv, Ukraine. — 2010. — P. 156–157.
  9. Investigation of element distribution in interfaces of solid-phase joining materials by  $\mu$ -PIXE and SIMS techniques / V. E. Storizhko, A. G. Ponomarev, D. V. Magilin, K. I. Melnik, **A. V. Romanenko**, S. M. Duvanov, V. I. Miroshnichenko, B. V. Borts, S. Flege, A. G. Balogh // 12 International conference on nuclear microprobe technology and applications (ICNMTA2010): 26–30 July 2010: book of abstracts. Leipzig, Germany. — 2010. — P. 147.
  10. Исследование распределения элементов в конструкционных материалах методом  $\mu$ -PIXE / А.Г. Пономарев, Д.В. Магилин, К.И. Мельник, **А.В. Романенко**, В.И. Мирошниченко, В.Е. Сторишко // XIX Международная конференция по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению: 06–11 сентября 2010 г.: труды конференции. Алушта, Украина. — 2010. — С. 453.
  11. Исследование распределения элементов в конструкционных материалах методом микро-PIXE / А.Г. Пономарев, Д.В. Магилин, К.И. Мельник, В.А. Ребров, **А.В. Романенко**, В.И. Мирошниченко, В.Е. Сторишко // IX Международная конференция «Взаимодействие излучения с твердым телом» (ВИТТ–2011): 20–22 сентября 2011 г.: труды конференции. Минск, Республика Беларусь. — 2011. — С. 442–443.
  12. Investigation of Cd1-xMnxTe polycrystalline thin films using nuclear microprobe techniques / A. G. Ponomarev, A. S. Opanasyuk, P. V. Koval, D. V. Magilin, S. S. Melnik, A. A. Ponomarov, **A. V. Romanenko** // 13-th International conference on nuclear microprobe technology and applications

(ICNMTA2012): 22–27 July 2012: book of abstracts. Lisbon, Portugal. — 2012. — P. 87.

13. Пономарев А. А. Определение параметров зондоформирующей системы ядерного сканирующего микрозонда на базе электростатического ускорителя ЭГ-5 ЛНФ ОИЯИ / А. А. Пономарев, **А. В. Романенко**, А. Г. Пономарев // XII Конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям: 17–21 марта 2014 г.: тезисы докладов. Харьков, Украина. — 2014. — С. 87.

## АНОТАЦІЯ

*Романенко О. В.* Формування іонного мікропучка для дослідження радіаційно-стимульованої міграції домішок у твердому тілі. — Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.20 — фізика пучків заряджених частинок. — Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, 2016.

Проведені в дисертаційній роботі теоретичні й експериментальні дослідження дозволили встановити особливості процесів формування сфокусованих пучків іонів, які можуть бути використані для опромінення ділянок мішеней мікронних розмірів. Показано, що використання дублету магнітних квадрупольних лінз (МКЛ) для формування пучків із високою густиною струму має обмеження пов'язані з розмірами апертури лінз. У той же час обвідні лінії пучків сформованих за рахунок триплету і розподіленого «російського квадруплету» МКЛ не перевищують розміри іонопроводу. При цьому для триплету установлені значення робочої відстані і розміри сфокусованого пучка, які забезпечують максимальну густина струму. Показано, що для розподіленого «російського квадруплету» МКЛ максимальна величина густини струму зростає зі збільшенням робочої відстані і розмірів пучка на мішені. Вдосконалено інтегральний метод отримання розподілу частинок на вході зондоформуючої системи, який дозволив встановити параметри розподілу, а також визначити привісову яскравість макропучку. Проведене чисельне моделювання показало можливість формування сфокусованих іонних пучків МеВ-них енергій з розподілом густини струму в площині мішені близького до рівномірного для струмів в десятки нА. Порівняння теоретичних і експериментальних профілів виходу вторинної електронної емісії при скануванні країв мішені ножового типу пучком з даним розподілом густини струму підтвердили результати розрахунків. Запропоновано спосіб, який дозволяє виконувати перефокусування пучка при зміні його енергії зі збереженням розмір зонду в заданих межах без необхідності зміщувати опромінювану мішень. Показано застосування ядерно-

го сканувального мікросонду з використанням ядерно-фізичного методу аналізу для контролю підготовлюваних зразків для задач радіаційно-стимульованої міграції домішок у конструкційному матеріалі.

*Ключові слова:* пучок заряджених частинок, зондоформуюча система, магнітна квадрупольна лінза, опромінення, ядерний сканувальний мікросонд, мікроаналіз.

## АННОТАЦИЯ

*Романенко А. В.* Формирование ионного микропучка для исследования радиационно-стимулированной миграции примеси в твердом теле. — Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц. — Институт прикладной физики НАН Украины, Сумы, 2016.

Диссертация посвящена решению актуальной задачи определения особенностей формирования пучков ионов МэВ-ных энергий для облучения микрообластей материалов в исследованиях радиационно-стимулированной миграции примеси в твердом теле с использованием ядерного сканирующего микрозонда.

Проведен сравнительный анализ фокусирующих систем на базе мультиплетов магнитных квадрупольных линз (МКЛ) для формирования пучков ионов с высокой плотностью тока. Установлено, что максимальная величина плотности тока, выраженная через плотность приведенного коллимированного аксептанса, зондоформирующей системы (ЗФС) на базе дублета МКЛ ограничена радиусом апертуры ионопровода внутри МКЛ. В тоже время огибающие пучка для ЗФС на базе триплета и распределенного «русского квадруплета» МКЛ не выходят за границы ионопровода. Максимальная плотность тока с использованием триплета МКЛ достигается при рабочих расстояниях 8...12 см и размере пучка на мишени 30–60 мкм, а в случае распределенного «русского квадруплета» она неуклонно растет с увеличением рабочего расстояния и смещением размера пучка в большую сторону.

Усовершенствован интегральный метод получения распределения частиц на входе ЗФС, основанный на измерениях тока частей пучка выделенных коллиматорами микрозонда. Разработанный метод позволяет получить параметры распределения и установить приосевую яркость макропучка. Проведенные измерения показали, что приосевая яркость пучка протонов на входе в канал ядерного сканирующего микрозонда составляет  $b_0 = (6,7 \pm 1,1) \text{ пкА}/(\text{мм}^2 \cdot \text{мрад}^2)$ .

Проведенная теоретическая работа показала возможность получения сфокусированных ионных пучков МэВ-ных энергий с распределением плотности тока в плоскости мишени близким к равномерному при токах в десятки нА. С помощью численного моделирования, учитывающего реальное неравномерное распределение частиц пучка на входе ЗФС, были определены размеры коллиматоров обеспечивающие отношение тока на полувысоте к полному току пучка на уровне  $> 90\%$ . Сравнение теоретических профилей выхода вторичной электронной эмиссии, полученных при моделировании сканирования края полубесконечной пластины пучком с заданным распределением плотности тока, с экспериментальными продемонстрировало согласованность результатов.

Предложен подход, который позволяет осуществлять фокусировку пучка в ядерном микрозонде при изменении его энергии с сохранением размеров зонда в заданных пределах без необходимости смещения облучаемого образца. Подход основан на предварительном определении реперных значений токов запитывания катушек полюсов линз для каждой энергии при условии точной фокусировки пучка на микрометрической сетке.

Показано применение ядерного сканирующего микрозонда с использованием ядерно-физического метода анализа для оценки качества подготавливаемых образцов в задачах радиационно-стимулированной миграции в конструкционном материале.

*Ключевые слова:* пучок заряженных частиц, зондоформирующая система, магнитная квадрупольная линза, облучение, ядерный сканирующий микрозонд, микроанализ.

## ABSTRACT

*Romanenko O. V.* Ion microbeam formation for study of radiation-induced migration of impurities in a solid. — Manuscript.

Candidate's thesis on Physics and Mathematics, speciality 01.04.20 — physics of charged particles beams. — Institute of Applied Physics of NAS of Ukraine, Sumy, 2016.

Theoretical and experimental studies performed in the thesis allowed determination of peculiarities of focused ion beam formation that may be used for radiation of the target areas of micron size. Use of a magnet quadrupole lens (MQL) doublet for beam formation with high current density is shown to have some restrictions related to lens aperture dimensions. In the same time, envelope lines of the beams formed by a triplet and a distributed «Russian quadruplet» of MQL do not exceed the ion beam line dimensions. Working distance and focused

beam size for the triplet were defined to provide maximum current density. Maximum density for the distributed «Russian quadruplet» of MQL is shown to grow as a working distance and beam spot size grow on a target. A method of the deconvolution of particle distribution at the probe forming system was improved to define the distribution parameters for particles at the PFS entrance and to determine a paraxial brightness of a macrobeam. Performed numerical modeling showed possibility to form the MeV focused beams with current density distribution in a target plane that is close to homogenous current of tens nA. Comparison of theoretical and experimental profiles of secondary emission yield during the sample edges scanning with the beam of preset density has proved evaluation results. A method has been suggested to re-focus the beam while its energy is changed and probe size is preserved within preset limits. Application of the nuclear scanning microprobe in nuclear-physical analytical method is presented for control of samples prepared for radiation-induced migration of impurities in constructional materials.

*Key words:* charged particle beam, probe-forming system, magnetic quadrupole lens, irradiation, nuclear scanning microprobe, microanalysis.

Підписано до друку 19.08.2016.  
Формат 60×84/16. Обл.-вид. арк. 1,9.  
Гарнітура Times. Тираж 100 пр. Вид. № 34.

Віддруковано у ВВП „Мрія-1“.  
40000, м. Суми, вул. Кузнечна, 2.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
серія ДК, № 36 від 19.04.2000.