

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Єрьомін Сергій Олександрович

УДК 537.534.8

**МАС-СПЕКТРОМЕТРІЯ НЕЙТРАЛЬНИХ ЧАСТИНОК,
РОЗПИЛЕНИХ ІОНАМИ З ЕНЕРГІЄЮ ДО 170 кеВ**

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті прикладної фізики
Національної академії наук України.

Науковий керівник – кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Батурін Володимир Андрійович,
Інститут прикладної фізики НАН України,
завідувач лабораторії прискорювачів прямої дії та
іонної імплантації і модифікації реакторних матеріалів.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Романюк Борис Миколайович,
Інститут фізики напівпровідників
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України,
провідний науковий співробітник відділу
фізичних основ інтегральної мікроелектроніки;

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

Захист відбудеться «___» грудня 2010 року о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.02 в Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, ауд. 236, корпус ЕТ.

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

Автореферат розісланий «___» листопада 2010 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В.О. Журба

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Широке застосування іонних технологій у різних галузях науки й техніки (джерела кластерів розпилювального типу, іонна літографія, термоядерний синтез, кількісний аналіз іонно-променевими методами та ін.) вимагає проведення досліджень іонного розпилення частинок певного сорту (ізотопів, молекулярних сполук, кластерів) при енергіях первинних іонів, що досягають 150-200 кеВ. На сьогоднішній день спостерігається відносно мала кількість публікацій з мас-спектрометричних досліджень процесів іонного розпилення у зазначеному діапазоні енергій. Це пов'язано з тим, що в установках для мас-спектрометричного аналізу потоків вторинних нейтральних частинок, як показує аналіз літературних даних, з міркувань компактності конструкції використовуються малогабаритні джерела первинних іонів, що генерують пучки з енергіями, які не перевищують 20-30 кеВ. Для одержання нових експериментальних даних про фізичні аспекти процесів іонного розпилення у широкому діапазоні енергій іонів (до 150-200 кеВ) необхідно створювати нові конструкції мас-спектрометрів вторинних нейтралей на основі установок, призначених для генерації високоенергетичних пучків іонів.

У даній роботі вперше запропонована конструкція мас-спектрометра вторинних нейтралей на основі високодозного іонного імплантера, що дозволить збільшити верхню межу енергій первинних іонів до 170 кеВ. Використання іонного імплантера дає такі переваги при дослідженнях процесів іонного розпилення: мас-сепарація первинного пучка, блокування нейтралей у первинному пучку, висока густина струму первинних іонів (до 1 мА/см² при повному струмі до 30 мкА), можливість зміни геометрії експерименту (кута між осями первинного пучка й системи аналізу вторинних частинок). Побудова системи аналізу розпилених частинок на основі монопольного мас-аналізатора з іонізатором ніровського типу, енергофільтром і системою регулювання струму вторинних іонів та іонів газового середовища дозволить значно розширити експериментальні можливості установки, оскільки дає можливість працювати в одному із трьох режимів – мас-спектрометрії вторинних нейтралей (МСВН), вторинних іонів (ВІМС) та іонів газового середовища. При цьому залишається актуальною проблемою знаходження оптимальних параметрів системи аналізу вторинних частинок для кожного режиму роботи установки, що відповідають максимальній чутливості при прийнятному рівні розділення піків, а також розроблення відповідних методик вимірювань, які забезпечать отримання коректних кількісних даних про процеси іонного розпилення.

Таким чином, розроблення експериментального обладнання та методик вимірювань для мас-спектрометрії потоку розпилених нейтральних частинок при широкому діапазоні зміни енергії первинних іонів дозволить одержати інструмент, здатний розширити й доповнити наші уявлення щодо фізичних механізмів іонного розпилення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у відділі електростатичних прискорювачів

Інституту прикладної фізики НАН України у рамках таких науково-технічних програм: «Розробка фізичних основ та створення апаратури для дослідження методами скануючого субмікронного ядерного аналізатора модифікованої поверхні твердих тіл» (державний реєстраційний № 0196U004906), 2000-2005 рр.; «Дослідження фізичних процесів при взаємодії високоінтенсивних пучків іонів водню та гелію з речовиною» (державний реєстраційний № 102U002778), 2000-2005 рр.; «Розробка високоінтенсивних іонних джерел та експериментальні дослідження іонно-променевої модифікації матеріалів атомної техніки» (державний реєстраційний № 0107U000316), 2006-2008 рр.

Мета досліджень полягає у наступному:

- розробленні експериментального обладнання та методик для досліджень процесів іонного розпилення у широкому діапазоні енергій первинних іонів (до 150-200 кеВ) методом мас-спектрометрії вторинних нейтральних частинок;
- розробленні методик визначення характеристик окремих вузлів обладнання та знаходженні оптимальних параметрів системи аналізу вторинних частинок, що забезпечують максимальну чутливість системи;
- встановленні фізичних принципів іонного розпилення нейтральних частинок певного сорту у зазначеному діапазоні енергій первинних іонів.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі **завдання**:

- розроблення конструкції та створення мас-спектрометра вторинних нейтралей на основі іонного імплантера з енергією первинних іонів до 170 кеВ; розроблення програмного забезпечення для автоматизації керування вимірювальною частиною системи; розвиток методики коректування сигналу детектора в режимі рахунку імпульсів;
- створення програмного забезпечення для моделювання траєкторій заряджених частинок в електричних і магнітних полях з урахуванням об'ємного заряду пучка; комп'ютерне моделювання траєкторій іонів в енергофільтрі, а також електронів та іонів у системі аналізу вторинних частинок;
- розроблення методик та експериментальне визначення основних характеристик енергофільтра та коефіцієнта трансмісії іонно-оптичної системи монопольного мас-аналізатора з енергофільтром як функцій енергії іонів;
- розроблення методик і проведення мас-спектрометричних досліджень емісії нейтральних кластерів міді, а також процесу переважного розпилення ізотопів молібдену при бомбардуванні поверхні іонами аргону в діапазоні енергій від 30 до 170 кеВ.

Об'єкт дослідження – процеси розпилення, іонізації та транспортування нейтральних частинок у системі аналізу вторинних частинок.

Предмет дослідження – потік нейтральних частинок, розпилених із поверхні твердого тіла пучком прискорених іонів.

Методи дослідження: вимірювання струму й енергії пучка первинних іонів та масового складу потоку розпиленних частинок; комп'ютерне моделювання траєкторій електронів та іонів у системі аналізу вторинних частинок; комп'ютерне моделювання процесів іонного розпилення матеріалів.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Розроблено експериментальну методику визначення коефіцієнта трансмісії іонно-оптичної системи монопольного мас-аналізатора, обладнаного електростатичним енергофільтром, як функції енергії іонів. Показано, що оптимальне співвідношення іонної трансмісії та розділення піків у мас-спектрі для даної системи досягається в інтервалі енергії іонів 20-30 еВ.

2. Уперше проведено комплексне дослідження системи аналізу розпиленних частинок, створеної на основі електронно-променевого іонізатора нейтралей. Для кожного із трьох режимів роботи визначені параметри, що забезпечують максимальну чутливість системи.

3. Мас-спектрометричні дослідження емісії нейтральних кластерів уперше проведені при високих енергіях пучка первинних іонів у широкому діапазоні зміни енергії (від 30 до 170 кеВ). Показано, що вигляд залежності відносної інтенсивності кластерів міді (на прикладі кластера Cu_3) від енергії іонів аргону відповідає рекомбінаційній моделі формування кластерів при помірних значеннях повного коефіцієнта розпилення міді ($Y_{\text{повн}} < 12$).

4. Мас-спектрометричні дослідження процесу переважного розпилення ізотопів проведені вперше при високих енергіях пучка первинних іонів у широкому діапазоні зміни енергії (від 30 до 170 кеВ). Отримано, що параметр ізотопного збагачення (на прикладі пари $^{92}\text{Mo} - ^{100}\text{Mo}$) у даному діапазоні енергій іонів залишається стабільним (4,9%), що відповідає результатам комп'ютерного моделювання процесів переважного розпилення ізотопів.

5. Створено нове експериментальне обладнання для мас-спектрометричного аналізу нейтральної компоненти продуктів іонного розпилення матеріалів, що дозволяє працювати при більш високих енергіях пучка первинних іонів (до 170 кеВ), ніж традиційні установки подібного типу (20-30 кеВ), а також розроблено відповідні методики вимірювань. Це дозволяє розширити діапазон досліджень фізичних механізмів іонного розпилення, що вимагають мас-сепарації потоку розпиленних частинок.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дисертаційної роботи є розвитком методики експериментального дослідження процесів іонного розпилення, що ґрунтується на мас-сепарації потоку розпиленних нейтральних частинок, та роблять внесок у розуміння фізичних аспектів іонного розпилення матеріалів в інтервалі енергій первинних іонів до 170 кеВ. Представлені в роботі конструкція установки, отримані експериментальні дані та методичні напрацювання можуть бути використані в приладобудуванні, матеріалознавстві, гео- і космохімії, напівпровідниковій техніці, термоядерних дослідженнях, фізиці іонного розпилення. Розроблена система аналізу вторинних нейтралей може використовуватися як складова частина іонно-променевих комплексів (імплантерів, літографів та ін.) для мас-спектрометричного аналізу та контролю продуктів розпилення твердотільних зразків.

Особистий внесок здобувача полягає у самостійному пошуку та аналізі літературних джерел, розробленні методик вимірювань, участі у створенні експериментального обладнання. Здобувач брав участь у розробленні

алгоритмів програмного забезпечення для керування мас-спектрометром та розрахунку траєкторій заряджених частинок. Самостійно проводив дослідження характеристик окремих вузлів обладнання та визначив оптимальні параметри роботи. Автор особисто проводив експериментальні дослідження іонного розпилення, обробку та інтерпретацію отриманих результатів. Постановку задач досліджень і узагальнення результатів зроблено спільно з науковим керівником к.ф.-м.н. с.н.с. Батуріним В.А. Здобувач особисто підготував тексти публікацій [2-4,7-10], матеріали публікацій [1,5,6] обговорювалися разом із співавторами.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи були подані й обговорені на таких науково-технічних конференціях: Науково-технічній конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів фізико-технічного факультету СумДУ (м. Суми, 2004 р.); ІХ Міжнародному семінарі „Плазмова електроніка та нові методи прискорення” (м. Харків, 2006 р.); Х Міжнародному семінарі „Плазмова електроніка та нові методи прискорення” (м. Харків, 2008 р.) – 2 доповіді; VI Конференції по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям (м. Харків, 2008 р.), а також наукових семінарах Інституту прикладної фізики НАН України.

Публікації. Основні матеріали дисертації опубліковані в 10 наукових працях, з яких 9 статей опубліковані у спеціалізованих журналах, що входять до переліку ВАК України, та у тезах доповіді в збірнику робіт науково-технічної конференції.

Структура і зміст роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Обсяг дисертації становить 153 сторінки, у тому числі 49 рисунків і 1 таблиця. Список використаних джерел містить 125 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі досліджень, показано наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів, зв'язок роботи з науковими програмами та темами, наведено дані про внесок здобувача, апробацію роботи, загальну структуру дисертації.

Перший розділ містить літературний огляд експериментальних методів дослідження процесів іонного розпилення. За принципом вимірювань їх можна розділити на 4 групи: вимірювання зменшення маси мішені, вимірювання зменшення товщини мішені, збору розпиленого матеріалу і безпосереднього реєстрування розпилених частинок під час польоту. Одним із найбільш чутливих та швидких методів є безпосереднє реєстрування частинок при їхній емісії з поверхні зразка. Використовуючи мас-сепарацію, можна одержувати інформацію про особливості розпилення окремих фракцій потоку розпилених частинок (наприклад, кластерів або молекулярних сполук). Потік розпилених частинок складається переважно з нейтральної компоненти (як правило, більше 99%), тому доцільно проводити дослідження, використовуючи метод мас-

спектрометрії вторинних нейтралей. Для реєстрування розпилених нейтральних частинок за допомогою мас-спектрометра вони повинні бути іонізовані на деякій відстані від поверхні зразка (так звана постіонізація нейтралей). Завдяки поділу процесів розпилення та іонізації частинок у просторі та часі цей метод забезпечує лінійну кореляцію між сигналом постіонізованих нейтралей даного елемента і його вмістом у зразку в межах широкого діапазону концентрацій (від 1 до 10^{-9} і менше).

Згідно з сучасними літературними даними, можна виділити три основні методи постіонізації розпилених нейтральних частинок: пучком прискорених електронів, електронною складовою високочастотної плазми низького тиску та фотоіонізацією інтенсивним лазерним випромінюванням. Кожен із перелічених методів має свої переваги й недоліки та, відповідно, свої галузі застосування. Для досліджень процесів іонного розпилення найбільш прийнятними методами в загальному випадку є електронно-променева та плазмова постіонізація, оскільки розпилення зразка в цих методах відбувається в безперервному режимі. При цьому іонізація за допомогою ВЧ-плазми використовується, як правило, при відносно низьких енергіях первинних іонів (до 1 кеВ). При високих енергіях первинних іонів (десятки кеВ) більш доцільно використовувати електронно-променеву постіонізацію. Цей метод, незважаючи на більш низький показник ефективності іонізації, дозволяє одержати відношення сигнал/шум мас-спектрометричних піків на рівні 10^5 - 10^6 , що цілком достатньо для досліджень процесів іонного розпилення.

Серед різних варіантів конструкцій установок МСВН із електронно-променевою іонізацією, що наведені в літературі, можна виділити два напрями. У конструкціях першого типу відстань від поверхні зразка до області іонізації порівняно велика (10-20 мм), що дозволяє встановити на цій ділянці затримувальні діафрагми або відхиляючі пристрої (дефлектори) для блокування вторинно-іонної компоненти при аналізі вторинних нейтралей. Інший тип конструкцій передбачає мінімальну відстань від поверхні зразка до області іонізації (1 мм і менше), що дозволяє значно збільшити частку розпилених нейтралей, які потрапили в область іонізації. Однак при цьому зникає можливість блокування до прийнятного рівня вторинно-іонної компоненти, що є серйозним недоліком даного типу конструкцій. Оскільки при дослідженнях процесів іонного розпилення важливо мати «чистий» спектр вторинних нейтралей, то доцільне розроблення конструкції саме першого типу.

У конструкціях мас-спектрометрів вторинних нейтралей, описаних у закордонних виданнях, для генерації первинних іонів використовується або ВЧ-плазма, з якої іони екстрагуються з енергіями в кілька сотень еВ, або компактні іонні джерела різних типів з енергіями іонів у декілька кеВ. Таким чином, у цілому енергії первинних іонів у даних установках обмежені величиною приблизно 30 кеВ. Відповідно, наведені в літературі роботи з дослідження процесів іонного розпилення методом МСВН також належать до даного діапазону енергій. Між тим, як уже було відзначено при викладі актуальності досліджень, становить фізичний інтерес проведення мас-спектрометричних досліджень процесів іонного розпилення у більш широкому діапазоні енергій

первинних іонів – до 150-200 кеВ. У зв'язку з цим виникає необхідність створення установки МСВН, конструкція якої дозволяє генерувати пучки первинних іонів з такими енергіями.

Другий розділ присвячений детальному опису конструкції мас-спектрометра вторинних нейтралей та дослідженню характеристик окремих частин установки.

У *першому підрозділі* представлена конструкція експериментального обладнання. Установка побудована на базі іонного імплантера, що дозволяє генерувати пучки іонів із енергіями до 170 кеВ і густиною струму до 1 мА/см² (рис. 1).

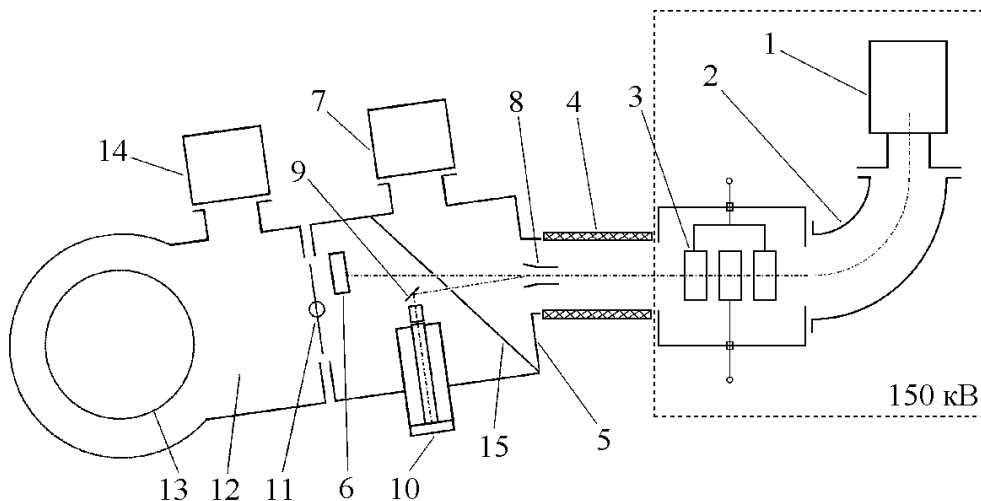


Рис. 1. Загальна схема експериментальної установки (вид зверху): 1 – джерело іонів (дуоплазматрон); 2 – 90⁰ електромагніт; 3 – одиночна лінза; 4 – прискорююча трубка; 5,12 – приймальні камери № 1 і № 2; 6 – циліндр Фарадея; 7,14 – високовакуумні насоси; 8 – дефлектор; 9 – зразок; 10 – система аналізу вторинних частинок і газового середовища; 11 – високовакуумний клапан; 13 – карусель; 15 – перегородка для диференційного відкачування

Система мас-сепарації і дефлектор пучка первинних іонів імплантера дозволяють очистити пучок від сторонніх іонів і нейтральної компоненти, що важливо при проведенні експериментів з іонного розпилення матеріалів.

Система аналізу вторинних частинок і газового середовища (рис. 2) створена у вигляді компактного модуля, вмонтованого в боковий фланець приймальної камери імплантера. Як іонізатор нейтральних частинок використовується джерело іонів ніровського типу. Воно дозволяє одержувати порівняно високі концентрації електронів у малому об'ємі і, крім того, звести до мінімуму енергетичний розкид іонів, що є особливо важливим при енергетичній сепарації постіонізованих вторинних нейтралей від іонів газового середовища.

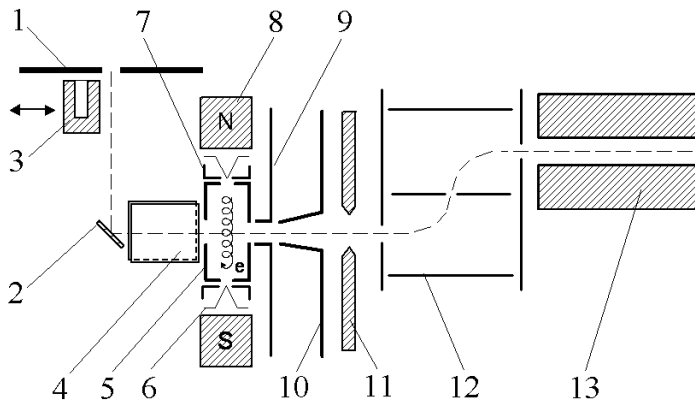


Рис. 2. Схема системи аналізу вторинних частинок і газового середовища: 1 – діафрагма на шляху первинного пучка іонів; 2 – зразок; 3 – пересувний циліндр Фарадея; 4 – дефлектор вторинних іонів; 5 – анод; 6 – катод; 7 – екрануючий електрод; 8 – постійний магніт; 9 – регулятор струму

іонів залишкових газів; 10 – екстрагуючий електрод; 11 – фокусуєчий електрод; 12 – енергофільтр; 13 – мас-аналізатор

Система аналізу вторинних частинок створена на основі монопольного мас-аналізатора, обладнаного електростатичним енергофільтром. Крім аналізу вторинних нейтралей, установка працює також у режимах аналізу вторинних іонів та іонів газового середовища, що значно розширює її експериментальні можливості. Розроблено програмне забезпечення, що дозволяє автоматизувати процеси керування приладом, реєстрації та обробки мас-спектрометричної інформації.

Другий підрозділ присвячений експериментальній методиці визначення основних характеристик енергофільтра шляхом аналізу проходження через енергофільтр пучка іонів з малим (менше 1 eV) розкидом за енергією. У результаті отримано залежність між енергією пропускання E_0 і відповідним їй керуючим потенціалом U_0 енергофільтра, а також визначена відносна величина смуги пропускання енергофільтра (на рівні 50% від максимуму) $\Delta E/E_0$ від енергії пропускання E_0 (рис. 3).

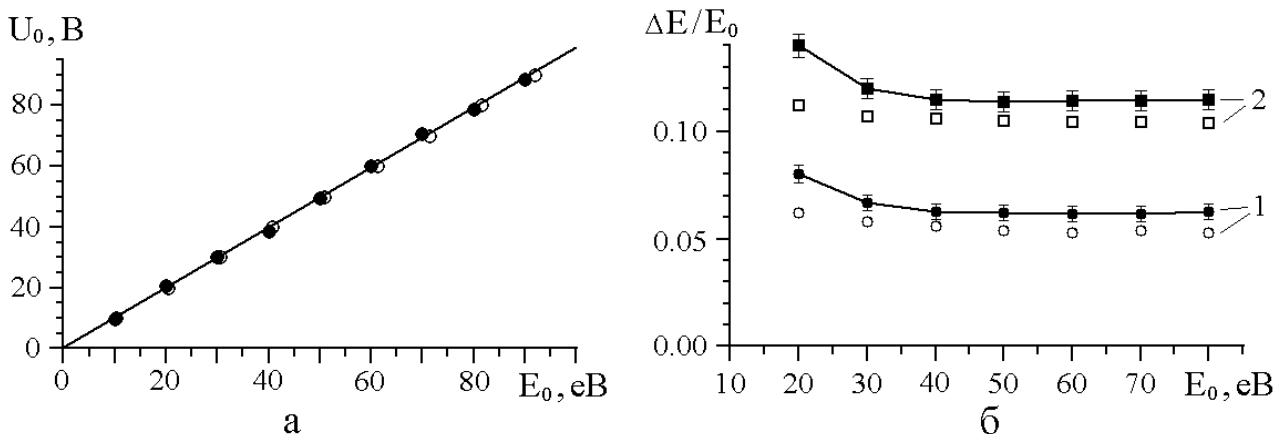


Рис. 3. Залежність відхиляючої напруги енергофільтра U_0 (а) та відносної ширини смуги пропускання енергофільтра на напіввисоті $\Delta E/E_0$ (б) від енергії пропускання E_0 : 1 – ширина щілини проміжної діафрагми 0,5 мм, 2 – ширина щілини 1 мм; чорні позначки – експеримент, білі – моделювання на ЕОМ

Експериментальні значення відносної величини смуги пропускання дещо перевищують отримані в результаті комп'ютерного моделювання, що може бути пов'язано із впливом неврахованого кутового розкиду частинок у пучку.

У *третьому підрозділі* запропоновано експериментальну методику визначення коефіцієнта трансмісії іонно-оптичної системи монопольного мас-аналізатора з енергофільтром для певного сорту іонів як функції енергії цих іонів. Коефіцієнт трансмісії визначається як відношення струму іонів з певним масовим числом M на виході іонно-оптичної системи (тобто тих, що реєструються детектором) до струму іонів із цим самим M на вході в систему. Методика ґрунтується на аналізі проходження через систему пучка іонів Ar^+ , очищеного від іонів інших сортів, з енергетичним розкидом не вище 1,5 еВ. Для вимірювання струму іонів на вході в систему використовувалася проміжна діафрагма енергофільтра. Дослідження показали, що зі збільшенням енергії іонів коефіцієнт трансмісії зростає і, починаючи з енергії 60 еВ, поступово виходить на насичення (рис. 4).

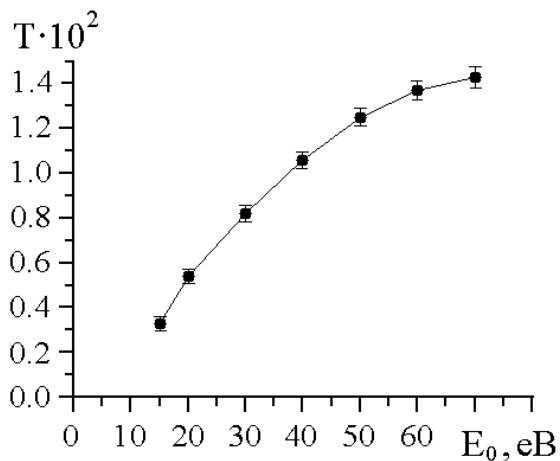


Рис. 4. Залежність коефіцієнта трансмісії іонно-оптичної системи монопольного мас-аналізатора з енергофільтром від енергії іонів $^{40}Ar^+$

Основним особливостям роботи установки в режимі рахунку імпульсів присвячений *четвертий підрозділ*. Визначено оптимальний діапазон напруги, що подається на вторинно-електронний помножувач. Розвинуто методику коректування сигналу детектора, яка враховує втрати імпульсів, що виникають при сигналі детектора вище $4 \cdot 10^4$ імп/с. Знайдено параметр максимальної швидкості рахунку імпульсів для формули коректування сигналу ($3,3 \cdot 10^5$ імп/с).

Третій розділ містить результати комплексного дослідження системи аналізу вторинних частинок і газового середовища.

У *першому підрозділі* досліджено залежність роздільної здатності мас-аналізатора від енергії іонів. З'ясовано, що оптимальне співвідношення роздільної здатності й трансмісії іонно-оптичної системи мас-аналізатора, обладнаного електростатичним енергофільтром, досягається в інтервалі енергій іонів 20-30 еВ. Методом комп'ютерного моделювання визначена оптимальна величина індукції магнітного поля, що фокусує електронний пучок в іонізаторі, при таких потенціалах елементів системи: анод 25 В, катод -45 В, екрануючий електрод -45,5 В. Так, величина магнітної індукції в області вершин катодів 34 мТл забезпечує проходження пучка електронів без втрат через боковий отвір іонізаційної камери (рис. 5). При цьому діаметр пучка електронів у центрі іонізаційного об'єму не перевищує 2 мм.

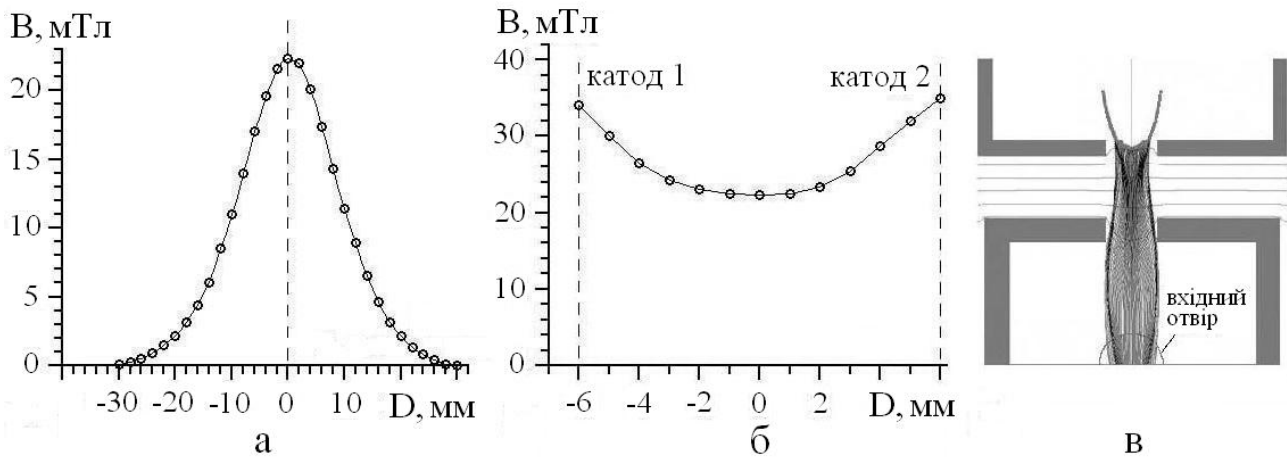


Рис. 5. Розподіл магнітного поля в іонізаторі вздовж осей іонного (а) та електронного (б) пучків; результат комп'ютерного моделювання траєкторій електронів в іонізаторі за даного розподілу магнітного поля (в)

Наступні три підрозділи присвячені визначенню оптимальних потенціалів іонно-оптичних елементів системи аналізу вторинних частинок для трьох режимів роботи методом комп'ютерного моделювання траєкторій іонів (рис. 6). В усіх трьох режимах потенціал екстрагуючого електрода -90 В, енергофільтр настроєний на 30 еВ.

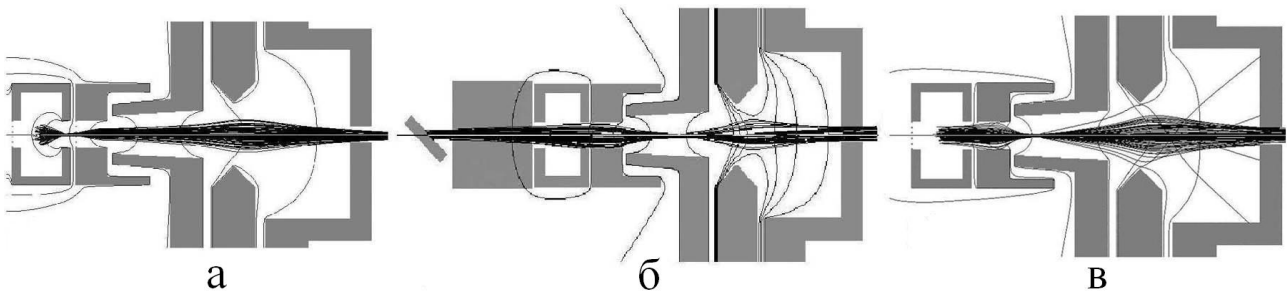


Рис. 6. Результати комп'ютерного моделювання траєкторій іонів у системі аналізу вторинних частинок для режимів аналізу: а – іонів газового середовища; б – вторинних іонів; в – вторинних нейтралей

Принципи роботи установки в режимі аналізу іонів газового середовища розглянуто у другому підрозділі. Проведено комп'ютерне моделювання траєкторій іонів газового середовища в системі аналізу (рис. 6а) при початкових енергіях $2,5 \cdot 10^{-2}$ еВ. Визначено оптимальні потенціали іонно-оптичних елементів системи: анод 30 В, діафрагма за анодом 5 В, фокусуючий електрод 20 В. Досліджено залежність струму іонів газового середовища від потенціалу діафрагми, що знаходиться за анодом (поз. 9 на рис. 2). Якщо потенціал діафрагми перевищує анодний на 1-2 В, інтенсивність сигналу газових іонів падає до рівня фону, що використовується при роботі установки в режимі МСВН. При цьому коефіцієнт зменшення струму газових іонів досягає 10^6 . На основі графіка залежності іонного струму детектора, що відповідає ізотопу аргону ^{36}Ar , від тиску аргону в приймальній камері визначені показники чутливості та порога чутливості установки в режимі газового аналізу (за

аргоном). Так, чутливість становила $2,13 \cdot 10^{-8}$ А/Па, а поріг чутливості – $1,5 \cdot 10^{-12}$ Па при струмі електронної емісії 0,5 мА.

У *третьому підрозділі* розглянуто принципи роботи установки в режимі мас-спектрометрії вторинних іонів. Проведено комп'ютерне моделювання траєкторій вторинних іонів у системі аналізу (рис. 6б) при початкових енергіях 10 еВ. Визначено оптимальні потенціали іонно-оптичних елементів системи: зразок 20 В, пластини дефлектора 20 В, анод 15 В, діафрагма за анодом 10 В, фокусуючий електрод 40 В. Досліджено залежність сигналу детектора, що відповідає вторинним іонам із певним масовим числом (Ta^+), від величини різниці потенціалів між пластинами дефлектора $U_{дефл}$ (енергофільтр настроєний на 30 еВ). Відповідно до цієї залежності, вже при $U_{дефл} = 60$ В сигнал вторинних іонів стає близьким до рівня фону, що використовується в режимі МСВН для очищення потоку постіонізованих вторинних нейтралей від вторинних іонів. При цьому коефіцієнт зменшення струму вторинних іонів досягає 10^5 . На прикладі спектра вторинних іонів титанового зразка з малою домішкою заліза визначений поріг чутливості установки в режимі ВІМС (за іонами Fe^+), що становив приблизно 10^{-6} .

Четвертий підрозділ присвячений особливостям роботи установки в режимі мас-спектрометрії вторинних нейтралей. Проведено комп'ютерне моделювання траєкторій постіонізованих розпилених нейтралей у системі аналізу (рис. 6в) при початкових енергіях 5 еВ. Визначено оптимальні потенціали іонно-оптичних елементів системи: анод 25 В, діафрагма за анодом 26 В, фокусуючий електрод 30 В. Отримано спектри ВІМС і МСВН бінарного сплаву $Ni_{40}Au_{60}$ (рис. 7).

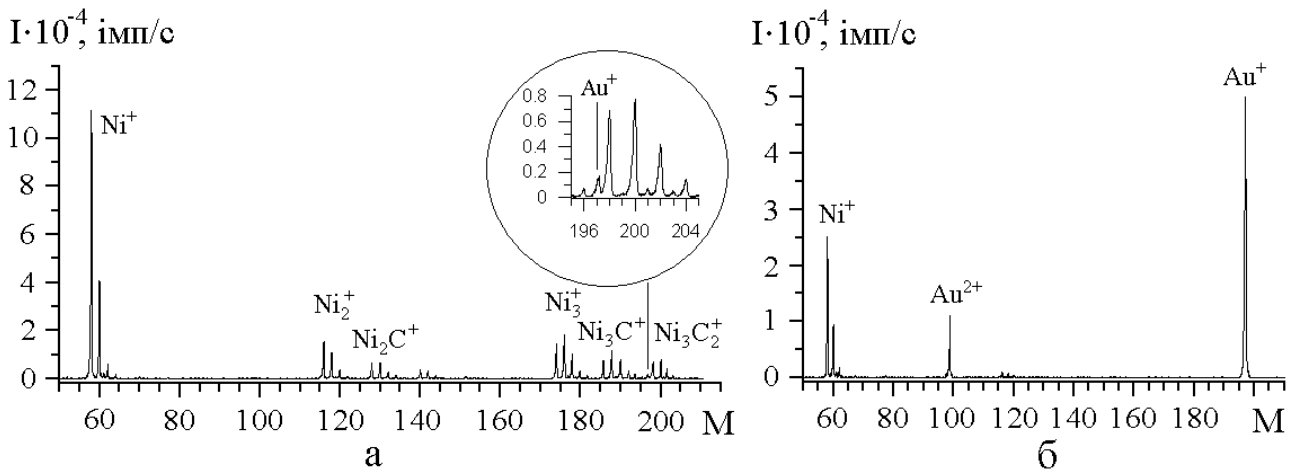


Рис. 7. Спектри ВІМС (а) і МСВН (б) бінарного сплаву $Ni_{40}Au_{60}$

На спектрі вторинних іонів сумарна інтенсивність піків ізотопів Ni^+ на два порядки перевищує інтенсивність піка Au^+ , у той час як на спектрі вторинних нейтралей це співвідношення близьке до стехіометричного. На основі отриманих спектрів можна зробити висновок, що за іонами Ni^+ більш високу чутливість має режим ВІМС, тоді як за іонами Au^+ чутливість установки значно вища в режимі МСВН.

Визначено поріг чутливості установки (за іонами Ni^+) в режимі МСВН (приблизно 10^{-5}). Зроблено теоретичну оцінку величини корисного виходу іонів при роботі в режимі МСВН ($3,5 \cdot 10^{-10}$). Ця величина близька до експериментально визначеної на прикладі іонів Ni^+ ($2,7 \cdot 10^{-10}$).

У **четвертому розділі** наведені результати експериментів з дослідження процесів іонного розпилення методом МСВН у широкому інтервалі енергій первинних іонів (до 170 кеВ) за допомогою створеного обладнання.

У *першому підрозділі* подано методику та проведені дослідження емісії нейтральних кластерів міді методом МСВН. Методика ґрунтується на дослідженні відносних інтенсивностей сигналу детектора $I(\text{Cu}_n^+)/I(\text{Cu}^+)$, що відповідають постіонізованим кластерам міді з n атомів, при зміні одного параметра експерименту та фіксації всіх інших параметрів. В результаті отримано залежності відносної інтенсивності сигналу детектора, що відповідає постіонізованим кластерам міді з $n = 2$ і 3, від енергії первинних іонів аргону (рис. 8а).

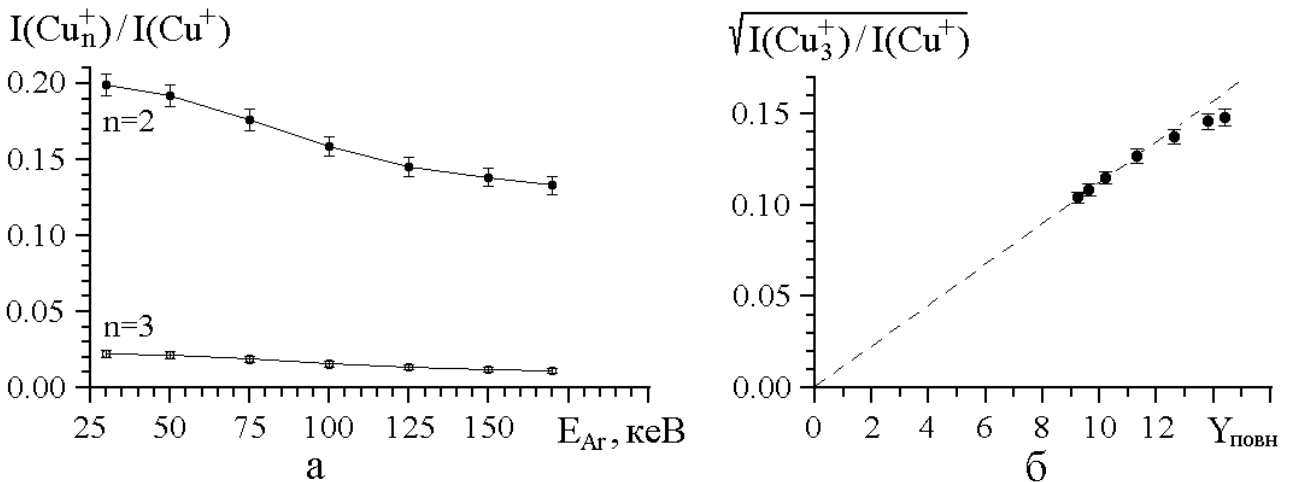


Рис. 8. Залежність відносної інтенсивності сигналу постіонізованих кластерів міді Cu_n ($n = 2; 3$) від енергії первинних іонів аргону (густина струму $0,17 \text{ mA/cm}^2$, кут падіння 45° , кут емісії 0°) (а); залежність величини $[I(\text{Cu}_3^+)/I(\text{Cu}^+)]^{1/2}$ від повного коефіцієнта розпилення міді $Y_{\text{повн}}$ (б)

Емісія нейтральних кластерів металів при бомбардуванні іонами інертних газів добре описується так званою рекомбінаційною моделлю формування кластерів [1*], згідно з якою коефіцієнт розпилення кластера із n атомів металу X $Y(X_n)$ визначається співвідношенням

$$Y(X_n) \sim (Y_{\text{повн}})^n,$$

де $Y_{\text{повн}}$ – повний коефіцієнт розпилення металу. При цьому для відносної інтенсивності сигналу кластера із n атомів міді ($n > 2$) можна отримати таке співвідношення:

$${}^{n-1}\sqrt{\frac{I(\text{Cu}_n^+)}{I(\text{Cu}^+)}} \sim Y_{\text{повн}}.$$

На рис. 8б представлено відповідну залежність (для $n = 3$), отриману на основі експериментальних даних (рис. 8а) та моделювання на ЕОМ (програма SRIM) для знаходження функції $Y_{новн}(E_{Ar})$. Згідно з графіком, при помірних величинах коефіцієнта розпилення міді ця лінійна залежність дійсно витримується, але при $Y_{новн} > 12$ спостерігається поступовий вихід на насичення. Це означає, що рекомбінаційна модель формування кластерів є непридатною при високих величинах коефіцієнта розпилення металу.

Отримано також залежності відносної інтенсивності сигналу детектора, що відповідає постіонізованим кластерам міді з $n = 2$ і 3 від кута емісії розпиленних частинок та густини струму первинних іонів (рис. 9).

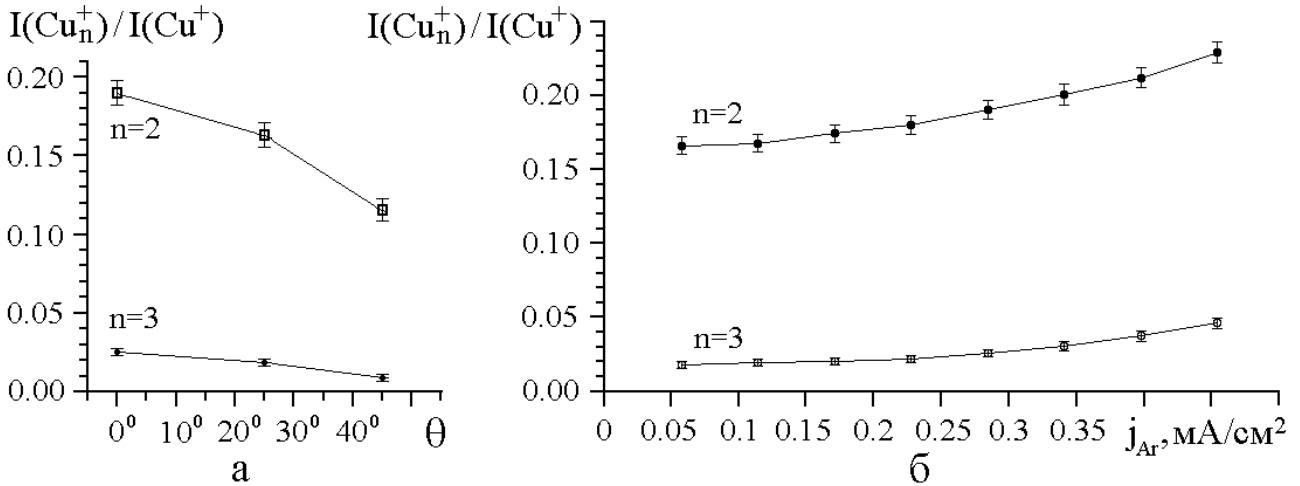


Рис. 9. Залежності відносної інтенсивності сигналу постіонізованих кластерів міді Cu_n ($n = 2; 3$): а – від кута емісії частинок (енергія 75 кеВ, кут падіння 45° , густина струму $0,3 MA/cm^2$); б – від густини струму первинних іонів (енергія 75 кеВ, кут падіння 45° , кут емісії 0°)

Отримані кутові розподіли відносної інтенсивності кластерів Cu_2 і Cu_3 відповідають рекомбінаційній моделі, згідно з якою кутові розподіли відносної інтенсивності кластерів із n атомів описуються функцією $(\cos \theta)^{p(n-1)}$, де θ – кут емісії частинок. При цьому коефіцієнт p у нашому випадку дорівнює 1,6. Зростання відносної інтенсивності кластерів зі збільшенням густини струму первинних іонів пов'язано зі збільшенням густини розпиленних атомів поблизу поверхні зразка, що означає збільшення ймовірності їх рекомбінації.

У другому підрозділі подано методику та проведені дослідження в режимі МСВН процесу переважного розпилення ізоотопів молібдену (у парі $^{92}Mo - ^{100}Mo$) при бомбардуванні іонами аргону в широкому діапазоні енергій (30-170 кеВ) та при різних кутах емісії розпиленних частинок. Величина ізоотопного збагачення характеризується наступним параметром:

$$\delta_0 = \frac{(Y_1/Y_2)_0}{(Y_1/Y_2)_\infty} - 1 = \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^{2m} - 1,$$

де $(Y_1/Y_2)_0$ і $(Y_1/Y_2)_\infty$ – відношення коефіцієнтів розпилення ізоотопів молібдену з масами M_1 і M_2 у наближенні відповідно нульового та нескінченного флюенсу первинних іонів; m – параметр, що залежить від потенціалу взаємодії між

атомами мішені ($0 < m < 1$). Методика ґрунтується на дослідженні залежності відношення мас-спектрометричних сигналів даних ізотопів молібдену від часу розпилення зразка. Результати досліджень переважного розпилення, проведених при різних енергіях первинних іонів, зведені в табл. 1 (кут падіння пучка 45^0 , кут емісії розпилених частинок 0^0).

Таблиця 1

Результати досліджень переважного розпилення в парі $^{92}\text{Mo} - ^{100}\text{Mo}$
при різних енергіях первинних іонів Ar^+

E_{Ar} , кеВ	30	80	130	170
δ_0 , %	$5,2 \pm 0,6$	$4,9 \pm 0,6$	$4,7 \pm 0,6$	$5,1 \pm 0,6$
m_{eff}	0,30	0,29	0,28	0,30
F_{st} , cm^{-2}	$6,3 \cdot 10^{16}$	$1,4 \cdot 10^{17}$	$2,2 \cdot 10^{17}$	$2,7 \cdot 10^{17}$
$Y_{\text{Mo}}(45^0)$	6,4	5,7	5,1	4,8
d_{st} , Å	640	1230	1728	2030
R_p , Å	200	430	640	810

У таблиці 1 використано такі позначення: E_{Ar} – енергія первинних іонів; m_{eff} – ефективна величина параметра m ; F_{st} і d_{st} – відповідно іонний флюенс та глибина кратера, що відповідають переходу процесу в стан рівноваги; $Y_{\text{Mo}}(45^0)$ – коефіцієнт розпилення молібдену іонами аргону при куті падіння 45^0 (моделювання на ЕОМ, програма SRIM); R_p – пробіг іонів у зразку.

Згідно з отриманими даними, зі збільшенням енергії первинних іонів у діапазоні від 30 до 170 кеВ збільшується глибина, на яку необхідно розпилити зразок для переходу процесу в рівноважний стан, у якому потік розпилених частинок відображає ізотопний склад зразка. У середньому ця глибина в 2,5-3 рази перевищує пробіг іонів у зразку при відповідній енергії. Оскільки дані величини глибин значно перевищують глибини емісії розпилених атомів (~ 1 нм), можна зробити висновок, що на процес переважного розпилення ізотопів значно впливають механізми імплантації атомів віддачі при зіткненнях і каскадного переміщення атомів. Отримані в результаті параметри ізотопного збагачення δ_0 (4,9%) і міжатомної взаємодії m (0,29) залишаються в цілому стабільними у даному діапазоні енергій, що відповідає результатам комп'ютерного моделювання переважного розпилення ізотопів молібдену [2*].

Зі збільшенням кута емісії розпилених частинок спостерігається зменшення ізотопного відношення $I(^{92}\text{Mo}) / I(^{100}\text{Mo})$ у наближеннях нульового та нескінченного флюенсів первинних іонів, а також відповідного показника ізотопного збагачення (рис. 10). У наближенні нескінченного флюенсу зменшення ізотопного відношення є наслідком зміненого ізотопного складу приповерхневих шарів зразка. У наближенні нульового флюенсу, як показує моделювання [2*], це зменшення пов'язане з сумарною дією каскадних ефектів та поверхневого бар'єра.

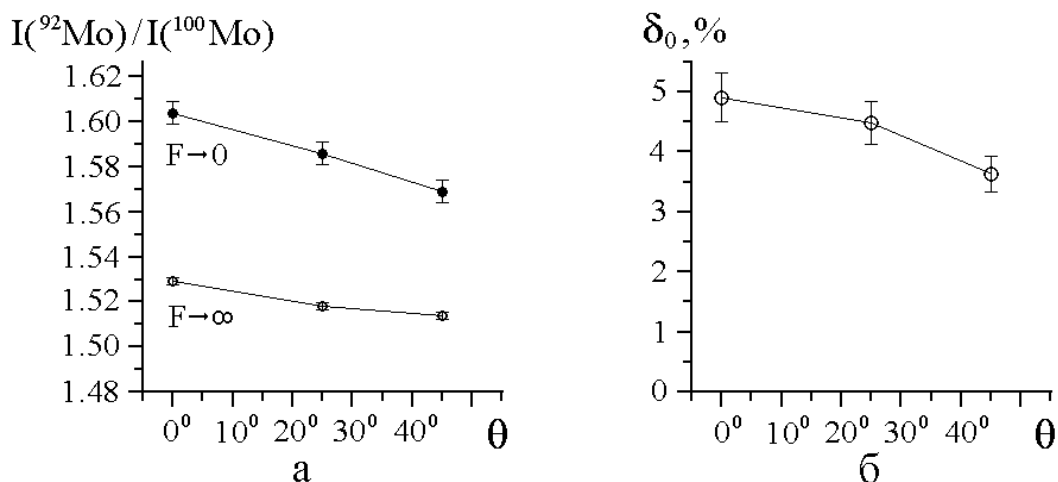


Рис. 10. Залежності ізотопного відношення $I(^{92}\text{Mo})/I(^{100}\text{Mo})$ у наближеннях нульового та нескінченного флюенсів первинних іонів (а), а також відповідного показника ізотопного збагачення (б) від кута емісії розпиленних частинок (первинні іони – Ar^+ , енергія 80 кеВ, кут падіння 45°)

ВИСНОВКИ

У ході виконання дисертаційної роботи розроблено нове експериментальне обладнання та методики для мас-спектрометрії розпиленних нейтральних частинок при енергіях первинних іонів до 170 кеВ, проведено оптимізацію параметрів обладнання та отримано нові експериментальні дані щодо фізичних механізмів іонного розпилення матеріалів.

1. Розроблено й побудовано нову експериментальну установку для мас-спектрометричного аналізу розпиленних нейтральних частинок. На відміну від традиційних установок подібного типу основою даної конструкції є високодозний іонний імплантер, що дозволило збільшити верхню межу діапазону енергій первинних іонів до 170 кеВ.

2. Розроблено методики та проведені дослідження окремих частин експериментальної установки, зокрема, енергофільтра іонів і монопольного мас-аналізатора. Отримано такі результати:

- відносна ширина смуги пропущення енергофільтра (на рівні 50% від максимуму) $\Delta E/E_0$ становила в середньому 6% (ширина щілини проміжної діафрагми 0,5 мм) та 11,5% (ширина щілини 1 мм);

- зі збільшенням енергії іонів збільшується коефіцієнт трансмісії іонно-оптичної системи монопольного мас-аналізатора, обладнаного енергофільтром (з виходом на насичення при енергіях вище 60 еВ), та погіршується роздільна здатність; оптимальне співвідношення цих двох параметрів досягається в інтервалі енергій іонів 20-30 еВ;

- запропоновано методику обліку прорахунків імпульсів при високих рівнях сигналу детектора (вище $4 \cdot 10^4$ імп/с); параметр максимальної швидкості рахунку імпульсів для формули коректування сигналу становив $3,3 \cdot 10^5$ імп/с.

3. При комплексному дослідженні системи аналізу вторинних частинок на основі електронно-променевого іонізатора, проведеному вперше, отримано такі результати:

- шляхом моделювання на ЕОМ визначено оптимальну величину індукції магнітного поля, що фокусує електронний пучок в іонізаторі (34 мТл в області вершин катодів при іонізуючій напрузі 70 В), при цьому діаметр пучка електронів у центрі іонізаційного об'єму становить близько 2 мм;

- шляхом моделювання на ЕОМ для кожного із трьох режимів роботи установки (ВМС, МСВН і газовий аналіз) визначено потенціали іонно-оптичних елементів системи аналізу вторинних частинок, що забезпечують оптимальне транспортування іонів;

- з'ясовано, що розроблена система блокування проходження вторинних іонів та іонів газового середовища дозволяє знизити рівень цих сигналів у режимі МСВН у 10^5 і 10^6 разів відповідно;

- теоретична оцінка величини корисного виходу іонів при роботі в режимі МСВН ($3,5 \cdot 10^{-10}$) близька до експериментально визначеної на прикладі іонів Ni^+ ($2,7 \cdot 10^{-10}$) та знаходиться на рівні закордонних установок МСВН подібного типу, побудованих на основі квадрупольних мас-аналізаторів.

4. Розроблено методику та проведені дослідження відносної інтенсивності нейтральних кластерів міді при різних параметрах пучка первинних іонів аргону та кутах емісії розпиленних частинок. Отримано наступні нові фізичні результати:

- зі збільшенням енергії первинних іонів у діапазоні від 30 до 170 кеВ спостерігається зменшення відносної інтенсивності кластерів міді у спектрі розпиленних частинок; вигляд отриманої кривої для кластера Cu_3 відповідає рекомбінаційній моделі формування кластерів при іонному розпиленні на ділянці кривої, що відповідає помірним значенням повного коефіцієнту розпилення міді ($Y_{повн} < 12$);

- зі збільшенням кута емісії відносний вміст кластерів міді в потоці розпиленних частинок зменшується відповідно до рекомбінаційної моделі, що передбачає кутові розподіли даного параметра у вигляді $(\cos \theta)^{p(n-1)}$, де θ – кут емісії частинок, n – число атомів у кластері (у нашому випадку $p \approx 1,6$);

- зі збільшенням густини струму первинних іонів відносна інтенсивність кластерів міді збільшується, що пов'язано зі збільшенням густини розпиленних атомів біля поверхні зразка та, відповідно, ймовірності їх рекомбінації.

5. Розроблено методику та проведені дослідження процесу переважного розпилення ізотопів (у парі $^{92}Mo - ^{100}Mo$) при бомбардуванні іонами аргону в діапазоні енергій від 30 до 170 кеВ. Отримано наступні нові фізичні результати:

- параметр ізотопного збагачення δ_0 та, відповідно, параметр міжатомної взаємодії m залишаються стабільними у зазначеному діапазоні енергій ($\delta_0 \approx 4,9\%$, $m \approx 0,29$), що знаходиться у відповідності до результатів комп'ютерного моделювання процесу переважного розпилення ізотопів молібдену;

- зі збільшенням енергії первинних іонів у зазначеному діапазоні збільшується глибина, на яку потрібно розпилити зразок для переходу процесу

в стан рівноваги (з 640 до 2030 Å), що в 2,5-3 рази більше пробігу іонів у зразку при відповідній енергії;

- зі збільшенням кута емісії розпилених нейтральних частинок спостерігається зменшення ізотопного відношення у наближеннях нульового та безкінечного флюенсів первинних іонів, а також відповідного показника ізотопного збагачення.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Батурич В. А. Особенности программного обеспечения однополюсных масс-спектрометров типа МХ7304А / В. А. Батурич, С. А. Еремич, В. А. Сурков // Вісник Сумського державного університету. Серія: Фізика, математика, механіка. – 2003. – № 8 (54). – С. 65–71.

2. Батурич В. А. Экспериментальное исследование характеристик энергофильтра к монополюсному масс-спектрометру МХ7304А / В. А. Батурич, С. А. Еремич // Приборы и техника эксперимента. – 2005. – № 2. – С. 120–122.

3. Батурич В. А. Масс-спектрометр вторичных нейтралей на базе ионного имплантера / В. А. Батурич, С. А. Еремич, С. А. Пустовойтов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения. – 2006. – № 5. – С. 222–224.

4. Батурич В. А. Вторично-ионный масс-спектрометр на базе высокодозного ионного имплантера / В. А. Батурич, С. А. Еремич, С. А. Пустовойтов // Журнал технической физики. – 2007. – № 6. – С. 93–98.

5. Батурич В. А. Определение коэффициента пропускания ионов монополюсных масс-спектрометров типа МХ7304А / В. А. Батурич, С. А. Еремич // Вісник Сумського державного університету. Серія: Фізика, математика, механіка. – 2007. – № 2. – С. 127–133.

6. Батурич В. А. Особенности работы монополюсных масс-спектрометров МХ7304А в режиме счета импульсов / В. А. Батурич, С. А. Еремич // Приборы и техника эксперимента. – 2007. – № 6. – С. 114–116.

7. Батурич В. А. Масс-спектрометрия вторичных нейтральных частиц (обзор) / В. А. Батурич, С. А. Еремич // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2008. – № 7. – С. 87–107.

8. Батурич В. А. Экспериментальная установка для анализа вторичных нейтральных частиц / В. А. Батурич, С. А. Еремич // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения. – 2008. – № 4. – С. 255–259.

9. Батурич В. А. Масс-спектрометрическое исследование процессов ионного распыления при высоких энергиях первичных ионов / В. А. Батурич, С. А. Еремич // Журнал нано- і електронної фізики. – 2009. – Т. 1, № 1. – С. 80–103.

10. Батурич В. А. Экспериментальное исследование характеристик энергофильтра к монополюсному масс-спектрометру МХ7304А / В. А. Батурич, С. А. Еремич // Научно-техническая конференция преподавателей, сотру-

ников, аспирантов и студентов физико-технического факультета СумГУ, Сумы, Украина. – 14–28 апреля 2004 г. Тезисы докладов. – Сумы, 2004. – С. 57–59.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ В АВТОРЕФЕРАТІ ЛІТЕРАТУРИ

1*. Gerhard W. A model calculation of the neutral molecule emission by sputtering processes / W. Gerhard // Zeitschrift für Physik B. – 1975. – V. 22, № 1. – P. 31–39.

2*. Shulga V. I. Angular dependence of preferential emission in isotope sputtering / V. I. Shulga // Radiation Effects and Defects in Solids. – 1997. – V. 142, № 1. – P. 351–367.

АНОТАЦІЯ

Єрємін С. О. Мас-спектрометрія нейтральних частинок, розпилених іонами з енергією до 170 кеВ. – Рукопис.

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

Дисертація присвячена експериментальному дослідженню процесів іонного розпилення твердих тіл у широкому інтервалі енергій первинних іонів методом мас-спектрометрії вторинних нейтральних частинок. Із цією метою створена установка для мас-спектрометричного аналізу розпилених нейтралей, що дозволяє працювати у діапазоні енергій первинних іонів до 170 кеВ, та розроблені відповідні методики досліджень.

Запропоновано методику обчислення коефіцієнта трансмісії іонно-оптичної системи монопольного мас-аналізатора з енергофільтром як функції енергії іонів. Методом комп'ютерного моделювання траєкторій електронів та іонів у системі аналізу розпилених частинок визначені оптимальні потенціали іонно-оптичних елементів системи, що забезпечують максимальну чутливість установки, для кожного із трьох режимів роботи.

Проведені дослідження емісії нейтральних кластерів міді, а також процесу переважного розпилення ізотопів молібдену при бомбардуванні поверхні іонами аргону в діапазоні енергій від 30 до 170 кеВ. Отримані результати добре узгоджуються з теорією формування кластерів при розпиленні та результатами моделювання на ЕОМ процесів переважного розпилення ізотопів.

Ключові слова: іонне розпилення, мас-спектрометр, первинні іони, вторинні нейтралі, енергофільтр, кластер, ізотоп.

АННОТАЦИЯ

Еремин С. А. Масс-спектрометрия нейтральных частиц, распыленных ионами с энергией до 170 кэВ. – Рукопись.

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

Диссертация посвящена экспериментальному исследованию процессов ионного распыления твердых тел в широком интервале энергий первичных ионов методом масс-спектрометрии вторичных нейтральных частиц. С этой целью создана установка для масс-спектрометрического анализа распыленных нейтралей, которая в отличие от традиционных установок подобного типа позволяет работать в диапазоне энергий первичных ионов до 170 кэВ, и разработаны соответствующие методики исследований.

Экспериментально определена относительная ширина полосы пропускания энергофильтра на полувысоте (6% та 11,5% при ширине щели промежуточной диафрагмы энергофильтра 0,5 и 1 мм соответственно). Предложена методика исследования коэффициента трансмиссии ионно-оптической системы монопольного масс-анализатора с энергофильтром как функции энергии ионов. Методом компьютерного моделирования траекторий электронов и ионов в системе анализа распыленных частиц определены потенциалы ионно-оптических элементов системы, обеспечивающие максимальную чувствительность установки, для каждого из трех режимов работы.

Проведены масс-спектрометрические исследования эмиссии нейтральных кластеров меди Cu_n ($n = 2$ и 3) при бомбардировке поверхности образца ионами аргона в интервале энергий от 30 до 170 кэВ. Установлено, что с ростом энергии первичных ионов в указанном диапазоне, а также с ростом угла эмиссии распыленных частиц относительное содержание кластеров меди в потоке распыленных частиц уменьшается в соответствии с рекомбинационной моделью формирования кластеров при распылении.

Проведены также исследования преимущественного распыления изотопов на примере пары ^{92}Mo - ^{100}Mo при бомбардировке ионами аргона в интервале энергий от 30 до 170 кэВ. Установлено, что в указанном диапазоне энергий первичных ионов параметр изотопного обогащения δ_0 остается стабильным ($\delta_0 \approx 4,9\%$). С ростом угла эмиссии распыленных частиц показатель изотопного обогащения уменьшается. Данные экспериментальные результаты соответствуют полученным другими исследователями в процессе моделирования на ЭВМ.

Ключевые слова: ионное распыление, масс-спектрометр, первичные ионы, вторичные нейтралы, энергофильтр, кластер, изотоп.

ABSTRACT**Yeryomin S. O. Mass-spectrometry of neutral particles sputtered by ions with energies up to 170 keV. – Manuscript.**

Thesis for a scientific degree of candidate of science in physics and mathematics, by speciality 01.04.01 – physics of devices, elements and systems. – Sumy State University, Sumy, 2010.

The thesis is devoted to experimental research of ion sputtering processes of solids in a wide range of primary ion energies using secondary neutral mass-spectrometry technique. For this purpose an installation for mass-spectrometric analysis of secondary neutrals, that allows working in the range of primary ion energies up to 170 keV, is built and the corresponding technique of measuring is developed.

The technique of measuring the transmission factor of an ion-optical system of the monopole mass-analyzer and energy filter as a function of ion energies is offered. By means of computer simulation of electron and ion trajectories in sputtered particle analysis system the optimal potentials of ion-optical elements of the system, that correspond to the maximum sensitivity of the installation, are determined for each of the three operation modes.

The mass-spectrometric research of neutral copper cluster emission and process of preferential sputtering of molybdenum isotopes at argon ion bombardment of surface in the ion energy range from 30 to 170 keV is conducted. The obtained experimental results are in good accordance with the theory of cluster formation at sputtering and the results of computer simulation of isotope preferential sputtering processes.

Keywords: ion sputtering, mass-spectrometer, primary ions, secondary neutrals, energy filter, cluster, isotope.