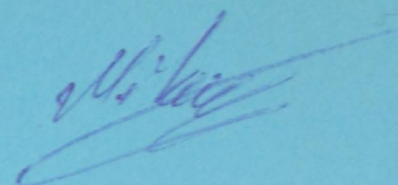


НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЇ ФІЗИКИ

Дрозденко Михайло Олександрович



УДК 621.386.12

**ФОРМУВАННЯ ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКА
В РЕНТГЕНІВСЬКИХ МЕТОДАХ ДОСЛІДЖЕННЯ**

01.04.20 – фізика пучків заряджених частинок

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті прикладної фізики НАН України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук,
академік НАН України
Сторіжко Володимир Юхимович,
Інститут прикладної фізики НАН України
(м. Суми), завідувач відділу ядерно-фізичних
досліджень, директор,

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Лисенко Олександр Володимирович,
Сумський державний університет,
завідувач кафедри прикладної математики та
модельювання складних систем;

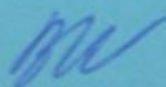
кандидат фізико-математичних наук,
Стадник Олександр Дмитрович,
Сумський державний педагогічний університет
ім. А.С. Макаренка,
доцент кафедри фізики та методики навчання фізики

Захист відбудеться «27» квітня 2017 року о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 55.250.01 при Інституті прикладної фізики НАН України за адресою: м. Суми, вул. Петропавлівська 58, конференц-зал.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту прикладної фізики НАН України.

Автореферат розісланий «27» березня 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат фізико-математичних наук



В.М. Недорешта

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Останнім часом відбувається бурхливий розвиток рентгенівських методів дослідження, який пов'язаний зі створенням джерел когерентного рентгенівського випромінювання (РВ) з рекордною яскравістю та досягненнями в технології рентгенівської оптики. На жаль, надмірно висока вартість та габарити джерел синхротронного випромінювання не залишають шансів широкого їх використання в лабораторних умовах, клініках, промислових технологіях і ін. В цих умовах надзвичайно актуальною є розробка нових компактних джерел РВ з високою яскравістю та когерентністю. Розробка компактних джерел РВ активно ведеться як в напрямку підвищення параметрів рентгенівських трубок, так і в напрямках використання джерел на базі прискорювачів іонів, потужних лазерів та плазмових установок.

Для реалізації рентгенівських методів дослідження необхідним є джерело РВ. На теперішній час основними джерелами РВ є синхротрони, радіоактивні ізотопи та рентгенівські трубки. Але використання синхротронного випромінювання супроводжується надто високими фінансовими витратами, що не завжди є виправданим. Іншим недоліком синхротронів є неможливість проведення дослідження об'єктів, які не можна перемістити в лабораторію (настінний живопис, габаритні історичні пам'ятки тощо). В свою чергу, використання радіоактивних ізотопів потребує особливої уваги при обробці даних через постійну втрату інтенсивності джерела. Але головним недоліком є проблеми, що зумовлені законодавчими вимогами щодо зберігання, транспортування та використання радіоактивних ізотопів. Таким чином, найбільш розповсюдженими джерелами РВ є рентгенівські трубки.

В рентгенівських трубках іонізуюче випромінювання генерується через взаємодію електронного пучка з мішенню (анодом), а, отже, головною задачею при генерації РВ для дослідження матеріалів та речовин є формування електронних пучків.

Від параметрів електронного пучка, що генерує випромінювання в рентгенівській трубці, в значній мірі залежать аналітичні можливості обладнання для рентгенівського аналізу. При цьому різноманіття видів рентгенівських трубок забезпечує гнучкість при проведенні того чи іншого експерименту, але існують специфічні задачі, які потребують індивідуального підходу. Тому питання формування електронних пучків для збудження РВ, створення лабораторних установок на їх основі та проведення рентгенівських методів дослідження є актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у відділі ядерно-фізичних досліджень Інституту прикладної фізики НАН України. Робота безпосередньо пов'язана з тематичним планом Інституту та є частиною наступних науково-дослідних робіт: «Розробка багатоцільової установки рентгенівського мікроаналізу Інституту прикладної фізики НАН України» (державний реєстраційний №0110U000721, термін виконання 2010-2011 рр.); «Розроблення джерел РВ з високою яскравістю та

створення на їх основі лабораторних установок для реалізації методів мікрорентгенофлуоресцентного аналізу, мікрорентгенівської дифракції, рентгенівської комп'ютерної мікротомографії» (державний реєстраційний №0110U004712, термін виконання 2010-2014 рр.). Частину експериментальної роботи було проведено в лабораторії Міжнародної агенції з атомної енергії в рамках міжнародних проектів: RER/8/015 «Використання ядерних методів для визначення характеристик і збереження пам'яток культурної спадщини в Європейському регіоні» та RER/0/034 «Оптимізація характеристики, збереження та захисту артефактів культурної спадщини». Здобувач брав участь у дослідженнях в якості відповідального виконавця.

Мета і задачі роботи. Метою роботи є – дослідження фізичних закономірностей формування електронних та рентгенівських пучків для задач рентгенівського аналізу та створення лабораторної установки на базі прецизійного джерела електронів.

Для досягнення поставленої мети у дисертаційній роботі розв'язуються наступні задачі:

- визначення оптимальних параметрів катодного вузла для отримання струму електронного пучка не менше 1 мА;
- розрахунок та моделювання електронно-оптичної схеми з можливістю фокусування пучка електронів на мішені;
- створення багатоцільової лабораторної установки для реалізації рентгенівських методів дослідження матеріалів та речовин;
- розробка та експериментальна апробація методики визначення чутливості рентгенфлуоресцентних спектрометрів;
- проведення експериментального дослідження об'єктів методами рентгенфлуоресцентного аналізу та рентгенівської радіографії.

Об'єкт дослідження – фізичні процеси при формуванні електронних та рентгенівських пучків для реалізації рентгенівських методів аналізу матеріалів та речовин.

Предмет дослідження – параметри пучка електронів, який генерує рентгенівське випромінювання та практичне використання цього випромінювання.

Методи дослідження:

- метод скінчених інтегралів при формуванні електронного пучка;
- метод рентгенфлуоресцентного аналізу (РФА);
- метод рентгенівської радіографії;
- метод елементної чутливості рентгенфлуоресцентного аналізу;
- метод фундаментальних параметрів.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше запропоновано та експериментально реалізовано модель триелектродного джерела електронів на базі площинного вольфрам-ренієвого катоду непрямого розжарювання, яка відрізняється від раніше відомих можливістю змінювати геометрію розташування електродів.

2. Вперше теоретично встановлено та експериментально підтверджено оптимальні параметри розташування електродів катодного вузла для формування електронного пучка з метою отримання джерела рентгенівського випромінювання з високою яскравістю за умови максимізації часу життя площинного вольфрам-ренієвого катоду непрямого розжарювання.

3. Запропоновано модель рентгенівського спектрометра з вторинною мішенню, яка відрізняється від класичної моделі наявністю полікапілярних рентгенівських лінз в проміжках проходження рентгенівських променів. Це дозволяє значно підвищити аналітичні характеристики рентген флуоресцентних спектрометрів.

4. Вперше застосовано елементну чутливість рентгенфлуоресцентних спектрометрів для порівняння аналітичних можливостей приладів.

Практичне значення наукових результатів. Під час виконання дослідження в ІПФ НАН України було розраховано, змодельовано та реалізовано джерело електронів на базі площинного вольфрам-ренієвого катоду непрямого розжарювання з регульованою геометрією електродів. Це дозволило отримати нове джерело рентгенівського випромінювання з можливістю фокусування електронного пучка на мішені, яке стало основою багатоцільової установки з реалізованими рентгенфлуоресцентним та радіографічним методами дослідження матеріалів та речовин. Результати, отримані при дослідженні особливостей формування електронних пучків, можуть бути використані при розрахунках та проектуванні електронно-променевих приладів та пристроїв.

Створено апаратуру та аналітичні методики можуть бути використані для дослідження різноманітних матеріалів та речовин, біологічних зразків, електронних компонентів, археологічних артефактів тощо. Вдосконалена методика порівняльного аналізу рентгенівських спектрометрів може бути використана для більш якісного підбору апаратури під конкретні об'єкти дослідження. Запропонована схема рентгенівського спектрометра з вторинною мішенню та полікапілярною оптикою має неабиякий потенціал не лише з аналітичної та дослідницької точок зору, але й з економічної, за умови комерційного виробництва.

Адаптовано та використано методику визначення товщини тонких шарів золота методом РФА.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно або за його безпосередньої участі. Постановка мети і завдань дослідження та обговорення одержаних результатів проводилися спільно з науковим керівником академіком НАН України В.Ю. Сторіжко, а також з к.ф.-м.н. О.М. Бугаєм.

Автор відіграв провідну роль у створенні багатоцільової лабораторної установки для реалізації рентгенівських методів дослідження матеріалів та речовин в ІПФ НАН України. В роботах [3, 4, 6, 7, 9, 10] автором детально описано створену електронну гармату з площинним вольфрам-ренієвим катодом непрямого розжарювання. Досліджено процес формування

електронного пучка при його проходженні від катоду до мішені для генерації РВ. Здобувачем визначено оптимальні параметри розташування електродів катодного вузла для формування електронного пучка з метою отримання джерела РВ з високою яскравістю за умови максимізації часу життя площинного вольфрам-ренієвого катоду непрямого розжарювання. Проведено апробацію джерела РВ для реалізації РФА та рентгенівської радіографії. В роботі [5] дисертантом було запропоновано та обґрунтовано нову модель геометрії рентгенфлуоресцентного спектрометра з вторинною мішенню та використанням полікапілярної рентгенівської оптики, на що був отриманий відповідний патент. В роботі [1] здобувачем запропоновано та описано детальну методологію розрахунку елементної чутливості, яку можна застосувати до рентгенфлуоресцентних спектрометрів будь-якого типу як для кількісного РФА так і для порівняння аналітичних можливостей спектрометрів. В роботах [2], [8] автором адаптовано та використано методику визначення товщини тонких шарів золота через відношення інтенсивностей характеристичних ліній L_{α}/L_{β} . Визначено найбільш вірогідні товщини позолоти елементів з латуні.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися та обговорювалися на таких конференціях та семінарах: 61-ша щорічна конференція по застосуванню рентгенівського аналізу «Denver X-ray Conference 2012» (м. Денвер, США, 6-10 серпня 2012), Європейська конференція з рентгенівської спектрометрії «EXRS-2012» (м. Відень, Австрія, 18-22 червня 2012), Європейська конференція з рентгенівської спектрометрії «EXRS-2014» (м. Болонья, Італія, 15-20 червня 2014), 2-я міжнародна науково-практична конференція «Nanotechnology and nanomaterials» (Львів, Україна, 27-30 серпня 2014) та Спільний семінар МЦТФ-МАГАТЕ «Досягнення в області рентгенівської апаратури і пристроїв для застосувань в області культурної спадщини» (м. Трієст, Італія, 13-17 червня 2015).

Публікації. Основні матеріали дисертації опубліковані у 10 наукових працях, з них 4 статті в реферованих наукових журналах (Вісник ХНУ, X-ray Spectrometry, Журнал нано- та електронної фізики, Nanomaterials: Applications & Properties), 1 патент України на корисну модель, частина розділу в монографії «Наноразмерные системы и наноматериалы: исследования в Украине» та 4 праці, що опубліковані як тези в збірниках наукових праць міжнародних конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, трьох оригінальних розділів, загальних висновків та списку використаних джерел. Обсяг дисертації складає 131 сторінка, у тому числі 52 рисунків та 13 таблиць. Список використаних джерел містить 84 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету й основні завдання дослідження, визначено об'єкт і

предмет дослідження, розкриті наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, зв'язок роботи з науковими програмами і темами, визначено особистий внесок здобувача, наведено відомості апробації результатів і структури дисертації.

Перший розділ «Фізичні основи рентгенівського випромінювання» присвячено аналізу літературних джерел, в яких висвітлено загальні принципи генерації РВ. Особливу увагу приділено збудженню РВ з необхідними параметрами за допомогою електронних пучків.

Найбільш розповсюдженим методом генерації РВ є взаємодія електронного пучка з матеріалом мішені. Оскільки при взаємодії пучка електронів з мішенню відбувається генерація як гальмівного, так і характеристичного випромінювання, слід враховувати обидві складові отриманого спектру. На характеристики рентгенівського спектру впливають параметри електронного пучка, геометричне розташування мішені, а також матеріал мішені. Показана актуальність використання сфокусованих електронних пучків для генерації РВ з використанням полікапілярної рентгенівської оптики.

Основою класичних рентгенфлуоресцентних спектрометрів є рентгенівські трубки, які збуджують вторинне РВ з матеріалу досліджуваного зразка, котре в подальшому реєструється спектрометричним трактом та обробляється різними аналітичними методами. Існуюче різноманіття видів рентгенівських трубок забезпечує гнучкість при проведенні експериментальних досліджень рентгенівськими методами, але існують специфічні задачі, які потребують індивідуального підходу. Рентгенівські методи дослідження матеріалів потребують певних характеристик джерела РВ та для кожної певної задачі формуються свої вимоги для джерела РВ, а отже формування електронного пучка з необхідним параметром для отримання специфічного джерела РВ. Наразі, особливу увагу приділяють точковим джерелам РВ через можливість використання полікапілярної рентгенівської оптики.

Таким чином, розрахунок, моделювання та створення лабораторних джерел РВ на базі електронних пучків з можливістю фокусування на мішені для отримання точкових джерел є актуальною задачею.

Другий розділ «Багатоцільова мікроаналітична рентгенівська установка» присвячено аналізу, розрахунку та моделюванню електронного пучка для створення лабораторної установки, на якій реалізовані такі методи дослідження як рентгенфлуоресцентний аналіз та рентгенівська радіографія.

У першому підрозділі був отриманий вираз для оцінки кількості характеристичних рентгенівських квантів, що виникають при взаємодії одного електрона з речовиною та можуть бути зареєстровані детектором:

$$N = \frac{\varepsilon\omega}{4\pi} \int_{E_0}^{E_{\text{кр}}} \frac{\sigma(E)}{S(E)} (1 - \eta) e^{-\frac{\mu x(E)}{\cos \alpha}} dE, \quad (1)$$

де E_0 - початкова енергія електронного пучка; $E_{кр}$ - мінімальна критична енергія електрона, при якій ще генерується характеристичний квант; ω - вихід флуоресцентного випромінювання; ε - ефективність детектора; $\sigma(E)$ - перетин іонізації атомів мішені, де електрон має залишкову енергію E на глибині x ; $S(E)$ - гальмівна здатність матеріалу; η - частка зворотне розсіяних електронів; μ коефіцієнт поглинання РВ в матеріалі мішені; α - кут реєстрації рентгенівського фотона з мішені.

В свою чергу переріз іонізації та гальмівна здатність матеріалу були розраховані зі співвідношень Бете для іонізації K -оболонки та для втрат енергії на одиниці шляху в матеріалі відповідно.

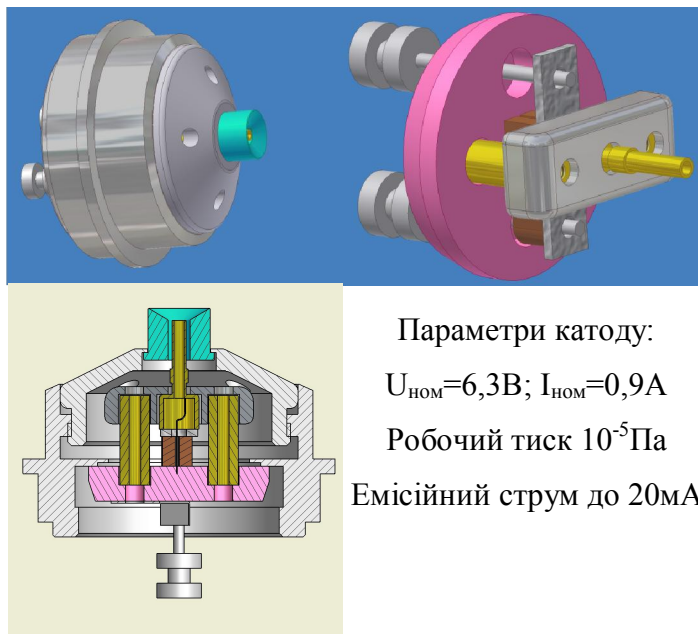
Використовуючи запропоновану методику було визначено інтенсивність РВ для мідної мішені. Результати розрахунку добре узгоджуються з теоретичними та експериментальними даними з літературних джерел, особливо в області енергій більше за 30 кеВ.

Таким чином була проведена попередня оцінка інтенсивності джерела РВ, для отримання якого в подальшому було реалізоване формування електронного пучка. Встановлено, що для отримання високояскравого джерела РВ достатньо створити електронний пучок з силою струму 1 мА за умови його фокусування на мішені в пляму розміром до 50 мкм. Для цього в якості основи лабораторної установки були використані вузли з виведеного з експлуатації електронного мікроскопа РЕМ-101М (виробництва ВАТ «Selmi»). Були використані вже наявні вакуумну камеру, систему вакуумної відкачки та камеру взаємодії з гоніометром без значних вдосконалень. Але головною проблемою РЕМ-101М є недостатній струм електронного пучка для поставленої задачі (~ 50 мкА). Розрахунки для типового вольфрамового катоду прямого розжарювання V-типу показали, що строк їх експлуатації для катодів діаметром 0,15 мм та 0,2 мм за умови емісії струму 1,06 мА та 1,17 мА складає 18 та 36 годин відповідно. Отже, показано його придатність до використання, але строк його експлуатації за даних умов є суттєво обмеженим через термічне випаровування матеріалу. Тому було запропоновано розробку катодного вузла на базі гармати Пірса.

При розрахунку параметрів електронно-оптичної системи для транспортування пучка заряджених частинок слід враховувати просторовий заряд. Кількісно дію поля просторового заряду характеризує така величина як первеанс. Для заданих умов $I = 1$ мА та $U = 30$ кВ, первеанс склав $P = 1,92 \cdot 10^{-10}$ А/В^{3/2}, а оскільки помітний вплив просторового заряду на рух електронів в пучку починає проявлятися при $P > 10^{-8}$ А/В^{3/2}, то просторовим зарядом в нашому випадку можна знехтувати.

Було проведено комп'ютерне моделювання катодного вузла та траєкторний аналіз руху електронів до мішені. Як базовий алгоритм моделювання було обрано метод скінчених інтегралів (відомий як FIT). Метод FIT вигідно вирізняється своєю універсальністю, оскільки може бути реалізований як у часовій, так і в частотній області моделювання. Крім того,

даний метод не накладає ніяких обмежень на тип сітки дискретизації простору, яка використовується: поряд зі структурованою сіткою у декартовій системі



Параметри катоду:
 $U_{\text{ном}}=6,3\text{В}$; $I_{\text{ном}}=0,9\text{А}$
 Робочий тиск 10^{-5}Па
 Емісійний струм до 20мА

Рис. 1 – Катодний вузол

координат підтримуються неортогональні сітки, що дозволяє проводити чисельне моделювання тривимірних конфігурацій систем будь-якої складності.

співвідношення між напруженостями та індукціями електромагнітного поля, їх інтегральні величини були апроксимовані за довжиною та за площею комірок, відповідно. Як наслідок, підсумкові коефіцієнти залежать від усереднених матеріальних параметрів та від просторової здатності сітки, та були прогруповані відповідно до алгоритму FIT.

На відміну від більшості чисельних алгоритмів, FIT засновано на використанні системи рівнянь Максвелла не в диференціальній, а в інтегральній формі. Для чисельного розв'язання цих рівнянь були визначені замкнені області розрахунку. Спеціальною сітковою системою були розбиті такі області на множину елементів або комірок сітки. Визначені необхідні співвідношення між напруженостями та індукціями електромагнітного поля, їх інтегральні величини були апроксимовані за довжиною та за площею комірок, відповідно. Як наслідок, підсумкові коефіцієнти залежать від усереднених матеріальних параметрів та від просторової здатності сітки, та були прогруповані відповідно до алгоритму FIT.

Даний механізм чисельного моделювання було використано для перевірки можливості використання наявного трьохелектродного джерела електронів Пірса в якості джерела РВ замість вольфрамового катоду V-типу. Результати моделювання виявили конструктивні недоліки готового джерела електронів та показали можливі шляхи модернізації конструкції катодного вузла для отримання високояскравого джерела РВ. Незважаючи на успішне проведення експерименту щодо емісійної здатності та строку експлуатації, запропоновано використати лише катод та створити нову конструкцію електродів.

Розроблено власний катодний вузол з вільною геометрією та використано катод непрямого розжарювання з емітером з вольфрам-ренієвого пористого матеріалу. Метод FIT було використано для моделювання та створення реальної моделі катодного вузла, який представлено на рисунку 1. Нове джерело має регульований за висотою електрод для фокусування електронного пучка. Реалізовано гнучку систему налаштування геометричних відстаней катод – анод, катод – фокусуючий електрод, фокусуючий електрод – анод. З новим катодним вузлом використає стандартне для РЕМ-101М тридротове високовольтне з'єднання, на відміну від попередньо розглянутого катодного

вузла, де необхідно 4 дроти: два для розжарювання катоду та два для фокусуєчих електродів. За допомогою траєкторного аналізу показано, що можливо отримати пучок електронів на вході в об'єктну лінзу діаметром не більше 6 мм без додаткового вдосконалення електронно-оптичної системи. Також була виконана умова суміщення осей електронного пучка та об'єктивної лінзи для ефективної роботи останньої. Моделювання показало, що трьохелектродна конфігурація має більш кращі та універсальні властивості. Перш за все, потенціал зсуву дає можливість встановлювати елементи катодного вузла з доволі великою похибкою: $\pm 0,5$ мм, і для отримання максимальної ефективності коригувати пучок в процесі роботи. На рисунку 2 зображено профіль проходження повного струму пучка від катоду до мішені, де h – глибина занурення емісійної поверхні відносно кромки конуса фокусуєчого електрода, U – потенціал фокусуєчого електрода відносно катода, I – відношення струму на мішені до струму з катода.

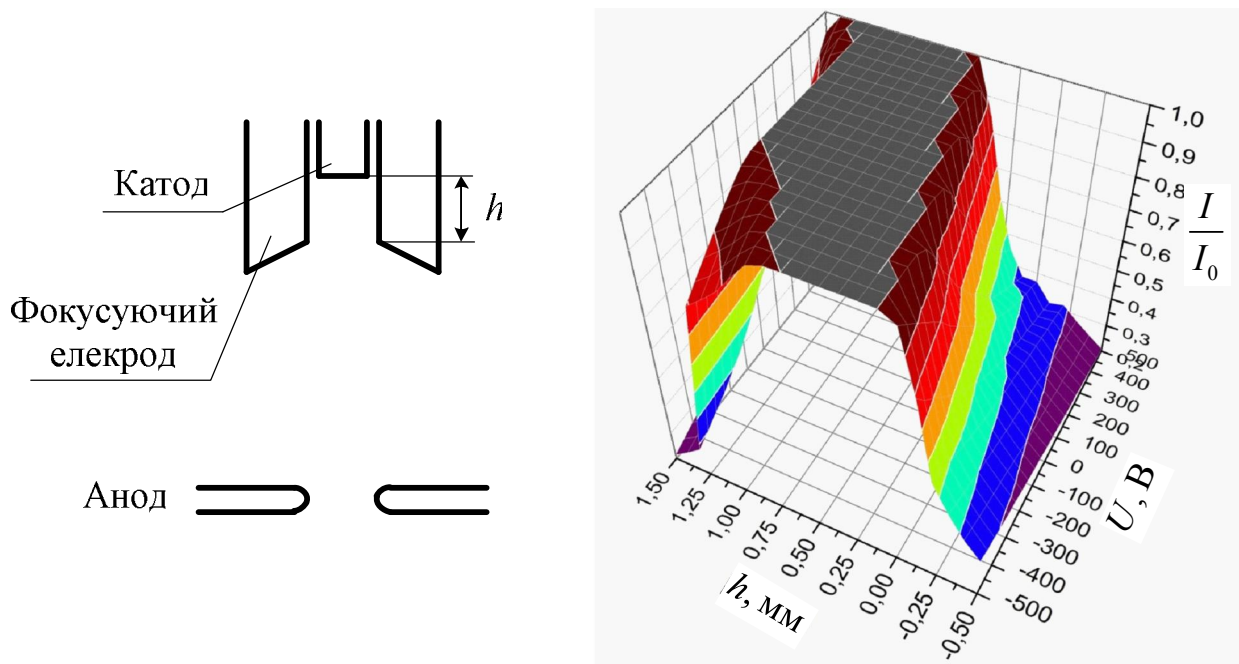


Рис. 2 – Залежність відношення струму на мішені I до емітованого катодом струму I_0 при різних напругах зміщення U та занурення катода відносно фокусуєчого електрода h

З урахуванням одержаних результатів роботи зі вдосконалення системи транспортування електронного пучка, відпрацьовано методику фокусування, зміщення та коригування електронного пучка. Окремо було налагоджено систему переміщення мішені. Для забезпечення належних умов для роботи катоду непрямого розжарювання, було вдосконалено систему вакуумної системи. Розроблено та впроваджена система контролю за тиском в основних вузлах установки на базі перетворювачів манометричних термопарних типу ПМТ-4М та мікроконтроллера ADuC847A. Реалізовані інтерфейси SPI та RS232

(опціонально USB), що дозволяє виводити дані на ПК та розглядати створену установку як елемент IoT в майбутньому.

За результатами моделювання (рис. 2) було розроблено блок живлення фокусуєчого електрода для вдосконалення електронної гармати. Головною конструктивною особливістю цього блоку живлення є те, що підвищуючий трансформатор гальванічно відв'язаний від потенціалу нуля та має потенціал високовольтного блоку живлення. Таким чином реалізована схема віртуального переміщення фокусуєчого електрода. Експерименти з використанням блоку живлення показали високу ефективність роботи системи, струм на мішені склав близько 70-80 % від розрахункового значення. Це зумовлено струмами втрат, коронними розрядами та неврахуванням шорсткості деталей катодного вузла. Експериментальні та теоретичні результати показують високу щільність (до $0,1 \text{ A/mm}^2$) струму на мішені за умови фокусування (діаметр менше $0,1 \text{ мм}$) електронного пучка. За умови використання масивної мішені необхідності в додатковому охолодженні мішені немає.

Розроблене джерело було застосовано для збудження первинного рентгенівського пучка при реалізації методу РФА. Також було розроблено та виготовлено вакуумній вхід для детектора РВ Amptek XR-100SDD та змонтовано вікно виходу РВ в атмосферу. Головною перевагою створеної установки перед комерційними аналогами є можливість змінювати матеріал мішені первинного джерела РВ. Це дозволяє підбирати найбільш оптимальну мішень за енергетичними характеристиками для підвищення ймовірності збудження характеристичних квантів з матеріалу досліджуваного об'єкта, що в свою чергу підвищує аналітичні можливості рентгенфлуоресцентного спектрометра. Для розширення можливостей створеної установки, було розроблено механізм реалізації рентгенівської радіографії. Змонтовано флуоресцентну плівку типу DRZ-std, яка зазвичай використовується як рентгенівський екран в медицині. Також для проведення експерименту було встановлено аналогову відеокамеру для реєстрації зображення на плівці. В подальшому зображення передається на 16-ти каналний аналого-цифровий перетворювач та через локальну мережу на персональний комп'ютер.

Експериментально показано, що сфокусований електронний пучок (напруга прискорення $U=20 \text{ кВ}$, сила струму $I=0,6 \text{ мА}$) залишає сліди на металевій пластині та при силі струму $1,5 \text{ мА}$ електронний пучок утворює в металевій пластині товщиною 1 мм наскрізний отвір діаметром до $1,5 \text{ мм}$. Враховуючи ці дані, запропоновано оцінити розміри плями електронного пучка за аналогією з лазерними променями, які руйнують метал при питомій потужності $10^8\text{-}10^9 \text{ Вт/см}^2$. Таким чином, розрахована та створена система транспортування та фокусування дозволяє фокусувати електронний пучок в пляму на мішені розмірами від 10 мкм до 65 мкм . Отримані результати добре узгоджуються з теоретичними розрахунками для об'єктивної лінзи, де показано діаметр сфокусованого електронного пучка на мішені 52 мкм для робочої відстані об'єктивної лінзи 60 мм . Ця властивість установки розширює її

можливості в напрямку використання полікапілярної рентгенівської оптики та проведення конфокального аналізу.

Була запропоновано модель рентгенівського спектрометра з вторинною мішенню, яка відрізняється від класичної моделі наявністю полікапілярних рентгенівських лінз в проміжках проходження рентгенівських променів. Модель має бути виконана в 90-градусній просторовій геометрії, завдяки цьому можна спостерігати поляризацію випромінювання, що реєструється детектором. Реалізація такої моделі дозволяє використовувати її при мікроаналізі, картуванні або конфокальному аналізу, в поєднанні з перевагами моделі з вторинною. В свою чергу, рентгенівський спектрометр з вторинною мішенню підвищує ступінь монохроматичності випромінювання, тобто відношення інтенсивності характеристичної лінії до інтенсивності фонового випромінювання зростає в 10-100 разів, в залежності від енергій характеристичних ліній та прискорюючої напруги. Це дозволяє значно підвищити аналітичні характеристики рентген флуоресцентних спектрометрів такого типу, особливо при аналізі домішкових та слідових елементів.

Третій розділ «Результати експериментальних досліджень» присвячено розробці методики порівняння рентгенфлуоресцентних спектрометрів та проведенню експериментальних досліджень методом РФА та радіографічним методом.

Ключовою характеристикою рентгенфлуоресцентних спектрометрів є чутливість до хімічного складу досліджуваного зразка, яка залежить від атомного номеру елементу. Інтенсивність РВ, що реєструється детектором, за умови монохроматичності первинного РВ, та гомогенності тонкого зразка, можна виразити наступним чином:

$$I_a(E_i) = I_0 G \sigma_i^a(E_0) f_{ab}(E_i) \varepsilon(E_i) c_a \frac{1 - \exp[-\mu_s(E_0, E_i) \xi]}{\mu_s(E_0, E_i)}, \quad (3)$$

де I_0 - інтенсивність початкового випромінювання, G - геометричний фактор, $\sigma_i^a(E_0)$ - переріз іонізації, $f_{ab}(E_i)$ - коефіцієнт поглинання у повітрі, $\varepsilon(E_i)$ - ефективність детектора для енергії E_i , c_a - концентрація елементу a у зразку, $\mu_s(E_0, E_i)$ - повний масовий коефіцієнт поглинання, який визначається як $\mu_s(E_0, E_i) = \frac{\mu(E_0)}{\sin \alpha} + \frac{\mu(E_i)}{\sin \beta}$, α та β - кути падіння та детектування РВ, ξ - товщина досліджуваного зразка.

Перелічені константи для цього конкретного спектрометра за певних умов визначають як елементну чутливість приладу:

$$S = I_0 G \sigma_i^a(E_0) f_{ab}(E_i) \varepsilon(E_i). \quad (4)$$

За умови нормування на живий час експерименту t та струм рентгенівської трубки I вираз для чутливості $S(E_i)$ за елементом i набуває вигляду:

$$S(E_i) = \frac{P}{t \cdot I \cdot C} \left(\frac{\mu(E_0)}{\sin \alpha} + \frac{\mu(E_i)}{\sin \beta} \right), \quad (5)$$

де P - кількість зареєстрованих характеристичних фотонів з енергією E_i ; t - живий час проведення експерименту; I - струм електронного пучка в рентгенівській трубці; C - концентрація досліджуваного елемента в зразку.

Для порівняння створеної установки з комерційним приладами проведено експериментальне вимірювання та розрахунок елементної чутливості поза межами вакуумної камери. Експеримент проводився з наступними однокомпонентними еталонними лабораторними зразками: Ti, Ni, Cu, Zn, Zr та Mo.

Порівняльний графік представлено на рисунку 3, де НМ - установка, створена в ІПФ НАН України, MiniPal - комерційний прилад виробництва PANalytical, XPRISM - спектрометр, створений в лабораторії МАГАТЕ, Spectro - дані з приладу Spectro2000, Niton(Main) - дані з портативного спектрометра Niton XL3t виробництва Thermo Fisher Scientific. Загалом елементні чутливості знаходяться в межах порівняння, але відрізняються на 2 порядки. Це обумовлено конструктивними особливостями кожного зі спектрометрів: MiniPal та Niton - класичні енергетично дисперсійні рентгенівські спектрометри, але Niton має вбудовані фільтри, які дозволяють підвищити чутливість; Spectro та XPRISM - спектрометри з вторинною мішенню, на що слід звертати особливу увагу при дослідженні зразків зі слідовим вмістом елементів, що знаходяться в області інтересу. Також слід зазначити, що Spectro обладнано кількома вторинними мішеннями, які можна змінювати в залежності від параметрів експерименту. Дані наведено для найбільш оптимальної конфігурації для представлених елементів - Pd-Mo пари. Слід зазначити, що для НМ існує можливість значно збільшити чутливість, якщо дослідження проводити у вакуумній камері. Це обумовлено збільшенням тілесного кута первинного РВ, що використовується для збудження характеристичного РВ зі зразка (оптимізацією геометричного фактора установки).

Завдяки отриманій кривій чутливості елементів проведено кількісний аналіз методом РФА засобами QXAS AXIL. Об'єктом дослідження в даному експерименті став еталонний золотий зразок з домішками срібла та міді. На рентгенфлуоресцентному спектрі було виявлено широкий перелік зареєстрованих елементів. Але, оскільки було заздалегідь відомо, що зразок складається лише з трьох заявлених елементів, то всі інші елементи такі, як залізо, хром, ванадій, титан та інші не були враховані в розрахунках

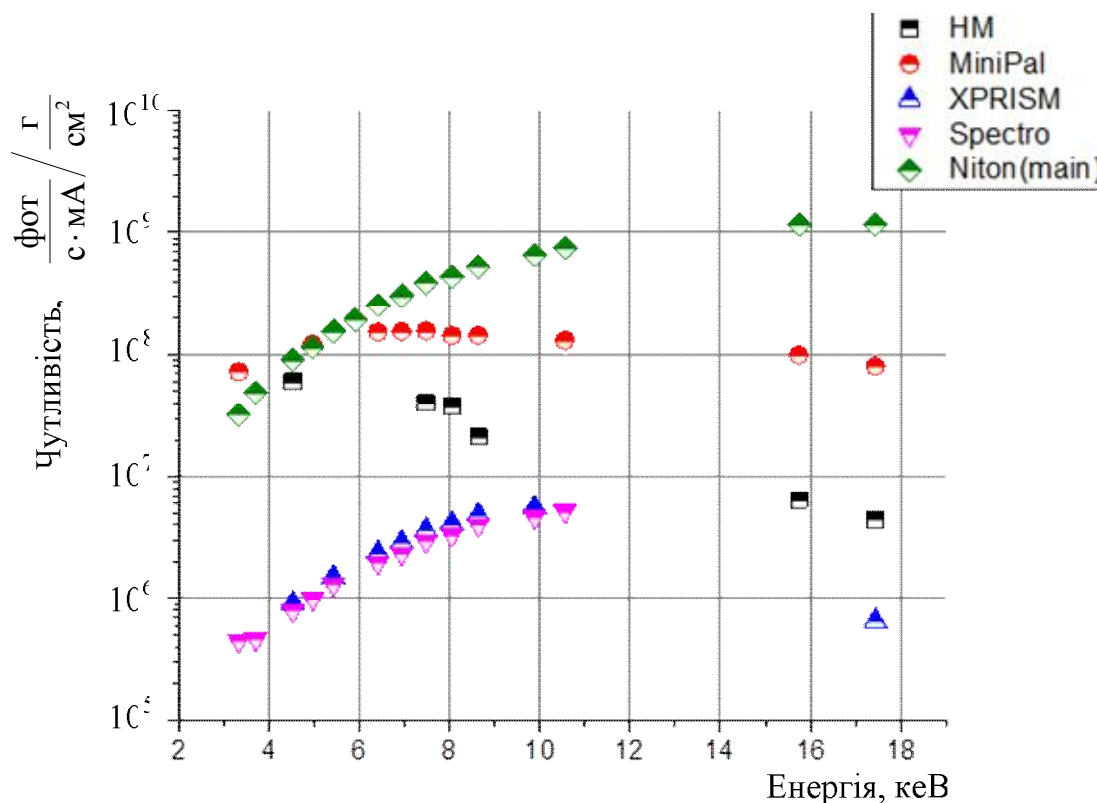


Рис. 3 – Чутливість для різних рентгенівських спектрометрів

. В результаті отримані наступні результати: Au - $92,62 \pm 0,12$ %, Ag - $6,64 \pm 0,03$ %, Cu - $0,74 \pm 0,02$ %. Такі дані повністю відповідають заявленим виробником концентраціям. Таким чином, були виявлені конструктивні недоліки вакуумної камери, вікна для виходу РВ в атмосферу та тримача зразків. В подальшому це можна нівелювати встановлення спеціалізованих коліматорів для РВ, які б захищали всі конструктивні елементи від потрапляння на них РВ та мінімізували вплив паразитного характеристичного РВ, яке виникає не з досліджуваного зразка на результати дослідження. Не існує універсальних коліматорів для використання в подібних системах, тому необхідно підбирати найбільш доцільні матеріали для кожного конкретного випадку. Також необхідно підбирати матеріал конвертора (первинного джерела РВ), щоб позбутися впливу когерентного відбиття фотонів РВ від досліджуваного зразка та їх хибного сприйняття за характеристичні фотони зі зразка.

Було проведено експерименти з рентгенівської радіографії. Суть експерименту полягала у збудженні рентгенівського потоку з мішені, встановленні зразка між мішенню та реєстрації зображення за допомогою системи, що її описано вище.

Досліджуванним зразком була мікросхема в корпусі SOIC-8. Експеримент показав, що дуже важливий вибір матеріалу мішені-конвертора. Це пов'язано з тим, що основною складовою рентгенівського потоку за прискорювальної напруги 30 кВ є лінія K-α матеріалу, також присутнє гальмівне

випромінювання, але його інтенсивність не така велика для чіткого зображення зразка на флуоресцентному екрані. Це добре узгоджується з теорією поглинання РВ. Згідно експерименту, частина променів має пройти крізь зразок, частина має поглинутися в ньому, а частина має пройти повз зразок, що утворить найяскравішу область на екрані. Ті області, в яких буде найбільше поглинання, будуть темнішими.

Експеримент показав, що фотони отримані з мідної мішені ($E_{K-\alpha}=8,04$ кеВ) не мають достатньої енергії та не спроможні пройти крізь мікросхему SOIC-8.

Але встановлення срібної конверторної мішені суттєво змінило ситуацію. Фотони з енергією 22,1 кеВ ефективно пройшли крізь частини мікросхеми з малим коефіцієнтом поглинання (полімерний корпус) та поглинулися в частині з великим коефіцієнтом поглинання. Результати представлені на рисунку 4.

На рисунку 4 можна добре бачити безпосередньо сам чіп, зрозуміла його будова, видні технологічні частини. При обробці картинки спеціальним програмним забезпеченням, в якому можна коригувати яскравість та

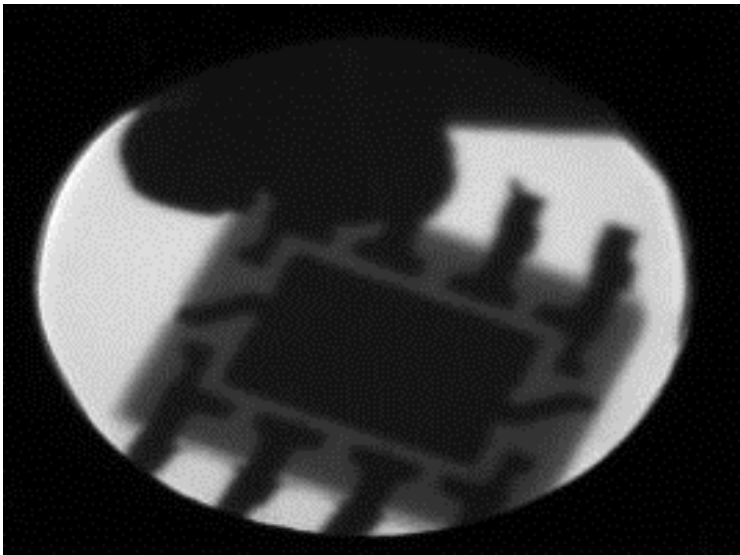


Рис. 4 – Мікросхема в корпусі SOIC-8 під рентгенівським пучком (анод -срібло)

контрастність, можна побачити волоски, які з'єднують виводи мікросхеми з кристалом. Вони зроблені дуже тонкими через те, щоби не перегрівати кристал при монтажі мікросхеми на плату.

Важливим аспектом при отриманні рентгенівських зображень для підвищення роздільної здатності є ступінь фокусування пучка електронів, що добре описується геометричною оптикою.

Класичний РФА передбачає однорідність досліджуваного зразка через

відсутність роздільної здатності за глибиною. У випадку шаруватої структури об'єкта, необхідно проводити конфокальний аналіз з роздільною здатністю по глибині з використанням полікапілярної оптики. Але такий метод дослідження не завжди доцільний з комерційної та технічної точок зору. Особливу проблему представляє дослідження об'єктів, які не можна або неможливо переміщати. В рамках дисертаційного дослідження був проведений аналіз елементів артефакту культурної спадщини, що представляє собою мексиканську прикрасу голови XVI століття. Великий інтерес представили елементи, додані наприкінці XIX сторіччя при реставрації, оскільки спектри показали високу інтенсивність Cu, Zn та в меншій мірі Pb, а також менші піки Au в порівнянні зі спектрами з оригінальних елементів. Присутність цих піків в спектрах дозволяє припустити,

що ці прикраси зроблені з позолоченої латуні. Двошарова система, а саме, наявність золотого шару металізації на поверхні латунного сплаву, не може бути оброблена за допомогою стандартних методик. Оскільки масовий коефіцієнт поглинання фотонів РВ залежить від їх енергії, то фотони різних характеристичних ліній одного матеріалу самопоглинаються по різному при виході з глибини матеріалу. Іншими словами, зі збільшенням глибини, з якої виходить збуджене характеристичне РВ, поглинеться більше фотонів з меншою енергією аніж з більшою. Це припущення було підтверджено методом фундаментальних параметрів, який враховує фізичні принципи взаємодії РВ з речовиною. Таким чином, було запропоновано наступну аналітичну методологію: по-перше – визначення товщини золотого покриття та по-друге – виконання корекції елементного складу латуні, враховуючи ефекти поглинання в зовнішньому шарі золота. При дослідженні тонких плівок з чистого золота було з'ясовано, що співвідношення площі характеристичних піків $Au-La/Au-L\beta$ плавно змінюється з товщиною фольги і забезпечує достатню чутливість для визначення товщини в діапазоні приблизно 2-8 мкм. Експериментально було досліджено набір еталонних зразків, які представляли собою плівки з відомою товщиною та вмістом золота 99,999%. В результаті дослідження знайдено залежність відношення площ характеристичних піків $Au-La/Au-L\beta$ від товщини плівки, як показано на рисунку 5. Отримані експериментальні дані відповідають значенням, що були розраховані з використанням підходу фундаментальних параметрів.

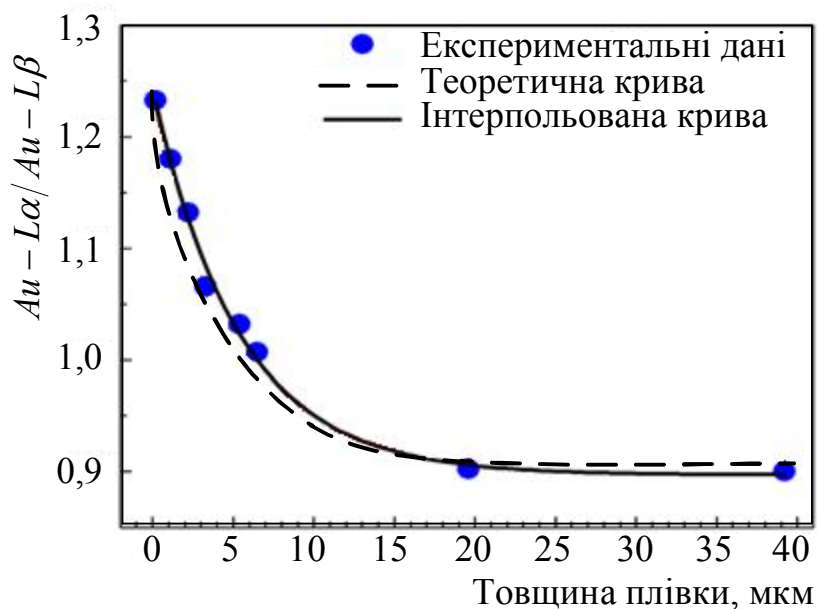


Рис. 5 – Залежність площ характеристичних піків $Au-La / Au-L\beta$ від товщини плівки

Отримані дані щодо товщини шару золота на поверхні дали можливість ввести коригуючий коефіцієнт для кожного з досліджуваних зразків прикрас. Запропонована корекція концентрації, що була отримана класичним методом з

врахуванням калібровки приладу (w_i) для Cu, Zn та Pb, була скоригована, враховуючи коефіцієнт проходження $f(d_{Au}, E_i)$ для первинного РВ з енергією E_0 та для характеристичного випромінювання E_i крізь шар золота товщиною d_{Au} наступним чином:

$$w_i^{corr} = \frac{w_i}{f(d_{Au}, E_0)f(d_{Au}, E_i)}. \quad (6)$$

Були визначені концентрації елементів для оригінальних золотих прикрас. В основному концентрація складає: Au – 76-85%, Ag – 9-18% та Cu – 3,0-5%, за винятком одного зразка з малим вмістом міді. Можна зробити припущення, що не всі елементи з золота були виконані з однієї руди, або вони були зроблені різними майстрами (технологіями).

Багато металевих зразків було ідентифіковано як неоригінальні – позолочена латунь. Концентрації елементів латуні знаходяться в наступних діапазонах: Cu – 66-68%, Zn – 31-34% та Pb – 0,04-0,8%. Вміст доданих металевих елементів говорить про те, що скоріш за всі все ці елементи були додані в один й той самий час. Ймовірніше за все, це було зроблено у 1878 році при першій задокументованій реставрації артефакту культурної спадщини. Товщина позолоти здебільшого складає менше за 1 мкм.

ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень у дисертаційній роботі запропоновано та визначено оптимальні параметри пристрою для формування електронного пучка з метою створення точкових джерел рентгенівського випромінювання. В дисертаційній роботі отримані такі основні наукові та практичні результати:

1. Запропоновано, обґрунтовано та реалізовано схему катодного вузла на базі площинного вольфрам-ренієвого катоду непрямого розжарювання яка відрізняється від раніше відомих можливістю змінювати геометричне розташування електродів. Визначено оптимальні параметри катодного вузла для отримання струму електронного пучка на мішені не менше 1 мА. Визначено теоретично та експериментально підтверджено оптимальні параметри електронно-оптичної схеми для отримання високояскравого джерела РВ шляхом аналізу топології формування пучка в міжелектродному просторі, транспортування та фокусування його на мішені.

2. Створено багатоцільову лабораторну установку для реалізації рентгенівських методів дослідження матеріалів та речовини на основі розрахованої електронно-оптичної схеми. Ця установка дозволяє проводити рентгенфлуоресцентний аналіз та рентгенівську радіографію, з можливістю проведення РФА в атмосферних умовах і у вакуумі. Вона відрізняється від раніше відомих тим, що має змінні мішені для генерації первинного РВ та

дозволяє повністю контролювати електронний пучок (силу струму, напругу прискорення, розміри плями на мішені), що дозволяє підібрати найбільш оптимальні параметри проведення експерименту для того чи іншого досліджуваного об'єкта.

3. Запропоновано застосування елементної чутливості рентгенфлуоресцентних спектрометрів для порівняння аналітичних можливостей приладів та показано, що створена установка за чутливістю не поступається комерційним аналогам. Проведено кількісний рентгенфлуоресцентний аналіз багатокомпонентного металевго зразка. Показано можливість проведення радіографії на прикладі мікросхеми в корпусі SOIC-8.

4. Адаптовано методику визначення товщини тонких шарів золота через відношення інтенсивностей характеристичних ліній L_{α}/L_{β} . Апробовано запропоновану методику на елементах артефакту культурної спадщини. Визначено найбільш вірогідні товщини позолоти елементів з латуні.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Праці, в яких опубліковані основні наукові результати:

1. **Дрозденко М.О.** Визначення чутливості установок рентгенфлуоресцентного аналізу на прикладі портативних спектрометрів / М.О. Дрозденко, А.Г. Карідас, О.М. Бугай // Вісник ХНУ ім. В.Н. Каразіна. – 2012. – Т. 1019. – С. 85-88.
2. Karydas A.G. Handheld XRF analysis of the old Mexican feather headdress in the Weltmuseum Vienna / A.G. Karydas, R.Padilla-Alvarez, **M.Drozdenko**, M.Korn, M.O.Moreno Guzman // X-Ray Spectrometry. – 2014. – Vol. 43, No 3. – P. 138-145.
3. Бугай А.Н. Источники рентгеновского излучения с ионным и электронным возбуждением / А.Н. Бугай, С.А. Вершинский, В.Л. Денисенко, **М.А. Дрозденко**, М.И. Захарец, В.Е. Сторишко // Наноразмерные системы и наноматериалы: исследования в Украине / под ред. А.Г. Наумовца. – К., 2014, – Гл. 3. – С. 314-319.
4. **Дрозденко М.О.** Розробка та експериментальна апробація електронної гармати / **М.О. Дрозденко** // Журнал нано- и электронной физики. – 2015. – Т. 7, № 3. – С. 03031-1–03031-5.
5. Пат. 97415 Україна, МПК G 01 N 23/223. Рентгенівський спектрометр / **Дрозденко М.О.**, Бугай О.М.; заявник та власник патенту Інституту прикладної фізики НАН України. – № 201411330; заявл. 17.10.2014; опубл. 10.03.2015, Бюл. № 5.
6. **Drozdenko M.O.**, Quantification of the X-ray Fluorescence Analyzers via Elemental Sensitivity Characteristic / **M.O. Drozdenko** // Proceedings of the International Conference. Nanomaterials: Applications and Properties. – 2016. – Vol. 5 No 1. – P. 01PCSI10-1–01PCSI10-2.

Праці апробаційного характеру:

7. Karydas A.G. Modeling XRF Intensities for Portable/Handheld Analyzers Using Fundamental Parameters Approach / A.G. Karydas, D. Sokaras, **M. Drozdenko**, V. Kantarelou, R. Padilla-Alvarez, A. Markowicz // Denver X-ray Conference, 6-10 August 2012: Book of Abstracts. – Denver, 2012. – P. F-37.
8. **Drozdenko M.** Hand-held XRF analysis of a 16th century Mexican feather headdress / **M. Drozdenko**, M. Moreno Guzman, M. Korn, R. Padilla-Alvarez, A.G. Karydas, A. Markowicz // European Conference on X-ray Spectrometry, 18-22 June 2012: Book of Abstracts. – Vienna, 2012. – P. 137.
9. Buhay O.M., **Drozdenko M.O.**, Storizhko V.Yu. Microanalytical X-ray facility in IAP NASU / O.M. Buhay, **M.O. Drozdenko**, V.Yu. Storizhko // Nanotechnology and nanomaterials, 27-30 August 2014: Book of Abstract. – Lviv, 2014. – P. 88-89.
10. **Drozdenko M.O.** Multipurpose X-ray facility at the Institute of Applied Physics of NAS of Ukraine / M.O. Drozdenko, O.M. Buhay, V.Yu. Storizhko // European Conference on X-ray Spectrometry, 15-20 June 2014: Book of Abstract. – Bologna, 2014. – P. 150.

АНОТАЦІЯ

Дрозденко М. О. Формування електронного пучка в рентгенівських методах дослідження. – 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, 2017.

Дисертаційна робота присвячена встановленню загальних закономірностей формування електронного пучка, який виступає джерелом РВ при взаємодії з речовиною, та практичному застосуванню РВ при аналітичному дослідженні матеріалів.

У літературному огляді визначені загальні тенденції генерації первинного РВ електронним пучком та збудження характеристичного РВ, зазначені основні об'єкти теоретичного та експериментального досліджень.

Було розраховано, змодельовано та експериментально впроваджено схему формування електронного пучка на базі площинного вольфрам-ренієвого катоду непрямого розжарювання з метою подальшої реалізації РФА та рентгенівської радіографії. Шляхом моделювання електронно-оптичної системи методом скінчених інтегралів визначено оптимальні параметри катодного вузла для отримання струму сфокусованого електронного пучка на мішені не менше 1 мА. Показано топологію формування пучка в міжелектродному просторі, транспортування та фокусування його на мішені для отримання високояскравого джерела РВ. На основі розрахованої та змодельованої електронно-оптичної схеми створено багатоцільову лабораторну установку для реалізації методів РФА та рентгенівської радіографії, з можливістю проведення

РФА в атмосферних умовах та у вакуумі. В роботі теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено доцільність обраної схеми на базі площинного вольфрам-ренієвого катоду непрямого розжарювання з регульованою геометрією електродів.

Запропоновано модель рентгенівського спектрометра з вторинною мішенню, яка відрізняється від класичної моделі наявністю полікапілярних рентгенівських лінз в проміжках проходження рентгенівських променів. Це дозволяє значно підвищити аналітичні характеристики рентген флуоресцентних спектрометрів.

Розвинута методика порівняння рентгенфлуоресцентних спектрометрів шляхом визначення елементної чутливості та нормування її на силу струму електронного пучка рентгенівської трубки та живий час експерименту. Застосовуючи запропоновану методику порівняння спектрометрів було встановлено, що аналітичні можливості створеної установки відповідають рівню передових світових установок MiniPal, XPRISM, Spectro2000 та Niton XL3t.

Ключові слова: електронний пучок, електронно-оптична система, характеристичне рентгенівське випромінювання, кросовер, траєкторний аналіз.

АННОТАЦИЯ

Дрозденко М. А. Формирование электронного пучка в рентгеновских методах исследования. – 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, 2017.

Диссертационная работа посвящена определению общих закономерностей формирования электронного пучка, который выступает источником рентгеновского излучения при взаимодействии с веществом, и практическому применению рентгеновского излучения при аналитическом исследовании материалов.

В литературном обзоре определены общие тенденции генерации первичного рентгеновского излучения электрон пучком и возбуждения характеристического рентгеновского излучения, указаны основные объекты теоретического и экспериментального исследований. Показана актуальность расчета, моделирования и реализации электронных пучков с возможностью фокусировки на мишени в задачах исследования материалов рентгеновскими методами.

Предложена методика расчета интенсивности характеристического рентгеновского излучения интегральным методом используя соотношения Бете. Было рассчитано, смоделировано и экспериментально внедрено схему формирования электронного пучка на базе плоскостного вольфрам-ренієвого катода непрямого накаливания с целью дальнейшей реализации

рентгенфлуоресцентного анализа и рентгеновской радиографии. Путем моделирования электронно-оптической системы методом конечных интегралов определены оптимальные параметры катодного узла для получения тока сфокусированного электронного пучка на мишени не менее 1 мА. Показано топологию формирования пучка в межэлектродном пространстве, транспортировку и фокусировку его на мишени для получения источника рентгеновского излучения с высокой яркостью. Реализованная электронно-оптическая схема выгодно отличается от классических наличием регулируемого фокусирующего электрода. Что, в свою очередь, увеличивает эффективность системы транспортировки электронного пучка от катода к мишени. Показан профиль прохождения электронного пучка от катода до мишени в зависимости от геометрического расположения фокусирующего электрода и потенциала смещения. Теоретически рассчитаны геометрические размеры сфокусированного электронного пучка на мишени для разных режимов работы объективной линзы. Экспериментально показано, что реальный размер пятна на мишени согласовывается с теоретическими расчетами и составляет от 10 мкм до 65 мкм.

На основе рассчитанной и смоделированной электронно-оптической схемы создана многоцелевая лабораторная установка для реализации методов рентгенфлуоресцентного анализа и рентгеновской радиографии с возможностью проведения рентгенфлуоресцентного анализа в атмосферных условиях и в вакуумной камере. Усовершенствована система вакуумной откачки, установлен микроконтроллер ADuC847A для контроля и передачи данных на ПК по интерфейсам RS232 и SPI.

В работе теоретически обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность выбранной схемы на базе плоскостного вольфрам-рениевого катода непрямого накаливания с регулируемой геометрией электродов.

Предложено модель рентгеновского спектрометра с вторично мишенью, которая отличается от классической модели наличием поликапиллярных рентгеновской линз на пути прохождения рентгеновских лучей. Это позволяет значительно улучшить аналитические характеристики рентгенфлуоресцентных спектрометров при анализе примесных и следовых элементов в задачах микроанализа, картирования и конфокального анализа в сочетании с преимуществами 90-градусной геометрии модели с вторичной мишенью.

Развита методика сравнения рентгенфлуоресцентных спектрометров путем определения элементной чувствительности и нормирования ее на силу тока электронного пучка рентгеновской трубки и живое время эксперимента. Используя предложенную методику сравнения спектрометров было установлено, что аналитические возможности созданной установки соответствуют уровню передовых мировых установок MiniPal, XPRISM, Spectro2000 и Niton XL3t.

Ключевые слова: электронный пучок, электронно-оптическая система, характеристическое рентгеновское излучение, кроссовер, траекторных анализ.

ABSTRACT

Drozdenko M. O. Electron beam formation for X-ray investigation methods. – Manuscript.

Thesis for degree of the Doctor of Philosophy in physics and mathematics sciences on speciality 01.04.20 — physics of charged particles beams. — Institute of Applied Physics of NAS of Ukraine, Sumy, 2017.

The PHD thesis is concerned to finding general laws of formation of an electron beam which is considered an X-ray source during interactions with substance, and to application of X-rays in analytical study of materials.

General trends of primary X-rays generated with an electron beam, excitement of characteristic X-rays, main objects of theoretical and experimental studies are reviewed in literature.

A beam-forming network was calculated, designed and implemented in the course of experiment on basis of a plate tungsten-rhenium indirectly heated cathode to realize X-ray fluorescence analysis and X-ray imaging. Optimal parameters of a cathode node were simulated on an electron-optical system with the finite integral technique to obtain current of a focused electron beam on a target at least 1 mA. Topology of the beam formation in an interelectrode gap, its transportation and focusing on the target to obtain a high-brightness X-ray source is shown. Basing on a calculated and simulated electron-optics network, a multipurpose laboratory facility is constructed for realization of X-ray fluorescence analysis and X-ray imaging so as to perform X-ray fluorescence analysis in atmospheric conditions and in a vacuum chamber. Viability of the chosen network based on a plate tungsten-rhenium directly heated cathode with an adjusted geometry of electrodes is theory-based and experimentally proven.

A model of an X-ray spectrometer with a secondary target is suggested which differs from a classical model in polycapillary X-ray lenses available in gaps of X-rays propagations. Thus, analytical parameters of the X-ray fluorescent spectrometers are increased considerably.

X-ray fluorescence spectrometers are compared with a developed technique which involves element sensitivity definition and its normalization by current of electron beam of the X-ray tube and experiment live time. The analytical properties of the developed facility was shown equally to the high-level worldwide X-ray spectrometers like MiniPal, XPRISM, Spectro2000 and Niton XL3t.

Keywords: electron beam, electron-optical system, characteristic X-ray emission, crossover, trajectory analysis.

Підписано до друку 04.11.2013.
Формат 60×84/16. Папір офсетний. Друк офсетний.
Наклад 100 прим. Ум. Друк. Арк.. 3,0. Тираж 100 пр. Вид. №18.

ВВП «Мрія-1» ТОВ. 40000, м. Суми, вул. Кузнечна, 2.
Свідectво про внесення до державного реєстру України:
Серія ДК, № 36