

Розробка та експериментальна апробація електронної гармати

М.О. Дрозденко*

Інститут прикладної фізики НАН України, вул. Петропавлівська 58, 40000 Суми, Україна

(Одержано 18.05.2015; у відредагованій формі – 10.06.2015; опубліковано online 20.10.2015)

В роботі описано нову модель трьохелектродної електронної гармати з катодом непрямого розжарювання для багатофункціональної лабораторної установки на базі прецизійного джерела електронів для реалізації методів рентгенівського мікроаналізу. Лабораторна мікроаналітична установка була запропонована на базі високовольтної колони растрового електронного мікроскопу РЕМ-101М. В результаті чисельного моделювання початкової моделі електронної гармати були виявлені технологічні недоліки конструкції експериментальної установки та запропоновано катодний вузол з вільною геометрією. Числове моделювання електронно-оптичної системи дало рекомендації для вибору геометричних параметрів та потенціалу фокусувального електрода. Експериментальне дослідження вибраних режимів роботи установки підтвердило надійність запропонованої конструкції при використанні її для джерела рентгенівського випромінювання.

Ключові слова: Катод, Електронна гармата, Фокусування, Джерело рентгенівського випромінювання.

PACS numbers: 29.25.Bx, 52.38.Ph

1. ВСТУП

Рентгенівські методи дослідження матеріалів є одними з найбільш інформативних та широко розповсюджених з переліку неруйнівних. Існує кілька принципів відмінних методів генерації рентгенівського випромінювання. Характеристики синхротронних установок (висока інтенсивність, когерентність та можливість досягнення високого ступеню монохроматизації) привели до їх активного застосування при дослідженні наноструктурних об'єктів та систем. Але такі комплекси надто дорогі та не розповсюджені (в Україні не існує жодного). Тому виникає необхідність в розробці нових, більш доступних джерел рентгенівського випромінювання та установок з їх використанням.

В даній роботі описана розробка електронної гармати для лабораторних установок рентгенфлуоресцентного аналізу та рентгенівської інтроскопії. Для реалізації поставленої задачі було вирішено отримати сфокусований, до розмірів порядку 50 мкм, електронний пучок струмом не менше 1 мА. При бомбардуванні мішені буде отриманий рентгенівський спектр, основними складовими якого буде характеристичне та гальмівне випромінювання. Це первинне рентгенівське випромінювання можна використовувати для реалізації згаданих вище методик.

Задля цього в якості основи майбутньої лабораторної установки був використаний виведений з експлуатації електронний мікроскоп РЕМ-101М (виробництва ВАТ «Selmi»). Таке рішення дало змогу використовувати вже наявну вакуумну камеру, систему вакуумної відкачки та камеру взаємодії з гоніометром без значних вдосконалень. Але головною проблемою РЕМ-101М є незначний струм електронного пучка (50 мкА).

Для досягнення необхідного струму (1 мА) електронного пучка та фокусування його на мішені-конверторі було розглянуто, проведені розрахунки та моделювання кількох варіантів.

2. РОЗРОБКА, МОДЕЛЮВАННЯ ТА АПРОБАЦІЯ ЕЛЕКТРОННОЇ ГАРМАТИ

2.1 Оптимальна модель для електронної гармати

Першим був розглянутий проект джерела електронів прямого розжарювання. Основною ідеєю було збільшення потужності класичної електронної гармати РЕМ-101М, а саме: встановлення більш товстого вольфрамового катода V-подібного типу та потужніших джерел живлення (розжарювання катода та високої напруги). Теоретичні розрахунки [1, 2] показали, що для досягнення струму електронного пучка на мішені в 1 мА потрібно встановити вольфрамову нитку діаметром 0,15-0,2 мм та розжарювати її до температури 2800 °С. За таких умов строк його роботи складе 18-24 години (в залежності від товщини нитки розжарювання та струму розжарювання) через випаровування матеріалу катода. Цього достатньо для разових експериментів, але створює значні незручності для експериментатора при проведенні серії експериментів. Тому така схема вирішення задачі була відхилена.

На наступному етапі вибору джерела електронів була розглянута трьохелектродна електронно-оптична система (ЕОС), що детально описана в [3]. Емісійна здатність такої гармати складає до 25 мА. Як електронна гармата, вона повністю задовольняє поставленим умовам, але її відносно великі розміри та фіксована геометрія електродів обумовлює ряд технічних та інженерних проблем. Додає необхідність створення нового катодного вузла для фіксації гармати та потужного високовольтного блоку живлення електроду для фокусування пучка електронів. Для проходження електронного пучка крізь прольотну трубку, довжина якої складає 50 см, напруга такого блоку живлення має складати кілька кВ. Але основною проблемою стало те, що необхідні чотири дровтові з'єднання для живлення цієї гармати. В свою чергу,

* Mykhailo.drozdenco@gmail.com

стандартні високовольтні з'єднання РЕМ-101М мають три лінії. Тому, щоб максимально використати наявне обладнання, було запропоновано застосувати безпосередньо сам катод, який використовується в цій ЕОС та розробити кріплення для нього на базі стандартного катодного вузла від РЕМ-101М.

На рис. 1 представлений новий катод непрямого розжарювання, в якому спіраль розжарювання вкрита оксидом алюмінію.

Як відомо, це покриття швидко руйнується при роботі катоду в умовах поганого вакууму. Також умови підтримання високого вакууму обумовлені структурою емісійного матеріалу катоду, а саме металевопористий сплав вольфраму та ренію.

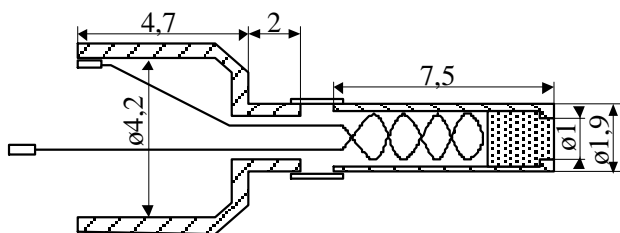


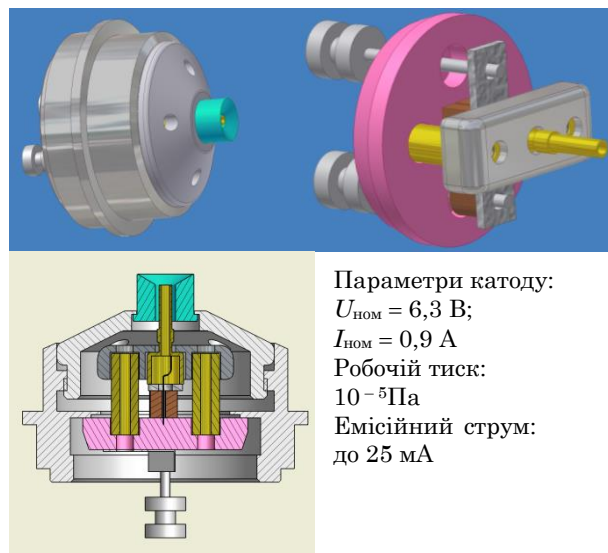
Рис. 1 – Встановлений катод непрямого розжарювання

Ці обставини зумовили нові вимоги для системи дегазації та підтримки високого вакууму. Що призвело до вкорочення колони електронного мікроскопу для більш ефективної та швидкої дегазації робочого об'єму шляхом вилучення електромагнітних ліній растрової системи.

2.2 Розробка катодного вузла

Моделювання такої системи передбачає відокремлений від фокусуєчого електрода катод (рис. 2). Найбільш зручною моделлю в даному випадку є модель трьохелектродної гармати Пірса. Вона дає можливість прийти до двоелектродної системи (використання двох дрітків тільки для живлення нитки розжарювання катоду), фокусування має відбуватися лише за рахунок геометричної конструкції тримача катоду, притискної гайки та фокусуєчого елемента. Така модель катодного вузла була створена та промодельована за допомогою програмного пакета «CST Particle Studio».

Зовнішній корпус катодного вузла був створений на базі стандартного катодного вузла РЕМ-101М. Система кріплення, ізоляції катоду та фокусуєчий електрод були виготовлені на виробничих потужностях Інституту прикладної фізики НАН України. Перші випробування показали, що дана конструкція має свої недоліки. Найголовнішим з них був занадто великий відвід тепла, що не давало можливості катоду працювати в режимі обмеження струму просторовим зарядом, що є вкрай необхідним для такого типу катоду. В даному режимі в області емісійної поверхні створюється електронна хмара, з якої можна формувати пучок необхідного струму. Даний режим не руйнує пористу структуру катоду. Для вирішення цієї проблеми була проведена перфорація притискного кріплення катоду для отримання так званих теплових вікон.



Параметри катоду:

$U_{\text{ном}} = 6,3 \text{ В};$

$I_{\text{ном}} = 0,9 \text{ А}$

Робочий тиск:

10^{-5} Па

Емісійний струм:

до 25 мА

Рис. 2 – Катодний вузол

Після монтажу даної конфігурації був встановлений керамічний зонд для перевірки емісійної здатності та роботоспроможності системи в цілому. Зонд був розташований на відстані 70 мм від аноду так, як показано на рис. 3б. Торцева поверхня була повністю вкрита металевою мішенню, приварений дріт, до якого був приєднаний міліамперметр. Дріт був пропущений крізь керамічну трубку задля електричної ізоляції від стінок прольотної рубки. Цей експеримент показав, що електронний пучок не повністю потрапляє в прольотну трубку. Але вдалося досягти значення до 80 % проходження струму відносно показів блоку високовольтного живлення. Модель була перевірена експериментально та були зняті емісійна характеристика катоду (показання струму бралися з високовольтного блоку живлення HCN140-35000) та струму пучка, що потрапляє на зонд. В ході експерименту металева поверхня (мідь завтовшки 1 мм), з якої знімався струм була зруйнована електронним пучком через нестачу тепловідводу та велику щільності струму електронного пучка. Далі пучок почав руйнувати керамічну трубку, що видно на рис. 4а. Цей випадок дав можливість зробити реальні виміри розміру пучка та побачити, що діаметр пучка на відстані 70 мм від аноду складає приблизно 0.5 мм, це задовільно узгоджується з теоретичною моделлю.

З рис. 3а видно, що траєкторія польоту електронів не співпадає з віссю прольотної трубки через похибки монтажу та допуски виробництва елементів катодного вузла. Для виправлення цього використовувалась стандартна електромагнітна система корекції траєкторії пучка, яка розташована в колонні РЕМ-101М. Вона включає в себе дві електромагнітні обмотки для нахилу та зміщення відповідно. Якщо представити електрооптичну систему в системі декартових координат та вісь Z направити вздовж напрямку руху електронів, то система корекції пучка дозволяє переміщувати та відхиляти пучок в напрямках X та Y. Крізь кожен з електромагнітних котушок йде струм від -100 мА до $+100 \text{ мА}$ в залежності від необхідного положення пучка. Але ця система корекції не спроможна в достатній мірі змістити

електронний пучок так, щоб він співпадав з головною оптичною віссю електронно-оптичної системи. Для цього необхідно встановити всі елементи електронної гармати з великою точністю (похибка може бути не більше ніж 0,1 мм). Але конструкція системи не дозволяє проводити прямі виміри відстаней.

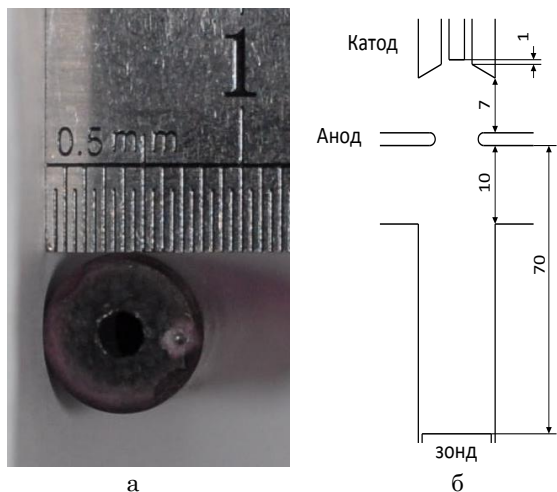


Рис. 3 – Керамічний зонд

Тому для спрощення вибору параметрів монтажу було проведено моделювання транспортування пучка електронів для моделі з фокусуючим електродом.

2.3 Моделювання проходження електронного пучка

Головним об'єктом теоретичного дослідження була функція залежності проходження струму електронного пучка від катоду до мішені. Були визначені параметри, від яких залежить ця функція та зафіксовані інші геометричні величини. Таким чином, змінними цієї функції є величина заглиблення емісійної поверхні катоду відносно фокусуючого електроду та напруга між катодом та фокусуючим електродом. На рис 4 показана схема заглиблення емісійної поверхні відносно фокусуючого електроду, позначена як h .

Моделювання проводилося з урахуванням реальних геометричних розмірів системи транспортування пучка. Розраховувалося відносно проходження електронного пучка до мішені з усіма іншими фіксованими параметрами. При цьому відстань від катоду до мішені складає 50 см. Саме моделювання проводилося в ітераційному порядку при фіксованій відстані h , було розраховане відносно проходження



Рис. 4 – Схема електродів електронної гармати

електронного пучка при зміні потенціалу фокусуючого електроду. Потенціал фокусування змінювався в межах від -500 В до 500 В з кроком 50 В. Після цього h змінювалась на $0,1$ мм. Процес повторювався до заповнення всієї матриці для h від $-0,5$ мм до $1,5$ мм.

Моделювання показало, що трьохелектродна конфігурація має більш вигідні 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 рис. 5 відображено профіль проходження струму електронного пучка від катоду до мішені.

Базуючись на отриманих результатах, виконані роботи із вдосконалення системи транспортування електронного пучка, відпрацьована методика фокусування, зміцнення та коригування електронного пучка. Окремо була налагоджена система переміщення мішені.

Моделювання електронно-оптичної системи показало позитивні результати та дало можливість з'ясувати які відстані треба витримувати при встановленні катоду, аноду та фокусуючого електроду та на яку відстань заглибити емісійну поверхню. Так, наприклад, при відсутності потенціалу фокусування, для проходження максимальної кількості електронів достатньо заглибити катод відносно конусної поверхні фокусуючого електроду на $0,75$ мм з можливою похибкою $0,25$ мм. Це можна зробити без використання особливого обладнання. За наявності більшої похибки, через можливі температурні розширення матеріалу, існує можливість коригувати електронний пучок за допомогою потенціалу фокусування, використовуючи наявний графік.

Опираючись на результати моделювання був зроблений блок живлення для фокусуючого електроду для вдосконалення моделі гармати Пірса.

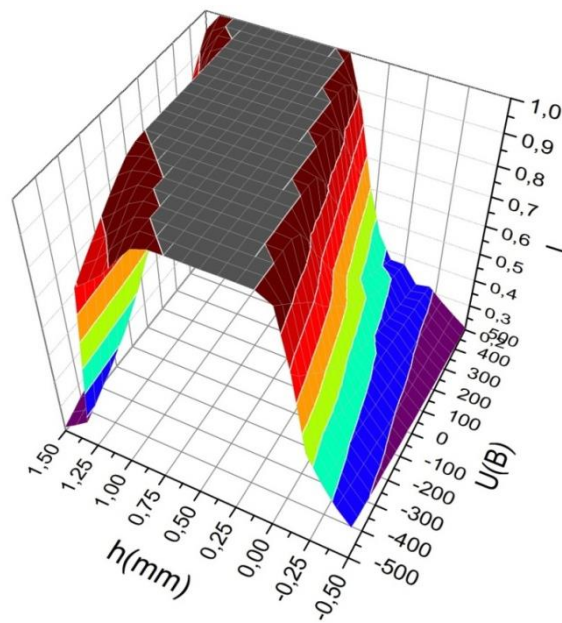


Рис. 5 – Моделювання проходження струму від катоду до мішені

Експерименти з використанням блоку живлення показали високу ефективність роботи системи. Але струм на мішені складає близько 70-80 % від розрахункового значення. Це обумовлене струмами втрат, коронними розрядами та неврахуванням шорсткості деталей катодного вузла. Експериментальні та теоретичні результати показують високу щільність струму на мішені за умови фокусування (діаметр менше 0,1 мм) електронного пучка. За умови використання масивної мішені необхідності в додатковому охолодженні мішені немає.

Система фокусування електронного пучка на виході з прольотної трубки (об'єктивна магнітна лінза) має достатню ефективність та показує стабільні результати. Нажаль, на даний момент немає можливості виміряти діаметр сфокусованого електронного пучка прямими методами. Це обумовлено відсутністю відповідного обладнання в камері взаємодії та високою щільністю струму. Але електронний пучок залишає сліди на поверхні мішені, що дозволяє оцінити діаметр порівнявши електронний пучок з лазерним променем.



Рис. 6 – Результати руйнування мішені електронним пучком

Ця оцінка робилась з розрахунку того, що електронний пучок руйнує (рис. 6) ділянки металеві пластина при потужності пучка починаючи з $P = 12$ Вт ($U = 20$ кВ, $I = 0,6$ мА). При потужності $P = 30$ Вт ($U = 20$ кВ, $I = 1,5$ мА) в металевій пластині завтовшки 1 мм утворюється кризний отвір діаметром до 1,5 мм. Виходячи із значення питомої потужності, яка потрібна для руйнування металів лазерним променем (10^8 - 10^9 Вт/см²) легко оцінити розмір пучка. Оцінка показує, що діаметр сфокусованого

електронного пучка знаходиться в межах від 10 мкм до 65 мкм, що повністю відповідає очікуваним результатам та заявленим вимогам початкового технічного завдання.

Незважаючи на заявлені виробником катоду дані щодо емісії до 25 мА, максимальний струм, що був отриманий на мішені, склав 2 мА. Це пояснюється надмірним тепловідводом в конструкції катодного вузла.

3. ВИСНОВКИ

В даній роботі описаний спосіб пошуку оптимальної моделі для створення електронної гармати, параметри якої мають відповідати поставленій задачі. Було проведено моделювання, створений та експериментально апробований новий катодний вузол.

Таким чином був отриманий стабільний електронний пучок на мішені, з можливістю фокусування до розмірів поперечного перерізу порядку 50 мкм. Всі параметри електронного пучка (висока напруга, струм, геометричні розміри) можуть бути змінені оператором в ході експерименту. Обмеженнями, обумовленими високовольтним блоком живлення, є струм до 4 мА та напруга до 35 кВ.

Отриманий електронний пучок можна використовувати для генерації рентгенівського випромінювання з подальшим використанням в лабораторних установках для рентгенофлуоресцентного аналізу та інтроскопії.

ПОДЯКИ

Автор висловлює подяку співробітникам Інституту прикладної фізики НАН України к.ф.-м.н. Бугаю О.М., к.ф.-м.н. Дрозденку О.О., к.ф.-м.н. Денисенку В.Л., Калініченку В.Ю. за допомогу у проектуванні та виготовленні елементів та вузлів експериментального обладнання, за обговорення та аналіз отриманих результатів.

Робота виконана в рамках держбюджетної теми № 0110U004712.

Development and Pilot Testing of an Electron Gun

M.O. Drozdenko

Institute of Applied Physics NAS of Ukraine, 58, Petropavliv'ska Str., 40000 Sumy, Ukraine

The paper describes a new model of three electrode electron gun with indirect heating cathode for multifunctional laboratory facility based on precise electron source for implementation X-ray analysis. Laboratory micro analytical facility was offered at the high-column scanning electron microscope SEM-101M. As a result of numerical simulation of the model of primary electron gun, technological design weaknesses are found and experimental setup cathode junction of free geometry is proposed. Numerical simulation of the electron-optical system gave recommendations for the selection of the geometric parameters and focusing electrode potential. Experimental investigation of the selected modes of installation confirmed reliability of the design while using it for the X-ray sources.

Keywords: Cathode, Electron gun, Focusing, X-ray source.

Разработка и экспериментальная апробация электронной пушки

М.А. Дрозденко

Институт прикладной физики НАН Украины, ул. Петропавловская, 58, 40000 Сумы, Украина

В работе описана новая модель трехэлектродной электронной пушки с катодом непрямого накаливания для многофункциональной лабораторной установки на базе прецизионного источника электронов для реализации методов рентгеновского микроанализа. Лабораторная микроаналитическая установка была предложена на базе высоковольтной колонны растрового электронного микроскопа РЭМ-101М. В результате численного моделирования начальной модели электронной пушки были обнаружены технологические недостатки конструкции экспериментальной установки и предложен катодный узел со свободной геометрией. Численное моделирование электронно-оптической системы дало рекомендации для выбора геометрических параметров и потенциала фокусирующего электрода. Экспериментальное исследование выбранных режимов работы установки подтвердило надежность предлагаемой конструкции при использовании ее для источника рентгеновского излучения.

Ключевые слова: Катод, Электронная пушка, Фокусирование, Источник рентгеновского излучения.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. М. Кноль, И. Эйхмейер, *Техническая электроника*, т. I, II, (перевод с нем.) (М.: Энергия: 1971) (M. Knol, I. Eikhmeuyer, *Tekhnicheskaya elektronika*, t. I, II, (perevod s nem.) (M.: Energiya: 1971)).
2. Р. Шампе, *Физика и техника электровакуумных приборов*, т. II, (перевод с франц.) (М.:Госэнергоиздат: 1964) (R. Shampe, *Fizika i tekhnika elektrovakuumnykh priborov*, t. II, (perevod s frants.) (M.:Gosenergoizdat: 1964)).
3. И.В. Барсук, Г.С. Воробьев, А.А. Дрозденко, *Ж. нано-электрон. физ.* **6** № 1, 01022 (2014) (I.V. Barsuk, G.S. Vorobyov, O.O. Drozdenko, *J. Nano- Electron. Phys.* **6** No 1, 01022 (2014)).