

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Барсук Іван Володимирович

УДК 621.358.6

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ
ПУЧКІВ У АКСІАЛЬНО-СИМЕТРИЧНИХ СИСТЕМАХ
ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИХ ПРИЛАДІВ**

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2013

Дисертація є рукописом.

Робота виконана в Сумському державному університеті
Міністерства освіти і науки України.

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

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Пономарьов Олександр Георгійович,
Інститут прикладної фізики НАН України,
завідувач лабораторії нелінійної динаміки
іонних пучків;

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Одаренко Євген Миколайович,
Харківський національний
університет радіоелектроніки,
доцент кафедри фізичних основ
електронної техніки.

Захист відбудеться «__» грудня 2013 року о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.02 Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корпус ЕТ, ауд. 236.

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

Автореферат розіслано «__» листопада 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

О. О. Рибалко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сьогодні до електронно-оптичних систем (ЕОС) висуваються жорсткі вимоги щодо формування пучків з великою густиною струму (до десятків та сотень А/см²) при досягненні необхідних вихідних параметрів: величини питомої потужності та компресії потоків частинок, що формуються. Як правило, вирішення зазначених питань пов'язане з необхідністю проведення оптимізації режимів роботи ЕОС, що вирішальним чином впливають на якість і параметри електронних пучків (ЕП). Як наслідок, виникає необхідність в аналізі та оптимізації режимів формування потоків електронів під час їх руху в зовнішніх статичних електричних та магнітних полях із різною структурою. Таким чином, питання ефективного аналізу й отримання високоточних даних, підвищення швидкості обробки інформації та економічності, оптимізації методик чисельних та експериментальних досліджень ЕП різних рівнів інтенсивності та конфігурацій на сьогодні становлять значний інтерес для широкого кола спеціалістів та дослідників як у галузі електроніки НВЧ, так і при розробленні ефективних електрофізичних пристроїв різного призначення.

Аналіз експериментальних методів дослідження потоків заряджених частинок показує, що вибір єдиної оптимальної техніки вимірювання параметрів ЕП в ЕОС різного типу не є можливим: сфери застосування методів суттєво залежать від специфіки роботи досліджуваних приладів. Крім того, застосування експериментальних методів – досить трудомісткий та дорогий процес, тому на початковій стадії дослідження характеристик конкретного ЕП доцільним є його чисельний аналіз.

Як правило, чисельне моделювання системи, основним робочим елементом якої є потік електронів, проводиться у два етапи шляхом розрахунку структури електромагнітних полів з подальшим траєкторним аналізом заряджених частинок. При цьому різноманітність чисельних алгоритмів та потужності сучасних обчислювальних систем забезпечує гнучкість у виборі того чи іншого методу і можливість індивідуального підходу у вирішенні питань моделювання та оптимізації режимів роботи ЕОС різного типу. Тому питання вибору та реалізації ефективних чисельних алгоритмів для оптимізації параметрів ЕП різноманітних конфігурацій є актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана в науково-дослідній лабораторії «Нові технології у фізиці та техніці НВЧ» кафедри наноелектроніки Сумського державного університету. Тематика роботи відповідає науковим програмам Міністерства освіти і науки України з фундаментальних досліджень. Основні результати роботи увійшли до звітів із НДР: держбюджетної теми «Фізика хвильових процесів у відкритих хвилевідно-резонаторних металодіелектричних системах з розподіленими

джерелами випромінювання» №0106U001931 (2006 – 2008 рр.); держбюджетної теми «Фізика формування потоків заряджених частинок в приладах для діагностики матеріалів атомної енергетики» № 0109U001378 (2009 – 2011 рр.); держбюджетної теми «Електромагнітні явища у низьковимірних планарних періодичних металодіелектричних системах міліметрового-інфрачервоного діапазонів хвиль» № 0112U001379 (2012 – 2014 рр.).

Мета і основні задачі дослідження. Мета досліджень – розроблення та удосконалення методів моделювання і аналізу процесів формування інтенсивних ЕП у статичних аксіально-симетричних полях.

Відповідно до цього в роботі вирішувалися такі наукові задачі:

- вибір і експериментальне дослідження базових аксіально-симетричних систем, які є основою при проведенні чисельних експериментів;
- узагальнений аналіз механізмів світіння поверхні металу при його бомбардуванні потоком електронів;
- розвиток методики діагностики ЕП за перехідним випромінюванням;
- розвиток методик чисельного моделювання аксіально-симетричних полів та траєкторного аналізу формування інтенсивних потоків електронів;
- чисельне моделювання конфігурації електростатичних полів;
- чисельне моделювання траєкторій руху електронів;
- визначення оптимальних режимів формування інтенсивних ЕП на виході з ЕОС та їх порівняння з результатами експерименту;
- оцінка ефективності розроблених методик при чисельному моделюванні тривимірних ЕП і ЕОС в мікрорентгенівській апаратурі.

Об'єкт дослідження – процеси формування інтенсивних ЕП у статичних аксіально-симетричних полях.

Предмет дослідження – фізичні характеристики пучків електронів, що формуються аксіально-симетричними ЕОС електровакуумних приладів.

Відповідно до поставлених задач використовувалися такі **методи досліджень**:

- теоретичний метод кінцевих інтегралів (the Finite Integration Technique);
- метод геометричної оптики;
- метод сіткової пастки для побудови розподілу густини заряду ЕП в поперечному перерізі;
- експериментальний метод діагностики ЕП за перехідним випромінюванням;
- методи фотометрування та цифрової обробки відеозображення.

Наукова новизна одержаних результатів. У роботі вперше запропонований підхід експериментально-чисельного моделювання процесів формування ЕП в електронно-променевих приладах, який базується на визначенні вихідних даних для побудови чисельної моделі з аналізу натурального експерименту для заданого типу ЕОС з подальшою оптимізацією її параметрів.

Цей підхід апробований на прикладі аксіально-симетричних систем і може бути використаний для ЕОС довільних конфігурацій та різних режимів роботи.

У результаті розроблення методики моделювання отримані такі нові результати:

- уперше запропонована методика побудови модифікованої математичної моделі аксіально-симетричної ЕОС, яка базується на використанні тестових експериментів такого типу гармат та методу кінцевих інтегралів, що дозволило значною мірою скоротити обсяги чисельного аналізу;
- дістав подальшого розвитку метод чисельного моделювання ЕОС приладів НВЧ середньої потужності з енергіями електронів до 6 кеВ і пристроїв мікрорентгенівської томографії з енергіями ЕП до 30 кеВ;
- на основі розроблених методик чисельного моделювання уперше для ЕП стрічкового типу пояснено експериментальний ефект S-подібного викривлення траєкторій електронів у процесі їх руху в фокусувальному магнітному полі ЕОС.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблена методика чисельного моделювання електростатичних полів в аксіально-симетричних ЕОС електронно-променеви приладів та визначення оптимальної геометрії ЕП в таких системах може бути використана для вирішення таких практичних задач: розрахунку оптимальних із точки зору проходження струму потенціалів електродів ЕОС, що використовують інтенсивні ЕП з високим значенням первеанса; визначення комбінації потенціалів для отримання кросовера пучка в області дрейфу (область рівних потенціалів); оптимізації мікроструктури ЕП у поперечному перерізі з урахуванням теплового розкиду електронів за швидкостями шляхом аналізу густини струму вздовж діаметра та значень емітанса пучка. Описана методика дозволяє враховувати вимоги до значень потенціалів конкретних електродів ЕОС, що в деяких випадках дає можливість значно спростити конструкцію системи блоків живлення установок.

Проведений у роботі аналіз механізмів світіння металевих поверхонь при електронному бомбардуванні підтвердив домінуючий внесок у механізми виникаючих світлових ефектів перехідного випромінювання. Це дозволяє ефективно використовувати експериментальний метод на базі даного виду випромінювання для дослідження структури ЕП різних рівнів інтенсивності (від одиниць Вт/см² до сотень кВт/см²), які використовуються в генераторах середньої потужності міліметрового діапазону, технологічних установках та для фізичних досліджень.

Особистий внесок здобувача. Особисто автором проводилися пошук і аналіз літературних джерел за темою дисертації, розроблена методика моделювання та оптимізації структури ЕП аксіально-симетричних систем

електронно-променевих приладів, проведена адаптація зазначеної методики для систем генераторів дифракційного випромінювання (ГДВ) та апаратів мікрорентгенівської томографії, розвинена методика діагностики параметрів стрічкових та аксіальних пучків за перехідним випромінюванням в оптичному діапазоні. Автор брав участь у проведенні чисельних та експериментальних досліджень структури, статичних характеристик та динаміки формування ЕП різної геометрії. Особисто автором підготовлені статті [3, 4] та тези доповідей [10 – 12, 14], у роботах [1, 6, 7 – 9] проводилися обробка та аналіз чисельних та експериментальних даних, у [2, 5] були проведені обробка літературних джерел та узагальнена характеристика систем формування та фокусування ЕП. Постановка мети і задач дисертаційного дослідження, аналіз експериментальних даних, обговорення і обробка отриманих результатів відбувалися спільно з науковим керівником доктором фіз.-мат. наук, професором Г. С. Воробйовим та співавторами робіт. Основні положення дисертаційної роботи доповідались особисто автором на наукових конференціях і форумах.

Апробація результатів дисертації проводилася на таких національних та міжнародних семінарах, конференціях і форумах: 20 – 22-й Міжнародних конференціях «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2010 – 2012 рр.); 16-му Міжнародному молодіжному форумі «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» (Харків, 2012 р.); Міжнародній конференції студентів і молодих вчених з теоретичної та експериментальної фізики «ЕВРИКА» (Львів, 2008 р.); конференції молодих вчених та аспірантів «ІЕФ-2011» (Ужгород, 2011 р.); 6-й, 7-й Міжнародних молодіжних науково-технічних конференціях «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» (Севастополь, 2010, 2011 рр.); науково-технічних конференціях співробітників, викладачів та студентів СумДУ (Суми, 2011, 2013 рр.); 1-й Міжнародній конференції «Наноматериалы: применение и свойства» (Алушта, 2011 р.); Міжнародній конференції «Radiation Interaction With Material and Its Use in Technologies 2012» (Каунас, 2012 р.).

Публікації. Основні положення і результати дисертації опубліковані у 19 наукових працях, основні 14 з яких наведені в авторефераті. Серед них розділ у міжнародній монографії, 6 статей у спеціалізованих наукових журналах та 7 тез доповідей у збірниках наукових праць різноманітних національних та міжнародних конференцій, форумів та симпозіумів, 6 робіт опубліковано у виданнях, що індексуються наукометричною базою даних Scopus.

Структура дисертації. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел. Дисертація викладена на 138 сторінках, з них 99 сторінок основного тексту, 57 рисунків та 8 таблиць. Список використаних джерел налічує 116 найменувань.

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 «Формування електронних потоків у статичних електромагнітних полях» – літературний огляд. У ньому висвітлено загальні принципи формування пучків електронів у статичних електричних і магнітних полях. Розглянуто традиційні, а також нові перспективні розробки електронно-оптичних систем для формування та фокусування потоків електронів у НВЧ-приладах типу лампа біжучої хвилі (ЛБХ), лампа зворотної хвилі (ЛЗХ), ГДВ. Проаналізовано питання фокусування і транспортування пучків заряджених частинок на рівні сучасних технологій, а також проведено огляд класичних і актуальних на сьогодні чисельних і експериментальних методів дослідження параметрів ЕП. На підставі проведеного огляду показана доцільність використання методу перехідного випромінювання, що виникає під час падіння електронів на металеву мішень, як експериментального методу визначення геометричних розмірів, характеру розподілу і величини густини струму ЕП.

Особливу увагу в розділі приділено чисельним методам аналізу потоків заряджених частинок як одного з найбільш поширених і перспективних способів дослідження, проектування та оптимізації ЕОС різних конфігурацій. Аналіз таких систем показав, що до цього часу для практичного застосування найбільш актуальною є задача оптимізації параметрів аксіально-симетричних ЕП, що широко використовуються як в електроніці НВЧ, так і в електрофізичних технологічних установках з обробки матеріалів та їх діагностики. Показано, що застосування методу кінцевих інтегралів, широко використовуваного сьогодні в акустиці, динамічній теорії пружності, при моделюванні електромагнітних полів тощо є доцільним при моделюванні статичних електромагнітних полів у досліджуваних системах формування ЕП.

У *другому розділі «Вибір об'єктів досліджень та визначення вихідних параметрів для чисельного моделювання»* для проведення чисельного моделювання конкретної геометрії ЕОС з подальшим траєкторним аналізом на початковому етапі дослідження було визначено вихідні параметри системи: геометричні характеристики і режими роботи, що дозволяють отримувати параксіальні потоки з кросовером в області виходу електронної гармати. Для виконання поставленої задачі як об'єкт досліджень була обрана конфігурація електронної гармати, що конструктивно складається з трьох електродів – фокусувального електрода і двох анодів, яка є найбільш поширеним варіантом

реалізації електронних гармат для формування аксіально-симетричних ЕП у різних електровакуумних приладах типу ЛБХ, ЛЗХ тощо Обрана гармата дозволяє формувати ЕП з діаметром у кросовері порядку 0.05 – 0.5 мм, струмом пучка 5 – 30 мА при прискорювальних напругах до 6 кВ.

Для встановлення залежності струму колектора від режиму роботи електронної гармати на початковому етапі моделювання ЕОС було проведено експериментальне дослідження вольт-амперних характеристик (ВАХ) системи, розміщеної у вакуумованій колбі. Порівняльний аналіз значень струму ЕП, розсіяного на електродах гармати і струму, що осів на колекторі (рис. 1 а), показав, що при збільшенні прискорювальної різниці потенціалів U_{a2} коефіцієнт проходження струму зростає і при $U_{a2} = 3$ кВ досягає максимального значення 93.4% при оптимальному U_{a1} , що відповідає значенню струму $I_{col} = 9.1$ мА. Проведене експериментальне моделювання режимів роботи гармати дозволяє використовувати отримані дані при чисельному аналізі та оптимізації об'ємів машинних розрахунків.

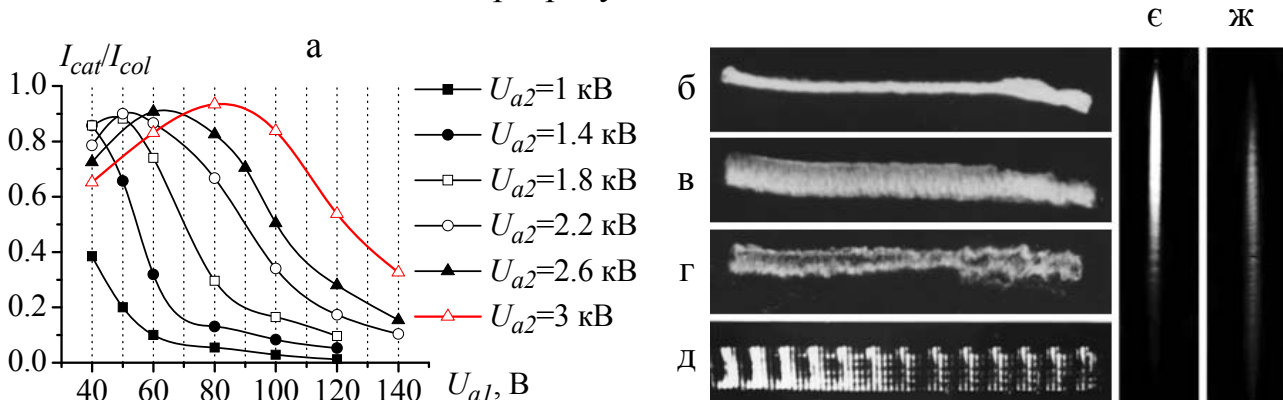


Рис. 1. Відносний коефіцієнт проходження струму при різних значеннях потенціалів U_{a1} і U_{a2} (а); фрагменти зображень фотореєстрації світіння стрічкового ЕП на статичній (б – в) і рухомій (г) мішенях; аксіально-симетричного ЕП на рухомій мішені (е, ж)

Крім того, в цьому розділі досліджені механізми виникнення світіння на поверхні металевих об'єктів під дією електронного бомбардування; показано, що переважним чинником у виникаючих світлових ефектах є перехідне випромінювання. На основі цього виду випромінювання розвинена методика діагностики ЕП з точки зору методів його реєстрації та використання в ЕВП. Запропонований чисельний алгоритм розпізнавання густини енергії перехідного випромінювання на металевих мішенях дозволяє удосконалити методику експериментального аналізу структури ЕП. За допомогою запропонованих схем аналізаторів характеристик ЕП стрічкової і аксіальної геометрії отримані фотографії слідів світіння пучків за допомогою традиційної фотокамери для різних режимів роботи електронних гармат (рис. 1 б – ж.). На рис. 1 б, в зображений профіль пучка в мінімумі та максимумі пульсацій відповідно. Рис. 1 г відповідає режиму роботи гармати з високою

неоднорідністю емісії катода, яка може бути пов'язана як з тривалістю роботи катода, так і з його дефектами. Рис. 1 д отриманий у процесі пульсацій ЕП на рухомій мішені при супроводі його магнітним полем на металевій періодичній структурі. Інтенсивність світіння аксіально-симетричного ЕП на рухомій мішені показана для двох граничних відстаней від останнього анода гармати – в області кросовера пучка (рис. 1 є) та в області його розфокусування та зменшення густини (рис. 1 ж). Отримані результати дозволяють провести порівняльний аналіз експериментальних даних з результатами чисельного моделювання і, таким чином, дати оцінку можливості практичного застосування запропонованої методики.

У *третьому розділі* «Методика і результати чисельного моделювання аксіально-симетричних полів» наведені результати моделювання електромагнітних полів, що відповідають різним режимам роботи триелектродної аксіально-симетричної електронної гармати, описаної у попередньому розділі.

Як базовий алгоритм визначення структури електромагнітних полів у досліджуваній ЕОС був використаний метод кінцевих інтегралів (the Finite Integration Technique – FIT), суть якого, як і будь-якого сіткового методу, полягає в дискретизації розрахункового простору, тобто розбитті замкнутої області, що розглядається, на елементарні геометричні елементи – комірки з утворенням спеціальної сіткової структури. На відміну від більшості чисельних алгоритмів FIT базується на використанні системи рівнянь Максвелла не в диференціальній, а в інтегральній формі запису. Просторова дискретизація рівнянь Максвелла подібно методу кінцевих різниць у часовій області (the Final Difference Method in Time Domain – FDTD) здійснюється за двосітковою схемою: ортогонально основній сітці будується додаткова, зміщена на половину довжини ребра комірки. Закон Фарадея із системи рівнянь Максвелла для кожної комірки розрахункової області з урахуванням напрямів компонент напруженостей електромагнітного поля може бути поданий у такому вигляді:

$$\oint_{l_0} E dl = - \frac{d}{dt} \int_{S_0} B ds \Rightarrow e_{i2} + e_{i4} - e_{i3} - e_{i1} = - \frac{\partial}{\partial t} b_n, \quad (1)$$

де l_0 – замкнутий контур, що обмежує поверхню S_0 комірки.

Якщо описану схему трансформації закону Фарадея повторити для всіх граней комірки, алгоритм розрахунку може бути поданий у матричному вигляді шляхом уведення топологічної матриці C як дискретного аналога аналітичного оператора ротора (2).

Застосовуючи описану схему до закону Ампера системи рівнянь Максвелла по відношенню до вторинної сітки, отримаємо відповідний дискретний оператор дивергенції.

що дозволяє з високою ймовірністю визначати оптимальне значення потенціалу першого анода за прискорювальною напругою системи без необхідності проведення моделювання.

При розрахунку оптимального значення фокусувального потенціалу за допомогою чисельних експериментів необхідно брати до уваги, що при від'ємних значеннях струм емісії знижується за рахунок виникаючого потенціального бар'єра. У зв'язку з цим питання визначення залежності емісійного струму від потенціалу фокусувального електрода є актуальним. Для його вирішення був проведений розрахунок модуляційної характеристики електронної гармати. Максимальний струм емісії катода $I_{\text{кmax}}$ визначається як

$$I_{\text{кmax}} = 2.44 \left(\frac{1}{\tau} f(\tau) \right)^2 U_{\text{к0}}^{3/2} \gamma(b), \quad (5)$$

де $U_{\text{к0}}$ – замикаюча напруга катода; $\gamma(b)$ – функція, що характеризує нерівномірність розподілу густини струму по поверхні катода; $f(\tau)$ – функція, що визначається зі співвідношення

$$f(\tau) = \frac{2}{\pi} \left(\arctg(\tau) + \frac{\tau}{1 + (\tau)^2} \right), \quad (6)$$

де τ – деякий геометричний параметр системи, що враховує товщину діафрагми модулятора, його радіус і відстань від катода. За аналогією з електронними лампами при визначенні $U_{\text{к0}}$ у разі тетродної системи введена діюча напруга найближчого до модулятора електрода, яким є перший анод:

$$U_{\text{д}} \approx U_{\text{a1}} + D_{\text{a1}} U_{\text{a}}, \quad (7)$$

де D_{a1} – проникність першого анода. Для визначення D_{a1} був проведений аналіз екрануючих властивостей першого анода по відношенню до другого шляхом розрахунку електростатичного поля у просторі між ними. На підставі описаної методики та проведених розрахунків була побудована модуляційна характеристика (рис. 2), що дозволяє аналітично описати характер зміни струму емісії використаного в досліджуваній аксіально-симетричній ЕОС катода при заданні від'ємних значень потенціалу на фокусувальному електроді.

Як бачимо з рисунка 2, замикаючий потенціал модулятора становить $U_m = -37$ В. Урахування наведеної залежності струму емісії від фокусувального потенціалу при чисельних розрахунках дозволяє удосконалити методику траєкторного аналізу в області від'ємних значень U_f , яка до визначення виду характеристики зводилася до задання фіксованого значення струму емісії в інтервалі потенціалів $U = U_m \div 0$.

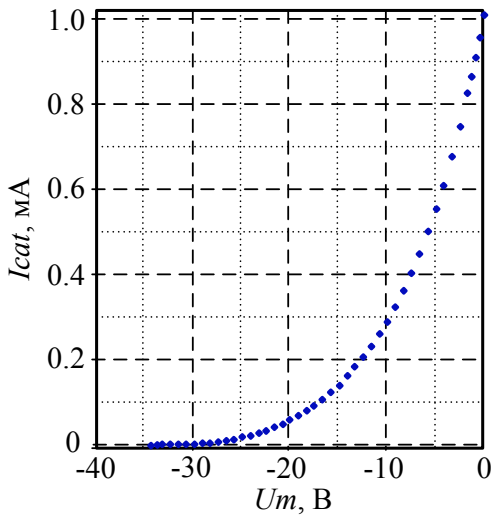


Рис. 2. Модуляційна

характеристика електронної гармати досліджуваної аксіально-симетричної ЕОС

характеристика електронної гармати залежно від фокусувального потенціалу. У результаті проведеного в третьому розділі розрахунку структур електричних полів для проведення траєкторного аналізу обрано такі режими потенціалів електродів ЕОС: $U_f = -10$ В, $U_{a1} = 40$ В і $U_f = -10 \div 5$ В, $U_{a1} = 80 \div 140$ В – для низьковольтного режиму, і $U_f = -10 \div 20$ В, $U_{a1} = 100 \div 140$ В і $U_f = 0 \div 20$ В, $U_{a1} = 120 \div 160$ В – для високовольтного режиму. Аналіз проходження струму в низьковольтному режимі показав, що максимальні значення коефіцієнта K спостерігаються при значеннях $U_f = (-20 \div -10)$ В. Це пов'язано з невеликим значенням прискорювального потенціалу U_{a2} , що призводить до збільшення діаметра пучка та осідання його на електродах гармати в каналі дрейфу. Встановлення від'ємного фокусувального потенціалу фактично дозволяє сфокусувати граничні електрони пучка (залежно від величини струму пучка), збільшивши при цьому проходження струму.

У високовольтному режимі максимальне проходження струму спостерігається при значеннях $U_f = (0 \div 10)$ В. Такий режим є менш критичним до збільшення струму емісії у зв'язку з досить високим потенціалом другого анода, який частково компенсує від'ємний просторовий заряд електронної хмари у прикатодній області. Так, при $I_{cat} = 0.025$ А можливе досягнення проходження струму на рівні 74 %, у той час як при менших значеннях прискорювального потенціалу цей коефіцієнт не перевищує 62 %.

Як приклад на рис. 3 а подані залежності коефіцієнта проходження струму від величини фокусувального потенціалу у високовольтному режимі роботи ЕОС для значення струму емісії $I_{cat} = 0.005$ А.

Проведені розрахунки показали, що при збільшенні прискорювального потенціалу U_{a2} значення U_f , що дозволяють отримати найбільший коефіцієнт проходження струму в межах режиму роботи, зміщуються з від'ємної області значень (-10 В) у додатну (+10 В). Однак задовільний коефіцієнт проходження ($K > 85$ %) можна отримати лише при значеннях $U_f \geq 0$. Для вибору найбільш

У **четвертому розділі** «Траєкторний аналіз» проводиться розрахунок траєкторій окремих частинок, що формують пучок, та дослідження його мікроструктури з метою отримання потоків з максимально прийнятними геометричними та фізичними характеристиками. Для вирішення поставленої задачі в цьому розділі був проведений аналіз коефіцієнта проходження струму $K = I_{col}/I_{cat}$ потоку електронів, формованого триелектродною аксіально-симетричною електронною гарматою, залежно від фокусувального потенціалу.

У результаті проведеного в третьому розділі розрахунку структур електричних

оптимального потенціалу фокусувального електрода був проведений додатковий аналіз якості сформованого ЕП шляхом дослідження діаметра кросовера і його положення щодо емітувальної поверхні.

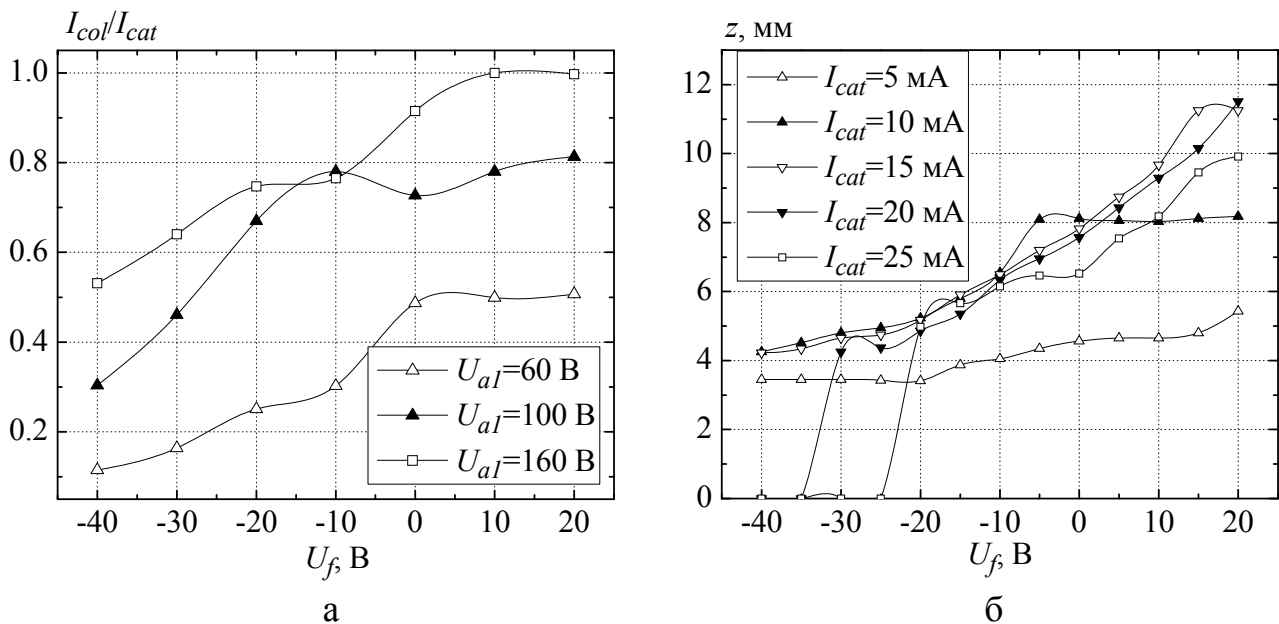


Рис. 3. Вплив фокусувального потенціалу на параметри електронної гармати: проходження струму у високовольтному режимі роботи при $U_{a2} = 4$ кВ (а); положення кросовера ЕП при різних значеннях струму пучка (б)

На рис. 3 б продемонстровано вплив фокусувального потенціалу на положення кросовера ЕП у пролітному каналі (відстань від емітувальної поверхні). Як приклад був обраний режим роботи ЕОС з параметрами $U_{a1} = 80$ В, $U_{a2} = 2400$ В. Як бачимо з рисунка 3 б, при збільшенні потенціалу U_f від -40 В до 0 В кросовер пучка зміщується у бік другого анода $z = (4 \div 6.4)$ мм, що є кращим, ніж його розміщення між електродами, оскільки значно спрощує його подальше транспортування. При цьому діаметр ЕП зменшується, а проходження струму зростає при значеннях $U_f = (-10 \div 0)$ В до 100 %. Таким чином, вибір потенціалу фокусувального електрода, що дорівнює потенціалу катода, є найбільш прийнятним, дозволяючи при цьому звести до мінімуму негативні ефекти виникаючого потенціального бар'єра і значно спростити схему аналізатора ЕП конструктивно.

Комплекс проведених чисельних експериментів з реалізації оптимальних режимів роботи електронної гармати, шляхом варіювання значеннями потенціалів електродів U_f , U_{a1} , U_{a2} , дозволив сформувавши ЕП з оптимальною геометрією, поданий на рис. 4.

Як бачимо з рисунка 4, кросовер пучка розміщується за другим анодом електронної гармати на відстані 8 мм, при цьому діаметр пучка становив 0.22 мм (під час вимірювання діаметра ЕП у поперечному перерізі

припускалося, що в межах розміру, що визначався, міститься 90 % струму пучка), що відповідає компресії ЕП ≈ 30 при енергії пучка 3 кеВ.

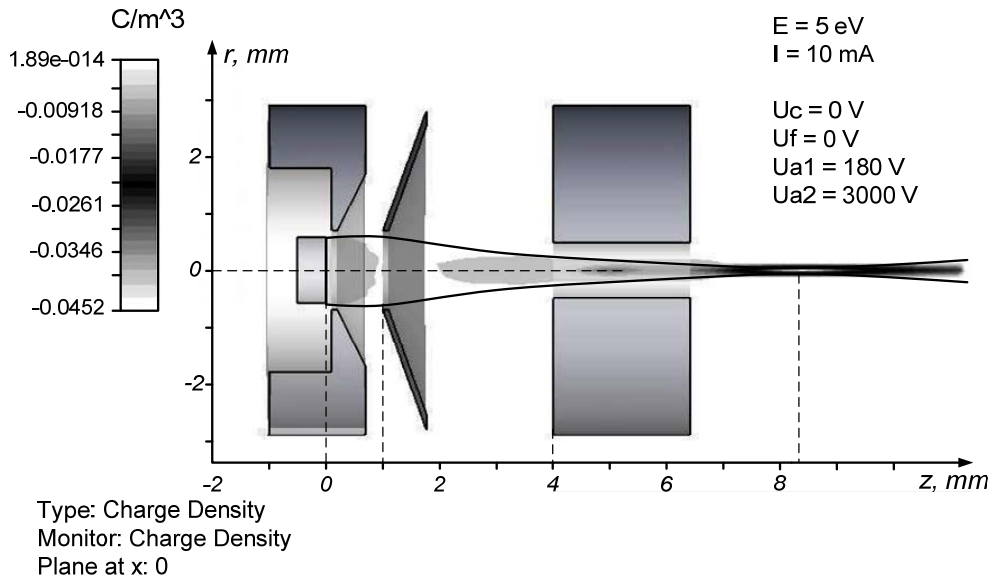


Рис. 4. Конфігурація ЕП після проведення оптимізації режимів роботи електронної гармати

Крім інформації про осідання електронів на електродах гармати, яка дозволяє провести попередній аналіз її режимів роботи, надзвичайно важливі відомості про якість формованого ЕП: характер розподілу частинок в поперечному перерізі, ламінарність, розкид поперечних компонент швидкостей електронів. Для опису таких характеристик був використаний середньоквадратичний (статистичний) емітанс:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \left(\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle x x' \rangle^2 \right)^{1/2} = \\ &= \left(\langle x - \langle x \rangle \rangle^2 \langle x' - \langle x' \rangle \rangle^2 - \langle (x - \langle x \rangle)(x' - \langle x' \rangle) \rangle^2 \right)^{1/2}, \end{aligned} \quad (8)$$

де $x' = \frac{v_x}{v_\perp}$, $\langle x \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_i$. Розрахунковий емітанс пучка $\varepsilon_{x,y}$ при оптимальному

проходженні струму на відстані 10 мм від катода (5 мм від другого анода) становив $\varepsilon_x = 1.71$ мрад·мм і $\varepsilon_y = 1.85$ мрад·мм за абсцисою та ординатою відповідно, діаметр пучка – $D = 0.8$ мм. Проте, як показали чисельні експерименти з дослідження поперечної динаміки електронів (рис. 5 а), це значення може бути зменшене шляхом варіювання потенціалу U_{a1} .

Аналіз двовимірних діаграм поперечного емітанса показав, що при збільшенні U_{a1} до 110 В спостерігається значне погіршення ламінарності ЕП (рис. 5 б), у той час як при зменшенні U_{a1} діаграма наближається до вигляду мінімально розбіжного пучка (рис. 5 в) при незначному збільшенні діаметра. З

аналізу результатів експериментальних вимірювань (рис. 1 а) і чисельного моделювання (рис. 4, 5) вибраний оптимальний режим при потенціалах $U_{a1} = 60$ В і $U_{a2} = 3$ кВ, який забезпечує проходження струму на рівні $K \approx 0.85$ при значеннях поперечного емітанса $\varepsilon_x = 1.67$ мрад·мм і $\varepsilon_y = 1.76$ мрад·мм.

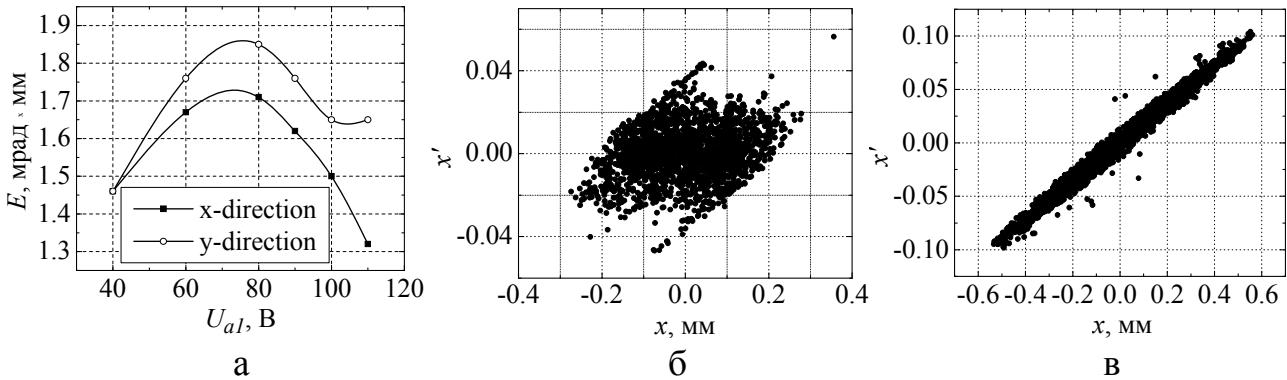


Рис. 5. Залежність емітанса ЕП від потенціалу U_{a1} : чисельні значення за координатними осями x та y (а); двовимірні діаграми при $U_{a1} = 110$ В і $U_{a1} = 40$ В (б, в відповідно)

У **п'ятому розділі** «Застосування розроблених чисельних моделей для аналізу електронних пучків у практичних схемах електрофізичної апаратури» як апробація методики аналізу систем формування ЕП досліджені реальні ЕОС різних геометричних конфігурацій, зокрема діодна гармата, що використовується у приладах типу ГДВ, ЛЗХ, а також аксіально-симетрична електронна гармата, яка призначена для формування потоків електронів у мікрорентгенівській апаратурі.

На відміну від триелектродної аксіально-симетричної електронної гармати в діодній ЕОС для фокусування ЕП використовується поздовжнє магнітне поле, що формується системою електромагнітів із полюсними наконечниками. У той самий час необхідна величина індукції магнітного поля (~ 1 Тл) та його структура вздовж осі системи можуть бути отримані шляхом використання постійних магнітів із енергоємних рідкоземельних матеріалів (наприклад, SmCo , NeFeB) з постійною намагніченістю. Для таких магнітно-фокусувальних систем визначальними параметрами є залишкова намагніченість B_r та коерцитивна сила H_C . Еквівалентна заміна електромагнітів на систему на постійних магнітах покладена в основу методики моделювання магнітного поля у цьому розділі.

Так, у випадку статичних полів електричні та магнітні складові не залежать одна від одної, що дозволяє переписати теорему Ампера системи рівнянь Максвелла про циркуляцію магнітного поля у вигляді

$$\oint_l H dl = \int_S j dS \quad \text{або} \quad \text{rot} \vec{H}_i = \vec{J} \Rightarrow \tilde{C} h_i = j. \quad (9)$$

У разі відсутності струмів магнітне поле можна вважати безвихровим, що дає можливість за аналогією з електричним полем ввести магнітний скалярний потенціал u_m :

$$\vec{H}_i = -\text{grad}u_m, \quad (10)$$

$$\text{div}\mu_0\vec{H}_i = \rho_m \Rightarrow SM_\mu h_i = q_m, \quad (11)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала; ρ_m – об’ємна густина ефективних «магнітних зарядів». Скалярний потенціал при цьому підлягає рівнянню Пуассона $\text{div}\mu_0\text{grad}u_m = -\rho_m \Rightarrow SM_\mu S^T \varphi_m = q_m$ (S^T – дискретний аналог оператора градієнта, вводиться аналогічно топологічним матрицям C , \tilde{C} , S , \tilde{S}). У свою чергу, об’ємна густина магнітних зарядів визначається як

$$\rho_m = -\mu_0 \text{div}\vec{M}, \quad (12)$$

$$\vec{B}_r = \mu_0 \vec{M} \Big|_{\vec{H}=0}, \quad (13)$$

де \vec{M} – намагніченість; B_r – залишкова намагніченість. Вирази (12) і (13) дають можливість зв’язати введений скалярний потенціал магнітного поля із значенням залишкової намагніченості матеріалу елемента, що формує магнітне поле, яка задається під час моделювання. Остаточного визначення компоненти вектора магнітного поля через скалярний потенціал може бути отримане із співвідношення $h = h_i - S^T \varphi_m$. Як приклад на рис. 6 поданий розподіл індукції

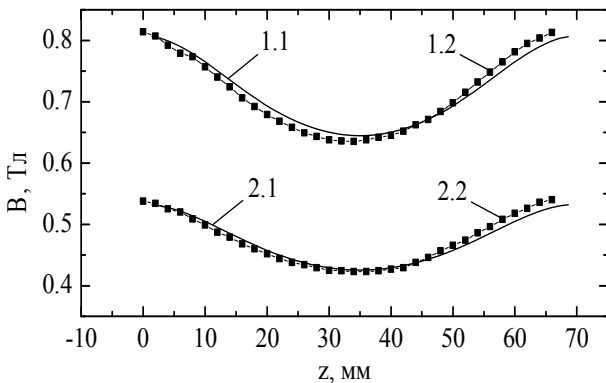


Рис. 6. Розподіл індукції магнітного поля вздовж осі МФС (розрахункові значення індукції – суцільні лінії: 1.1 – $u_{mN,S} = \pm 20000$; 2.1 – $u_{mN,S} = \pm 13200$; експериментальні значення індукції – пунктирні лінії: 1.2 – $I = 10$ А; 2.2 – $I = 6$ А)

магнітного поля вздовж осі системи для магнітних потенціалів, що відповідають різним значенням струму в котушках електромагніту: 10 А і 6 А.

Чисельний траєкторний аналіз ЕП у досліджуваній ЕОС показав добру кореляцію з експериментальними даними. Зокрема, наявність пульсацій граничних електронів сформованого стрічкового пучка відносно деякої рівноважної координати (рис. 1 д), а також S-подібне викривлення сліду ЕП на колекторі, що пов’язане з наявністю швидкості зносу в площині xOz .

Крім того, у цьому розділі проведений розрахунок триелектродної ЕОС, що використовується як система формування ЕП у пристроях

мікрорентгенівської томографії. На першому етапі розрахунку була вироблена методика визначення геометричних параметрів фокусувального електрода на спрощеній моделі гармати Пірса, що базувалася на алгоритмах чисельного моделювання електромагнітних полів і траєкторного аналізу, викладених у розділах 3 та 4. Далі зазначена методика була адаптована до практичної схеми мікрорентгенівського джерела ЕОС стенда. Виходячи з існуючих вимог до конструкції каналу дрейфу методом геометричної оптики, а також на основі результатів аналізу розподілу заряду в поперечному перерізі ЕП визначені поперечні розміри пучка на вході магнітної лінзи.

Результати моделювання дозволяють зробити висновок, що запропонована модель задовольняє умови ТЗ на стенд. При цьому забезпечується оптимальне проходження (повного) струму з катода до входу в електромагнітну фокусувальну лінзу стенда. Максимальний розмір пучка при цьому на вході в лінзу об'єктива становить від (0.802 ± 0.122) мм до (3.914 ± 0.381) мм, а в кросовері – від (0.2 ± 0.015) мм до (0.25 ± 0.017) мм, що відповідає заданим вихідним вимогам.

ВИСНОВКИ

У роботі встановлені загальні закономірності фізичних процесів формування ЕП у статичних аксіально-симетричних полях ЕОС електровакуумних приладів НВЧ типу ЛБХ, ЛЗХ, ГДВ тощо і дані рекомендації з використання оптимальних режимів роботи таких пристроїв.

1. Експериментально на вакуумованих макетах триелектродних ЕОС визначені оптимальні з точки зору проходження струму ЕП режими роботи, які при напрузі фокусувального електрода $U_f = 0$ В мають значення: напруга першого анода $U_{a1} = 80$ В, другого анода – 3 кВ.

2. Шляхом експериментальних досліджень і загального теоретичного аналізу показано, що під час падіння електронів на металеву мішень переважаючим фактором у виникаючих світлових ефектах є перехідне випромінювання. На основі цього виду випромінювання розвинена методика діагностики ЕП з точки зору методів його реєстрації та використання в ЕВП.

3. На базі методу кінцевих інтегралів розвинена методика моделювання електростатичних полів аксіально-симетричних ЕОС відповідно до реальної геометрії і типових режимів роботи триелектродної електронної гармати. Визначено оптимальні значення потенціалів електродів для отримання низькоенергетичного інтенсивного пучка з кросовером за другим анодом фокусувальної системи.

4. Розроблено методику побудови модуляційної характеристики досліджуваної ЕОС і чисельно визначено величину запірної напруги на фокусувальному електроді, що дозволяє оптимізувати інтервали параметрів при

подальшому траєкторному аналізі руху електронів у досліджуваних системах, тим самим скоротивши обсяги чисельних розрахунків. На цій основі встановлено ступінь впливу та оптимальні значення потенціалу фокусувального електрода аксіально-симетричної ЕОС на коефіцієнти проходження струму ЕП у пролітному каналі.

5. Шляхом серії чисельних модельних розрахунків поперечного середньоквадратичного емітанса ЕП проведено коригування інтервалу значень потенціалу першого анода для зменшення емітанса в координатних напрямках x та y . Виконаний розрахунок структури електричного поля діодної ЕОС ГДВ, а також магнітного поля його аксіально-симетричної МФС. У ході траєкторного аналізу з використанням методу сіткової пастки показано, що основним елементом, що формує стрічковий ЕП на вході у простір фокусування, є анодна щілина.

6. Аналіз динаміки формування стрічкового ЕП уздовж періодичної структури показав кореляцію аналітичного розрахунку довжини хвилі пульсацій з даними, отриманими внаслідок застосування методики чисельного моделювання пучка. Отриманий розподіл густини заряду ЕП на мішені продемонстрував появу S-подібного викривлення перерізу пучка, пов'язаного з поперечним зсувом шарів частинок.

7. Визначено оптимальні режими роботи для аксіально-симетричної моделі електронної гармати для діапазону прискорювальних потенціалів $10 \div 30$ кВ, використовуваної в ЕОС мікрорентгенівської апаратури. Для даних режимів визначені розміри пучка в кросовері, які становлять $0.04 \div 0.06$ мм при вихідному діаметрі емітувальної поверхні катода 1 мм.

8. У результаті траєкторного аналізу практичної моделі мікрорентгенівського джерела ЕОС стенда визначена обернено пропорційна залежність розбіжності пучка від прискорювальної напруги. Розмір ЕП у місці розташування входу в електромагнітну фокусувальну лінзу становив від (0.802 ± 0.122) мм до (3.914 ± 0.381) мм, при цьому розмір пучка в кросовері становив від (0.2 ± 0.015) мм до (0.25 ± 0.017) мм.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Праці, в яких опубліковані основні наукові результати:

1. The diffraction of electromagnetic waves on the periodic heterogeneities and its use for realization of practical technical and electronic devices of millimeter and sub millimeter wavelength range / G. Vorobyov, L. Vietzorreck, **I. Barsuk** and A. Rybalko // Solutions and applications of scattering, propagation, radiation and emission of electromagnetic waves / edited by A. Kishk. – Rijeka : InTech, 2012. – Ch. 8. – P. 209–231.

2. Formation and analysis of extended electron beams in vacuum microwave devices / G. S. Vorobyov, **I. V. Barsuk**, A. A. Drozdenko, A. A. Ponomaryova // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2012. – Vol. 71, No 8. – P. 705–716.

3. **Барсуک І. В.** К вопросу о механизмах свечения поверхности металла при бомбардировке его интенсивным потоком электронов / **И. В. Барсуک** // *Журнал нано- и электронной физики*. – 2012. – Т. 4, № 2. – С. 02029-1–02029-4.

4. **Барсук І. В.** К вопросу моделирования режимов работы трехэлектродной электронной пушки ЛБВ / **И. В. Барсук**, Г. С. Воробьев, А. А. Дрозденко // *Прикладная радиоэлектроника*. – 2012. – Т. 11, № 1. – С. 72–76.

5. Воробьев Г. С. Методы формирования и анализа интенсивных пучков электронов в статических электромагнитных полях (обзор) / Г. С. Воробьев, **И. В. Барсук**, А. А. Дрозденко // *Журнал нано- и электронной физики*. – 2011. – № 3(3). – С. 63–77.

6. Методика диагностики электронных пучков среднего уровня мощности по переходному излучению / Г.С. Воробьев, А.А. Дрозденко, Ю.В. Шульга, **И. В. Барсук** // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. – 2010. – № 5-6(89). – С. 7–10.

Праці апробаційного характеру:

7. Using of transition radiation for analyzing of electron beam microstructure / A. Pogrebnyak, G. Vorobyov, A. Drozdenko, **I. Barsuk** // *Radiation Interaction with Material and its Use in Technologies 2012 : 4th International Conference, May 14–17, 2012 : Program and materials*. – Kaunas, 2012. – P. 302–303.

8. **Барсук І. В.** Експериментальне дослідження мікроструктури інтенсивних електронних потоків / **І. В. Барсук**, О. О. Дрозденко // Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «ЕВРИКА-2008», 19–21 трав. 2008 р. : тези доп. – Львів, 2008. – С. Е25.

9. Drozdenko A. A. On the analysis of the structure of intense electron beam on transition radiation / A. A. Drozdenko, G. S. Vorobyov, **I. V. Barsuk** // *Microwave and Telecommunication Technology : 20th International Crimean Conference “CriMiCo’2010”, Sept. 13–17, 2010. : proceedings*. – Sevastopol, 2010. – P. 249–250.

10. Application of Simulation Technologies to the Investigation of the Beam Generating Systems / **I. V. Barsuk**, A. V. Bondar, G. S. Vorobjov, A. A. Drozdenko // *Nanomaterials: Applications and Properties “NAP 2011” : 1st International Conference, Sept. 27–30, 2011 : proceedings*. – Alushta, 2011. – P. 350–353.

11. Vorobyov G. S. Optimization of operating regimes of TWT three-electrode electron gun / G. S. Vorobyov, **I. V. Barsuk**, A. A. Drozdenko // *Microwave and Telecommunication Technology : 21st International Crimean Conference*

“CriMiCo’2011”, Sept. 12–16, 2011. : proceedings. – Sevastopol, 2011. – P. 316–317.

12. Combining of the experiment and numerical simulation for electron beam optimization of the TWT system / **I. V. Barsuk**, A. A. Drozdenko, G. S. Vorobyov, A. A. Ponomarova // Microwave and Telecommunication Technology : 22nd International Crimean Conference “CriMiCo’2012”, Sept. 10–14, 2012. : proc. – Sevastopol, 2012. – P. 211–212.

Праці, які додатково відображають наукові результати:

13. Методы диагностики и расчета статических характеристик интенсивных нерелятивистских электронных пучков (Обзор) / Г. С. Воробьев, А. А. Дрозденко, К. А. Пушкарев, **И. В. Барсуک** // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2007. – № 3(9). – С. 79–91.

14. **Барсуک И. В.** Моделирование диодных электронно-оптических систем для генераторов дифракционного излучения / **И. В. Барсук**, А. А. Дрозденко // Міжнародна наукова конференція молодих вчених та аспірантів «ІЕФ 2011», 24–27 трав. 2011 р. : прогр. і тези доп. – Ужгород, 2011. – С. 198.

АНОТАЦІЯ

Барсук І. В. Моделювання процесів формування електронних пучків у аксіально-симетричних системах електронно-променевих приладів. – Рукопис.

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

Дисертаційна робота присвячена встановленню загальних закономірностей динаміки формування ЕП у статичних аксіально-симетричних полях ЕОС електровакуумних приладів НВЧ типу ЛЗХ, ЛБХ, ГДВ тощо, а також формуванню практичних рекомендацій щодо використання оптимальних режимів роботи зазначених пристроїв.

У літературному огляді визначені найбільш актуальні задачі дослідження принципів побудови ЕОС для формування та фокусування ЕП в електровакуумних приладах. Для проведення чисельного моделювання реальної ЕОС із подальшим траєкторним аналізом попередньо були визначені геометричні характеристики, режими роботи, побудовані ВАХ системи. Розвинена методика експериментального дослідження структури ЕП за перехідним випромінюванням в оптичному діапазоні. Запропонована загальна методика моделювання режимів роботи триелектродної аксіально-симетричної електронної гармати на базі методу кінцевих інтегралів. Розрахована

модуляційна характеристика електронної гармати, проведено дослідження коефіцієнта проходження, емітанса та положення кросовера пучка відносно катода, що дозволяє визначити оптимальність фокусування електронів. Запропонована методика була адаптована для дослідження мікроструктури пучків діодної гармати ЕОС ГДВ та під час проектування аксіально-симетричної гармати, що може бути використана як джерело електронів у мікрорентгенівській апаратурі.

Ключові слова: електронний пучок, електронно-оптична система, електромагнітне поле, перехідне випромінювання, мікроструктура пучка, кросовер, траєкторний аналіз.

АННОТАЦІЯ

Барсуک І. В. Моделирование процессов формирования электронных пучков в аксиально-симметричных системах электронно-лучевых приборов. – Рукопись.

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

Диссертация посвящена установлению общих закономерностей динамики формирования ЭП в статических аксиально-симметричных полях ЭОС электровакуумных приборов СВЧ типа ЛОВ, ЛБВ, ГДИ и др., а также выработке практических рекомендаций по использованию оптимальных режимов работы таких устройств.

На основании литературного обзора определены наиболее актуальные в настоящее время задачи исследования принципов построения ЭОС различных конфигураций для формирования и фокусировки ЭП в электровакуумных приборах, обозначены основные объекты теоретических и экспериментальных исследований, а также задачи, решаемые в диссертационной работе.

Для проведения численного моделирования конкретной геометрии ЭОС с последующим траекторным анализом на начальном этапе исследования были определены исходные параметры системы: геометрические характеристики и режимы работы, позволяющие получать параксиальные осесимметричные потоки с кроссовером в области выхода электронной пушки. Развита методика экспериментального исследования структуры ЭП по переходному излучению оптического диапазона, возникающего при падении пучка на металлическую мишень; проведено экспериментальное моделирование режимов работы трехэлектродной ЭОС, позволяющее использовать полученные данные при проведении численного анализа и оптимизации объемов машинного счета. Предложен численный алгоритм распознавания плотности энергии

переходного излучения на металлических мишенях, который позволяет усовершенствовать методику экспериментального анализа структуры ЭП.

Предложена общая методика моделирования режимов работы трехэлектродной аксиально-симметричной электронной пушки путем определения структуры статических электрических полей. Проведена серия численных экспериментов на базе метода FIT, что позволяет оптимизировать значения потенциалов электродов ЭОС, необходимые для получения потоков электронов оптимальной геометрии. Рассчитана модуляционная характеристика электронной пушки, позволяющая усовершенствовать методику траекторного анализа в области отрицательных значений потенциала фокусирующего электрода $U_f \leq 0$ В.

Траекторный анализ исследуемой ЭОС позволил провести исследование относительного коэффициента токопрохождения потока электронов в пролетном канале с последующим определением конкретных оптимальных значений фокусирующего электрода. Проведен анализ положения кроссовера относительно эмиссионной поверхности катода и эмиттанса ЭП в зависимости от выбранного режима работы, которые позволяют определить оптимальность фокусировки электронов.

В качестве апробации методики анализа систем формирования и фокусировки ЭП исследованы реальные ЭОС различных геометрических конфигураций, в частности двухэлектродная диодная пушка, используемая в приборах типа ГДИ, ЛОВ, а также аксиально-симметричная электронная пушка, которая предназначена для источников электронов в микрорентгеновской аппаратуре. Выработана методика определения геометрических параметров фокусирующего электрода упрощенной модели пушки Пирса, а также ее адаптация к практической схеме микрорентгеновского источника ЭОС стенда. Исходя из существующих требований к конструкции канала дрейфа методом геометрической оптики, а также на основании результатов анализа распределения заряда в поперечном сечении ЭП определены поперечные размеры пучка на входе магнитной линзы. При этом обеспечивается оптимальное прохождение (полного) тока с катода до входа в электромагнитную фокусирующую линзу стенда. Максимальный размер пучка при этом составляет от (0.802 ± 0.122) мм до (3.914 ± 0.381) мм, а в кроссовере от (0.2 ± 0.015) мм до (0.25 ± 0.017) мм, что соответствует заданным исходным требованиям. Результаты численного исследования указывают на возможность применения предложенных методик в разработке практических схем систем формирования и фокусировки пучков различных энергетических спектров с максимально приемлемыми выходными параметрами.

Ключевые слова: электронный пучок, электронно-оптическая система, электромагнитное поле, переходное излучение, микроструктура пучка, кроссовер, траекторный анализ.

ABSTRACT**Barsuk I. V. Modeling of the processes of electron beam forming in axially-symmetric systems of cathode-ray tubes. – Manuscript.**

Thesis for a candidate of physics and mathematics sciences degree, by specialty 01.04.01 – physics of devices, elements and systems. – Sumy State University, Sumy, 2013.

The thesis is devoted to the establishment of general regularities in dynamics of the electron beam (EB) forming in static axially-symmetric fields of electron-optical systems (EOS) of super-high frequency electronic devices such as backward-wave tube, traveling-wave tube, diffraction radiation generator (DRG), etc., and to give practical recommendations of using the optimal working regimes in the above-mentioned devices.

In the literary review the most topical research problems of design concepts of various EOS, which are used to form and focus EB in electronic devices, were defined. To simulate a real EOS with subsequent trajectory analysis the geometry, working regimes and volt-ampere characteristics were defined previously. The methodology of experimental research of the EB structure on the transition radiation of the optical range was developed. The general technique of modeling of working regimes of three-electrode axially-symmetric electron gun on the basis of the final integration technique was proposed. The modulation characteristic of the electron gun was calculated; the investigation of the EB current transmission coefficient, position of the beam crossover and emittance values, which help to analyze the focusing quality of the electrons, was carried out. The proposed methodology was adapted to the research of the beam microstructure of the EOS DRG diode gun and was used in designing of the axially-symmetric gun, which can be used as the source of electrons in X-ray equipment, as well.

Key words: electron beam, electron-optical system, electromagnetic field, transition radiation, beam microstructure, crossover, trajectory analysis.

Підписано до друку 04.11.2013.

Формат 60×90/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9.

Тираж 100 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач

Сумський державний університет,

вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.