

**СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Дрозденко Олексій Олександрович**

УДК 621.385.6

**ФІЗИКА ІНТЕНСИВНИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПУЧКІВ У  
ВИСОКОЧАСТОТНИХ ПРИЛАДАХ О-ТИПУ**

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

**Суми – 2009**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі фізичної електроніки Сумського державного університету Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник** – доктор фізико-математичних наук, професор  
**Воробйов Геннадій Савелійович**,  
Сумський державний університет,  
професор кафедри фізичної електроніки  
Сумського державного університету.

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук,  
член-кореспондент НАН України,  
старший науковий співробітник  
**Мірошниченко Валентин Іванович**,  
Інститут прикладної фізики НАН України,  
заступник директора;

доктор фізико-математичних наук, професор,  
старший науковий співробітник  
**Цвик Олексій Іванович**,  
Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова  
НАН України,  
старший науковий співробітник.

Захист відбудеться 19 червня 2009 року о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.02 при Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, ауд. 236, корпус ЕТ.

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

Автореферат розіслано 15 травня 2009 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

А.С. Опанасюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Інтенсивні електронні пучки (ЕП) стали ефективним інструментом у промислових технологічних установках, при діагностиці матеріалів та у НВЧ-приладах, де вони виконують функції перенесення та перетворення енергії. Для отримання інформації про параметри та мікроструктуру ЕП існують різні методи, які можуть бути згруповані за двома основними напрямками: експериментальні і теоретичні. Досвід традиційних експериментальних досліджень ЕП показує, що ефективність застосування різних методів вимірювання параметрів пучків багато у чому залежить від їх специфічних особливостей. Так, наприклад, відомо, що при дослідженні ЕП з поперечними розмірами порядку 0,1 мм і питомими потужностями в десятки і сотні кВт/см<sup>2</sup> стає проблематичним використання одного з основних методів – методу діафрагми з малим вхідним отвором, а також методу отримання зображення сліду пучка на різних екранах. Малоефективним є також метод аналізу оптичного випромінювання з об'єму пучка, що спричиняється взаємодією електронів з молекулами залишкового газу. Тому останніми роками при дослідженні тонких ЕП високої питомої потужності використовується перехідне випромінювання оптичного діапазону, що виникає при падінні електронів на металеву поверхню. Дане явище покладене в основу методу визначення геометричних розмірів, характеру розподілу і величини щільності струму у поперечному перетині стрічкових і аксіально-симетричних ЕП, які широко використовуються у НВЧ-приладах О-типу.

Не зважаючи на досягнуті успіхи в експерименті, значного поширення ді-стали також сучасні чисельні методи розв'язання рівнянь руху електронів у заданих зовнішніх електричних і магнітних полях, які з урахуванням поля просторового заряду і багатьох інших факторів дозволяють оперативно розраховувати траєкторії граничних і внутрішніх електронів, простежувати основні етапи формування пучка у міжелектродному просторі. Використовування чисельних методів дозволяє забезпечити побудову алгоритмів на ЕОМ для вирішення конкретних задач електронної оптики за значно коротший час, ніж в експерименті. Широкого використання набули кінцево-різницеві методи для розв'язання рівняння Пуассона у двовимірних і тривимірних областях з різними типами граничних умов, ітераційні методи, комбіновані методи послідовності сіток та ітерацій у підобластях. За умови, що електроди мають досить рівні поверхні, у багатьох випадках рекордно високу точність обчислення потенціалів можна отримати зведенням диференціального рівняння до інтегральних рівнянь теорії потенціалів. Відомо також, що від точності розрахунку і вибору конструкції електронної гармати багато у чому залежать основні прилади – ККД, потужність, довговічність та ін. При цьому для апробації побудованих алгоритмів чисельних розрахунків бажано також проведення модельного і натурального експериментів. Тому питання розвитку теоретичних і експериментальних методів дослідження електронних гармат, які формують ЕП різних типів, актуальні для широкого кола фахівців у галузі електроніки.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана у науково-дослідній лабораторії «Нові технології у фізиці та техніці НВЧ» кафедри фізичної електроніки Сумського державного університету. Тематика роботи відповідає науковим програмам Міністерства освіти і науки України з фундаментальних досліджень. Основні результати роботи увійшли до звітів з НДР: держбюджетна тема № 0103U000776 «Хвильові процеси у відкритих електродинамічних системах при русі нерелятивістських електронів уздовж періодичних металодіелектричних структур» (2003 – 2005 рр.); держбюджетна тема № 0106U001931 «Фізика хвильових процесів у відкритих хвилевідно-резонаторних металодіелектричних системах з розподіленими джерелами випромінювання» (2006 – 2008 рр.); держбюджетна тема № 0109U001378 «Фізика формування потоків заряджених частинок в приладах для діагностики матеріалів атомної енергетики» (2009 – 2011 рр.).

**Мета і задачі дослідження.** Мета дисертаційної роботи полягає у розробленні методик аналізу загальних фізичних закономірностей процесів формування інтенсивних ЕП у неоднорідних статичних полях НВЧ-приладів О-типу і виробленні практичних рекомендацій щодо оптимізації їх електронно-оптичних систем (ЕОС).

Відповідно до цього у роботі вирішувалися такі наукові задачі:

- удосконалення методик вимірювань статичних характеристик ЕП на основі аналізу перехідного випромінювання електронів і вибір чисельних методів для опису фізики процесів формування аксіально-симетричних і стрічкових пучків;
- траєкторний аналіз і вивчення мікроструктури аксіальних ЕП у реальних ЕОС, що використовуються в НВЧ-приладах О-типу;
- розроблення алгоритмів для визначення структури неоднорідних фізичних полів і траєкторного аналізу руху електронів у діодних ЕОС;
- розроблення загальної методики чисельного моделювання фізичних полів і траєкторій руху електронів у ЕОС різних конфігурацій;
- експериментальне дослідження мікроструктури ЕП і проведення порівняльного аналізу з результатами чисельних розрахунків з метою перевірки адекватності розроблених алгоритмів і методик.

*Об'єкт дослідження* – фізика процесів формування ЕП у неоднорідних статичних полях НВЧ-приладів О-типу.

*Предмет дослідження* – стрічкові і аксіально-симетричні ЕП приладів міліметрового діапазону довжин хвиль.

Відповідно до поставлених задач використовувалися такі *методи досліджень*: **теоретичні** – метод зарядової щільності (метод інтегральних рівнянь); параксіальне наближення; наближення еліптичних інтегралів; неявний однокроковий алгоритм Еверхарта; **експериментальний** метод діагностики ЕП високої питомої потужності на основі аналізу перехідного випромінювання.

**Наукова новизна одержаних результатів.** У дисертаційній роботі розроблені універсальні методики теоретичних та експериментальних досліджень

фізики формування ЕП у неоднорідних статичних полях НВЧ-приладів, та отримані такі нові результати:

- проведені експериментальні дослідження мікроструктур аксіально-симетричних і стрічкових ЕП на основі аналізу перехідного випромінювання;
- проведено порівняння та встановлене задовільне узгодження результатів експерименту з результатами чисельних розрахунків мікроструктур для аксіально-симетричних ЕП;
- уперше проведений траєкторний аналіз аксіально-симетричних ЕП з використанням швидкісного алгоритму Еверхарта і встановлена можливість компенсації впливу просторового заряду шляхом підвищення прискорюючої напруги, що дозволяє сформуванню кросовер пучка за другим анодом електронної гармати;
- уперше проведено порівняльний аналіз фізичних процесів формування аксіально-симетричного ЕП у три і двоелектродних гарматах, в результаті аналізу струмоосадження встановлена визначна роль допоміжного анода при формуванні інтенсивних пучків;
- уперше проаналізована топологія формування пучка в міжелектродних проміжках на основі розроблених алгоритмів чисельного розрахунку полів і траєкторій руху електронів у тривимірних конфігураціях ЕОС і встановлено, що визначальний вплив на формування форми і мікроструктури пучка виявляє поле анодної лінзи: стиснення та розтягнення пучка до форми стрічки відбувається саме в анодній щілині;
- для задач тривимірних моделей ЕОС отримала розвиток теорія розрахунку фокусуємих фізичних полів у наближенні методу зарядової щільності; при цьому встановлено, що ці моделі можуть бути використані для розрахунку як електростатичних так магнітостатичних полів, що підтверджено результатами експерименту.

**Практичне значення одержаних результатів.** У роботі розвинені методики розрахунку полів, траєкторного аналізу електронів і визначення щільності струму за діаметром ЕП для довільної конфігурації аксіально-симетричних електронно-оптичних систем. Ці методики можуть бути використані для таких практичних цілей як розрахунок структури фізичних полів та аналізу траєкторій руху електронів при заданих потенціалах електродів, підбір оптимальних величин потенціалів фокусуємих електродів, за умови отримання максимального струму пучка на виході електронної гармати, аналіз впливу теплового розкиду електронів на їх траєкторії руху.

Шляхом експериментальних досліджень і порівняння з чисельним траєкторним аналізом показана доцільність використання методу перехідного випромінювання при діагностиці ЕП з характерним розміром перетину пучка порядку 0,1 мм і питомою потужністю від одиниць Вт/см<sup>2</sup> до сотень кВт/см<sup>2</sup>, що може бути використане при потоковому контролі характеристик ЕП різного профілю, які застосовуються у генераторах середньої потужності міліметрового

діапазону, технологічних установках і для фізичних досліджень. Надані практичні рекомендації з вибору типів приймачів випромінювання, які визначаються вимогами стосовно до точності аналізу мікроструктури електронного пучка і швидкості отримання інформації.

Результати дисертаційної роботи використовуються у спеціальних курсах для студентів і магістрантів за фаховим спрямуванням «Мікро- та наноелектроніка» у Сумському державному університеті, а також були використані під час виконання госпдоговірних тем № 0106U001025 (2005 р.) та № 0106U001026 (2005 р.) з ІПФ НАН України.

**Особистий внесок здобувача.** Особистий внесок дисертанта полягає у самостійному аналізі літературних джерел, що стосуються дисертаційного дослідження, формулюванні мети і задач дослідження, виборі теоретичних та експериментальних методів, обговоренні отриманих результатів разом із науковим керівником. Автором особисто проводилися розроблення та комп'ютерна реалізація чисельних алгоритмів під час аналізу аксіальних та стрічкових електронних потоків, а також експериментальні дослідження аксіальних електронних потоків та автоматизація обробки результатів. У розробленні методик розрахунку фізичних полів брали участь с.н.с. Пономарьов О.Г. та м.н.с. Магілін Д.В. (ІПФ НАН України). Експериментальні дослідження структури стрічкових електронних потоків проводилися за допомоги та консультацій с.н.с. Білоусова Є.В. та Коржа В.Г. (ІРЕ НАН України). Автор брав активну участь в отриманні та аналізі результатів, що опубліковані у статтях [1, 2], особисто автор підготував статті [3-7] та 11 тез доповідей [8-18].

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові і практичні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на 13-й, 15-й – 18-й Міжнародних конференціях «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (м.Севастополь, 2003, 2005 – 2008 рр.); Харківській нанотехнологічній Асамблеї-2007 (Харків, 2007 р.); Міжнародних конференціях студентів та молодих вчених з теоретичної та експериментальної фізики «ЕВРИКА» (Львів, 2006, 2008 рр.); The Six International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves «MSMW 2007» (Харків, 2007 р.); конференції молодих вчених та аспірантів «ІЕФ-2007» (Ужгород, 2007 р.); науково-технічних конференціях співробітників, викладачів та студентів СумДУ (Суми, 2003 – 2008 рр.).

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковані у 22 наукових працях, основними з яких є 18 робіт, серед них: 7 статей у спеціалізованих журналах, 5 з яких – у фахових наукових журналах фізико-математичного профілю та 2 – у фаховому науковому журналі технічного профілю, що входять до переліку ВАК України, і в 11 тезах доповідей та працях міжнародних наукових конференцій, форумів, симпозіумів.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи – 130 с., 41 рисунок, 4 таблиці. Список використаних джерел налічує 130 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** викладається актуальність теми і обґрунтовується необхідність виконання дисертаційної роботи, сформульовані мета і основні задачі досліджень, визначені наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, зв'язок роботи з науковими програмами і темами, наведені відомості з апробації результатів роботи, основних публікацій, а також щодо структури дисертації.

У **першому розділі «Формування пучків заряджених частинок в електронно-оптичних системах приладів О-типу (літературний огляд)»** розглянуті базові принципи формування аксіально-симетричних та стрічкових ЕП, що широко використовуються в НВЧ приладах О-типу, описані характеристики ЕП, що визначають вихідні параметри таких приладів. Проаналізовані особливості конструкцій та режимів роботи електронних гармат під час використання їх у приладах міліметрового діапазону хвиль. Показано, що залежно від призначення і класу приладу або пристрою визначаються функції ЕП в них. Наприклад, під час створення підсилювачів і генераторів НВЧ ЕП перетворює енергію зовнішніх джерел живлення в енергію високочастотних коливань. Тому для таких приладів потрібні інтенсивні протяжні пучки електронів, що мають по всій довжині різко окреслену поверхню і необхідну геометричну форму. У розділі розглянуті також схеми класичних електронних гармат, а саме – гармати Пірса та Треневої в порівнянні з гарматою Міллера та принципи їх модифікації з використанням керуючих електродів.

У **другому розділі «Методи та задачі досліджень»** викладені основні підходи, на базі яких у роботі вирішуються задачі чисельного моделювання електростатичних та магнітних полів, а також методів побудови траєкторій руху заряджених частинок в них. Проаналізовані основні експериментальні методи вимірювання параметрів пучків заряджених частинок, які розділені на непрямі (метод перехідного випромінювання, світіння залишкових газів та ін.) і прямі (зондові методи та різновиди методів діафрагм). Також проаналізовані теоретичні методи визначення параметрів ЕП, що використовуються для отримання інформації про структуру електричних полів та розв'язання рівнянь руху електронів. Теоретичні методи розділені на аналітичні та чисельні. В результаті проведена загальна класифікація методів досліджень ЕП (рис. 1).

У ході аналізу недоліків та переваг методів досліджень проведений вибір чисельного методу зарядової щільності для розрахунку фізичних полів, однокрокового швидкісного методу Еверхарта для розв'язання траєкторних рівнянь руху електронів та метод перехідного випромінювання для експериментального дослідження мікроструктури інтенсивних ЕП. Визначені задачі дослідження.

У **третьому розділі «Моделювання полів та пучків заряджених частинок в аксіально-симетричних системах»** викладені загальні принципи побудови та розрахунку моделей аксіально-симетричних систем, що знайшли широке використання в ЛБХ та клістронах. У порівнянні із загальним тривимірним випадком моделювання аксіальних систем більш просте завдяки можливості

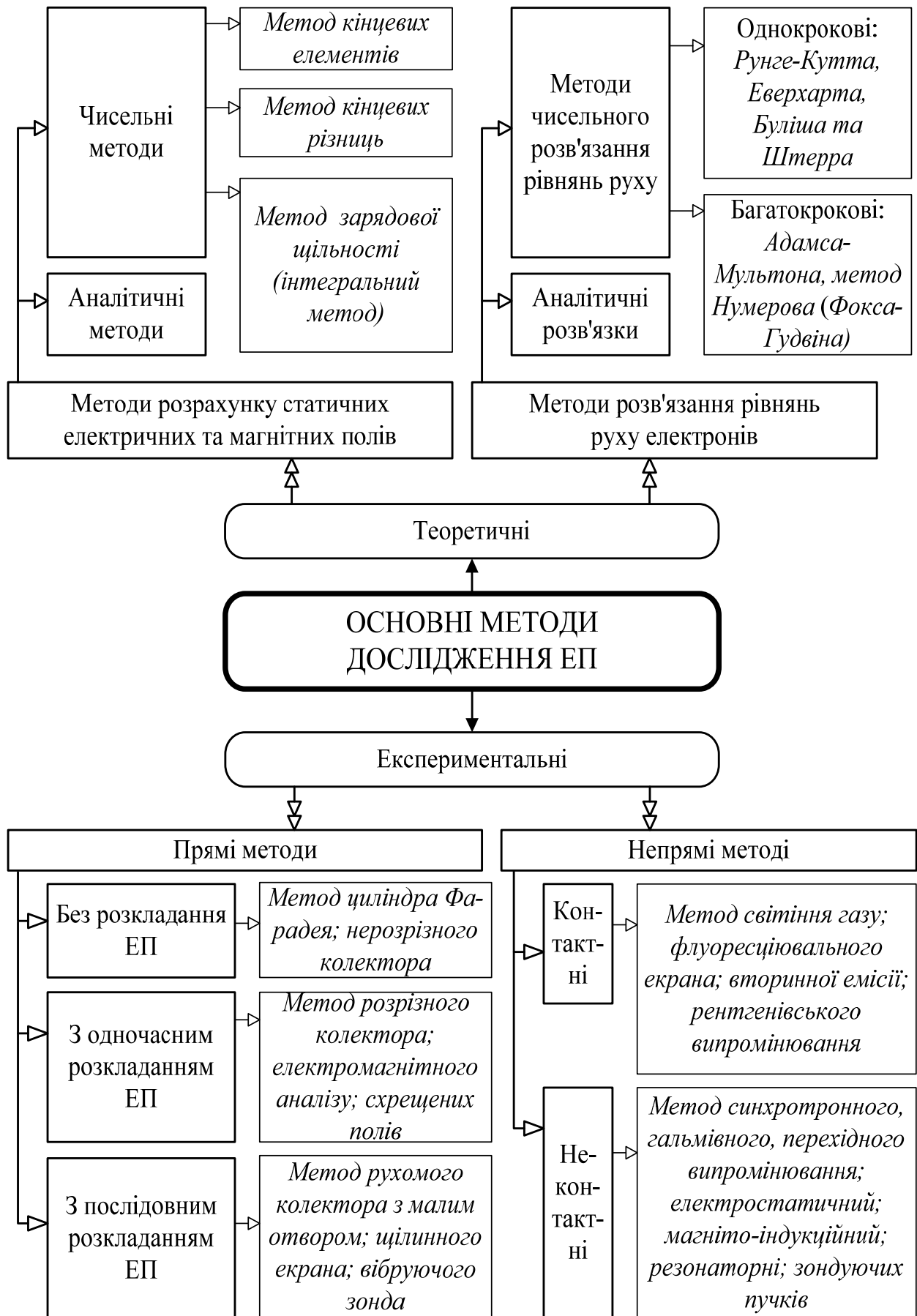


Рис. 1. Схема класифікації методів досліджень параметрів ЕП



переведення задачі в меридіанну площину, тобто зведенню до двовірної. Тому третій розділ присвячений відпрацюванню методик і алгоритмів обчислення аксіальних гармат та ЕП.

На першому етапі створювалася геометрична модель досліджуваної гармати у вигляді набору елементарних ділянок, що вкривають поверхні електродів із заданими потенціалами. Наступний крок – розрахунок структури електричного поля в міжелектродному просторі за допомогою методу зарядової щільності (рис.2а), після чого стає можливим проведення траєкторного аналізу руху електронів.

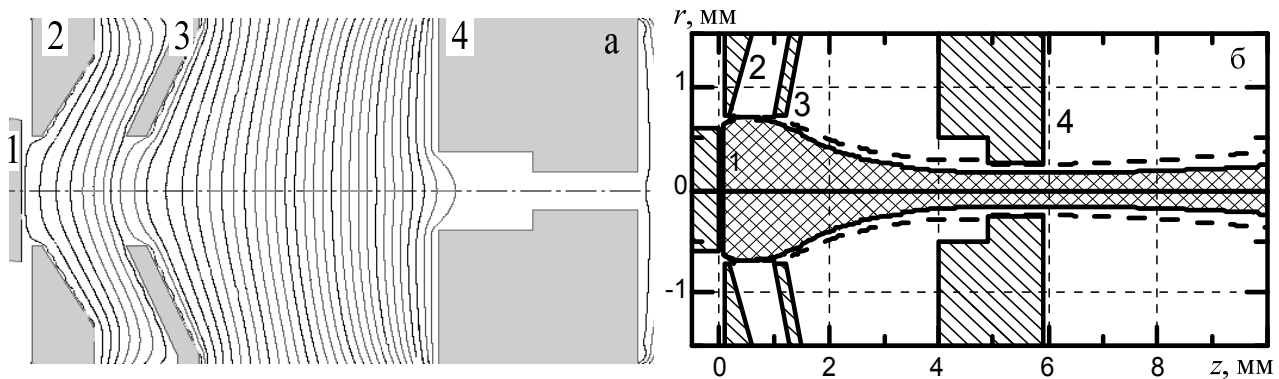


Рис. 2. Приклад структури електричних полів (а) та обвідні ЕП (б) в триелектродній аксіальній гарматі при оптимальних потенціалах: 1 – катод  $U_K = 0$  В; 2 – фокусуєчий електрод  $U_\phi = 0$  В; 3 – перший анод  $U_{A1} = 180$  В та 4 – другий анод  $U_{A2} = 4000$  В

Для нерелятивістських ЕП з урахуванням сил просторового заряду отримане основне траєкторне рівняння має вигляд:

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = \frac{1+r'}{2 \cdot \Delta U} \cdot \left( \frac{I \cdot r}{2\pi \cdot R^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot V} - E_r(r, z) + r' E_z(r, z) \right),$$

де  $r$  та  $z$  – аксіальні координати електрона;  $\Delta U$  – пройдена електроном різниця потенціалів;  $I$  – струм пучка;  $R$  – радіус пучка в даному перетині;  $V$  – швидкість електрона;  $E_r(r, z)$  та  $E_z(r, z)$  – поперечна та поздовжня компоненти електричного поля відповідно. Траєкторне рівняння розв'язується чисельним методом Еверхарта. На кінцевому етапі аналізується траєкторія для визначення струмоосадження та мікроструктури у заданих перетинах ЕП.

Так, приклад роботи розроблених алгоритмів представлений на рис.2б, де наведені конфігурації гармати та обвідні ЕП.

Крім того, досліджувалися аксіальні двоелектродні гармати, які можуть бути конструктивно реалізовані шляхом спрощення триелектродної гармати. У результаті комплексу досліджень аксіально-симетричних гармат встановлено:

- ступінь впливу просторового заряду на процеси формування ЕП;
- міри струмоосадження на ділянки електродів для двох типів гармат при різних значеннях струму пучка для оптимальних режимів роботи ЕОС.

Аналіз вихідних параметрів та струмоосадження ЕП свідчить про повну перевагу триелектродної ЕОС. У ході серій розрахунків встановлений вплив просторового заряду на розмір пучка у кросовері та його зсув (рис.3) відносно зовнішньої межі другого анода при різних прискорюючих потенціалах.

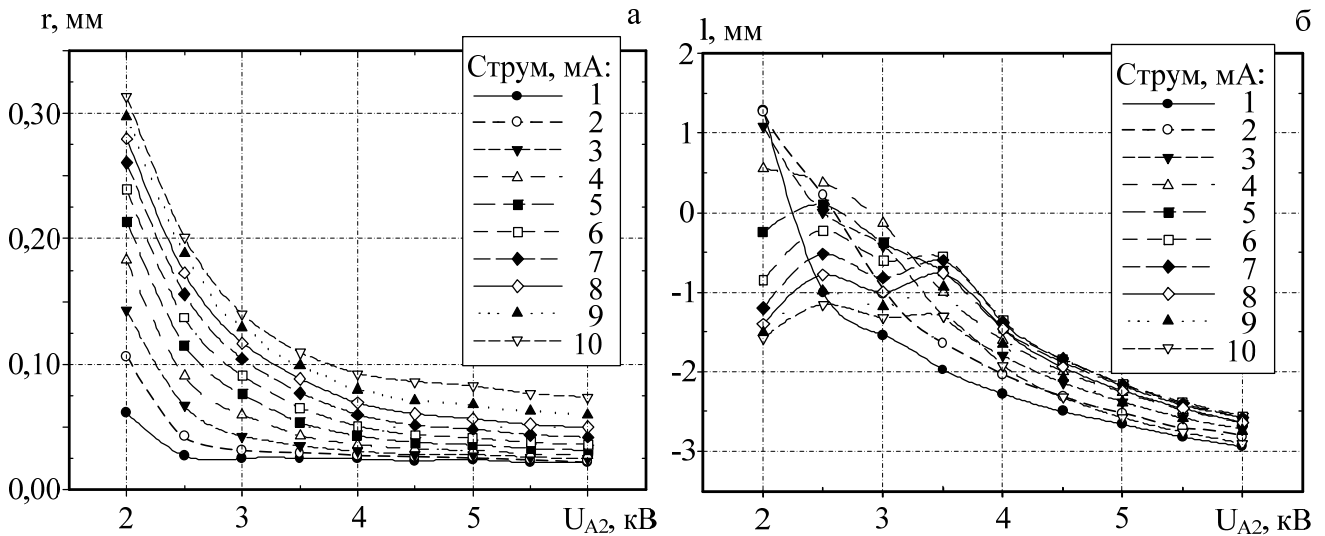


Рис. 3. Залежність радіуса пучка у кросовері (а) та зсув кросовера (б) від потенціалу другого анода

У четвертому розділі «Моделювання полів та пучків заряджених частинок у діодних електронно-оптичних системах» використаний досвід моделювання аксіальних систем шляхом адаптації методик, алгоритмів та програм для обчислення тривимірної моделі діодної гармати та стрічкового ЕП, що використовується в НВЧ-приладах типу ЛЗХ, ГДВ.

На першому етапі проводиться створення просторової геометричної моделі гармати. При цьому поверхні електродів замінюються системою сіток з трикутною коміркою з визначенням усіх вузлів та їх зв'язків. Далі, шляхом використання адаптованого до тривимірного простору методу зарядової щільності обчислюється щільність зарядів елементарних трикутників, що дозволяє провести розрахунок структури поля в міжелектродному просторі гармати. Так, на рис.4а представлена така структура у вигляді розподілу потенціалу на осі ЕОС, де можна виділити особливі ділянки: внутрішній простір ЕОС (0-1 мм) характеризується рівномірним зростанням потенціалу 1 (постійна напруженість), який прискорює електрони до енергії 3500 еВ; далі, в прианодній області (1,0-1,2 мм) з'являється неоднорідність поля 2, обумовлена ефектом анодної лінзи; на ділянці 2 електрони додатково отримують енергію у 500 еВ, після чого у пролітному каналі анода (1,2-2,0 мм) дрейфують в еквіпотенціальному просторі 3 за межі ЕОС; заанодна область 4а характеризується невеликим спадом потенціалу на осі системи, що пояснюється «проникненням» катодного потенціалу через пролітний канал анода.

Діодна електронна гармата знаходиться у в аксіальному полі електромагнітної фокусувальної системи (МФС). Структура магнітного поля, що обчислена

також методом зарядової щільності, представлена на рис.4б у вигляді розподілу індукції уздовж осі та порівняння з експериментальними вимірюваннями: суцільна лінія – розрахована індукція; пунктирна лінія – індукція, що виміряна експериментально. Добра кореляція результатів свідчить про можливість використання обраного методу для обчислення магнітних полів. У роботі також проведений розрахунок МФС на базі постійних самарій-кобальтових магнітів, що використовуються в пакетованих ГДВ.

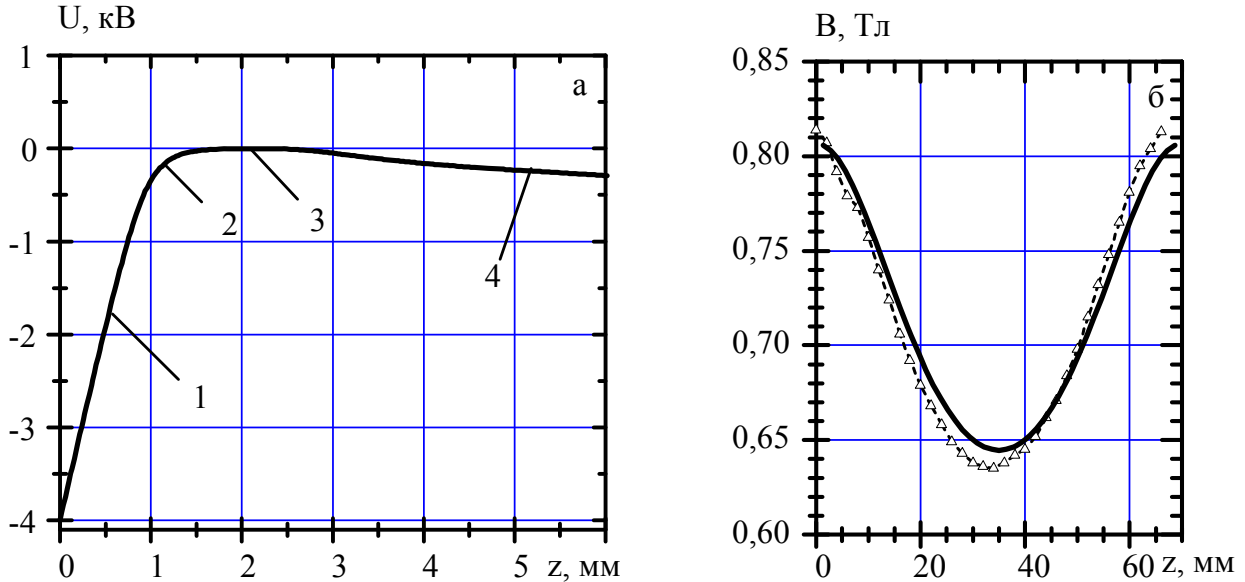


Рис. 4. Розподіли електричного потенціалу (а) та індукції магнітного поля (б) уздовж осі фокуруючих систем

Отримані траєкторні рівняння для нерелятивістських електронів мають вигляд

$$\left\{ \begin{array}{l} x'' = \left( \frac{Q}{m_0 \sqrt{2q \cdot \Delta U}} \right) [1 + x'^2 + y'^2]^{\frac{1}{2}} \times \\ \times \left[ (1 + x'^2 + y'^2)^{\frac{1}{2}} (E_x - x' E_z) / \sqrt{\frac{2q \cdot \Delta U}{m}} - (1 + x'^2) B_y + y' (x' B_x + B_z) \right], \\ y'' = \left( \frac{Q}{m_0 \sqrt{2q \cdot \Delta U}} \right) [1 + x'^2 + y'^2]^{\frac{1}{2}} \times \\ \times \left[ (1 + x'^2 + y'^2)^{\frac{1}{2}} (E_y - y' E_z) / \sqrt{\frac{2q \cdot \Delta U}{m}} - (1 + y'^2) B_x + x' (y' B_y + B_z) \right], \end{array} \right.$$

де  $x$  та  $y$  – поперечні координати системи;  $q$  та  $m$  – заряд та маса електрона;  $B_x$ ,  $B_y$  та  $B_z$  – компоненти індукції магнітного поля.

У результаті проведення траєкторного аналізу встановлено вирішальний вплив структури поля анодної щілини на формування мікроструктури стрічкового ЕП (рис.5).

Потрібно відзначити, що використання швидкісного алгоритму Еверхарта для чисельного розв'язання траєкторних рівнянь дозволило моделювати ЕП з кількості частинок  $10^4 - 10^5$  шт./перетин при незначних затратах машинного часу (до десятків хвилин).

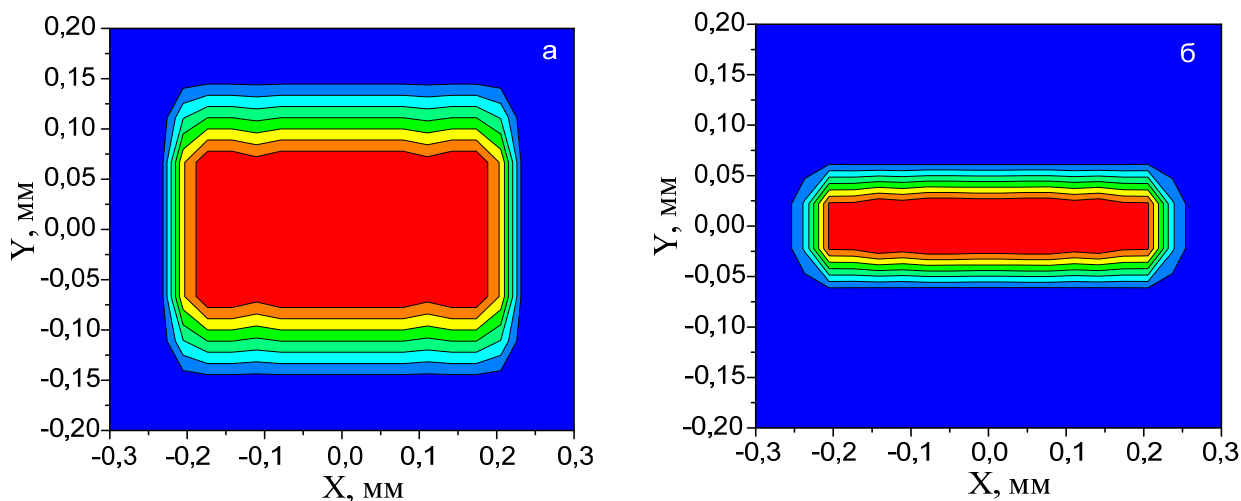


Рис. 5. Мікроструктура ЕП у поперечних перетинах: а) 0,2 мм від катода – початок формування пучка; б) 1,4 мм від катода – пучок при проходженні анодної щілини

У п'ятому розділі «Результати експерименту та порівняння з чисельним моделюванням» запропоновані структурні схеми дослідження характеристик ЕП по перехідному випромінюванню для стрічкових (рис.6а) та аксіальних (рис.6б) пучків.

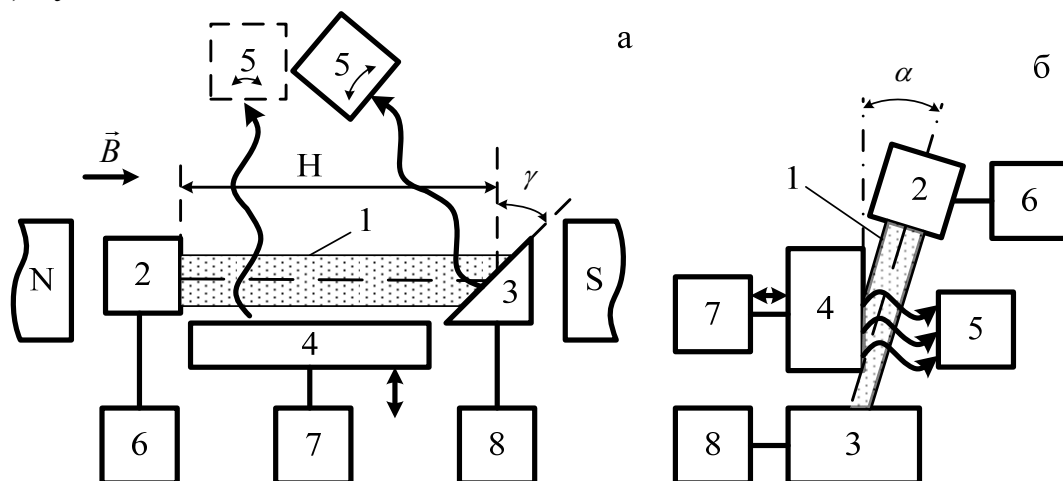


Рис. 6. Структурні схеми реєстрації перехідного випромінювання стрічкового (а) і аксіально-симетричного (б) пучків: 1 – ЕП, 2 – електронна гармата; 3 – нерухома мішень; 4 – рухома мішень; 5 – пристрій реєстрації (приймач) випромінювання; 6, 7 8 – реєстрація струмів

Вибір типу приймача випромінювання визначається вимогами, що ставляться до точності аналізу мікроструктури ЕП, швидкості обробки результатів

та наочності отримання інформації. У п'ятому розділі проведений аналіз найбільш поширених типів приймачів випромінювання: фотокамера, відеокамера та цифрова фотокамера (табл. 1). Встановлено, що максимальна точність аналізу зображення ЕП досягається при використанні фотокамери, проте час обробки інформації за рахунок прояву та сканування плівки досягає кількох годин. Відеокамера може забезпечити високу оперативність отримання інформації, наприклад, для візуального контролю якості високоінтенсивних пучків при поточному виробництві електронних гармат. Цифрова ж камера, що має середній рівень роздільності та високу оперативність обробки інформації, може бути рекомендована при проведенні науково-дослідних робіт при розробленні нових типів ЕОС.

Таблиця 1

## Загальні характеристики приймачів оптичного випромінювання

Тип камери	Фотокамера	Відеокамера	Цифрова фотокамера
Тип приймача	фотоплівка	ПЗЗ (CCD) матриця	КМОП (CMOS) матриця
Тип об'єктива	мікропланар	мікропланар	MP-E65 f/2.8 1-5x Macro
Збільшення	5x	5x	5x
Ефективна кількість точок в перетині ЕП*	$10^4-10^5$	$10^1-10^2$	$10^2-10^3$
Час обробки інформації	декілька годин	у реальному часі	декілька хвилин
* - ефективна кількість точок визначається шириною перетину ЕП відносно розподільної здатності приймача			

За поданими на рис.6 схемами розроблені та реалізовані експериментальні установки для реєстрації перехідного випромінювання, що виникає при падінні електронів на металеву мішень. Розроблений алгоритм та реалізована комп'ютерна програма для аналізу інтенсивності перехідного випромінювання та обчислення щільності струму в поперечних перетинах ЕП. Приклад діагностики та результатів обробки слідів світіння аксіальних ЕП представлений на рис.7.

Після отримання експериментальних даних про розподіл щільності струму в перетині аксіального ЕП в дисертаційній роботі проведений їх порівняльний аналіз результатами чисельного розрахунку розподілу щільності струму. Встановлена добра кореляція результатів, що підтверджує коректність вибору методів досліджень та адекватність побудованих моделей реальним системам.

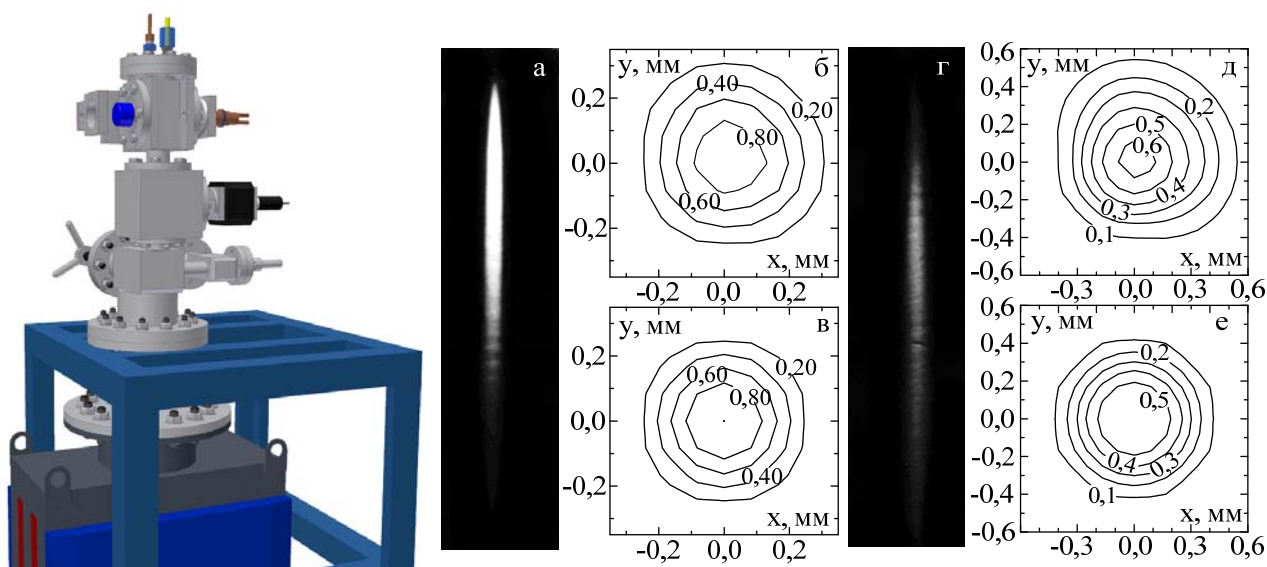


Рис. 7. Загальний вигляд установки для діагностики аксіальних ЕП, слід світіння (перехідне випромінювання) двох перетинів (а), (г) і топологія ЕП у вигляді експериментальних (б), (д) та теоретичних (в), (е) еквіпціальних ліній

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі отримані комплексні методики (теоретичні та експериментальні) дослідження фізики формування ЕП у височастотних приладах О-типу міліметрового діапазону хвиль, що є важливою науковою задачею при створенні високоефективних джерел електромагнітних коливань. При цьому автором запропонована низка оригінальних і нових рішень як у плані реалізації чисельного моделювання, так і при обробці експериментальних результатів.

1. Проаналізовані основні підходи до формування ЕП та їх характеристики, що визначають параметри електронних НВЧ приладів О-типу.

2. Прокласифіковані методи експериментального і теоретичного дослідження параметрів ЕП, на підставі аналізу якої для розрахунку фізичних полів у системах формування пучків вибраний метод зарядової щільності (метод інтегральних рівнянь), а для траєкторного аналізу – однокроковий метод Еверхарта, експериментальні дослідження базуються на використанні методу перехідного випромінювання при падінні електронів на металеву мішень.

3. На підставі властивостей аксіальної симетрії описана математична модель досліджуваної ЕОС. Запропонована схема переходу в меридіанну площину і шляхом використання методу зарядової щільності побудовані математичні моделі для чисельного аналізу електричних полів і траєкторій руху заряджених часток методом Еверхарта в аксіально-симетричних системах з відносною похибкою  $\varepsilon < 0,001$ . На конкретній геометрії практичних ЕОС показана працездатність.

тність запропонованих алгоритмів чисельного рахунку, визначені оптимальні інтервали робочих режимів на електродах гармати та показано, що гранично допустимі значення струмів залежать від прискорюючого потенціалу і лежать в інтервалі  $I = 10 - 20$  мА.

4. Побудовані чисельні алгоритми для аналізу електричних полів і траєкторій руху пучків заряджених частинок у довільних тривимірних системах. На конкретній геометрії діодної ЕОС, яка знайшла широке застосування в приладах МСМ діапазону хвиль, показана працездатність запропонованих алгоритмів. За допомогою запропонованого методу сіткового уловлювача частинок проаналізована зміна мікроструктури ЕП під час проходження ділянки катод-анод і показано, що основним елементом, що формує стрічковий ЕП на вході в простір фокусування є анодна щілина.

5. На підставі методики визначення аксіальних електричних полів запропонований метод розрахунку аксіально-симетричної МФС і показана задовільна кореляція розрахункових і експериментальних результатів визначення індукції магнітного поля при правильному задаванні магнітних потенціалів.

6. Узагальнені структурні схеми реєстрації перехідного випромінювання електронів на металевих мішенях при діагностиці аксіально-симетричних і стрічкових пучків. Запропоновані і реалізовані експериментальні електровакуумні установки.

7 Розроблена програма для чисельного аналізу зображення сліду свічення ЕП. Шляхом порівняльного аналізу показана кореляція результатів чисельного моделювання і експерименту для аксіально-симетричних ЕП.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Воробьев Г.С. Установка для измерения статических характеристик высокоинтенсивных электронных пучков / Г.С. Воробьев, А.А. Дрозденко, Д.А. Нагорный // Приборы и техника эксперимента.– 2009.– №1. – С. 115-118.

*Здобувач брав участь у реалізації установок для діагностики електронних потоків та у проведенні експериментальних досліджень, проведенні аналізу пристроїв реєстрації перехідного випромінювання та комп'ютерній обробці результатів експерименту.*

2. Воробьев Г.С. Система регистрации переходного излучения оптического диапазона для измерения статических параметров электронных пучков в СВЧ приборах / [Воробьев Г.С., Дрозденко А.А., Нагорный Д.А., Рыбалко А.А.] // Изв. вузов. Радиоэлектроника.– 2008. – №7(51). – С. 22-29.

*Здобувачем проведено чисельне моделювання аксіального електронного пучка, розроблена програма для аналізу перехідного випромінювання, виникаючого при падінні електронів на металеву поверхню, проаналізована кореляція результатів експерименту і чисельного моделювання.*

3. Воробьев Г.С. Численный анализ статических характеристик аксиально-симметричных электронных пучков в приборах СВЧ / Г.С. Воробьев, **А.А. Дрозденко**, А.Г. Пономарев // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2006. – №6(49). – С. 11-16.

*Здобувачем розроблена методика теоретичного аналізу параметрів електронних пучків, проведено чисельне моделювання, написаний текст статті.*

4. **Дрозденко А.А.** Численное моделирование формирования ленточного электронного пучка в неоднородном поле диодной пушки / **А.А. Дрозденко** // Вісник Сумського державного університету. Серія: Фізика, математика, механіка. – 2008. – №1. – с. 115-123.

*Стаття повністю підготовлена здобувачем.*

5. Воробьев Г.С. Численное моделирование движения электронов в электрическом поле аксиально-симметричных электронно-оптических систем / [Воробьев Г.С., Пономарев А.Г., **Дрозденко А.А.**, Коплык И.В.] // Вісник Сумського державного університету. Серія: Фізика, математика, механіка. – 2003. – №10(56). – С. 135-144.

*Здобувачем були розроблені математична модель для чисельного розрахунку аксіально-симетричної електронної гармати, методика обчислення аксіальних електричних полів методом зарядової щільності, написаний текст статті.*

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

*Здобувачем проведені пошук літературних джерел та їх аналіз, проаналізовані експериментальні методи діагностики інтенсивних електронних пучків, написаний текст статті.*

7. Воробьев Г.С., **Дрозденко А.А.**, Пономарев А.Г., Пушкарев К.А. Перспективы применения переходного излучения в диагностике высокоинтенсивных электронных пучков // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2005. – №2(2). – С. 93 – 97.

*Здобувачем був проведений чисельний аналіз розподілу щільності струму в аксіальному електронному пучку, порівняльний аналіз із результатами експериментальних досліджень, написаний текст статті.*

8. Воробьев Г.С. Расчет структуры электрического поля и траекторный анализ электронного пучка в аксиально-симметричной электронно-оптической системе / Г.С. Воробьев, А.Г. Пономарев, **А.А. Дрозденко** // 13-я Международная Крымская конференция "СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2003). – Севастополь: Вебер, 2003. – С. 294-295.

*Здобувачем проводилися розрахунки електростатичних полів та проведення траекторного аналізу, підготовлено текст тез.*



9. Воробьев Г.С. К вопросу оптимизации режимов работы трехэлектродной пушки ЛБВ / Г.С. Воробьев, А.Г. Пономарев, **А.А. Дрозденко**, Ю.А. Крутько // 15-я Международная Крымская конференция “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо'2005). – Севастополь: Вебер, 2005. – С. 212-213.

*Здобувачем побудована чисельна модель триелектродної гармати ЛБХ, підготовлено текст тез.*

10. **Дрозденко О.О.** Застосування методу Еверхарта в задачах моделювання руху електронів / **О.О. Дрозденко** // Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики (ЕВРИКА-2006). – Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2006. – В. 6.

*Текст тез і доповідь підготовлені повністю здобувачем.*

11. **Дрозденко А.А.** Теоретический анализ аксиальных систем формирования электронных пучков / **А.А. Дрозденко** // 16-я Международная Крымская конференция “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо'2006). – Севастополь: Вебер, 2006. – С. 305-306.

*Текст тез і доповідь підготовлені повністю здобувачем.*

12. Воробьев Г.С. Переходное излучение в диагностике высокоинтенсивных электронных пучков / Г.С. Воробьев, **А.А. Дрозденко**, А.Г. Пономарев // Харьковская нанотехнологическая Ассамблея-2007.- Харьков: ННЦ «ХФТИ», ИПП «Контраст», 2007.– Т1.– С. 219-223.

*Здобувачем розроблені методика і схеми проведення експериментальних досліджень, проведений чисельний аналіз мікроструктури електронного пучка, підготовлено текст тез.*

13. **Дрозденко А.А.** Автоматизация исследований параметров и микроструктуры электронных пучков / **А.А. Дрозденко** // Конференція молодих вчених та аспірантів ІЕФ-2007.– Ужгород: ІЕФ НАН України, 2007.– С. 123.

*Здобувачем підготовлені тези і зроблена доповідь на конференції.*

14. **Drozdenco A.A.** 3-D modeling of electron beam sources / **A.A. Drozdenco**, D.V. Magilin // The Sixth International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'07). – Kharkov: IRE NASU, 2007. – P.580-582.

*Здобувачем розвинута методика побудови тривимірних моделей систем формування електронних потоків, підготовлено текст тез англійською мовою.*

15. Воробьев Г.С. Влияние ускоряющего напряжения на размер и положение кроссовера аксиально-симметричного электронного пучка / Г.С. Воробьев, **А.А. Дрозденко**, И.В. Барсук // 17-я Международная Крымская конференция “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо'2007). – Севастополь: Вебер, 2007. – С. 143-144.

*Здобувачем проведений чисельний аналіз триелектродної гармати, підготовлено текст тез.*

16. **Дрозденко А.А.** Методика моделирования электронного пучка в нелинейных электростатических полях / **А.А. Дрозденко**, И.В. Барсук // XII Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». – Харьков: ХНУРЭ, 2008. – С. 310.

*Здобувачем розвинута методика моделювання електронного пучка в тривимірному просторі діодної гармати з урахуванням нелінійних електростатичних полів, підготовлено текст тез.*

17. 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 (ЕВ-РИКА-2008). – Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2008. – С. Е-25.

*Здобувачем проведено автоматизацію експериментальних досліджень мікроструктури інтенсивних електронних потоків, підготовлено текст тез.*

18. Воробьев Г.С. К вопросу моделирования ленточного электронного пучка / Г.С. Воробьев, **А.А. Дрозденко**, И.В. Барсук // 18-я Международная Крымская конференция “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо'2008), Севастополь: Вебер. – 2008. – С. 171-172.

*Здобувачем проведена побудова чисельної моделі діодної гармати та реалізована комп'ютерна програма, підготовлено текст тез.*

## АНОТАЦІЯ

**Дрозденко О.О. Фізика інтенсивних електронних пучків у високочастотних приладах О-типу. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізикоматематичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем. – Сумський державний університет, Суми, 2009.

Дисертація присвячена розробленню комплексних методик дослідження фізики формування інтенсивних електронних пучків у НВЧ-приладах О-типу. Проведений аналіз і вибір методів досліджень: метод зарядової щільності і метод Еверхарта – для проведення теоретичних досліджень (чисельних розрахунків), метод перехідного випромінювання – для експериментального дослідження мікроструктури електронних пучків.

Розроблена математична модель аксіально-симетричної електронно-оптичної системи і визначені оптимальні структури електричних полів для різних прискорюючих потенціалів. Проведений траєкторний аналіз руху електронів, у ході якого встановлений ступінь впливу просторового заряду на розмір і положення кросовера пучка залежно від прискорюючої напруги, проаналізовані процеси струмоосадження на електродах двох різних конструкцій гармат.

Побудовані чисельні алгоритми для аналізу фізичних полів і траєкторій руху електронів у тривимірних фокусуєчих системах. Проведені розрахунок і

аналіз структури електричного і магнітного полів діодної системи. У ході траєкторного аналізу і обчислення мікроструктури стрічкового електронного пучка визначена топологія його формування у внутрішньому просторі діодної гармати та показана визначальна роль анодної щілини у процесі формування стрічкового пучка.

Запропонована загальна методика експериментального дослідження мікроструктури інтенсивних електронних пучків за перехідним випромінюванням. Розроблена програма для чисельного аналізу зображення сліду світіння електронного пучка, і шляхом порівняльного аналізу розподілів щільності струму у поперечних перетинах аксіально-симетричного пучка показана кореляція результатів чисельного моделювання і експерименту.

**Ключові слова:** електронний пучок, фізичні поля, електронно-оптична система, магнітна фокусуєча система, перехідне випромінювання, мікроструктура пучка.

## АННОТАЦІЯ

**Дрозденко А.А. Физика интенсивных электронных пучков в высокочастотных приборах О-типа. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – физика приборов, элементов и систем. – Сумский государственный университет, Сумы, 2009.

Диссертация посвящена разработке комплексных (теоретических и экспериментальных) методик исследования физики формирования интенсивных электронных пучков в СВЧ-приборах О-типа. Проанализированы основные подходы формирования электронных пучков и составлена схема классификации методов экспериментальных и теоретических исследований параметров электронных пучков. Проведены анализ и выбор методов исследований: метод зарядовой плотности (интегральный метод) – для вычисления физических полей, метод Эверхарта – для решения траекторных уравнений, метод переходного излучения – для экспериментального исследования микроструктуры электронных пучков.

Разработана математическая модель аксиально-симметричной электронно-оптической системы, применяемой в СВЧ-приборах типа ЛБВ, и определены оптимальные структуры электрических полей для различных ускоряющих напряжений. Проведен траекторный анализ движения электронов, в ходе которого установлена степень влияния пространственного заряда на размер и положение кроссовера пучка в зависимости от ускоряющего напряжения, проанализированы процессы токооседания на электродах пушек двух различных конструкций электронно-оптических систем.

Построены численные алгоритмы для анализа физических полей и траекторий движения электронов в трехмерных фокусирующих системах. На конкретной геометрии диодной электронно-оптической системы, находящейся в аксиальном магнитном поле, показана работоспособность предложенных алгоритмов. Проведены расчет и анализ структуры электрического поля диодной системы и вычисление аксиального магнитного поля на основании методики определения аксиальных электростатических полей. Показана удовлетворительная корреляция расчетных и экспериментальных результатов определения индукции магнитного поля. В ходе траекторного анализа и вычисления микроструктуры ленточного электронного пучка определена топология его формирования во внутреннем пространстве диодной пушки, показана определяющая роль анодной щели на процессы формирования ленточного пучка.

Предложена общая методика экспериментального исследования микроструктуры интенсивных электронных пучков по переходному излучению, возникающему при падении электронов на металлическую мишень. Описаны структурные схемы регистрации переходного излучения и конструкции реализованных экспериментальных электровакуумных установок. Разработана программа для численного анализа изображения следа свечения электронного пучка, и путем сравнительного анализа распределений плотностей тока в поперечных сечениях аксиально-симметричного пучка показана корреляция результатов численного моделирования и эксперимента.

**Ключевые слова:** электронный пучок, физические поля, электронно-оптическая система, магнитная фокусирующая система, переходное излучение, микроструктура пучка.

## ABSTRACT

**Drozdenco A.A. Physics of intensive electron beams in the high-frequency O-type devices. – Manuscript.**

Thesis for a Doctor of Philosophy degree (PhD) of physics and mathematics sciences of 01.04.01 speciality – physics of devices, elements and systems. – Sumy State University, Sumy, 2009.

The thesis is devoted to the development of theoretical and experimental research of physics of forming of intensive electron beams in O-type microwave devices. The analysis and choice of methods of researches has been conducted: method of charge closeness and method of Everhart – for theoretical researches (numeral computation), method of transient radiation – for experimental research of electron beam microstructure.

The mathematical model of axially symmetrical electron-optical system has been developed and the optimum structures of the electric fields for different accelerating potentials have been defined. The trajectory analysis of electron movements has

been carried out, during which the degree of influence of spatial charge on the size and position of beam crossover depending on accelerating potential has been determined, the settling electrons on the electrodes of two different cannon constructions have been analyzed.

Numerical algorithms for the analysis of the physical fields and path of motion of electrons in the three-dimensional focusing systems have been made. The calculation and analysis of structure of the electric and magnetic fields of the diode system have been conducted. During the trajectory analysis and calculation of microstructure of ribbon electron beam the topology of its forming in the internal space of diode gun has been defined. The important influence of anodal slit on the processes of forming of ribbon-type beam has been shown.

The general method of experimental research of microstructure of the intensive electron beams according to the transient radiation has been suggested. The program for the numerical analysis of image of the electron beam luminescence has been developed and, by the comparative analysis of current density distributing in cross sections of the axially symmetrical beam, correlation of results of numeral calculation and experiment research has been shown.

**Keywords:** electron beam, physical fields, electron-optical system, magnetic focusing system, transient radiation, beam microstructure.

Підп. до друку 12.05.2009 р.

Формат 60×90/16. Папір ксерокс. Гарнітура Times New Roman Cyr. Друк офс.

Ум. друк. арк. 1,1 Обл.-вид. арк. 0,9.

Тираж 100 пр.

Зам. № 611.

Видавництво СумДУ при Сумському державному університеті  
40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру  
ДК №3062 від 17.12.2007 р.

Надруковано у друкарні СумДУ

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