

МОДЕЛЮВАННЯ НИЗЬКОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТРІЧКОВОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ ГАРМАТИ ПІРСА МЕТОДОМ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

В статті розглядається низькоенергетична стрічкова електронна гармата Пірса, що застосовується для поверхневої обробки оптичних матеріалів. Представлено результати розрахунку електростатичного поля та траєкторій руху електронів у ній. Досліджено вплив на форму стрічкового електронного променя різниці потенціалів між катодом та модулятором.

Ключові слова: електронно-променева гармата, електронна оптика Пірса, метод кінцевих елементів.

In the article the low-band electronic Pierce gun, used for surface treatment of optical materials. The results of calculation of electrostatic fields and trajectories of the electrons in it. The influence on the shape of strip electron beam the potential difference between cathode and modulator.

Key words: electron-beam gun, electron optics Pierce, finite element method.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень

Електронно-променеві гармати Пірса є першим типом гармат розроблених для формування прямолінійних ламінарних електронних пучків простої конфігурації: стрічкового, циліндричного і конічного [1]. Завдяки простій конструкції електродів гармати Пірса стали широко застосовуватись у НВЧ-техніці, оскільки фокусують пучки з високим первеансом і піддаються досить точному і простому розрахунку. Ці ж переваги стали причиною використання гармат Пірса як інструмента для термічних технологічних процесів [2-5]. Зокрема низькоенергетична (прискорююча напруга менше 10 кВ) електронно-променева гармата Пірса зі стрічковою формою електронного потоку застосовується для поверхневої обробки оптичних матеріалів та виготовлення оптичних мікроелементів [6-10].

Необхідною умовою подальшого розвитку технології електронно-променевої обробки оптичних матеріалів у напрямку мікромініатюризації виробів є підвищення керованості інструменту обробки, яким виступає стрічковий електронний промінь. Для цього необхідно встановити залежності між керованими параметрами гармати Пірса (прискорююча напруга, струм розжарення катода, напруга на модуляторі), геометричними розмірами електродів та просторово-енергетичними параметрами електронного променя (потужність та розподіл енергії променя на оброблюваній поверхні). Існує два способи дослідження таких залежностей, а саме отримання інформації про параметри електронного променя експериментально, шляхом зондування та розрахунковим способом, із застосуванням чисельних методів розрахунку траєкторії електронів у зовнішніх електричних полях.

Експериментальне дослідження параметрів стрічкового електронного променя розглядалось в роботах [11-14]. Використання сучасних мікропроцесорних систем збору

інформації дозволило оперативну та з достатньо високою точністю визначати просторово-енергетичні характеристики електронного променя. Однак недоліком цього методу є досить висока вартість та тривалість досліджень, особливо на початковому етапі розробки електронної гармати. Більш доцільним є чисельний розрахунок електронно-оптичної системи та траєкторій руху електронів з подальшою перевіркою розрахункових даних експериментальним шляхом.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є побудова математичної моделі низькоенергетичної стрічкової електронної гармати Пірса методом кінцевих елементів, а також дослідження впливу на форму стрічкового електронного променя різниці потенціалів між катодом та модулятором.

Виклад основного матеріалу дослідження.

В роботі використано електронно-променеві гармати Пірса, які генерують плоско-паралельні (параксіальні) потоки електронів стрічкової форми, що характеризуються співвідношеннями Пірса:

$$U = A \cdot z^{4/3} \quad (1)$$

$$j = \frac{2.33 \cdot 10^{-6} \cdot U^{3/2}}{z^2} \quad (2)$$

де z – повздожня координата, відрахована від катода;

$$A = \frac{U_{np}}{d^{4/3}} \quad (3)$$

U_{np} – прискорююча напруга, кВ;

d – відстань катод-анод, м;

Для забезпечення граничної умови $U=Az^{4/3}$, $dU/dy=0$ (рис. 1) необхідно щоб форма електродів гармати повторювала форму екіпотенціальних поверхонь у області зовнішній до потоку. У спрощеній формі достатньо відтворити лише форму екіпотенціальної

поверхні нульового потенціалу (прикатодного електроду), яка представляє собою площину нахилену до границі потоку під кутом $67,5^\circ$, а форма електроду з

потенціалом анода може бути площиною перпендикулярною до потоку (в загальному випадку анод має складну форму).

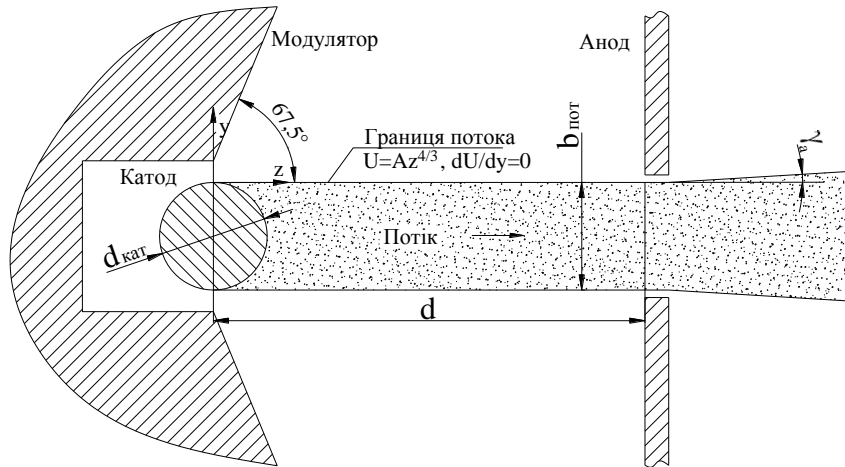


Рис. 1 Паралельний стрічковий потік електронів. Граничні умови

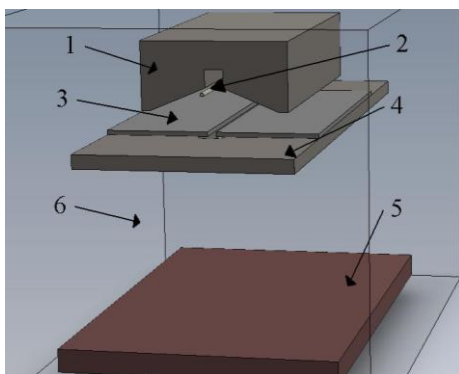
Як було зазначено вище, ми застосовуємо електроди спрощеної форми. При цьому користуємось тією обставиною, що оддалік потоку зміна форми електроду слабо позначається на розподілі потенціалу в області потоку, а отже, і на ході траєкторій. Практично виявляється достатнім витримати потрібну форму електродів на відстані від межі потоку, рівному $(1...1,5)b_{\text{пот}}$, де $b_{\text{пот}}=2$ мм – ширина потоку. На більшій відстані форма електродів може бути багато в чому довільною. Її обрано з конструктивних міркувань.

Для розрахунку електронної гармати було побудовано тривимірну модель геометрії електродів (рис. 2а). Розрахунок на основі цієї моделі дозволить врахувати не лише особливості впливу форми модулятора та розташування катода на електронний потік, а й встановити вплив крайових ефектів на торцях

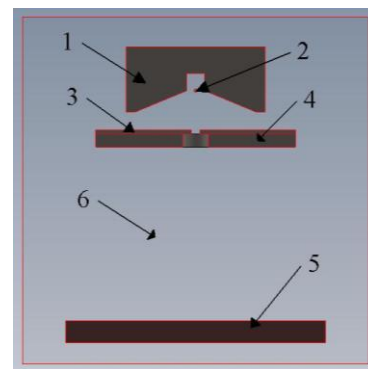
модулятора на стрічковий промінь. Однак використання тривимірної геометрії значно ускладнює чисельний розв'язок задачі руху електронів, тому в рамках даного дослідження було розв'язано задачу на основі двовимірної геометрії (рис. 2б).

Для вирішення поставленої задачі використовувався метод кінцевих елементів (МКЕ), як найбільш універсальний метод вирішення подібних задач. Важливим фактором також є поширеність програмного забезпечення для ЕОМ в якому реалізовані алгоритми МКЕ.

Розв'язання задачі було розділено на два етапи: розв'язок задачі електростатики для побудови форми електричного поля в електронній гарматі та розв'язок задачі руху заряджених частинок (електронів) у заданому електричному полі.



а)



б)

Рис. 2. Тривимірна (а) та двовимірна (б) модель стрічкової електронної гармати Пірса
1 – модулятор, 2 – дрітняний вольфрамовий катод, 3 – анодні пластини з тугоплавкого матеріалу (молібден), 4 – анод, 5 – підложка, 6 – простір моделювання траєкторій електронів.

Для обчислення електростатичного поля визначено наступні умови однозначності моделі: теорема Гауса для електростатичних полів у вакуумі $\nabla \cdot E = \rho / \epsilon_0$,

потенціал катода $U_{\text{к}} = -5\text{кВ}$, потенціал модулятора в діапазоні $U_{\text{м}} = -5...-5,35\text{кВ}$, потенціал анода та підложки $U_{\text{а}} = 0$.

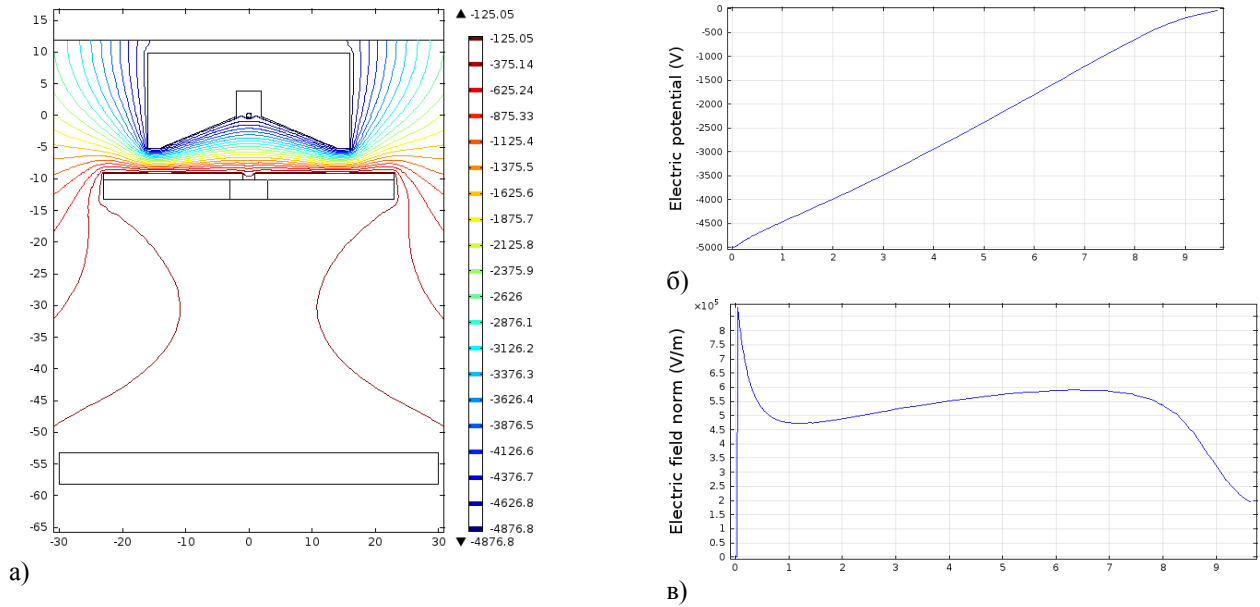


Рис. 3. Розраховане електростатичне поле у моделі:

а) розподіл електричного потенціалу (еквіпотенціальні лінії); б) розподіл електричного потенціалу вздовж вісі симетрії електронної гармати від катоду до аноду; в) розподіл напруженості електричного поля вздовж вісі симетрії.

На другому етапі було вирішено задачу руху електронів, що рівномірно емітуються з поверхні катода в розрахованому електростатичному полі. Умови однозначності моделі: рух частинок відповідає другому закону Ньютона, властивості частинки (маса та заряд електрона), вторинна емісія не враховується (частинки, які досягають меж зони моделювання, поверхонь анода та модулятора припиняють рух), джерело частинок поверхня катода, за 1 нс емітується 625 частинок, початкова швидкість рівна 0. Для розрахунку прийнято режим роботи гармати при якому струм емісії катода 100 мА, що відповідає емісії близько $625 \cdot 10^6$ електронів за 1 нс. Первеанс електронного потоку складає $P = 2,8 \cdot 10^{-7} \frac{A}{B^{3/2}}$, тобто для такого потоку необхідно враховувати дію об'ємного заряду. Для цього при розрахунку взаємодії електронів заряд кожного з них множить на 10^6 .

На рис. 4а представлено результат розрахунку траєкторій електронів в гарматі Пірса. Як видно з рисунка форма електронного потоку істотно відрізняється від форми в класичній гарматі Пірса, що пов'язано перш за все з тим що катод має не плоску форму. В нашому випадку застосовано дротяний вольфрамовий катод діаметром 0,8 мм, що пов'язано з його більшою доступністю ніж вольфраму у вигляді смуг, також такий катод потребує струм розжарення в межах 20...25 А, що значно менше ніж потрібно для смугового катода. Однак в наслідок застосування катода з круглим перерізом електронний потік між катодом та анодом має помітно розхідну форму, що викликає ще більшу розхідність електронів після анода, також досить значна частина емітованих електронів потрапляє на анод і не приймає участь у обробці матеріалу, що зменшує ефективність гармати. Вирішення цієї проблеми без внесення змін у конструкцію електронної гармати можливе при застосуванні модулятора в якості керуючого електрода.

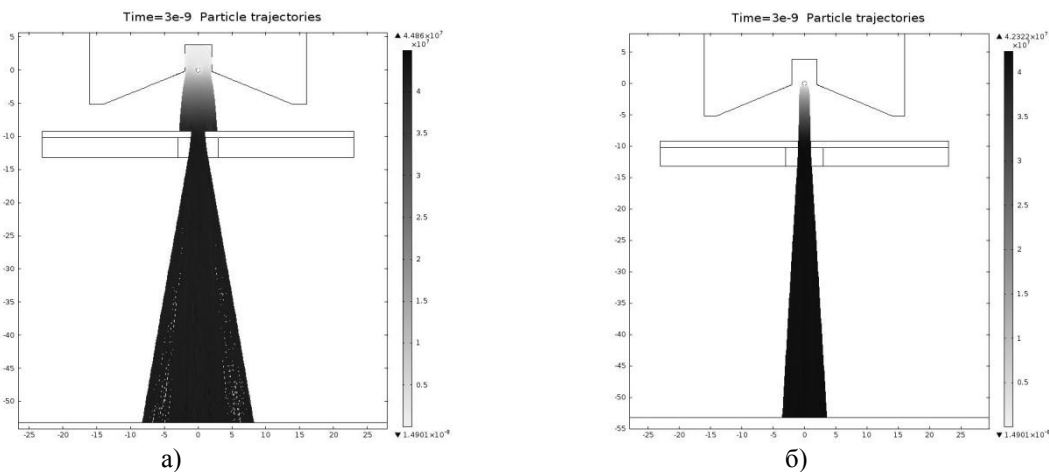


Рис. 4. Траєкторії руху електронів, що емітуються з катода в електронній гарматі Пірса: а) $U_M - U_K = 0$; б)

$$U_M - U_K = -350V.$$

На рис. 46 представлено результат розрахунку траєкторій електронів при прикладенні різниці потенціалів між катодом та модулятором $U_m - U_k = -350B$. Як видно з рисунка додатковий потенціал на модуляторі дозволив отримати практично паралельний потік електронів в проміжку між катодом та анодом шириною менше 2 мм, в результаті чого всі емітовані електрони проходять через анодну щілину ширина якої складає 2 мм. В наслідок дії анодної щілини як розсіюючої лінзи після анода електронний потік стає розхідним, однак кут розходження значно менший ніж у випадку не керованого модулятора.

Отримані розрахункові результати досить добре коригуються з результатами зондування електронного потоку в роботі [11-14].

Висновки дослідження і перспективи подальших розвідок в обраному напрямку

Отримано модель електронної гармати Пірса заданої конструкції та розраховано форму електростатичного поля та траєкторії руху електронів в ній. Отримані теоретичні результати у межах 10-12% збігаються з раніше отриманими експериментальними дослідженнями [11-14]. Запропоновано підвищення ефективності використаної електронної гармати Пірса шляхом використання модулятора в якості керуючого електрода. Враховуючи те, що модель є досить спрощеною, нами планується змоделювати та дослідити вплив на електронний потік відхилень від симетричного розташування катоду в електронній гарматі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Пирс Дж. Р. Теория и расчет электронных пучков. – М.: Советское радио, 1956. – 216 с.
2. Шиллер З. Электронно-лучевая технология / З. Шиллер, У. Гайзиг, З. Панцер. – Пер. с нем. – М.: Энергия 1980. – 528 с.
3. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. Справочник/ [Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, И. В. Зуев, А. Н. Коконя]. – М.: Машиностроение 1985. – 495с.
4. Электронно-лучевая сварка. / [Назаренко О. К., Кайдалов А. А. Ковбасенко С. Н. и др.]; Под ред. Б.А. Патона. – К.: Наукова думка. 1987. – 225с.
5. Молоковский С. И. Интенсивные электронные и ионные пучки / Молоковский С. И. – М.: Энергоатомиздат. 1991, 312 с.
6. Дудко Г. В. Формирование предельно гладких поверхностей оптических стекол / Г. В. Дудко, А. А. Кравченко, Д. И. Чердниченко // Физика и химия стекла, 1987, т. 13, №5, С. 740 – 746.
7. Лисоченко В. Н. Разработка элементов интегрально-оптических схем новыми методами на основе электронно-лучевой обработки / В. Н. Лисоченко, Г. В. Канашевич, В.А. Ващенко и др. – отчет по НИР Черкасского филиала КПИ. – Черкассы. – 1993. – 205с.
8. Ващенко В. А. Высокотемпературные технологические процессы взаимодействия концентрированных источников энергии с материалами. Монография / Ващенко В.А. – М.: – 408 с. Деп. в ВИНТИ 07.08.96, №62. – ХП 96.
9. Канашевич Г.В. Термична електронно-променева обробка скляних плат оптичних інтегральних схем. Монографія / Г.В.Канашевич // Укр. Деп. в НИИ ТЭХИМ, Черкассы, 2002. – 165 с.
10. Тепловые процессы при электронной обработке оптических материалов и эксплуатации изделий на их основе / [Ващенко В. А., Котельников Д. И., Лега Ю. Г. и др.]. – Киев.: Наукова думка, 2006. – 368 с.
11. The express-diagnostics of band electronic stream / [M. P. Rud, V. P. Boyko, Yu. I. Kovalenko etc.] // Вісник Черкаського державного технологічного університету, №3, 2005. – С.49 – 51.
12. Автоматична система експрес діагностики розподілу енергії електронного пучка стрічкової форми по його перерізу / [Канашевич Г. В., Ващенко В. А., Рудь М. П. та ін.] // Матеріали П'ятої щорічної Промислової конференції з міжнародною участю та виставки «Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях». – сел. Славське, Львівської обл., Карпати, 21–25 лютого 2005. – С.296 – 298.
13. Визначення розподілу густини струму стрічкового електронного потоку при обробці оптичних матеріалів / [М. П. Рудь, Г. В. Канашевич, В. П. Бойко та ін.] // Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Динаміка наукових досліджень – 2006», Том 7. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2006. – С.45 – 47.
14. Рудь М. П. Визначення розподілу густини струму стрічкового електронного потоку / Рудь М. П. // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Спецвипуск – 2007. – С.148 – 150.

© Рудь М. П.,
Канашевич Г. В.,
Бондаренко М. О.,
Коваленко Ю. І., 2012

Дата надходження статті до редколегії 02.05.2012 р.

РУДЬ М. П. – Черкасский государственный технологический университет (г. Черкассы, Украина).