

М. П. Рудь, к.т.н., доцент,
Ю. І. Коваленко, старший викладач,
Я. В. Годованець, магістрант,
С. М. Мацепа, магістрант,
Г. В. Канашевич, д.т.н., доцент

Черкаський державний технологічний університет
 б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна
rood77@mail.ru, kovyurij@rambler.ru, kgv-elbeam@rambler.ru

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОННОГО ПОТОКУ НИЗЬКОЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ ГАРМАТИ ПІРСА

Побудовано модель електронно-променевої гармати Пірса з метою використання її в технології мікрообробки поверхонь оптичних матеріалів. Представлено результати розрахунку впливу електростатичного поля на траєкторії руху електронів у ньому з урахуванням дії об'ємного заряду та початкової швидкості електронів. Досліджено вплив потенціалу модулятора на форму стрічкового електронного потоку.

Ключові слова: електронно-променева гармата, електронна оптика Пірса, метод кінцевих елементів, електростатичне поле, об'ємний заряд.

Електронно-променеві гармати Пірса розроблені для формування прямолінійних ламінарних електронних пучків простої конфігурації [1, 2]. Основною перевагою гармат Пірса є досить проста конструкція електродів та можливість генерування потужних технологічних електронних пучків. В роботах [3-6] як інструмент для поверхневої низькоенергетичної (прискорююча напруга менша 10 кВ) обробки оптичних матеріалів застосовується гармата Пірса зі стрічковою формою електронного потоку. Особливістю цієї гармати є спрощена форма електродів, відмінна від класичної оптики Пірса, та застосування дряного вольфрамового термокатода. В роботах [7-11] для визначення характеристик електронної гармати застосовувався метод автоматичного зондування електронного потоку. В роботі [12] з використанням методу кінцевих елементів побудована розрахункова модель такої гармати і показана відмінність траєкторій електронів від ідеальної форми.

На сьогодні методи моделювання електронних гармат є досить розвиненими і дозволяють проводити розрахунки складних нестаціонарних процесів у електронно-оптичних системах різного призначення [12].

Для підвищення якості технології електронно-променевої мікрообробки оптичних матеріалів та ефективного використання просторово-енергетичних характеристик потоку шляхом автоматичного керування актуальним

питанням є розробка комп'ютерних моделей для процесів, що відбуваються в зоні контакту електронного потоку з матеріалом. Однією з таких моделей повинна бути модель електронної гармати як технологічного інструменту [12] та модель електронного потоку, який формується в гарматі.

Застосування комп'ютерних систем та моделей для керування процесом обробки дозволяє вийти на більш високий технологічний рівень – рівень мікрообробки.

Метою роботи є моделювання електронного потоку в гарматі Пірса для забезпечення її як інструменту в поверхневій мікрообробці матеріалів.

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 – позовжня 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 необхідно, щоб форма електродів гармати повторювала форму еквіпотенціальних поверхонь в області, зовнішній до потоку. У спрощеній формі достатньо відтворити лише форму еквіпотенціальної поверхні нульового потенціалу (прикатодного електрода), яка являє собою площину, нахилену до границі потоку під кутом $67,5^\circ$, а форма електрода з потенціалом анода може бути площиною, перпендикуляр-

ною до потоку (в загальному випадку анод має складну форму).

Використання тривимірної геометрії значно ускладнює чисельний розв'язок задачі, тому в рамках цього дослідження було розв'язано задачу на основі двовимірної геометрії (рис. 1). Розрахунок на основі цієї моделі дозволить урахувати особливості впливу форми модулятора та розташування катода на електронний потік.

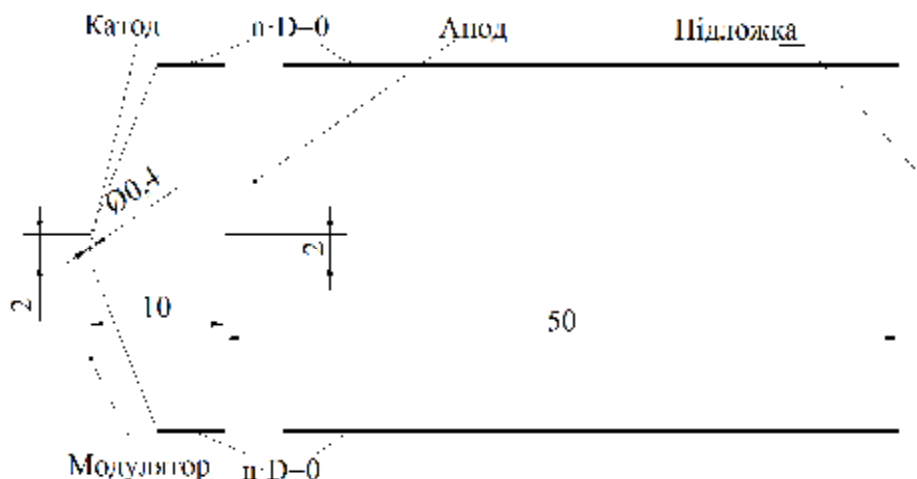


Рис. 1. Двовимірна модель стрічкової електронної гармати Пірса

Для вирішення поставленої задачі використувався метод кінцевих елементів (МКЕ) як найбільш універсальний метод вирішення подібних задач.

Розв'язання задач руху потоків заряджених частинок традиційно розділяється на дві окремі задачі, а саме: задача розрахунку електромагнітного поля в електронній гарматі та задача руху заряджених частинок у цьому полі. Розв'язання ускладнюється тим фактом, що джерелом електричного та магнітного полів є не лише електроди та котушки, а й самі рухомі заряди. У зв'язку з цим можна виділити два типи розв'язань задач руху потоків заряджених частинок: з одностороннім зв'язком між фізичними явищами (генерація поля та рух частинок у ньому) та двостороннім зв'язком, коли щільність частинок достатньо велика, щоб потік частинок почав помітно збурювати поле навколо нього.

Щільність об'ємного заряду частинок електронного потоку визначається його первеансом. Відомо, що в електронних пучках вплив об'ємного заряду стає помітним при значеннях первеансу $P > 0,1 \frac{\text{мкА}}{B^{3/2}}$. Для розрахунку прийнято режим роботи гармати,

при якому струм емісії катода становить 100 мА, а прискорююча напруга – 5 кВ. Первеанс електронного потоку становить $P = 0,28 \frac{\text{мкА}}{B^{3/2}}$, тобто для такого потоку

необхідно враховувати дію об'ємного заряду. Струм 100 мА відповідає емісії близько $6,25 \cdot 10^8$ електронів за 1 нс. Прямий розрахунок руху такої кількості електронів, особливо з урахуванням їх взаємодії між собою, неможливо виконати за прийнятний час із застосуванням персональних комп'ютерів.

Однак розв'язок цієї задачі можна значно спростити, якщо вважати електричне поле, створене електронним потоком, стаціонарним. У такому випадку можливо розрахувати сумарне електричне поле електронного потоку та поле, створене електродами гармати. В подальшому проводиться розрахунок траєкторій електронів у такому сумарному полі.

Унікальною особливістю стаціонарних систем є те, що вони дозволяють розраховувати траєкторії частинок і полів з використанням методу самоузгодженого поля (метод Гартрі-Фока), що є більш ефективним, ніж обчислювати повний розв'язок для нестационарної задачі.

Для обчислення електростатичного поля визначено такі умови однозначності моделі:

– теорема Гауса для електростатичних полів у вакуумі $\nabla \cdot E = \rho/\epsilon_0$, $E = -\nabla U$;

– умова збереження заряду $E = -\nabla U$, $\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r E) = \rho_V$;

– умова нульового заряду – існує нульовий заряд на границі області моделювання, так що $n \cdot D = 0$ (рис. 1);

– густина просторового заряду $\nabla \cdot D = \rho_U$;

– потенціали електродів як гранична умова $U = U_0$. Для катода $U = 5$ кВ, для модулятора $U = 5$ кВ, для анода та підложки $U = 0$ В.

Для обчислення траєкторій електронів визначено такі умови однозначності моделі:

– другий закон Ньютона $F = \frac{d(m_e v)}{dt}$,

де $m_e v$ – імпульс частинки, e – заряд електрона;

– електрична складова сили Лоренца $F = eZ(-\nabla U) = eZE$,

де Z – кількість частинок, ∇U – градієнт потенціалу електричного поля, E – напруженість електричного поля;

– визначення входу частинок у зону моделювання: заряд $q = eZ$, початкова швидкість $v = v_0$; електрони рівномірно емітуються з катода циліндричної форми діаметром 0,4 мм. Строгий опис руху потоків заряджених частинок повинен враховувати ефекти різної початкової (теплової) швидкості електронів з поверхні емітера. Основною проблемою є неможливість урахування точної швидкості та напряму визначення швидкості електронів;

– урахування ефекту просторового заряду в електронному потоці, тобто кулонівського відштовхування між негативно зарядженими частинками потоку. Для цього необхідно враховувати двосторонній зв'язок між частинками і полем. Тобто, поле робить силовий вплив на частинки, а просторовий заряд частинок впливає на поле. Для того щоб побачити цей ефект, необхідно вирішити задачу для частинок і полів одночасно.

$$-\nabla \cdot \epsilon_0 \nabla U = \sum_{i=1}^N eZ \delta(r - q_i),$$

$$\frac{d(m_e v)}{dt} = eZ(-\nabla U),$$

де δ – дельта функція Дірака.

Внесок кожної моделі частинки до повної щільності просторового заряду пучка знаходиться за розрахунком суми

$$\frac{d\rho}{dt} = eZ \sum_{i=1}^N f_{rel} \delta(r - q_i),$$

де f_{rel} – ефективна частота випромінювання частинок (кількість частинок, що емітуються з катода, за секунду).

Щоб уникнути проблеми, пов'язаної з дуже малою величиною точкового заряду, щільність просторового заряду розподіляється рівномірно по кожному елементу сітки перед вирішенням проблеми електростатики.

На рис. 2 зображено результат розбиття об'єкта моделювання на трикутні елементи. Для підвищення точності розрахунку найменший розмір елементів обрано в прикатодній зоні та в зоні анодної щілини, що пов'язано з найбільшими значеннями напруженості електричного поля та найбільшою кривизною траєкторій електронів у цих зонах.

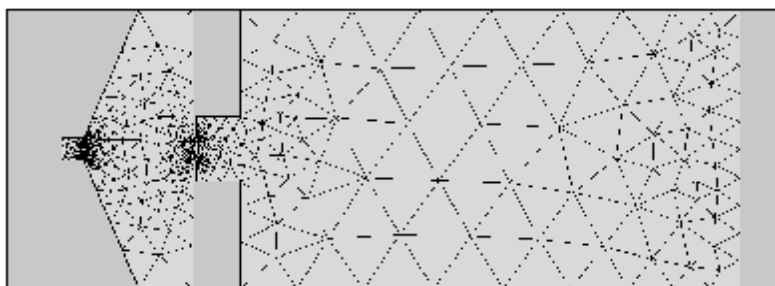


Рис. 2. Кінцево-елементна сітка для розрахунку

Результатом розрахунку моделі є електростатичне поле, що утворюється в результаті сумісної дії потенціалів на електродах гарма-

ти та об'ємного заряду електронного потоку, а також траєкторії електронів під дією електричного поля. На рис. 3 представлено резуль-

тат розрахунку електричного поля у вигляді еквіпотенціальних ліній у прискорюючому

проміжку та ліній напруженості поля.

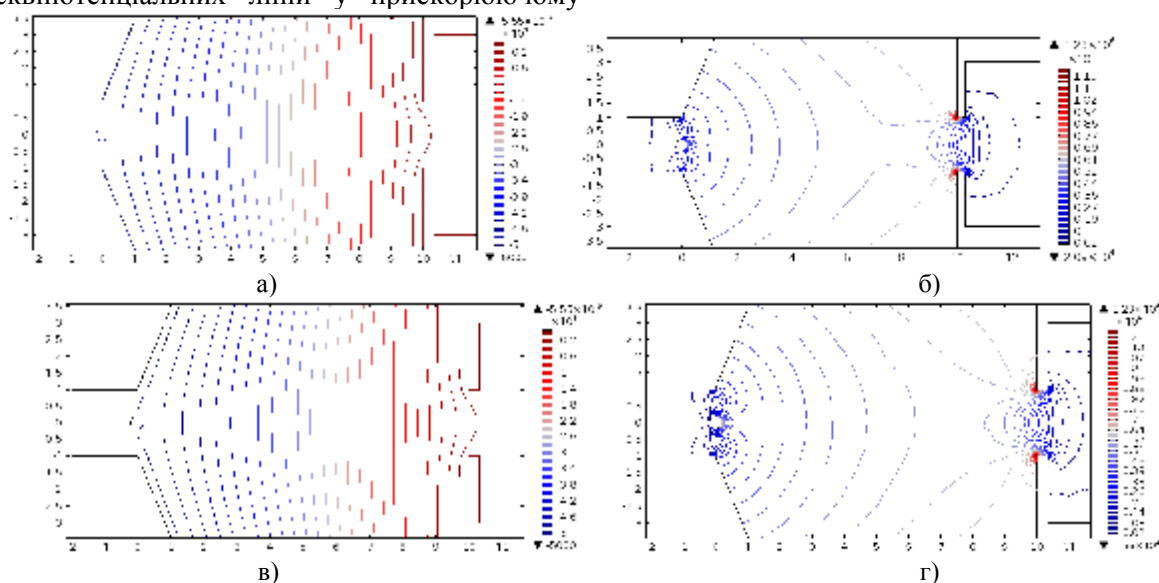


Рис. 3. Результат розрахунку електростатичного поля в електронній гарматі Пірса: еквіпотенціальні лінії електростатичного поля між катодом та анодом електронної гармати, В:
 а) $U_{np} = 5000$ В; $U_{mod} = U_{np}$; в) $U_{np} = 5000$ В; $U_{mod} = U_{np} - 100$ В;
ліній напруженості електростатичного поля В/м:
 б) $U_{np} = 5000$ В; $U_{mod} = U_{np}$; г) $U_{np} = 5000$ В; $U_{mod} = U_{np} - 100$ В

На рис. 4 представлено розраховані траєкторії електронів залежно від початкової швидкості електронів та потенціалу на модулюючому електроді. При врахуванні впливу теплових швидкостей на конфігурацію пучка і розподіл густини струму по перерізу пучка припускається, що відома конфігурація пучка за відсутності теплових швидкостей. Як видно

з рисунка, форма електронного потоку при відсутності теплової швидкості та при врахуванні швидкості електронів 10^6 м/с відрізняється несуттєво. Водночас показані можливості регулювання електронного потоку при створенні різниці потенціалів між модулюючим електродом та катодом.

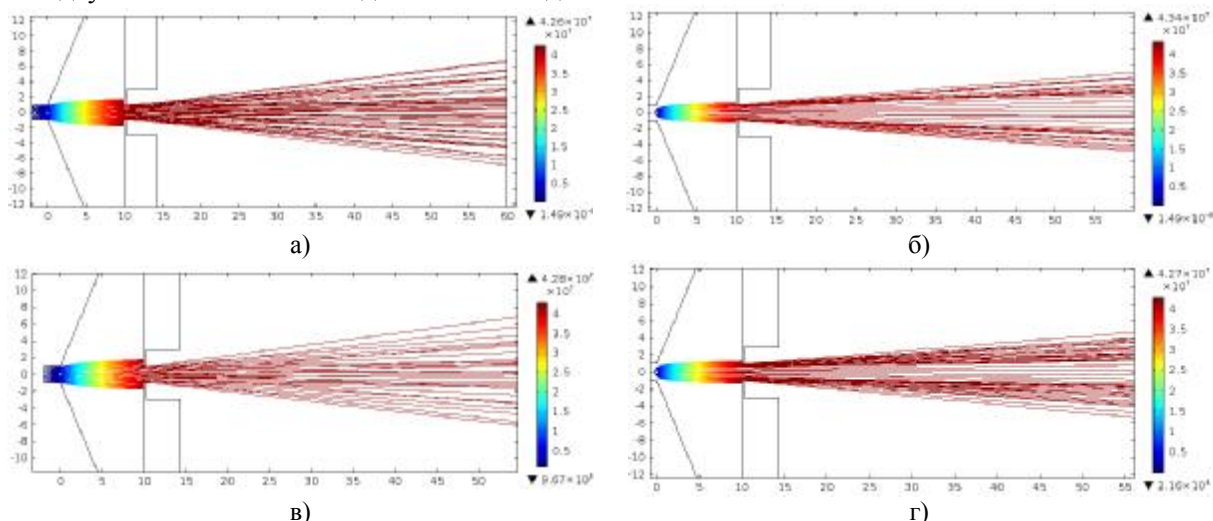


Рис. 4. Отримані за розрахунковими даними траєкторії руху електронів, що сформовані оптикою Пірса при різних значеннях початкової швидкості електронів v_0 , напруги на модулюючому електроді U_{mod} :
 а) $U_{mod} = U_{np}$; $v_0 = 0$ м/с; б) $U_{mod} = U_{np} - 50$ В; $v_0 = 0$ м/с;
 в) $U_{mod} = U_{np}$; $v_0 = 10^6$ м/с; г) $U_{mod} = U_{np} - 50$ В; $v_0 = 10^6$ м/с

Також було проведено порівняння форми електронного потоку з урахуванням об'ємного заряду потоку та без урахування. Встановлено, що врахування об'ємного заряду при струмі емісії 100 мА змінює ширину електронного потоку менш ніж на 1 %, при

струмі 500 мА – на 2,55 % (рис. 5). Помітний вплив на траєкторії електронів можна відмітити лише в прикатодній зоні (рис. 5 в). Однак після формування електронного потоку електронно-оптичною системою відмінності практично нівелюються.

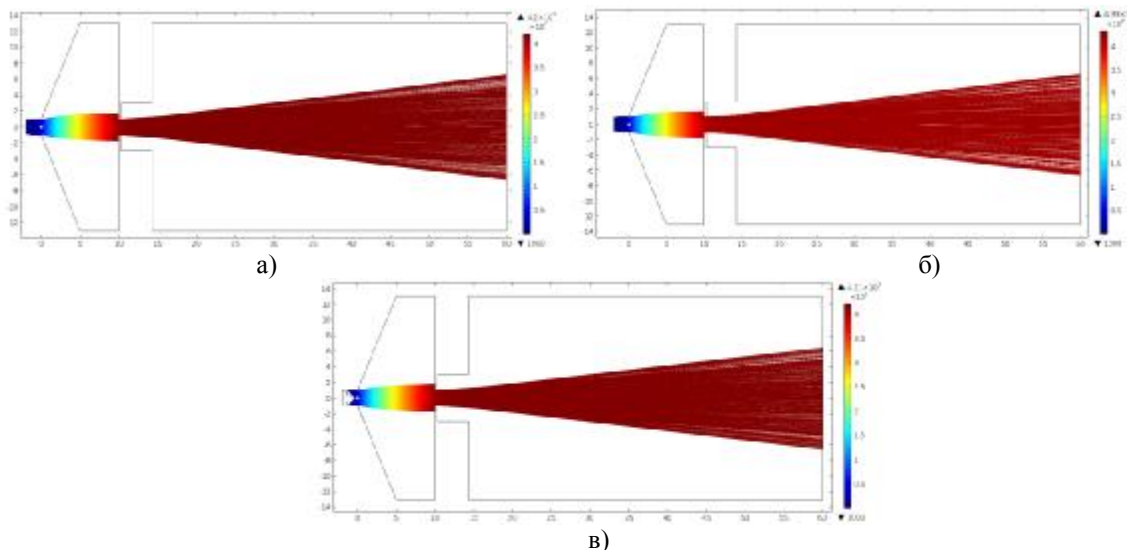


Рис. 5. Вплив об'ємного заряду на форму траєкторій електронів у гарматі Пірса:
 а) вплив об'ємного заряду не враховано, б) вплив об'ємного заряду для струму потоку 100 мА,
 в) вплив об'ємного заряду для струму 500 мА

Як видно з рис. 5, траєкторії електронів у проміжку катод-анод суттєво не паралельні, на відміну від траєкторій електронів у класичній електронно-оптичній системі Пірса, внаслідок застосування катода з круглим перерізом. В результаті цього значна частина електронів потрапляє на анод і, таким чином, енергія, отримана від блока живлення гармати, затрачена на їх розгін, витрачається на нагрів анода. Тобто для електронно-променевої обробки використовується лише енергія електронів, що пройшли через анодну щілину. Для кількісного опису цього явища введемо поняття ефективності електронно-

оптичної системи гармати Пірса. Під ефективністю електронно-оптичної системи слід розуміти відношення струму електронного потоку, що формується на об'єкті обробки, до повного струму електронного потоку. Для підвищення ефективності електронно-оптичної системи застосовується керування напругою на модуляторі, яке дозволяє змінити форму електронного потоку. На рис. 6 зображено залежність розподілу струму електронного потоку між анодом та підложкою від потенціалу на модуляторі.

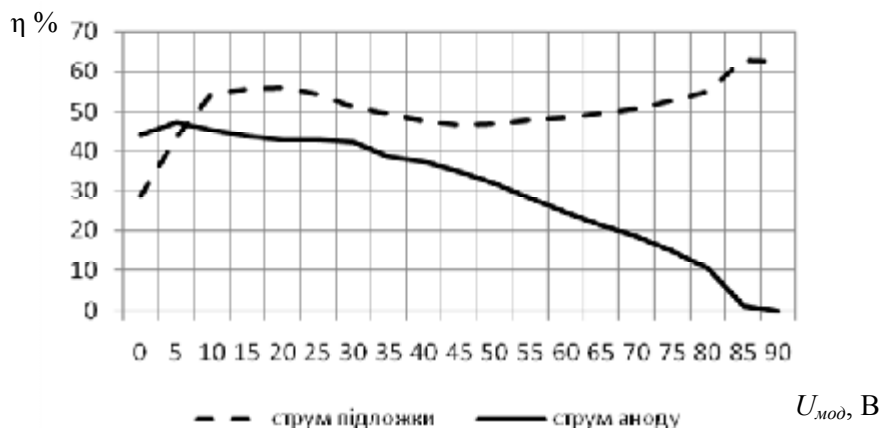


Рис. 6. Залежності струмів аноду гармати та підложки η (%) від потенціалу модулятора U_{mod} (В)

Слід зазначити, що зі збільшенням напруги на модуляторі зменшується ефективна площа катода, тобто площа, електрони емісії з якої беруть участь у формуванні електронного потоку. Зменшення ефективної площі катода видно на рис 5, б, г. З даних графіка на рис. 6 можна зазначити, що зменшення ефективної площі катода стає помітним при напрузі на модуляторі > 20 В, коли зменшення струму анода не призводить до збільшення струму електронного потоку на об'єкті обробки.

Як видно з представлених розрахунків, регулювання електронним променем за допомогою потенціалу модулятора дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії електронної гармати. Максимальна ефективність досягається при потенціалі 85 В. Однак, з другого боку, збільшення потенціалу модулятора призводить до зменшення ефективної площі катода, тобто для підтримання струму емісії необхідно збільшувати струм розжарення катода, що, в свою чергу, зменшує термін його служби.

Як видно з рисунка, додатковий потенціал на модуляторі дозволив отримати практично паралельний потік електронів у проміжку між катодом та анодом шириною, меншою 2 мм, у результаті чого всі емітовані електрони проходять через анодну щілину, ширина якої становить 2 мм. Внаслідок дії анодної щілини як розсіюючої лінзи після анода електронний потік стає розхідним, однак кут розходження значно менший, ніж у випадку некерowanego модулятора.

Висновки дослідження і перспективи подальших розвитку в обраному напрямку:

1. Побудовано комп'ютерну модель електронно-променевої гармати Пірса, яка дозволила визначити форму електростатичного поля та траєкторії руху електронів у гарматі.

2. Враховано вплив об'ємного заряду потоку електронів та початкової швидкості електронів емісії на форму потоку. Для вирішення задачі об'ємного заряду запропоновано використати метод спільного вирішення задачі електростатики та розрахунку траєкторій електронів. Показано, що величина об'ємного для робочих струмів електронної обробки та неспокуюваного електронного потоку слабо впливає на його форму. При струмі 500 мА розбіжність ширини потоку від дії об'ємного заряду становить 2,5 %.

3. Запропоновано і проведено розрахункову оцінку підвищення ефективності електронно-оптичної системи стрічкової електронної гармати Пірса. Розрахунки показали, що при збільшенні потенціалу модулятора зменшується частка анодного струму і збільшується ефективність електронно-оптичної системи гармати. Розраховано, що для використаної конструкції при прикладенні потенціалу між катодом та модулятором 85 В струм аноду практично відсутній.

Слід зазначити, що в розглянутій моделі не враховується вплив на форму електронного потоку позитивних іонів, що утворюються в результаті зіткнень електронів з атомами залишкових газів у вакуумній камері. Їх накопичення в області, зайнятій електронним пучком, приводить до часткової або повної компенсації об'ємного електронного заряду. Врахування цього ефекту та дослідження його впливу на електронний промінь планується в подальших дослідженнях.

Список літератури

1. Пірс Дж. Р. Теория и расчет электронных пучков / Дж. Р. Пірс. – М. : Советское радио, 1956. – 216 с.
2. Молоковський С. И. Интенсивные электронные и ионные пучки / С. И. Молоковський. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 312 с.
3. Дудко Г. В. Формирование предельно гладких поверхностей оптических стекол / Г. В. Дудко, А. А. Кравченко, Д. И. Черденченко // Физика и химия стекла. – 1987. – Т. 13, № 5. – С. 740–746.
4. 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 Черкас. филиала КПИ. – Черкассы, 1993. – 205 с.
5. Ващенко В. А. Высокотемпературные технологические процессы взаимодействия концентрированных источников энергии с материалами : [монография] / В. А. Ващенко. – М. – 408 с. Деп. в ВИНТИ 07.08.96, № 62. – ХП 96.
6. Канашевич Г. В. Термічна електронно-променева обробка скляних плат оптичних інтегральних схем : [монографія] / Г. В. Канашевич // Укр. Деп. в НИИТЭХИМ, Черкассы, 2002. – 165 с.

7. The express-diagnostics of band electronic stream / [M. P. Rud, V. P. Boyko, Yu. I. Kovalenko et al.] // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2005. – № 3. – С. 49–51.
8. Автоматична система експрес-діагностики розподілу енергії електронного пучка стрічкової форми по його перерізу / [Канашевич Г. В., Ващенко В. А., Рудь М. П. та ін.] // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях : матеріали П'ятої щорічної Промисл. конф. з міжнар. участю та виставки. – сел. Славське Львівської обл., Карпати, 21–25 лютого 2005. – С. 296–298.
9. Визначення розподілу густини струму стрічкового електронного потоку при обробці оптичних матеріалів / [М. П. Рудь, Г. В. Канашевич, В. П. Бойко та ін.] // Динаміка наукових досліджень – 2006 : матеріали V Міжнар. наук.-практ. конф. – Дніпропетровськ : Наука і освіта, 2006. – Т. 7. – С. 45–47.
10. Рудь М. П. Визначення розподілу густини струму стрічкового електронного потоку / М. П. Рудь // Вісник Черкаського державного технологічного університету : спецвипуск – 2007. – С. 148–150.
11. Дослідження та формування стрічкового електронного потоку для мікрообробки неметалевих матеріалів / [М. П. Рудь, Г. В. Канашевич, М. О. Бондаренко, Є. Я. Губар] // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні : наук. журн. Запорізьк. нац. техн. ун-ту. – Запоріжжя, 2012. – Вип. 2. – С. 58–63.
12. Моделювання низькоенергетичної стрічкової електронної гармати Пірса методом кінцевих елементів / [М. П. Рудь, Г. В. Канашевич, Ю. І. Коваленко, М. О. Бондаренко] // Наукові праці : наук.-метод. журн. Чорноморськ. держ. ун-ту ім. Петра Могили. – Миколаїв, 2012, Вип. 179, т. 191. – С. 28–31. – (Серія «Комп'ютерні технології»).
3. Dudko, G. V., Kravchenko, A. A. and Cherednychenko, D. I. (1987) Formation of extremely smooth surfaces of optical glasses. *Physica i chimiya stekla*, (13), № 5, pp. 740-746 [in Russian].
4. Lisochenko, V. N. Kanashevich, G. V., Vashenko, V.A. et al. (1993) Development of elements of integrated optical circuits by new methods based on electron beam processing: report on research of Cherkasy branch of KPI. Cherkasy, 205 p. [in Russian].
5. Vashenko, V. A. (1996) High-temperature technological processes of interaction of concentrated sources of energy with materials. Moscow, 408 p. Dep. VINITI 07.08.96, № 62. – XII 96 [in Russian].
6. Kanashevych, G. V. (2002) Thermal electron beam processing of glass boards of optical integrated circuits. Ukr. Dep. NIITEHIM, Cherkasy, 165 p. [in Ukrainian].
7. Rud', M. P., Boyko, V. P., Kovalenko, Yu. I. et al. (2005) The express-diagnostics of band electronic stream. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*, (3), pp. 49-51 [in Ukrainian].
8. Kanashevych, G. V., Vashchenko V. A., Rud' M. P et al. (2005) Automated system of rapid diagnostics of energy distribution for electron beam of banded form along its section. *Proceedings of the Fifth annual Industry conference with international participation and exhibition "Effectiveness of the implementation of scientific, industrial and resource potential in modern conditions"*. Pos. Slavs'ke, Lviv region, Carpathians, 21-25 February, pp. 296-298 [in Ukrainian].
9. Rud', M. P., Kanashevych, G. V., Boyko, V. P. et al. (2006) Determination of the distribution of current density of banded electron beam at optical materials processing. *Proceedings of the V International scientific and practical conference "Research Dynamics – 2006"*, (7). Dnepropetrovsk: Nauka i osvita, pp. 45-47 [in Ukrainian].
10. Rud', M. P. (2007) Determination of the distribution of current density of banded electron beam. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. Special Edition*, pp. 148-150 [in Ukrainian].
11. Rud' M. P., Kanashevych, G. V., Bondarenko, M. O. and Gubar, E. Y. (2012) Research and formation of banded electron beam for microprocessing of nonmetal materials. *Novi materialy i technologii v metallurgii i machinbuduvanni: Scient. journal of Zaporizhia*

References

1. Pierce, J. R. (1956) Theory and calculation of electron beams. – Moscow: Soviet radio, 216 p. [in Russian].
2. Molokovsky, S. I. (1991) Intense electron and ion beams – Moscow: Energoatomizdat, 312 p. [in Russian].

National Technical University (2), pp. 58-63 [in Ukrainian].

12. Rud', M. P., Kanashevych, G. V., Kovalenko, Yu. I. and Bondarenko, M. O. (2012) Modeling of low-energy banded electron Pierce gun by finite element method. *Proceedings. "Computer technologies" series: Scient.-method. journal of Black Sea State University. named after Peter Graves*. Mykolayiv, Issue 179, vol. 191, pp. 28-31 [in Ukrainian].

ceedings. "Computer technologies" series: Scient.-method. journal of Black Sea State University. named after Peter Graves. Mykolayiv, Issue 179, vol. 191, pp. 28-31 [in Ukrainian].

Стаття надійшла до редакції 29.01.2014.

M. P. Rud', *Ph.D., associate professor,*
Y. I. Kovalenko, *senior teacher,*
Y. V. Godovanec, *undergraduate,*
S. M. Macepa, *undergraduate,*
G. V. Kanashevych, *Dr. Tech. Sc., associate professor*
 Cherkasy State Technological University
 Schevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine
rood77@mail.ru, kovyurij@rambler.ru, kgv-elbeam@rambler.ru

THE CALCULATION OF ELECTRON BEAM PARAMETERS FOR LOW-ENERGY ELECTRON PIERCE GUN

The paper analyses a developed two-dimensional model of electron Pierce gun for microprocessing of optical materials surfaces. The electron gun is characterized by simplified electrodes compared to the classical Pierce electron optics and tungsten wire thermionic emitting cathode. To solve this problem we used finite element method (FEM) as the most universal method for solving of such problems. We described physical setting of a joint task to compute electrostatic fields and trajectories of electrons in it. Since the perveance of electron beam is over 0,1 uA/V^{3/2} the model takes into account the impact of space charge density of electron beam particles on the electron trajectory. We offer to calculate particles trajectories and electric fields using self-consistent field method (Hartree-Fock method), which can significantly reduce the computation time.

The results of the calculation of electrostatic field influence on electrons trajectory with regard to the action of space charge and electrons initial velocity are presented. Modulator potential influence on the form of banded electron beam is investigated. Calculations have shown that increasing of the modulator potential capacity reduces anode current portion and increases electron-optical system efficiency.

Key words: *electron beam gun, electron Pierce optics, finite element method, electrostatic field, space charge.*