

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри КСУ

_____ Петро ЛЕОНТЬЄВ

_____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності

176 – Мікро- та наносистемна техніка

освітньо-професійної програми

«Нанотехнології та біомедичні системи»

на тему: «Розрахунок та проектування електронної пушки за методом Пірса»

Здобувача групи ФЕ.м-31

Яковенко Анатолій Вікторович

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Анатолій ЯКОВЕНКО

(підпис)

Керівник доцент кафедри КСУ, к.ф.-м.н., доцент Анатолій РУБАН

(посада, науковий ступінь, вчене звання, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Суми – 2024

Сумський державний університет

(назва вузу)

Факультет ЕІТ Кафедра Комп'ютеризованих систем управління

Спеціальність 176 «Мікро- та наносистемна техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедрою _____

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА магістерську РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

магістерську / бакалаврську

Яковенко Анатолію Вікторовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Розрахунок та проектування електронної пушки за методом Пірса
затверджені наказом по університету від “ 08” листопада 2024 року № 1156-VI
2. Термін здачі студентом закінченого проекту (роботи) 9 грудня 2024 року
3. Вхідні дані до проекту (роботи) Теоретична модель електронної пушки Пірса для формування електронного потоку, розраховані графіки еквіпотенціальних ліній в залежності від геометричних розмірів пушки і їх потенціалу
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити) _____
Провести аналіз існуючих електронних пушок для формування пучка, розгляд їх переваг і недоліків. Розгляд формування різних форм електронних пучків у гарматі Пірса. Проведення розрахунку гармати Пірса для обраних форм пучків, з аналізом результатів.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначення обов'язкових креслень)

презентація із наведеними результатами виконаного індивідуального завдання

6. Дата видачі завдання 15 вересня 2024 року

Керівник

(підпис)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Дослідження видів електронних гармат	До 23.10.24	виконано
2	Розбір форм електронного пучка для гармати Пірса	До 04.11.24	виконано
3	Проведення розрахунків електронного пучка в гарматі Пірса для обраних форм	до 21.11.24	виконано
4	Аналіз результатів проведених розрахунків для гармати Пірса	до 30.11.24	виконано

5	Питання охорони та умов праці в контексті виконання відповідних завдань	до 03.12.24	виконано
---	---	-------------	----------

Студент-дипломник

(підпис)

Керівник проекту

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Робота виконана на 65 сторінках і складається з 2 розділів, 5 підрозділів. Робота включає 26 ілюстрації, 4 таблиці, 31 джерел за переліком посилань.

Об'єктом розрахунку і проектування є електронна пушка.

Мета роботи полягає у дослідженні методів розв'язання задач про формування електронних пучків довільної форми та розмірів. Також потрібно розрахувати методом Пірса електронну гармату, що формує пучок різних форм.

Завдання про розподіл потенціалів і вибір форми електродів гармат в аксіально-симетричних системах часто вирішується за допомогою електролітичної ванни.

Дана робота представляє короткий огляд видів фокусування пучків та головних вимог до електронної гармати, яка формує інтенсивні електронні потоки. Після розгляду деяких методів формування потоків, вибір пав на метод Пірса, який вирізняється простотою та ефективністю, даючи змогу отримувати пучки для різних цілей.

Ключові слова: ЕЛЕКТРОДИ ПІРСА, ЕЛЕКТРОЛІТИЧНА ВАННА, ПРОСТОРОВИЙ ЗАРЯД, АНОДНИЙ ОТВІР, КАТОД, ЕКВІПОТЕНЦІЙНІ ЛІНІЇ ПОЛЯ, ПЕРВЕАНС, ЕЛЕКТРОННА ГАРМАТА, ПРОЛІТНИЙ КАНАЛ, ПОТЕНЦІАЛ.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	7
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1.....	11
1. МЕТОДИ ПОБУДОВИ ТА РОЗРАХУНКУ ГАРМАТ ІНТЕНСИВНИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПУЧКІВ	11
2. Метод Дж. Пірса.....	14
2.1. Формування паралельного пучка	14
2.2. Формування клиноподібного пучка	19
2.3. Формування суцільного циліндричного пучка	23
2.4. Формування трубчатого циліндричного пучка	27
2.5. Формування кінцевого пучка	28
3. Метод Е. Мюллера	35
4. Метод С.Н. Треневої	41
РОЗДІЛ 2.....	47
5. РОЗРАХУНОК І ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОННОЇ ГАРМАТИ ПІРСА.....	47
5.1. Розрахунок формування кінцевого пучка.....	47
5.2. Розрахунок формування паралельного пучка.....	51
5.3. Розрахунок формування суцільного циліндричного пучка.....	54
ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ РОБОТІ З ПЕРСОНАЛЬНИМ КОМП'ЮТЕРОМ.....	58
ВИСНОВОК.....	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	63

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І
ТЕРМІНІВ

j_0 - густина струму;

ε_0 - діелектрична стала;

I - величина струму на одиницю довжини циліндра;

A – коефіцієнт густини струму;

μ - молекулярна вага одноразово іонізованої частинки;

β - функція, що задовольняє диференціальному рівнянню;

θ_0 - кут збіжності пучка;

r/r_0 - відстань від вісі пучка;

z/r_0 - відстань від катод;

ρ - об'ємна густина заряду;

R_K - радіус кривизни катода;

R - поточна координата;

U_0 - потенціал внутрішнього електрода (анода);

P – первеанс пучка;

R_a - радіус внутрішнього електрода (анода);

$p_{с.д.}$ - первеанс сферичного діода;

$p_{с.к.}$ - первеанс системи типу сферичного конденсатора із суцільними електродами;

$r_{П.В.}$ - внутрішній радіус пучка;

$r_{П.З.}$ - зовнішній радіус пучка;

θ_B - внутрішній кут пучка;

θ_3 - зовнішній кут пучка;

Φ_{2^*k} – циліндрична функція, $k=0,1,2\dots$;

$tg, arctg = tan, arctan$

ВСТУП

Електронні пучки є основою широкого класу електровакуумних приладів. Їх використовують в генераторах, електронно-променевих трубках, у прискорювачах заряджених частинок, підсилювачах надвисокої частоти(НВЧ прилади), у зварюванні і плавленні металів у вакуумі, при обробці твердих сплавів і алмазів. Під кожен процес підбирають різні геометричні та електричні характеристики. Формування електронних пучків здійснюється за допомогою електронної гармати.

Основне завдання електронної гармати полягає у формуванні інтенсивного електронного пучка певної конфігурації із заданим значенням струму і швидкості, а також з можливістю ламінарного руху електронів. Спроби отримати такі пучки за допомогою електронних гармат чи прожекторів, що використовуються в електронно-променевих трубках і мікроскопах, не дали позитивних результатів. Тому розробка променевих приладів радіотехнічного призначення була тісно пов'язана з пошуками нових формувальних і фокусуєчих систем.

Сучасні електронні гармати, що формують інтенсивні електронні потоки, можна класифікувати за способом фокусування: магнітним, електростатичним і комбінованим(магнітним + електростатичним). Слід зауважити, що магнітне поле не може змінювати енергію, тобто прискорювати електрони, тому створити чисто магнітну гармату принципово не можливо. Але якщо використовувати електростатичне поле тільки для прискорення електронного потоку, а магнітне поле буде займатися формуванням пучка, то можна вважати це гарматою магнітного фокусування. Гармату також можна класифікувати за характером створюваного пучка, розглядаючи гармати, що формують симетричні за віссю пучки - конічні, циліндричні, трубчасті та плоскі (стрічкові), які бувають паралельні або такі, що сходяться.

Американський учений Джон Пірс здійснив значний вклад запропонувавши метод формування прямолінійних електронних пучків простої форми: циліндричний,

конічний, стрічковий(плоский). На основі даного методу було розроблено електронні гармати із високою ефективністю, що зараз відомі під назвою гармата Пірса.

В залежності від точності розрахунків та конструктивного вибору гармати змінюються основні показники роботи приладу, такі як потужність, ККД, широкосмуговість, якість зварювання, довговічність і тд. Тому вибір методів розрахунку і конструкцій гармат для формування електронного потоку є джерелом дослідження для багатьох фахівців галузі.

За весь час було запропоновано велику кількість наближених рішень та нових методів фокусування пучка. Серед багатьох діячів можна виділити роботи Г.А. Грінберга, В.С. Лукошкова, які досліджували вплив об'ємного заряду на рух потоку заряджених часток. Роботи В.С. Лукошкова про методи моделювання інтенсивних пучків, а також Дж. Пірса, Мюллера, Л. Бріллуена та ін. Так як створення електронних гармат пов'язане із розвитком електронних приладів НВЧ, то варто відмітити тих, хто поклав основу методів розрахунку гармат, це Джон Пірс, Мюллер, Тренева та інші[1-4].

РОЗДІЛ 1

1. МЕТОДИ ПОБУДОВИ ТА РОЗРАХУНКУ ГАРМАТ ІНТЕНСИВНИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПУЧКІВ

В даний час не існує загального конкретного методу розв'язання задачі про формування пучків будь-яких заданих форм і розмірів. Є методи розрахунку і рішення для деяких конкретних випадків. З них найпоширенішими є системи для отримання паралельних електронних потоків, що сходяться, засновані на ідеях Пірса.

На відміну від своїх попередників, які визначали траєкторії руху електронів у деяких заданих полях, Пірс поставив перед собою завдання визначити поле, в якому траєкторії електронів були б прямолінійними. Цей метод полягає у тому, щоб у плоскому діоді, повністю заповненому електронами, виділити частину електронного потоку, тоді на межі утвореного пучка відштовхувальні сили просторового заряду будуть компенсовані об'ємним зарядом інших частинок.

Такий самий ефект можна отримати, якщо область поза пучком звільнити від електронів, потім помістити туди систему електродів відповідних геометричних форм, після чого прикласти до них відповідну напругу при якій краї пучка залишилися б незмінними, тобто компенсувати поле просторового заряду на поверхні пучка полем фокуруючих електродів. Така компенсація можлива при виконанні певних умов, таких як: потенціал безперервний на межі пучка і складова напруженості електричного поля, що нормальна до поверхні пучка повинна дорівнювати нулю, але це за наявності поля, нормального до межі пучка, коли електронний потік не був би прямолінійним[1]. Тоді маємо:

$$U = f(z)$$

$$\frac{\partial U}{\partial r} = 0$$

Таку обмежену ділянку в суцільному потоці електронів можна наприклад виділити між коаксіальними циліндрами і концентричними сферами. В такому випадку, одна поверхня є анодом, а інша катодом. В загальному така система називається гарматою Пірса, а електроди – це електроди Пірса. А така форма електродів дозволяє отримувати циліндричні або прямолінійні (стрічкові) пучки.

Вчені, зокрема К. Шпандгерберг, розраховали оптимальні форми електродів для створення конічних електронних пучків, які часто використовуються в техніці. Їхні розрахунки базуються на відомій моделі руху електронів у просторі між двома сферами.

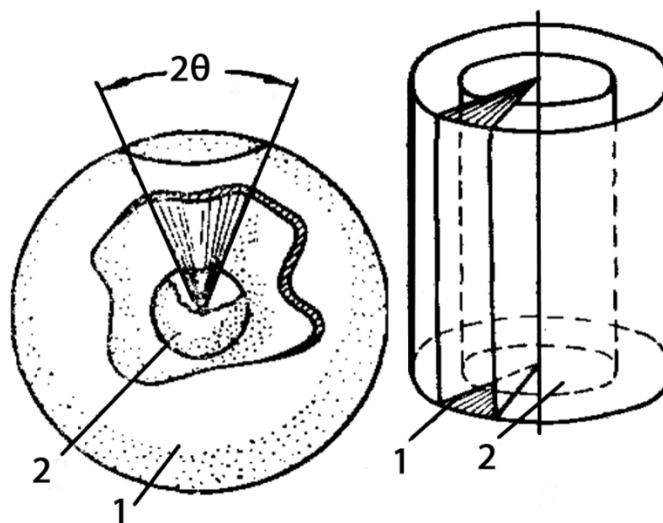


Рис. 1.1 – Формування клиноподібного та конічного пучків,

де 1-анод, 2-катод

Аналітичний розрахунок розподілу потенціалу фокусуєчого поля не викликає труднощів тільки для найпростішого випадку формування паралельного пучка прямокутного перерізу. Тоді як розрахунок розподілу потенціалу для формування паралельного пучка кільцевого, кругового перерізу пучка тощо пов'язаний зі певними

труднощами, і як результат є тільки наближені рішення.

Одне із рішень запропонував Пірс, показавши, що завдання про вибір форми електродів гармати і розподіл потенціалів у аксіально-симетричних системах можна вирішувати за допомогою електролітичної ванни.

Пучок імітується діелектричною пластинкою, наприклад полістироловою, текстолітовою тощо. Оскільки в місцях зіткнення діелектрика й електроліту струм не надходить в електроліт і не йде з нього, то на межі імітованого пучка, поле, перпендикулярне до границі пучка, рівне нулю.

2 МЕТОД ПІРСА

2.1 ФОРМУВАННЯ ПАРАЛЕЛЬНОГО ПУЧКА ПРЯМОКУТНОГО ПЕРЕРІЗУ

Для початку розглянемо модель, де прямолінійний пучок формується плоским катодом, поміщеним у точці $z=0$.

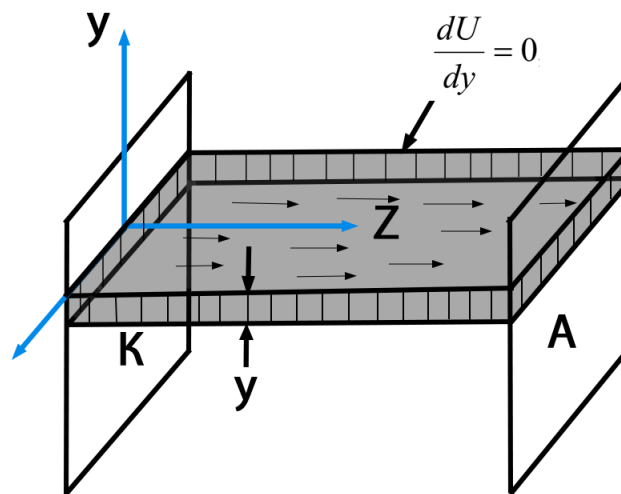


Рис. 2.1 – Прямолінійний пучок, виділений із потоку електронів у плоскому діоді

Дана задача формування стрічкового пучка прямокутного перерізу можна вирішити аналітично, взявши до уваги, що:

- Початкові швидкості електронів і потенціал катода дорівнюють нулю.
- Струм емісії обмежений просторовим зарядом.
- Усі електрони пучка рухаються паралельними траєкторіями в напрямку осі z .
- Густина струму в пучку постійна в усіх точках.

Знайдемо розподіл потенціалу вздовж осі z , тобто $U = f(z)$. Залежність між відстанню, потенціалом і густиною струму визначається рівнянням Пуассона:

$$\frac{d^2U}{dz^2} = \frac{j_0}{\varepsilon_0 \cdot \sqrt{2\eta}} U^{-\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

Де ε_0 - діелектрична стала, j_0 - густина струму, $\eta=e/m$

Розглянемо обмежений пучок в ділянці $y < 0$, де немає зарядів. Для того, щоб пучок не розширювався, потенціал на межі потоку має бути безперервним, а складова поля, нормальна до поверхні пучка, повинна дорівнювати нулю, тоді граничні умови за $y = 0$ мають вигляд:

$$\begin{aligned} U &= f(z) \\ \frac{\partial U}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

Розв'язок рівняння 2.1 для зони всередині пучка (при $y < 0$) за умови рівності нулю потенціалу на катоді $U=0$, отже, градієнт потенціалу $\frac{dU}{dz} = 0$, тоді обмеження струму просторовим зарядом має вигляд:

$$U = f(z) = \left(\frac{9 \cdot j_0}{4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{2\eta}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot z^{\frac{4}{3}} \quad (2.3)$$

Де j_0 - густина струму [А/см²].

Для визначення потенціалу $U(y,z)$ поза пучком, необхідно знайти розв'язок рівняння Лапласа, що відповідає заданим граничним умовам (2.2).

Оскільки будь-яка функція комплексної змінної, а також її дійсна чи уявна частини, задовольняють двовимірне рівняння Лапласа, то розв'язок рівняння можна записати:

$$U(z, y) = \operatorname{Re}[f(z + jy)] = \frac{1}{2}[f(z + jy) + f(z - jy)] \quad (2.4)$$

При $y=0$ на границі пучка:

$$U = f(z) = Az^{4/3}$$

При $y>0$ маємо:

$$U = \operatorname{Re}[A(z + jy)^{4/3}] = \operatorname{Re}[A(z^2 + y^2)^{2/3} \cdot e^{j^{4/3}\alpha}] = A(z^2 + y^2)^{2/3} \cos\left(\frac{4}{3}\alpha\right) \quad (2.5)$$

Де $\alpha = \arctan\left(\frac{y}{z}\right)$

Форма еквіпотенційних поверхонь за межами пучка, необхідних для формування прямолінійного пучка прямокутного перерізу, задається виразом 2.5 та показана на рисунку (2.2):

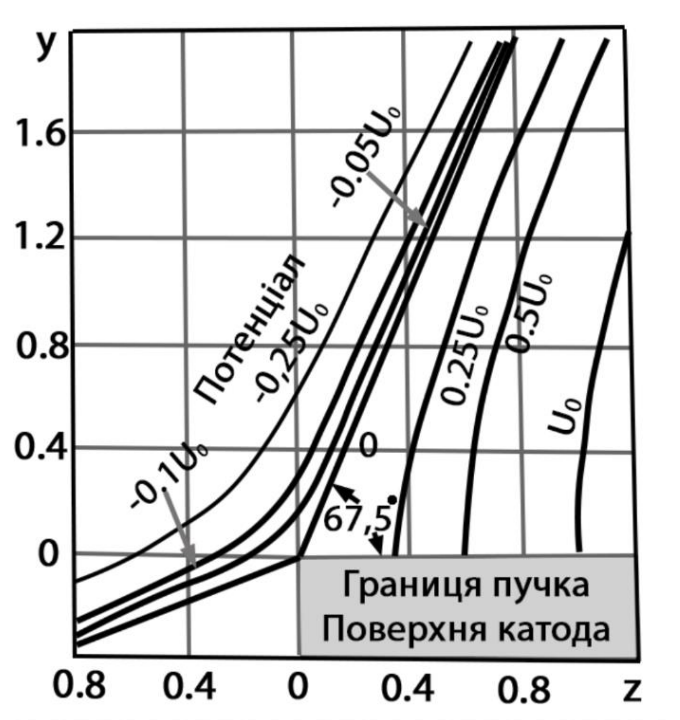


Рис. 2.2 – Еквіпотенційні лінії поля, за якими можна визначити форму електродів

Основною умовою вибору форми електродів є їх збіжність з еквіпотенційними поверхнями. Можна обмежитися тільки двома електродами з потенціалами $U=0$, тобто катод із фокусуєчим електродом, і $U=U_0$ тобто анод чи прискорювальний електрод. Дана система електродів має назву гармата Пірса.

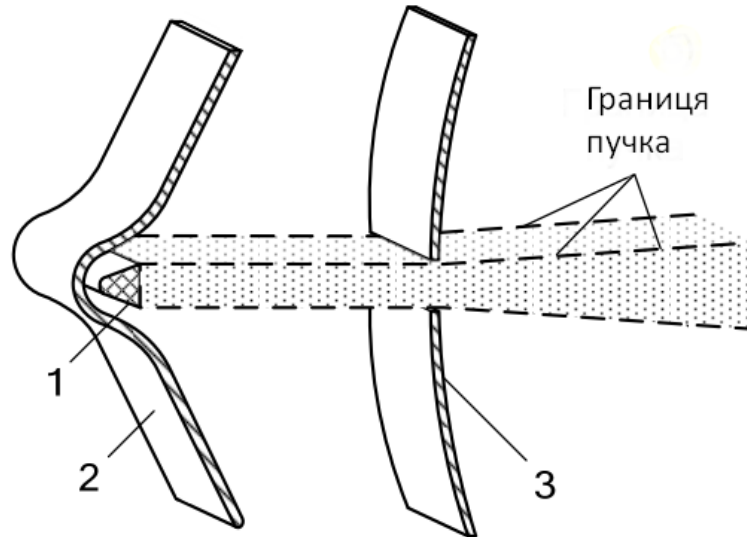


Рис. 2.3 – Гармата Пірса для формування прямолінійного пучка: 1 – катод; 2 – фокусуєчий електрод; 3 – анод

Тепер визначимо форму прискорювального та фокусуєчого електродів. На катоді, тобто $z=0$, маємо $U=0$, тоді з формули 2.5 маємо:

$$Ay^{\frac{4}{3}} \cos\left(\frac{4}{3} \arctan\left(\frac{y}{z}\right)\right) = 0$$

При умові $y \neq 0$, маємо:

$$\cos\left(\frac{4}{3} \arctan\left(\frac{y}{z}\right)\right) = 0$$

Тоді

$$\arctan\left(\frac{y}{z}\right) = \frac{3\pi}{8} = 67.5^\circ$$

В результаті маємо формулу форми фокусуєчого електрода:

$$y = z \cdot \tan(67,5^\circ) \quad (2.6)$$

Що являє собою площину з кутом нахилу $67,5^\circ$, до поверхні стрічкового пучка. Форма прискорювального електрода можна знайти з рівняння:

$$A(z^2 + y^2)^{\frac{2}{3}} \cos\left(\frac{4}{3} \arctan\left(\frac{y}{z}\right)\right) = U_0 \quad (2.7)$$

Отвір для проходження пучка в прискорювальному електроді закривається сіткою. Однак часто, особливо при великих швидкостях електронів і високій щільності струму, сітка відсутня. При цьому електронний потік, що виходить зі отвору, буде розбіжним внаслідок дії лінзи отвору[1-2].

Розфокууюча дія щілини збільшується при зростанням її ширини та зменшенні відстані катод-анод. Однак, коли ширина отвору значно менша за відстань катод-анод, то електронний потік буде практично ідентичним, як і при наявності сітки.

2.2 ФОРМУВАННЯ КЛИНОПОДІБНОГО ПУЧКА

Клиноподібний пучок із центральним кутом $2\theta_0$ можна виділити в системі коаксіальних циліндричних електродів на рис. 1.1 . Потенціал зовнішнього електрода (катода) дорівнює нулю, тоді як внутрішнього (анода) дорівнює U_0 . Для уникнення розфокууванню пучка, необхідно змінити форму анодного і катодного електродів так, щоб зовнішнє електростатичне поле на границі пучка врівноважувало сили просторового заряду. Форма електродів для пучків з кутами збіжності рівними 30° і 20° , була визначена В. П. Ігнатенко.

Для розв'язання задачі краще обрати систему полярних координат R і θ з початком у центрі кривизни електродів і полярною віссю, що збігається з віссю симетрії пучка[1-4].

Розподіл потенціалу всередині пучка на основі рішення Блоджета і Ленгмюра без урахування початкових швидкостей електронів визначається рівнянням:

$$U = A \left[\frac{R}{R_K} \cdot \beta^2 \left(\frac{R_K}{R} \right) \right]^{\frac{2}{3}} \quad (2.8)$$

Де $A = 2.04 \cdot 10^4 (I^2 \mu R_K)^{1/3}$;

I – величина струму на одиницю довжини циліндра;

μ – молекулярна вага одноразово іонізованої частинки;

R_K – радіус кривизни катоду;

β – функція, що задовольняє диференціальному рівнянню

Тоді

$$3\beta \frac{d^2\beta}{d\gamma^2} + \left(\frac{d\beta}{d\gamma} \right)^2 + 3\beta \left(\frac{d\beta}{d\gamma} \right) = 1 - \beta^2$$

Функцію β можна подати у вигляді ряду:

$$\beta = \gamma - 0.4\gamma^2 + 0.091667\gamma^3 - 0.014242\gamma^4 + 0.001679\gamma^5 - \dots = e^{-\gamma/2} \sum_{k=0}^{\infty} B_k \gamma^k$$

Де $\gamma = \frac{R}{R_K}$;

B_k – коефіцієнт наведений в таблиці 1.

Таблиця 1 – Коефіцієнти розкладання функції Блоджета-Ленгмюра

k	B_k	b_k	k	B_k	b_k
0	0	1	3	0.01667	0.00392

1	1	0.133	4	0.002424	0.000529
2	0.1	0.0244	5	0.000287	0.0000697

Функція $\Phi = \left[\frac{R}{R_K} \beta^2 \left(\frac{R_K}{R} \right) \right]^{\frac{2}{3}}$ задовольняє диференціальне рівняння $\frac{d^3\Phi}{d\gamma^2} = \frac{4}{9} \Phi^{-\frac{1}{2}} e^\gamma$

і має вигляд $\Phi = \gamma^{\frac{4}{3}} \sum_{k=0}^{\infty} b_k \gamma^k$, коефіцієнт b_k також наведений в таблиці 1.

Функцію Φ можна наближено подати у вигляді:

$$\Phi_1 = -0.34 + 0.5 \frac{R_K}{R} - 0.023 \left(\frac{R_K}{R} \right)^2$$

Або

$$\Phi_2 = -0.62 + 0.72 \frac{R_K}{R} - 0.072 \left(\frac{R_K}{R} \right)^2 + 0.003 \left(\frac{R_K}{R} \right)^3$$

Для порівняння в таблиці 2 надані значення функцій Φ , Φ_1 , Φ_2 при різних значеннях R_K/R :

Таблиця 2 – Приближені значення функцій Φ , Φ_1 та Φ_2

R_K/R	Φ_1	Φ_2	Φ
1.5	—	0.312	0.285
2	0.556	0.563	0.563
3	0.939	0.987	0.996
4	1.276	1.321	1.319
5	1.570	1.583	1.575
6	1.813	1.791	1.787

7	2.008	1.963	1.968
8	2.145	2.117	2.126
9	2.260	2.271	2.267
10	2.315	2.443	2.391

На межі пучка, де $\theta = \theta_0$, розподіл потенціалу може визначатися функцією:

$$U = A\Phi.$$

В зоні, вільній від зарядів, розподіл потенціалу знаходиться через розв'язання рівняння Лапласа:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial \gamma^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial \theta^2} = 0 \quad (2.9)$$

При граничних умовах $\left(\frac{\partial U}{\partial \theta}\right) = 0$ і $U = A\Phi$ за $\theta = \theta_0$.

Розв'язок рівняння 2.9 можна знайти за методом Фур'є. Кінцевий розв'язок рівняння 2.9, яке визначає форму еквіпотенційних поверхонь, має вигляд:

$$U(R, \theta) = \operatorname{Re} \left\{ \omega^{\frac{4}{3}} \sum_{k=0}^{\infty} b_k \omega^k \right\} \quad (2.10)$$

Де $\omega = \ln \frac{R_k}{R} + j(\theta + \theta_0)$.

Форма електродів для двох значень кутів зходження $\theta_0 = 20^\circ$ і $\theta_0 = 30^\circ$ визначається із рис. 2.4.

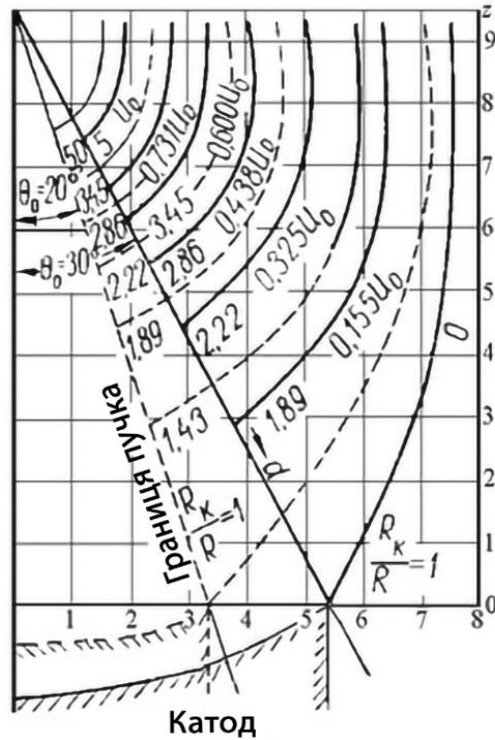


Рисунок 2.4 – Еквіпотенційні лінії поля, що визначають форму електродів, необхідну для отримання клиноподібного пучка

2.3 ФОРМУВАННЯ СУЦІЛЬНОГО ЦИЛІНДРИЧНОГО ПУЧКА

Задача вибору форми еквіпотенційних поверхонь для формування суцільного циліндричного пучка в загальному вигляді не вирішується. Необхідний розподіл потенціалу при виборі форми електродів визначається експериментально за допомогою наближеним розрахунком чи електролітичної ванни.

Для формування циліндричного пучка потенціал на його границі має задовольняти умови:

$$U(r_0, z) = Az^{\frac{4}{3}};$$

$$\frac{\partial U}{\partial r}(r_0, z) = 0,$$

Де r_0 – радіус циліндричного пучка.

Форма еквіпотенційних поверхонь для отримання циліндричного пучка, знайдена за допомогою електролітичної ванни, показана на рисунку 2.5. На ньому по горизонталі відкладено відстань від катода $\frac{z}{r_0}$, по вертикалі – відстань від осі пучка $\frac{r}{r_0}$. Радіус циліндричного пучка беремо рівним радіусу катода. На рис. (2.6) наведено гармату для отримання циліндричного пучка.

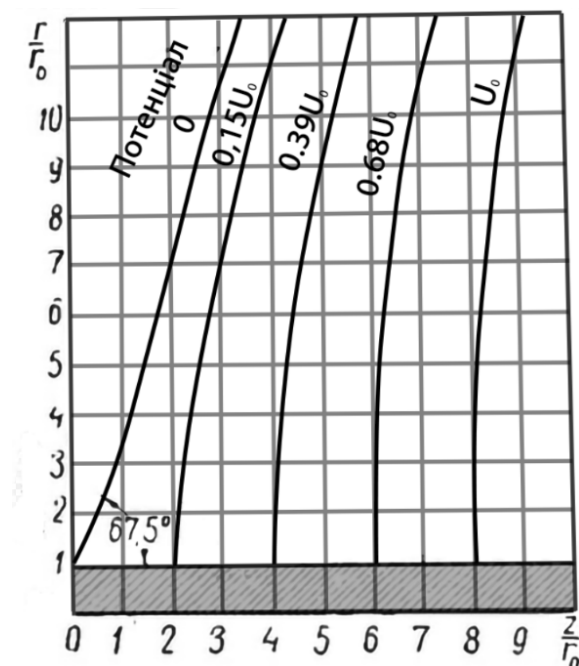


Рис. 2.5 – Еквіпотенційні лінії поля для отримання циліндричного пучка: r_0 – радіус катода

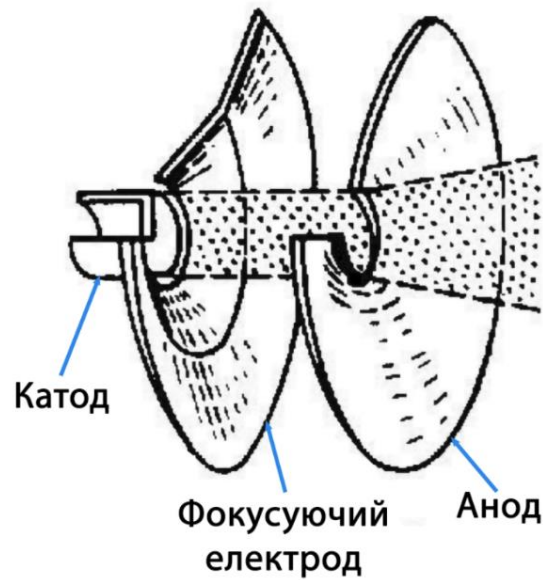


Рис. 2.6 – Пушка Пірса для формування суцільного циліндричного пучка

Наближений аналітичний розв'язок задачі з формування циліндричного пучка було виконано Дайкеном. Тому рівняння еквіпотенційних ліній можна записати у вигляді:

$$U(r, z) = Az^{\frac{4}{3}} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \left(\frac{r_0}{z}\right)^{2k} \Phi_{2k}\left(\frac{r}{r_0}\right) \quad (2.11)$$

Де $\Phi_{2k}\left(\frac{r}{r_0}\right)$ – циліндричні функції.

Тоді в області біля краю пучка:

$$\Phi_0 = 1$$

$$\Phi_2\left(\frac{r}{r_0}\right) = \frac{1}{9} \left\{ \left(\frac{r}{r_0}\right)^2 - 2 \ln\left(\frac{r}{r_0}\right) - 1 \right\};$$

$$\Phi_4\left(\frac{r}{r_0}\right) = \frac{10}{1296} \left\{ \left(\frac{r}{r_0}\right)^4 - 8\left(\frac{r}{r_0}\right)^2 \left[\ln\left(\frac{r}{r_0}\right) - \frac{1}{r} \right] - 4\ln\left(\frac{r}{r_0}\right) - 5 \right\} \dots$$

Значення функцій Φ_2 і Φ_4 в залежності від величини співвідношення r/r_0 наведено в таблиці 3.

В області $R < r_0^2$:

$$U(r, z) = R^{\frac{2}{3}} \cos\left(\frac{4}{3}\alpha\right) + \frac{R^{\frac{5}{3}}}{4r_0} \left\{ \sin\left(\frac{\alpha}{3}\right) - \frac{1}{7} \sin\left(\frac{7}{3}\alpha\right) \right\} + \dots \quad (2.12)$$

де $R = z^2 + (r - r_0)^2$,

$$\alpha = \arctan\left(\frac{r - r_0}{z}\right).$$

Таблиця 3 – Циліндричні функції Φ_2 і Φ_4

r/r_0	Φ_2	Φ_4	r/r_0	Φ_2	Φ_4
0.1	0.4016	0.0342	1.0	0.0000	0.0000
0.2	0.2508	0.0166	1.5	0.0488	0.0088
0.4	0.1103	0.0039	2.0	0.1793	0.0158
0.6	0.0423	0.0006	3.0	0.6448	0.2219
0.8	0.0096	0.0002	4.0	1.3586	1.0200
			5.0	2.3090	3.0220

Форма екіпотенційних поверхонь, отриманих у результаті розрахунків, представлена на рис. (2.7).

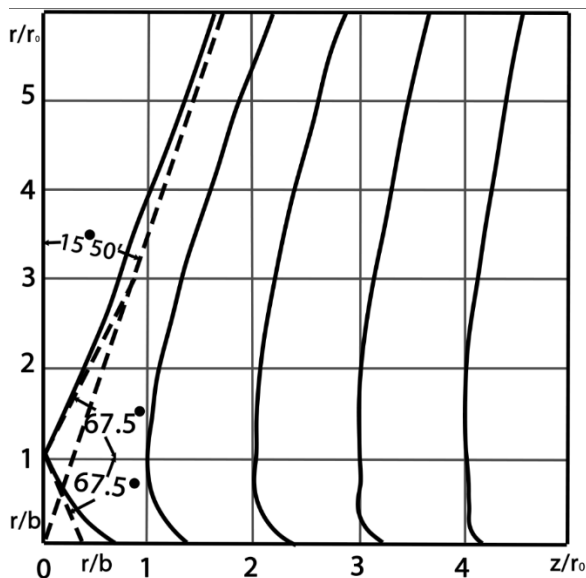


Рис 2.7 – Еквіпотенційні лінії поля, за допомогою яких визначається форма електродів для циліндричного або трубчастого пучка

2.4 ФОРМУВАННЯ ТРУБЧАТОГО ЦИЛІНДРИЧНОГО ПУЧКА

Для формування порожнистого пучка (рис. 2.8.1) із внутрішнім (b) і зовнішнім (r_0) радіусами в області поза пучком форма еквіпотенційних ліній описується рівняннями (2.11) і (2.12).

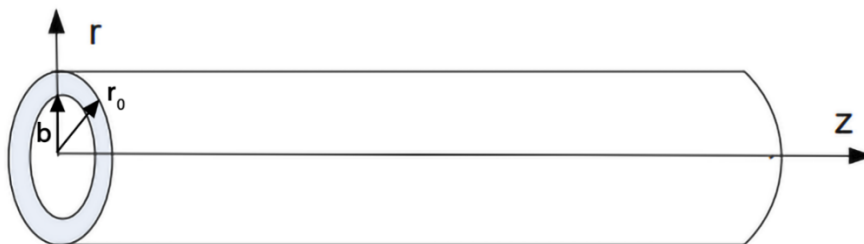


Рис. 2.8.1 – Трубчатий циліндричний пучок: r – радіус пучка, z – довжина пучка

Тоді як додаткові електроди, що поміщаються всередину пучка, визначаються рівняннями (2.11) і (2.12), у яких r_0 замінено b і мають вигляд:

Рівняння екіпотенційних ліній:

$$U(r, z) = Az^{\frac{4}{3}} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \left(\frac{b}{z}\right)^{2k} \Phi_{2k}\left(\frac{r}{b}\right)$$

Для області $R < b^2$:

$$U(r, z) = R^{\frac{2}{3}} \cos\left(\frac{4}{3}\alpha\right) + \frac{R^{\frac{5}{3}}}{4b} \left\{ \sin\left(\frac{\alpha}{3}\right) - \frac{1}{7} \sin\left(\frac{7}{3}\alpha\right) \right\} + \dots$$

В такому випадку форма екіпотенційних поверхонь для області всередині пучка показана також на рис. (2.7) [1-3].

2.5 ФОРМУВАННЯ КОНІЧНОГО ПУЧКА

Конічний пучок можна отримати з частини радіального потоку електронів, що проходить між концентричними сферами (рисунок 1.1). Частина внутрішньої сфери є анодом, а частина зовнішньої сфери – катодом.

Задача про струми, обмежені просторовим зарядом між концентричними сферами, була розв'язана Ленгмюром і Блоджетом ще в 1924 р. Їхнє розв'язання було покладено в основу задачі з формування конічних пучків, виконаних Філдом та ін. Розподіл потенціалу між концентричними сферами для випадку повного просторового заряду можна отримати з розв'язування рівняння Пуассона у сферичних координатах.

Якщо припустити, що потенціал не залежить від кутових координат, то рівняння Пуассона набуває вигляду:

$$\frac{1}{R^2} \cdot \frac{d}{dR} \left(R^2 \frac{dU}{dR} \right) = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (2.13)$$

Де ρ – об'ємна густина заряду, [Кл/м³], $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ [Ф/м³].

Якщо знехтувати початковими швидкостями електронів і виразити гуστину заряду через загальний струм I , то отримаємо:

$$\frac{1}{R^2} \cdot \frac{d}{dR} \left(R^2 \frac{dU}{dR} \right) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0 R^2 \sqrt{2\eta} U^{\frac{1}{2}}} \quad (2.14)$$

де U – потенціал на відстані R від центру.

Тепер, якщо розв'яжемо рівняння (2.14), то можна повний струм у всій сфері з тілесним кутом 4π радіан.

$$I = \frac{16\pi\varepsilon_0}{9} \sqrt{2\eta} \frac{U^{\frac{3}{2}}}{\alpha^2} \quad (2.15)$$

Або інший вид:

$$I = 29,3 \cdot 10^{-6} \frac{U^{\frac{3}{2}}}{\alpha^2}$$

Де α – функція відношення R/R_k . В свою чергу, значення α наведені в таблиці 4.

Для конуса з півкутом кутом θ_0 , вирізаного зі сфери, струм потоку визначається виразом:

$$I = 29,3 \cdot 10^{-6} \frac{U^{\frac{3}{2}}}{\alpha^2} \sin^2 \frac{1}{2} \theta_0 \quad (2.16)$$

де U – напруга, [В];

I – струм, [А].

Часто зручніше виразити напругу U в кіловольтах [кВ], струм I в амперах [А], і тоді формулу 2.16 можна записати у вигляді:

$$I_0 = \frac{0.928U^{\frac{3}{2}} \sin^2 \frac{1}{2} \theta_0}{\alpha^2} \quad (2.17)$$

Звідки слідує:

$$U = \frac{1,051 \cdot I_0^{\frac{2}{3}} \alpha^{\frac{4}{3}}}{\left(\sin \frac{\theta_0}{2} \right)^{\frac{4}{3}}} \quad (2.18)$$

Таблиця 4-Величина α^2 як функція R_a/R_k [(α^2) для $R_a > R_k$ і $(-\alpha^2)$ для $R_a < R_k$]

$\frac{R}{R_k}$ або $\frac{R_k}{R}$	α^2	$(-\alpha)^2$	$\frac{R}{R_k}$ або $\frac{R_k}{R}$	α^2	$(-\alpha)^2$
1,0	0,0000	0,0000	4,6	1,063	6,712
1,05	0,0023	0,0024	4,8	1,103	7,334
1,1	0,0086	0,0096	5,0	1,141	7,976
1,15	0,0180	0,0213	5,2	1,178	8,636
1,2	0,0299	0,0372	5,4	1,213	9,315
1,25	0,0437	0,0571	5,6	1,247	10,01
1,3	0,0591	0,0809	5,8	1,280	10,73
1,35	0,0756	0,1084	6,0	1,311	11,46
1,4	0,0931	0,1696	6,5	1,385	13,35
1,45	0,1114	0,1740	7,0	1,453	15,35
1,5	0,1302	0,2118	7,5	1,516	17,44
1,6	0,1688	0,2968	8,0	1,575	19,62
1,7	0,208	0,394	8,5	1,630	21,89

1,8	0,248	0,502	9,0	1,682	24,25
1,9	0,287	0,621	9,5	1,731	26,68
2,0	0,326	0,750	10	1,777	29,19
2,1	0,364	0,888	12	1,938	39,98
2,2	0,402	1,036	14	2,073	51,86
2,3	0,438	1,193	16	2,189	64,74
2,4	0,474	1,358	18	2,289	78,56
2,5	0,509	1,531	20	2,378	93,24
2,6	0,543	1,712	30	2,713	178,2
2,7	0,576	1,901	40	2,944	279,6
2,8	0,608	2,098	50	3,120	395,3
2,9	0,639	2,302	60	3,261	523,6
3,0	0,669	2,512	70	3,380	663,3
3,2	0,727	2,954	80	3,482	813,7
3,4	0,783	3,421	90	3,572	974,1
3,6	0,836	3,913	100	3,652	1144
3,8	0,886	4,429	120	3,788	1509
4,0	0,934	4,968	140	3,903	1907
4,2	0,979	5,528	160	4,002	2333
4,4	1,022	6,109	180	4,089	2790

Нижче на рисунку 2.8 наведений графік залежності (α і $\alpha^{4/3}$) від R/R_K , де R_K – радіус кривизни катоду.

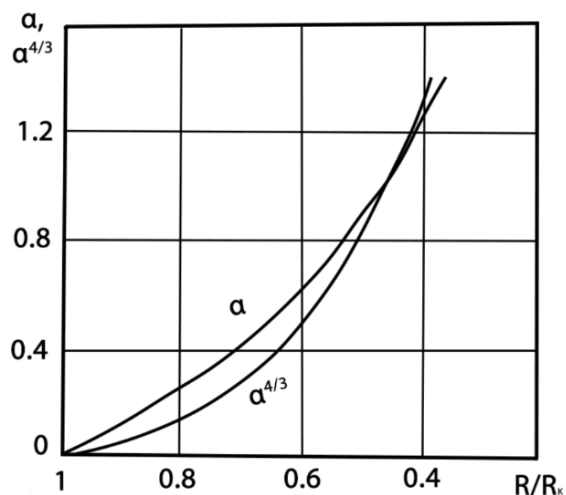


Рис. 2.8 – Залежність параметрів α і $\alpha^{4/3}$ від відношення R/R_k

З формули 2.18 видно, що $U = A\alpha^{4/3}$, за кривою $\alpha^{4/3}$ можна визначити потенціал залежності від відстані R для конусоподібного пучка. Це перша гранична умова отримання такого потоку. Друга гранично умова має вигляд:

$$\frac{dU}{d\theta} = 0 \quad (2.19)$$

Тобто, для конічного пучка, обмеженого просторовим зарядом, за заданого струму можна розрахувати розподіл потенціалу, як функцію відстані. Тоді знаючи розподіл потенціалу в електролітичній ванні, підбираються форма електродів, для фокусування, так, щоб заданий розподіл потенціалу здійснювався вздовж межі конічного пучка.

На рисунку 2.9, 2.10 і 2.11 показано форми електродів для 4-х різних кутів збіжності пучка (5° ; 10° ; 20° і 30°), які визначені за допомогою електролітичної ванни. Форму анода вибирають за однією з еквіпотенційних кривих.

При умові коли відома конструкція гармати двохелектродної системи, то таке рішення можна легко використати і для побудови трьохелектродної гармати. Знаючи

форму електродів, можна визначити форму еквіпотенційних ліній між катодом і анодом. Границя пучка не змінить своєї форми, якщо на місце якої-небудь еквіпотенційної лінії помістити електрод із відповідним позитивним потенціалом.

Дані розглянуті форми електродів Пірса для отримання різних пучків справедливі тільки для суцільних електродів. Але на практиці гармати Пірса використовуються для формування інтенсивних пучків, що вводяться через анодний отвір у пролітний канал електронно-променевого приладу. У наведеному розрахунку електронних гармат не враховується дія анодного отвору.

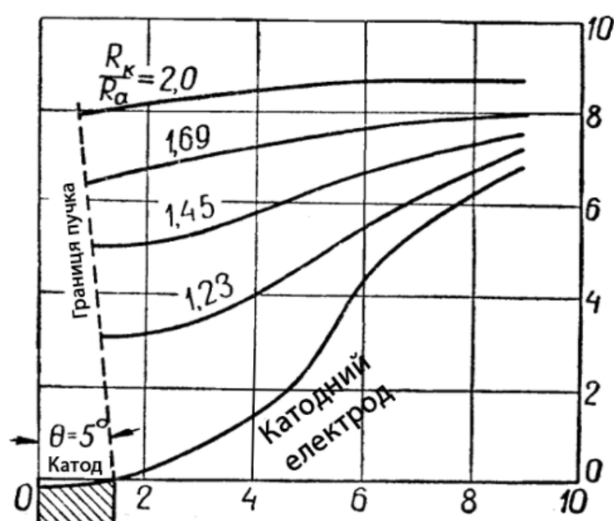


Рис. 2.9 – Форма еквіпотенційних електродів для отримання конічного пучка з кутом збіжності (5°)

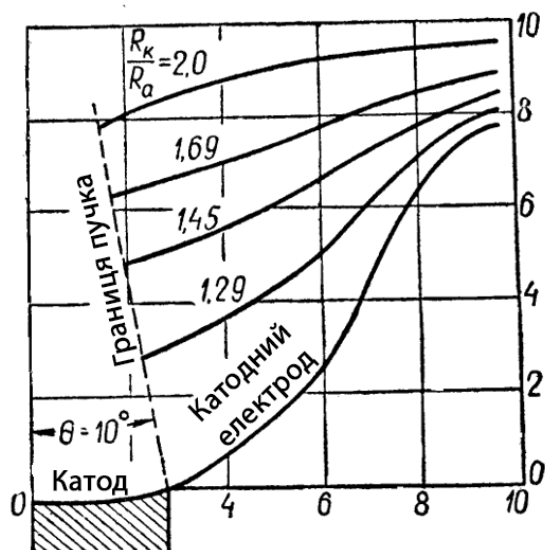


Рис. 2.10 – Форма еквіпотенційних електродів для отримання конічного пучка з кутом збіжності (10°)

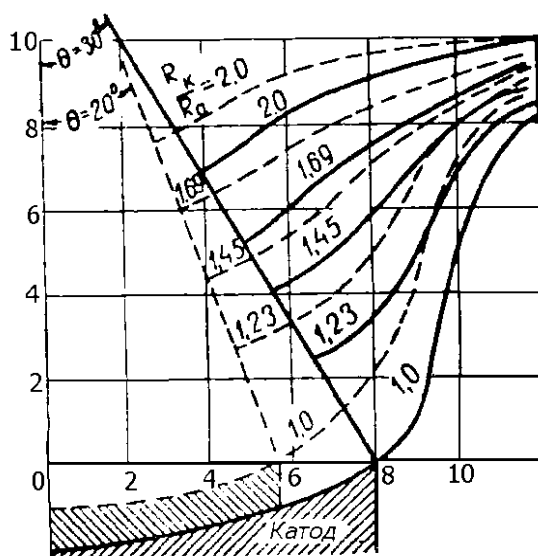


Рис. 2.11 – Форми еквіпотенційних електродів, за допомогою яких виходять конічні пучки з кутами збіжності 20° і 30°

3. МЕТОД МЮЛЛЕРА

Німецький фізик Е. Мюллер, ґрунтуючись на прагненні наблизити за формою і розташуванням еквіпотенційні криві електричного поля в сферичному діоді до еквіпотенціальних кривих сферичного конденсатора, так як із-за великого первеансу при розрахунку гармат виникають значні відхилення від теорії. На практиці первеанс виходить меншим ніж розрахунковий, в результаті провідність струму погіршується, а положення кросовера зміщується.

Тому Мюллер запропонував метод розрахунку електронних гармат з первеансом ($2 \cdot 10^{-6} \text{ A/V}^{3/2}$) і вище. Вплив кінцевих розмірів анодного отвору враховували за допомогою розрахунку ємності системи, що формулює пучок, і подальшого порівняння її з ємністю аналогічної системи із суцільними електродами.

Для сферичного конденсатора потенціал у просторі між електродами визначається за формулою:

$$U = U_0 \frac{\frac{R_k}{R} - 1}{\frac{R_a}{R} - 1} \quad (3.1)$$

де U_0 - потенціал внутрішнього електрода (анода);

R - поточна координата;

R_a - радіус внутрішнього електрода (анода);

R_k - радіус зовнішнього електрода (катода);

При наявності отвору, як видно з графічного представлення кривизни поля (рис. 3.1), потенціал біля катода зменшується, і це відповідає ніби зменшенню внутрішнього електрода сферичного конденсатора.

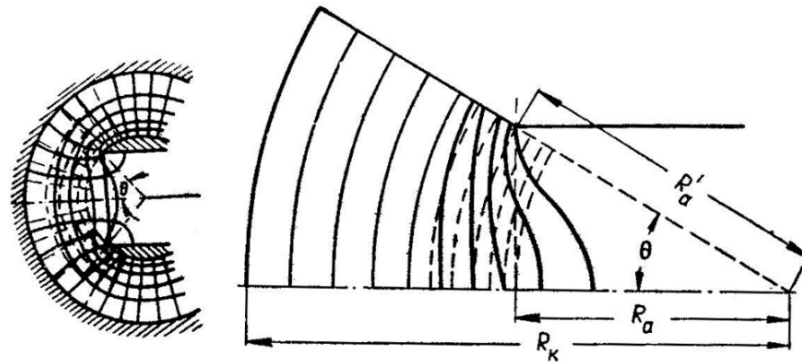


Рис. 3.1 – Картина кривизни поля сферичного конденсатора, яка обумовлена отвором в аноді

Первеанс системи з отвором сферичного діода – зменшується. Тому якщо знайти розміри еквівалентного сферичного конденсатора, то можна знайти первеанс $p_{С.д.}$. При цьому виявляється залежність:

$$p_{С.д.} \left(\frac{R'_a}{R_k} \right) = p_{С.к} \left(\frac{R_a}{R_k} \right) \quad (3.2)$$

де $p_{С.д.}$ - первеанс сферичного діода, тобто системи з анодом у вигляді циліндра, аксіальна довжина якого дорівнює діаметру отвору; $p_{С.к}$ - первеанс системи типу сферичного конденсатора із суцільними електродами;

$$R_a = R'_a \cdot \cos \theta_0$$

Якщо $R_a/R_k \leq 0,6$ і $\theta_0 = 30^\circ$, різниця між $p_{С.д.}$ і $p_{С.к}$ становить приблизно 2% (рис. 3.1). При збільшенні кута отвору θ_0 виникає помітне викривлення поля біля катода, із-за якого струмове навантаження катода виходить нерівномірним, причому воно тим більше, чим більшк є R_a/R_k і θ_0 . Якщо отвір виконано у формі конуса, тоді первеанс змінюється залежно від розширення або звуження отвору на вході анода.

Для сферичного діода первеанс визначається функціональним співвідношенням $\frac{R_a}{R_k}$, тобто

$$p = \frac{I}{U^{\frac{3}{2}}} = \frac{16}{9} \pi \varepsilon_0 \frac{1}{(-\alpha)^2} \sqrt{2\eta} = \frac{129.35}{(-\alpha)^2} \cdot 10^{-6} \quad (3.3)$$

Значення безрозмірної величини $(-\alpha)^2$ залежно від R_k/R_a наведено в таблиці 4.

Потенціал у просторі між електродами задається формулою:

$$U = K (-\alpha)^{\frac{4}{3}} \quad (3.4)$$

Для сферичного діода:

$$U = U_0 \frac{U\left(\frac{R}{R_k}\right)}{U\left(\frac{R_a}{R_k}\right)} \quad (3.5)$$

де U_0 – анодна напруга.

$U\left(\frac{R_a}{R_k}\right)$ - потенціал, який визначається відношенням $\frac{R_a}{R_k}$;

$U\left(\frac{R}{R_k}\right)$ - потенціал, який визначається відношенням $\frac{R}{R_k}$.

В задачі потрібно прагнути, щоб екіпотенційні криві у сферичному діоді наближалися за розташуванням і формою до екіпотенційних кривих сферичного конденсатора.

При аналітичних розрахунках виходять значні складності. Мюллер у своїх розрахунках користувався даними Шпангенберга, які були отримані за допомогою електролітичної ванни.

Потенціал поблизу анода описується виразом:

$$U(R) = U_a \left[1 - \left(\frac{R}{R_a} - 1 \right)^{\frac{\pi}{2\alpha}} \right]_{R \rightarrow R_a} \quad (3.6)$$

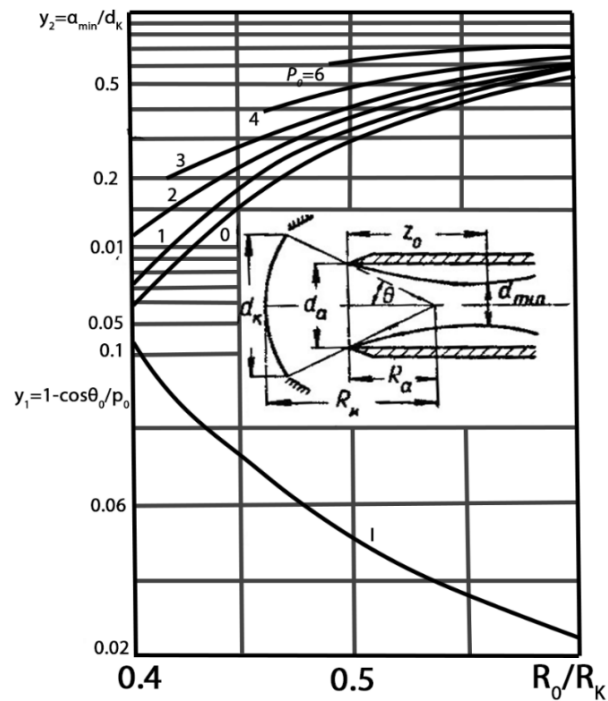


Рис. 3.2 – Розрахункові графіки Мюллера для електронної гармати

Для розрахунку гармати необхідно задати такі величини:

- щільність струму j_k (А/см)² ;
- найменший діаметр пучка d_{\min} (см).

- прискорювальна напруга U_0 (В);

- величина струму пучка I (А);

Розрахунок гармати проводиться наступним чином:

1) Визначається діаметр емітуючої поверхні катода :

$$d_k = 1.13 \cdot \sqrt{\frac{I}{j_k}} \quad (3.7)$$

2) Визначається величина первеансу та мікропервеансу:

$$p = \frac{I}{U_0^2} \quad (3.8)$$

$$p_0 = 10^6 \cdot p \quad (3.9)$$

3) За верхнім графіком рис. 3.2 з величиною p_0 і за відношенням $\frac{d_{\min}}{d_k}$

визначається відношення $\frac{R_a}{R_k}$.

4) З нижнього графіка рисунку 3.2, знаходиться відношення:

$$y_1 = \frac{1 - \cos \theta_0}{p_0}$$

Звідки виходить:

$$\theta_0 = \arccos(1 - y_1 \cdot p_0) \quad (3.10)$$

5) Визначається радіус кривизни катода :

$$R_k = \frac{d_k}{2 \sin(\theta_0)} \quad (3.11)$$

6) Визначається R_a , відстань анод-катод, діаметр отвору в аноді d_a ;

7) За кривими на рисунку (3.3) визначається положення кросовера пучка Z_0 .

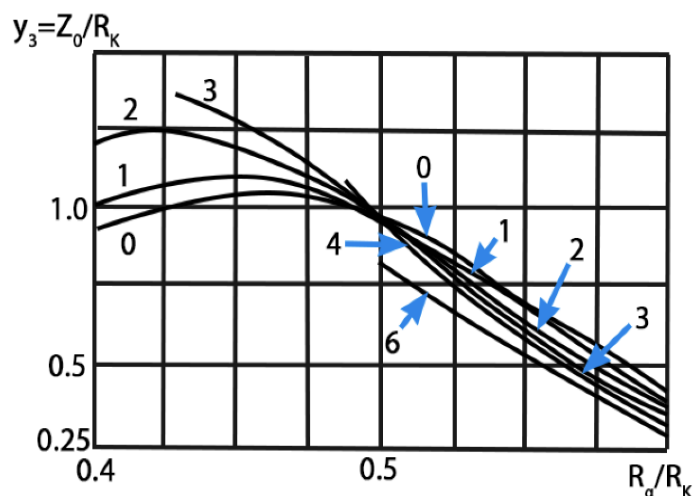


Рис. 3.3 – Розрахункові графіки для кросовера пучка гармати Мюллера.

Однак конструкція такої гармати Мюллерам має суттєві недоліки, серед яких виділяються:

- 1) Анод гармати має тонку вхідну трубку, а гармата розраховується за умови обстрілу анодного входу крайніми електронами пучка, тобто гармата мало придатна для роботи при високій анодній напрузі і за великих потужностей пучка;
- 2) Електрична міцність гармати низька, оскільки малі зазори між анодом, фокусуєчим та коригуючим електродами;
- 3) При ретельній експериментальній перевірці було виявлено, що структура пучка, сформованого гарматою Мюллера, має суттєві недоліки. Радіальний розподіл густини струму в пучку неоднорідний і змінюється зі зміною відстані від катода.

Також варто зазначити, що за допомогою гармат, заснованих на методі Мюллера, не можна отримати ламінарні потоки з постійною густиною струму по поперечному перерізу пучка. Є значні поперечні швидкості, які виникають через серйозну сферичну аберацію в полі лінзи анодного отвору.

Подібні ефекти спостерігаються і в гарматах з високим первеансом (тобто більше $2 \cdot 10^{-6} A/B^{3/2}$), які засновані на розрахунках за методом Пірса. Можна компенсувати похибку лінзи введенням сферичної аберації протилежного знаку в прискорювальну ділянку, наприклад, використовуючи гіперболічну форму поверхні катода, що емітує, щоб збільшити збіжність центральних електронних траєкторій щодо зовнішніх. Однак, для усунення аберації і отримання ламінарного потоку електронів у гарматах з великим первеансом та великою компресією променя, найвдалішим рішенням буде ввести магнітне поле в область формування пучка. Величина потоку через катод становить приблизно 0,4 - 0,55 всього потоку, причому необхідно прагнути до збігу розрахованих електронних траєкторій із силовими лініями магнітного поля. Попереднє дослідження магнітного поля, вибір форми наконечників проводяться в електролітичній ванні, а вже форма наконечників, а також величина поля остаточно вибираються експериментально.

Гармати з великим первеансом, значною компресією і магнітним полем у ділянці формування пучка досить широко поширені в потужних прогонових клістронах.

4 МЕТОД С. Н. ТРЕНЕВОЇ

Конструкції гармат згаданих вище, розрахованих за методом Мюллера і Пірса, мають суттєві недоліки:

По-перше, у їхніх конструкціях відсутній необхідний тепловий зазор між катодом і фокусуєчим електродом. А по-друге, профіль електродів гармат утворений сукупністю кривих вищих порядків.

Такі електроди мають складну форму, для виготовлення яких необхідно застосовувати спеціальні фрези, мало придатні для практичного застосування. Тому С.Н. Тренєва розробила метод розрахунку гармат для отримання конічних, порожнистих, клиноподібних, що сходяться, та інших пучків з електродами простої форми (конічних і циліндричних).

В якості основи було взято гармату сферичного типу (рисунок 4.1), яка складається з катода, анода та електрода, що фокусує. За допомогою даної гармати можна одержувати конусоподібні потоки електронів (порожністі або суцільні) з різними кутами сходження θ_0 .

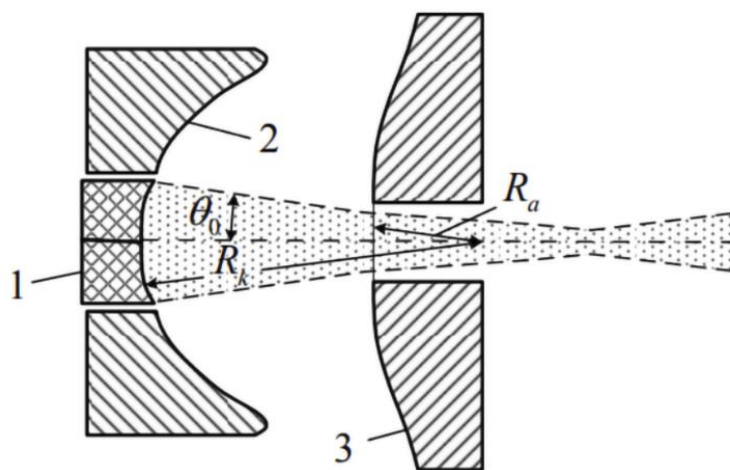


Рис. 4.1 – Ескіз сферичної гармати: 1 – катод, 2 - фокусуєчий електрод, 3 - анод.

Як уже зазначалося, необхідною умовою отримання інтенсивних конічних пучків є виконання граничних умов на їхній поверхні:

$$\left. \begin{aligned} U &= U_0 \left(\frac{\alpha^2}{\alpha_0^2} \right)^{\frac{2}{3}} \\ \frac{\partial U}{\partial r} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

де U_0 - потенціал анода;

U - потенціал на відстані ($S=R_k - R$) від катода за радіусом;

($S=S_0$ за $R = R_a$; R_k, R_a - радіуси кривизни катода й анода).

α^2 - табульована функція відношення R_k/R (табл.4), $\alpha=\alpha_0$ при $R = R_a$.

Спрощену форму електродів визначали в електролітичній ванні. Межа електронного пучка імітувалася пластинкою з ізоляційного матеріалу, у процесі дослідження визначали форму і співвідношення розмірів електродів, при яких уздовж границі пучка (ізоляційної пластинки) виконувалася умова 4.1. У результаті досліджень було розроблено купу конструкцій електронних гармат для клиноподібних і конічних пучків, але основна їх конструкція лишилася незмінною: котод, анод, фокусуєчий електрод.

Під час процесу вибору форми електродів гармат виявилось, що не можна домогтися повного збігу розподілу потенціалу вздовж границі, відповідно до умов, через викривляючу дію анодного отвору в ділянці анода і катода. Однак дані області можна зробити порівняно малими, як і самі відхилення.

Для розрахунку гармати задають: струм пучка I , прискорювальну напругу U_0 , радіус пучка на виході з гармати $r_{\Pi 0}$, кут θ_0 (для порожнистого пучка задають зовнішній і внутрішній радіуси $r_{\Pi B}$ і $r_{\Pi H}$, а також який-небудь із кутів θ_H, θ_B).

Первеанс пучка визначається формулою:

$$p = \frac{I}{U_0^{\frac{3}{2}}} = 927 \frac{\sin^2 \frac{\theta_0}{2}}{\alpha_0^2} \quad (4.2)$$

де U_0 - напруга, κB ;

I - струм, mA ;

Формула для порожнистого пучка:

$$p = 927 \frac{\sin^2 \frac{\theta_H}{2} - \sin^2 \frac{\theta_B}{2}}{\alpha_0^2} \quad (4.3)$$

Також, для прямолінійних границь пучка можна вважати:

$$\frac{\sin \theta_H}{\sin \theta_B} = \frac{r_{П.Н}}{r_{П.В}}$$

Далі визначається α_0^2 , потім (R_k / R_a) , яке відповідає (α_0^2) . Знаючи θ_0 і (R_k / R_a) за графіками побудованими С.Н.Треневою, для різних конструкцій гармат, можна знайти усі розміри електродів.

Такими гарматами практично можна користуватися для формування потоків з кутами θ_0 від 1° до 50° і (R_k / R_a) від 1,5 до 10. І тепер за допомогою кривих (рисунки 4.4, 4.5 і 4.6) можна визначити основні розміри гармати, для формування конічного пучка при умові $(\theta_0 < 25^\circ)$ і $(R_k / R_a) < 4$.

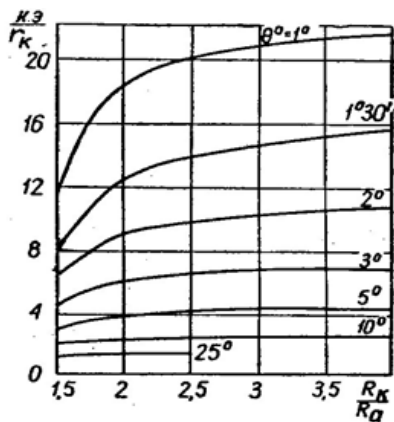


Рис. 4.4

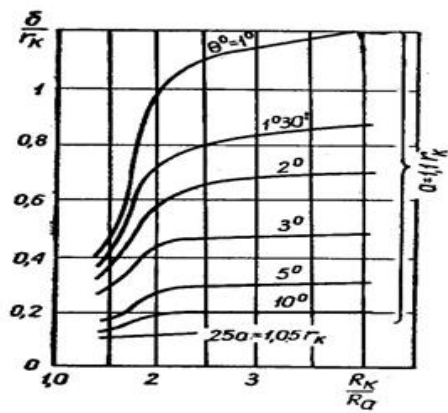


Рис. 4.5

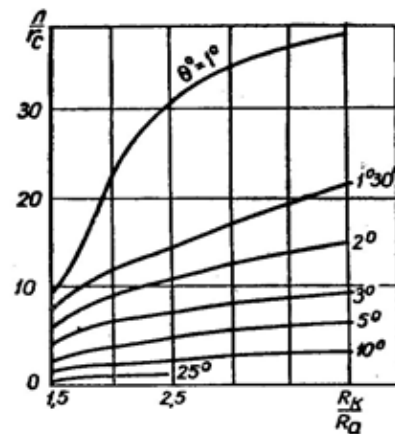


Рис. 4.6

На рисунку (4.7) наведено криві, за якими визначають допустимі відхилення від розмірів, зазначених на основних графіках.

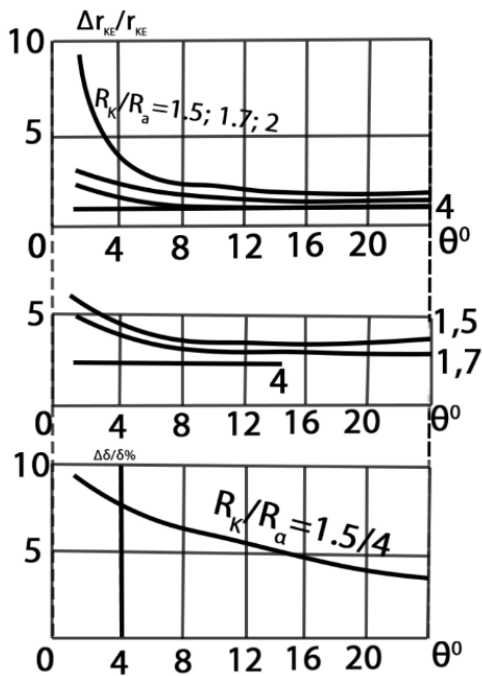


Рис. 4.7 – Допустимі відхилення в гарматах

Розміри діаметра фокусуєчого електрода на рівні, нижчому за емітуючу поверхню, не критичні.

Також слід зауважити, що гармати Треневої для полого пучка, що сходиться, мало придатні для практичного застосування. У даних гарматах важко зберегти трубчасту структуру пучка (особливо для внутрішньої його межі) на значних відстанях від катода в прогонових каналах приладів. Більш перспективними для отримання порожнистих пучків з великими первеансами є магнетронні гармати. Але всеж гармати Треневої дуже зручні для формування суцільних кінчних пучків.

У конструкції гармат передбачена можливість компенсації похибки розрахунку подачею деякої негативної напруги на фокусуєчий електрод. За допомогою гармат С.Н. Треневої можна забезпечити струмопровідність через анодний отвір близько (98-100 %) при нульовом потенціалі фокусуєчого електрода і розрахункового значення струму пучка.

Розподіл густини струму за перерізом пучка в гарматах Треневої за великих значень θ_0 і великого первеансу p приблизно такий самий, як і в гарматах Пірса та Мюллера.

РОЗДІЛ 2

5. ПРОВЕДЕННЯ РОЗРАХУНКУ І ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОННОЇ ГАРМАТИ ЗА МЕТОДОМ ПІРСА

В даній частині роботи буде проведено теоретичний пошук параметрів електронної гармати Пірса для різних форм пучка. Так як початкових параметрів немає, то будуть використані довільні числа в певних межах. На основі цього вже будуть розраховані відповідні параметри для побудови гармати Пірса.

5.1 Розрахунок параметрів гармати пірса для кінчного пучка

Для побудови гармати Пірса з кінчним пучком потрібно мати початкові параметри, а інші знаходити за формулами. Загальна модель кінчного пучка має вигляд на рисунку.

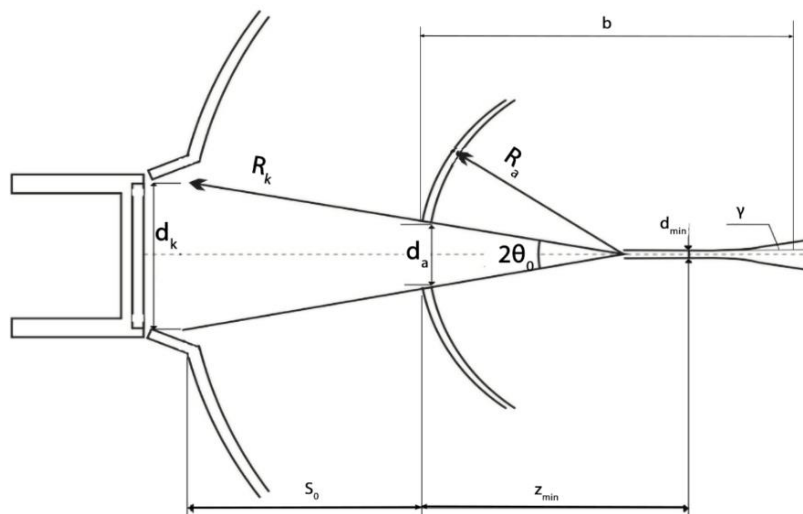


Рис. 5.1 – Модель кінчного пучка в гарматі Пірса

Для початкових значень задаймо:

$U_0 - 10$ кВ прискорювальна напруга;

$I_0 - 1$ А струм пучка;

$d_0 - 0,4$ см діаметр пролітного каналу;

$j_0 - 14$ А/см² густина струму на катоді.

Знайдемо діаметр катода:

$$d_k = 1.13 \cdot \sqrt{\frac{I}{j_0}} = 0.302 \text{ (см)}$$

Також знайдемо первеанс пучка:

$$P = \frac{I}{U_0^{3/2}} = 1 * 10^{-6} \text{ (A / B}^{3/2}\text{)}$$

Найменший діаметр пучка визначається за формулою:

$$d_{\min} = 0.7 * d_0 = 0.28 \text{ (см)}$$

По відношенню $d_{\min}/d_k = 0.92$ та графіку залежності мінімального діаметра пучка від відношення R_k/R_a , знаходимо останнє, де в результаті отримаємо $R_k/R_a \approx 1.5$. Тепер знаючи первеанс і відношення R_k/R_a , по розрахованим графікам 2.2 можемо знайти кут сходження θ_0 і кут виходу пучка із анодного отвору γ . В результаті маємо приблизно $\theta_0 = 10^\circ$ ($\pi/18 = 0.1745$) і $\gamma \approx 0,8$.

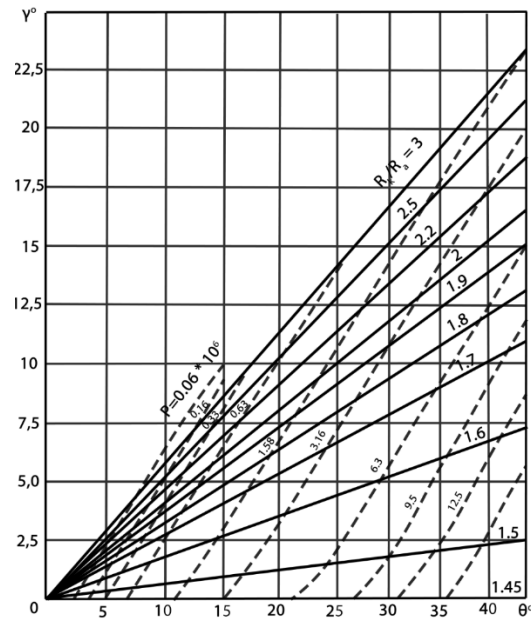


Рис. 5.2 – Розрахований графік, що пов’язує θ_0 , γ із значеннями первеансу та відношенням R_k/R_a

Тепер знайдемо радіус кривизни катода і анода:

$$R_k = \frac{d_k}{2 \cdot \tan(\theta_0)} = 0,85 \text{ (cm)}$$

$$R_a = \frac{R_k}{1.5} = 0,57 \text{ (cm)}$$

Знайдемо відстань катод-анод:

$$S_0 = R_k - R_a = 0.28 \text{ (cm)}$$

Діаметр пучка анодного отвору і сам отвір:

$$d_n = 2 * R_a * \tan(\theta_0) = 0.201 \text{ (cm)}$$

$$d_{a_n} = 1.1 * d_n = 0.22 \text{ (cm)}$$

По розрахованому графіку знаходимо відстань фокусу b і відстань до кросовера

Z_{\min} .

$$z_{\min} \Rightarrow \frac{z_{\min}}{R_k} = 0.1 = 0.086 \text{ (cm)}$$

$$b \Rightarrow \frac{b}{R_k} = 5 = 4.28 \text{ (cm)}$$

Далі знайдемо повний струм у сфері з тілесним кутом 4π (рад), де $R_k > R_a = -a^2$.

$$I_p = 29.33 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{U_0^{3/2}}{a^2} = 138.48 \text{ (A)}$$

Де $a^2 = 0.2118$.

Для конуса вирізаного з пів кутом θ_0 із сфери, струм пучка знаходиться за формулою:

$$I_{\theta_0} = 29.33 * 10^{-6} \cdot \frac{U_0^{3/2}}{a^2} \cdot \sin\left(\frac{\theta_0}{2}\right)^2 = 1.05 \text{ (A)}$$

Тоді напруга знаходиться за формулою:

$$U = \frac{1.051 \cdot I_{\theta_0}^{3/2} \cdot a^{4/3}}{\sin\left(\frac{\theta_0}{2}\right)^{4/3}} = 10.43 \text{ (кВ)}$$

Форму електрода для кінчного пучка визначається із графіка нижче.

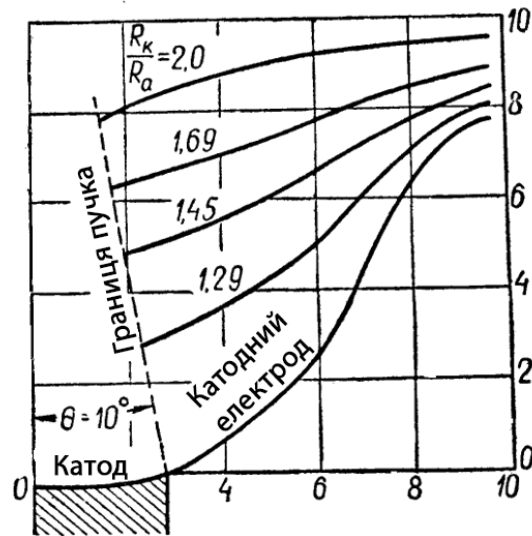


Рис. 5.2 – Форма екіпотенційних електродів для отримання конічного пучка з кутом збіжності (10°)

Форма анода вибирається по одній із екіпотенціальних кривих. У нашому випадку кут сходження $\theta=10^\circ$, а відношення $R_k/R_a \approx 1.5$. Тому і положення лінії буде приблизне до лінії 1.45. Тобто можна вважати, що задані теоретичні характеристики гармати відповідають стандартам конструкції Пірса і забезпечують правильне прискорення електронів, формуванню фокусування конічного пучка, забезпечення стабільності системи та мінімізації ефекту просторового заряду.

5.2 ПАРАМЕТРИ ГАРМАТИ ПІРСА ДЛЯ ПРЯМОЛІНІЙНОГО ПУЧКА

Для прямокутного (стрічкового) пучка спочатку задаємо ширину a і товщину b поперечного перерізу пролітного каналу $a = 0.8$ см, $b = 1.2$ см.

Тепер знайдемо розміри самого пучка:

$$a_p = 0.7 \cdot a = 0.56 \text{ (cm)}$$

$$b_p = 0.7 \cdot b = 0.84 \text{ (cm)}$$

Розміри катодного отвору такі самі $a_k = a_p$, $b_k = b_p$. За цими параметрами знайдемо площу катодної поверхні $S_k = a_k \cdot b_k = 0.4704 \text{ см}$. Задамо початкові струм і напругу.

$$I_0 = 1 \text{ A/cm}^2$$

$$U_0 = 10 \text{ кВ}$$

Знаючи ці параметри, розрахуємо густину струму у стрічковому пучку:

$$j_0 = \frac{I_0}{S_k} = \frac{1}{0.4704} = 2.126 \text{ (A / cm}^2\text{)}$$

Тепер знайдем відстань між катодом і анодом на границі пучка ($y=0$) з рівняння:

$$U_0 = A \cdot z^{\frac{4}{3}}$$

Тоді отримаємо:

$$z = 1.04 \text{ (см)}$$

$$\text{Де } A = 5.7 \cdot 10^3 \cdot j_0^{2/3} = 9423.88$$

Знайдемо первеанс пучка:

$$P = \frac{I_0}{U_0^{\frac{3}{2}}} = 1.00 \cdot 10^{-6} \text{ (A / B}^{3/2}\text{)}$$

Спробуємо знайти z за формулою із кутом Пірса 67.5° для значення $y=a_k$:

$$z_2 \Rightarrow y = z_2 \cdot \tan(67.5^\circ) \Rightarrow y = z_2 \cdot \tan\left(\frac{3 \cdot \pi}{180}\right)$$

$$z_2 = 0.23 \text{ (см)}$$

Знайдемо напругу фокуруючого електрода для різних значень відстані катод-анод:

$$U_a = A(z^2 + y^2)^{2/3} \cdot \cos\left(\frac{4}{3} \cdot \arctan\left(\frac{y}{z}\right)\right) = 9423.9 \cdot (1.04^2 + 0.56^2)^{2/3} \cdot \cos\left(\frac{4}{3} \cdot \arctan\left(\frac{0.56}{1.04}\right)\right) = 9377.99 \text{ (В)}$$

$$U_{a2} = A(z_2^2 + y^2)^{2/3} \cdot \cos\left(\frac{4}{3} \cdot \arctan\left(\frac{y}{z_2}\right)\right) = 9423.9 \cdot (0.23^2 + 0.56^2)^{2/3} \cdot \cos\left(\frac{4}{3} \cdot \arctan\left(\frac{0.56}{0.23}\right)\right) \approx -10 \cdot 10^{-7} \text{ (В)}$$

Отримані результати дають змогу оцінити, яка напруга потрібна для обраних значень відстані z .

Тепер використовуючи розраховані графіки знайдемо форму фокууючого ($U=0$) і прискорювального ($U=U_0$) електродів. Форму електродів для прямолінійного пучка можна знайти за графіком нижче:

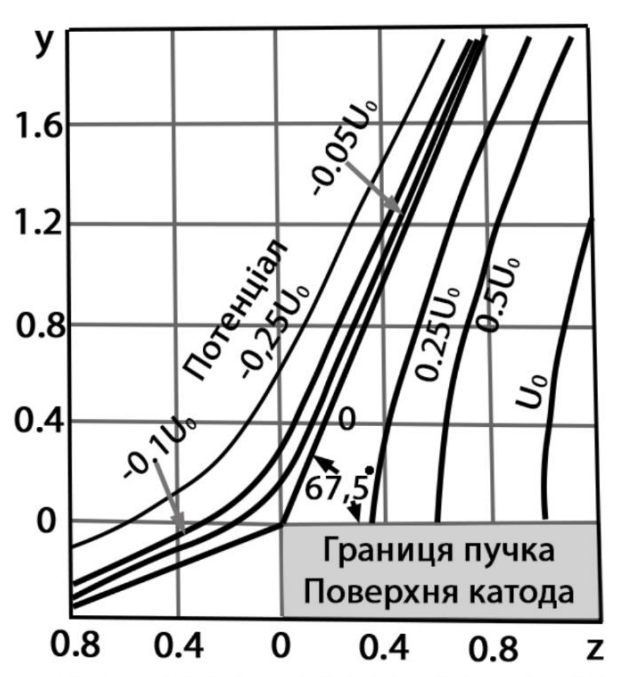


Рис. 5.3 – Екіпотенційні лінії поля, за якими можна визначити форму електродів

Вибираючи значення із графіку і підставляючи у формули 2.6, 2.7, можна отримати форми електродів. Наприклад, при $U=0$, $z=0.2$:

$$y = z \cdot \tan(67.5^\circ) = 0.2 \cdot \tan\left(\frac{3\pi}{8}\right) = 0.48 \text{ (см)}$$

При $U=10 \text{ (кВ)}$, $z=1 \text{ (см)}$, $A=9423.9$ тоді:

$$U_0 = A(z^2 + y^2)^{2/3} \cdot \cos\left(\frac{4}{3} \cdot \arctan\left(\frac{y}{z}\right)\right), \text{ тоді}$$

$$y = 0.517 \text{ (см)}$$

Ці значення відповідають формам електродів згідно графіку і дозволяють забезпечити високу якість пучка, запобігають його розширенню через просторовий заряд, формують ламінарний пучок, мінімізують аберації і роблять електронну гармату оптимальною для конкретного застосування.

5.3 ПАРАМЕТРИ ГАРМАТИ ПІРСА ДЛЯ ЦИЛІНДРИЧНОГО ПУЧКА

Задача по виборі форм екіпотенціальних поверхонь для створення суцільного циліндричного пучка в загальному вигляді не вирішується. Тут можна використати приблизні розрахунки або розподілити потенціал для вибору форми електродів за допомогою електролітичної ванни. Розрахунок параметрів циліндричної гармати почнемо із задання діаметру пролітного каналу $d_0 = 1.2 \text{ см}$, а також знаходження розмірів самого пучка, припустивши, що діаметр пучка і отвору однакові:

$$d_p = 1.2 \text{ см}$$

$$r_0 = d_p / 2 = 0.6 \text{ см}$$

$$r = r_0$$

Задаймо величину струму, площу поперечного перерізу пучка, і прискорювальну напругу:

$$I_0 = 1 \text{ (A)}$$

$$S_d = \pi d^2/4 = 1.13 \text{ (cm}^2\text{)}$$

$$U_0 = 10 \text{ кВ}$$

Знаючи ці параметри розрахуємо густину струму:

$$j_0 = \frac{I_0}{S_d} = \frac{1}{0.0707} = 0.88 \text{ (A/cm}^2\text{)}$$

Первеанс циліндричного пучка:

$$P = I_0 / U_0^{3/2} = 1 * 10^{-6} \text{ (A/B}^{3/2}\text{)}$$

Тепер за формулою знайдемо відстань між анодом і катодом:

$$U_0 = A \cdot z^{4/3}$$

$$z = 1.62 \text{ (cm)}$$

$$\text{Де } A = 5,7 * 10^3 j_0^{2/3} = 5250.97$$

Далі використовуючи рисунок для еквіпотенційних ліній поля по отриманню циліндричного пучка можна підібрати відповідну форму. Анод пушки поєднується з однією еквіпотенціальною лінією. Форма анода не є критичною. Наприклад, у нашому випадку $r/r_0 = 1$.

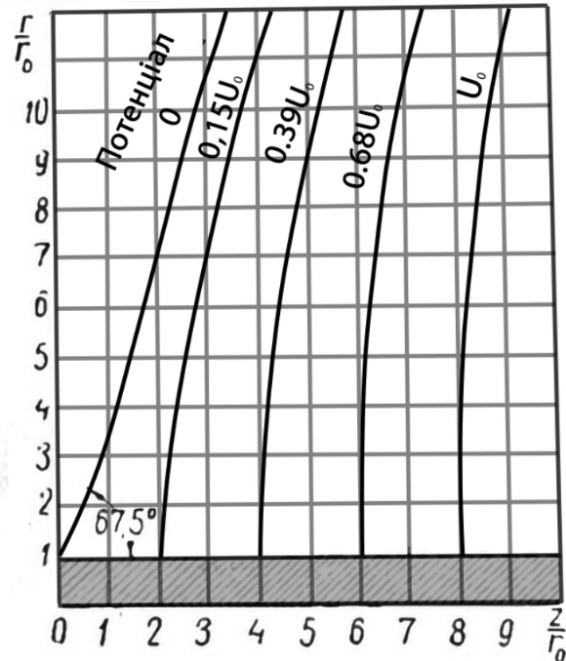


Рис. 5.4 – Еквіпотенційні лінії поля для отримання циліндричного пучка

Ще один варіант приблизного аналітичного рішення задачі формування пучка можна вирішити за допомогою рівняння, що було виконане Дайкеном:

$$U(r, z) = Az^{\frac{4}{3}} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \left(\frac{r_0}{z} \right)^{2k} \Phi_{2k} \left(\frac{r}{r_0} \right)$$

Де $\Phi_{2k} \left(\frac{r}{r_0} \right)$ – циліндричні функції, значення для яких (Φ_0, Φ_2, Φ_4) в залежності

від величини співвідношення r/r_0 можна знайти в таблиці 3. У нашому випадку значення $[1, 0, 0]$.

Тоді підставляючи значення у формулу отримаємо, при $r/r_0 = 1$, тоді:

$$U(r, z) = Az^{\frac{4}{3}} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \left(\frac{r_0}{z}\right)^{2k} \Phi_{2k}\left(\frac{r}{r_0}\right)$$

$$\text{При } U = 0, \left(\frac{r}{r_0}\right) = 1, k = 0, 1, 2 :$$

$$Az^{\frac{4}{3}} \cdot \left(\left((-1)^0 \cdot \left(\frac{r_0}{z}\right)^{2*0} \cdot \Phi_{2*0}\left(\frac{r}{r_0}\right) \right) + \left((-1)^1 \cdot \left(\frac{r_0}{z}\right)^{2*1} \cdot \Phi_{2*1}\left(\frac{r}{r_0}\right) \right) + \left((-1)^2 \cdot \left(\frac{r_0}{z}\right)^{2*2} \cdot \Phi_{2*2}\left(\frac{r}{r_0}\right) \right) \right) = 0$$

$z = 0$

Тоді при відомих інших параметрах, отримаємо $z=0, r=0.6$ см. Тобто відстань на початку і радіус.

$$\text{При } U = 10000, \left(\frac{r}{r_0}\right) = 1, k = 0, 1, 2 :$$

$$Az^{\frac{4}{3}} \cdot \left(\left((-1)^0 \cdot \left(\frac{r_0}{z}\right)^{2*0} \cdot \Phi_{2*0}\left(\frac{r}{r_0}\right) \right) + \left((-1)^1 \cdot \left(\frac{r_0}{z}\right)^{2*1} \cdot \Phi_{2*1}\left(\frac{r}{r_0}\right) \right) + \left((-1)^2 \cdot \left(\frac{r_0}{z}\right)^{2*2} \cdot \Phi_{2*2}\left(\frac{r}{r_0}\right) \right) \right) = 0$$

$z = 1.62$ (см)

Тобто це буде відстань до анода для циліндричного пучка із такими початковими параметрами. Дані теоретичні розрахунки вказують, що електронна гармата з такими характеристиками може працювати і відповідати основним критеріям гармати Пірса.

ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ РОБОТІ З ПЕРСОНАЛЬНИМ КОМП'ЮТЕРОМ

Робота за більшістю електронних пристроїв, як от смартфони, ноутбуки, комп'ютери, має психологічний і фізичний вплив на людину та її організм. Зараз проблеми здоров'я пов'язані з цим набули широкого поширення. Сам комп'ютер вважати шкідливим видом діяльності не можна, проте ризики для безпеки і здоров'я розповсюджуються на людей любого віку, а це в свою чергу призводить до неприємних наслідків.

Повна заборона використовувати комп'ютерну техніку неможливо, через її глибоке інтегрування в повсякденне життя, хоча можна просто знизити негативні наслідки використовуючи певні поради і правила. Ось декілька порад, що знизять ризики виникнення неприємних ситуацій при використанні персонального комп'ютера [11]:

- Потрібно розташовувати комп'ютер у кімнаті, де у вас достатньо простору для вільного переміщення і виходу з кімнати в екстреній ситуації.
- Місце розташування комп'ютера повинно бути близьким до електричної розетки, для запобігання розтягування дротів по підлозі. У випадку використання подовжувача, переконатися у його надійності та безпечності, щоб він не перегрівався і нікому не заважав ходити.
- Тримайте флору і напої подалі від комп'ютерних пристроїв.
- Перед використанням чи обслуговуванням комп'ютера, потрібно обов'язково прочитати інструкцію до цього пристрою і чітко її дотримуватися. В іншому випадку довірте це експертам.
- Електричні розетки не повинні бути перевантажені перехідниками. Краще використовувати настінні блоки із декількома розетками.

- Регулярно проводьте перевірку всього електрообладнання на наявність зношення кабелів чи пошкодження вилок.

Значний відсоток проблем організму пов'язаний із зором, м'язами, попереком та іншим. Серед поширених проблем при взаємодії з комп'ютером у користувачів, це травми, що виникають від постійного напруження м'язів (болі в зап'ясті, спині, шиї і тд.) перебування у незручній позі, механічною компресією. Це має більш професійну назву – «Синдром надмірного використання» чи «Професійний м'язово-скелетний розлад». Деяка доля проблем пов'язана із надмірним мерехтінням екрану, що може спричинити епілептичні напади. Проте особливе місце в комп'ютерно-технічних хворобах посідає проблеми з очима. Так як погіршення стану зору чи сильне навантаження на очі, є наслідком тривалої комп'ютерної роботи. Популярні симптоми це:

- Свербіж очей.
- Головний біль.
- Дискомфорт в очах.
- Труднощі із зоровим фокусуванням.

Тому варто виділити кілька порад, що допоможуть уникнути даних ситуацій:

- Розміщуйте екран, клавіатуру та миш прямо перед собою.
- Уникайте тривалого використання комп'ютера, для цього вірно організуйте робочі навантаження.
- Перед роботою відрегулюйте крісло(стілець) на якому ви сидітимете у найзручніше положення.
- Під час роботи за комп'ютером зберігайте правильну поставу.
- Використовуйте підставки для зап'ястя для відпочинку у проміжках між набором тексту.

- Уникайте тривалого нахилання та згинання шиї при роботі з документами, наприклад можна використовувати тримачі (підставки), щоб тримати текст перед собою. Зазвичай – це розташування під прямим кутом відносно столу.
- У випадку моніторів, регулюйте їх висоту для мінімізації рухів голови та шиї.
- Заздалегідь перевіряйте вільний простір під робочим місцем, ваші ноги повинні мати місце для рухів.
- Освітленість робочого місця повинна бути постійною .
- Потрібно регулярно провітрювати та підтримувати вологість повітря на робочому місці.
- Щоб розслабити очі, у переривах дивіться на віддалені об'єкти, це дасть зору відпочинок.
- Регулярно перевіряйте стан зору у лікаря. Це допоможе виявити проблеми на ранніх стадіях.
- Тривала робота за комп'ютером може спричинити стрес, для уникнення якого потрібно запобігати перевантаження на роботі та робити часті перериви.

Також не варто забувати про правильну поставу за комп'ютером, нижче наведено більш точне пояснення пункту. Перш за все, правильною позою вважають положення, при якому ступні людини знаходяться на підлозі або підставці для ніг, тоді частина рук від плечей до ліктів розташована вертикально. Стегна в свою чергу – горизонтально. Голова в цей час знаходиться в нахилі під кутом 15-20°, а ліктьовий суглоб – під кутом 70-90°. В цей час, зап'ястя має бути зігнуто не більше чим під кутом 20°(градусів). Крісло має повторювати форму спини, маючи вигин в області шиї та поясниці[12,13,20].

Якщо дотримуватися даних порад, то можна максимально знизити негативний вплив від комп'ютера та підняти загальну ефективність роботи.

ВИСНОВОК

В наведені роботі було представлено короткий огляд різних видів фокусуєчих пучків, а також основні вимоги до електронної пушки, яка формує інтенсивні електронні потоки. Серед різних розглянутих методів, метод Пірса виділяється ефективністю і простотою. Він дозволяє отримувати пучки для різноманітних цілей. В роботі розглядалися форми суцільних електродів Пірса для формування основних типів пучків. Проте в практичному застосуванні, гармати Пірса використовуються для створення інтенсивних пучків, які проходять через анодний отвір у пролітний канал приладу. Але у наведених розрахунках не береться до уваги дія анодного отвору.

Відомо, що анодний отвір по різному впливає на електронний пучок гармати. Він може виступати у якості діафрагми, яка спричиняє розсіювальну дію на пучок і тоді розрахунковий кут збіжності на виході із анодного отвору може зменшуватися. Наявність анодного отвору спричиняє зменшення величини градієнта потенціалу в центрі катода, а це в свою чергу приводить до того, що величина первеансу, підрахованої для даної пушки, в результаті виявляється в деяких випадках значно меншою. При практичному застосуванні у більшості випадків прагнуть зменшити відстань між анодом і катодом, тому що при збільшенні первеансу гармати потребується зближення катода і анода. З цього впливає одна із проблем в отриманні електронних пушок із великим первеансом.

У даній роботі було розраховано електронні гармати Пірса для формування кінчного, стрічкового(прямолінійного) і суцільного циліндричного пучків. Перед початком розрахунків, було обрано початкові дані, що є типовими для таких пушок, а саме анодну напругу, струм і деякі розміри. Для стрічкового пучка, за формулами і графіками отримали такі характеристики: $U_0 = 10 \text{ kV}$, $I=1 \text{ A}$, $a \times b = y \times x = 0.56 \times 0.84 \text{ см}$, $j_0 = 2.13 \text{ A/cm}^2$, $P=1 \cdot 10^{-6}$. Також були визначені відстані анод-катод та розміри фокусуєчого електрода. Отримані задовільняють умови гармати Пірса для стрічкового пучка. Наступним розраховували для циліндричного пучка, але для нього немає точного

аналітичного розрахунку, тому дані приблизні, хоча вони також підходять для гармати Пірса.

Найскладнішим було розрахувати гармату для формування конічного пучка. Підібравши початкові параметри: $U_0 = 10 \text{ kV}$, $I = 1 \text{ A}$, $d_0 = 0.4 \text{ см}$, $j_0 = 14 \text{ A/cm}^2$, $P = 1 * 10^6$. Для сферичної гармати, було знайдено, радіуси катода і анода, відстань між ними, діаметри отворів для пучка, відстані його фокусу, кути сходження і розходження, повний струм сфери, напругу і струм потоку. Форма анода вибрали по одній із еквіпотенціальних кривих. Це дало змогу підтвердити, що задані теоретичні характеристики гармати відповідають стандартам конструкції Пірса і забезпечують правильне прискорення електронів, формуванню, фокусуванню конічного пучка, забезпеченням стабільності системи та мінімізації ефекту просторового заряду.

Гармати з такими параметрами можуть використовуватися в різних областях. Наприклад, конічний пучок має велику густину струму, що забезпечує високу енергію в локальній зоні. Це дозволяє застосовувати його в прискорювальній техніці, електронно-променевої обробці, літографії і тд. Стрічковий пучок може застосовуватися для сканування, електронно-променевої стерилізації, тонкоплавкого покриття та багато інших сфер. Циліндрична форма створює стабільний пучок, що дає змогу використання в мікроскопії, медичній техніці та іншому. Задані напруга, струм і первеанс є оптимальними для більшості задач.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Пірс Дж. Р. Теорія і розрахунок електронних пучків .- М.: Радянське радіо, 1956.- 216 с.
2. Погребняк А.Д. Термічний відпал за допомогою електронного пучка та його вплив на структуру та фазовий склад гібридних покриттів /О.Д. Погребняк, Ю.О. Кравченко, В.С. Кшнякін // Вісник Сумського державного університету. Серія: Фізика, математика, механіка, - 2004, - №10(69)
3. Рудь М. П. Визначення розподілу густини струму стрічкового електронного потоку / Рудь М. П. // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Спецвипуск – 2007. – С.148 – 150.
4. Теплові процеси під час електронної обробки оптичних матеріалів та експлуатації виробів на їхній основі / [Ващенко В. А., Котельников Д. І., Лега Ю. Г. та ін.]. - Київ.: Наукова думка, 2006. - 368 с.
5. Мельник І.В., Починок А.В. Алгоритм розрахунку фокальних параметрів профільних електронних пучків, які формуються газорозрядними гарматами. – Системні дослідження та інформаційні технології. 2019, №2.
6. Канашевич Г.В. Термічна електронно-променева обробка скляних плат оптичних інтегральних схем. Монографія / Г.В.Канашевич // Укр. Деп. в НИИ ТЭХИМ, Черкасы, 2002. – 165 с
7. Каденко І. М., Плюйко В.А. Фізика атомного ядра та частинок : підручник. 2-ге вид., переробл. і доповн. Електронна версія. К. 2019, 467 с.
8. Плюйко В.А., Солодовник К.М. Збірник задач з ядерної фізики з розв'язками, навчальне видання, Київ. 2020. 50 с
9. Строїтелева Н.І., Кісельов Є.М. Фізика твердого тіла. Навчальний посібник. ЗДІА, Запоріжжя, 2018. 145 с.
10. Фізичні методи вивчення властивостей матеріалів : підручник / Е.К. 9 Посвятенко, Р.В. Будяк, О.В. Мельник, В.Г. Нікітін. – К. : НТУ, 2019. – 184 с.

11. Коваленко, Ю. І., Бондаренко, М. О., & Антонюк, В. С. (2020). Дослідження вольт-амперних характеристик дротяної електронної гармати Пірса для електронно-променевої мікрообробки діелектриків. *Технічна інженерія*, (1(85), 53–59.
12. Слободян Ф. Охорона праці при роботі з комп'ютерною технікою / Ф. Слободян // Охорона праці і пожежна безпека. – 2017. - № 9. – С.31-37
13. Грибан В.Г., Негодченко О.В. Охорона праці. Навч.посіб. К.: ЦУЛ, 2020. 280 с.
14. Основи охорони праці. навчально-методичний посібник для студентів вищих навчальних закладів педагогічного напрямку / [Укладачі: В.І. Кошель,Г.П. Сав'юк, Б.С. Дзундза] – Івано-Франківськ: НАІР, 2020. – 182 с.
15. Melnyk, I., Tyhai, S., Pochynok, A. Universal Complex Model for Estimation the Beam Current Density of High Voltage Glow Discharge Electron Guns. // *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2021, 152, с.
16. Лобода, П. І. Рентгеноструктурний аналіз матеріалів у дисперсному стані : навч. посібник / П. І. Лобода, О. П. Карасевська, І. Ю. Троснікова ; НТУУ “КПІ”. — Київ : Центр учбової літ., 2020. — 140 с.
17. Шматько А.А. Електронно-хвильові системи міліметрового діапазону. Том 1 / Шматько О.О. - Харків : ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2008.- 464 с.
18. Mazmanishvili A.S., Reshetnyak N.G., Shovkoplyas O.A. Beam and sector modes of electron fluxes in cylindrical magnetic field of magnetron gun. *Journal of Nano- and Electron Physics*. 2020. Vol. 12, № 3, 03001.
19. Проценко І.Ю., Черноус А.М., Проценко С.І. Прилади і методи дослідження плівкових матеріалів: Навчальний посібник. - Суми: Вид- во СумДУ, 2020.-270 с.
20. Яковенко А.В. Вплив фокусуєчого магнітного поля на електронно-хвильові процеси у підсилювачі на базі відкритого хвилеводу. Бакалаврська робота. Сумський державний університет, 2023.

21. Воробьев Г.С., Дрозденко А.А., Дрозденко Д.А. Поликапиллярная оптика как метод фокусировки рентгеновского излучения// Науково–технічна 31 конференція фізика, електроніка та електротехніка (ФЕЕ–2011). – Суми: СумДУ. – 2011. – С. 69.
22. Williams D.B., Carter C.D. Transmission Electron Microscopy // A Textbook for Materials Science. Plenum Press, New York, London, 1996, 729 p.
23. Данильченко С.М., Кузнецов В.М., Проценко І.Ю. Рентгенодифракційні методи дослідження кристалічних матеріалів: навчальний посібник. - Суми: СумДУ, 2019. -135 с.
24. L. Chen, Z. Chen, Z. Li, J. Hu, and S. X. Tian, “Time-delayed mass spectrometry of the low-energy electron impact with a liquid beam surface,” Rev. Sci. Instrum. 89, 103102 (2018).
25. Z. Barba, K. Bucar, S. Krusic, and M. Zitnik, “Magnetic bottle electron spectrometer driven by electron pulses,” Rev. Sci. Instrum. 91, 073108 (2020).
26. E. Wang, X. Ren, M. Gong, E. Ali, Z. Wang, C. Ma, D. Madison, X. Chen, and A. Dorn, “Triple-differential cross sections for (e, 2e) electron-impact ionization dynamics of tetrahydrofuran at low projectile energy,” Phys. Rev. A 102, 062813 (2020).
27. Проценко І. Ю. Прилади і методи дослідження плівкових матеріалів : навчальний посібник / А. М. Черноус, С. І. Проценко / За загальною редакцією проф. І. Ю. Проценка. – Суми : Вид-во СумДУ, 2007.– 264 с.
28. Кармазін В. В. Курс загальної фізики: навч. посіб. для вищ. навч. закл./ В. В. Кармазін, В. В. Семенець. – Київ : Кондор, 2009. – 786 с.
29. Локальні методи досліджень: підручник для студентів спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» / Загородній В.В.; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019, 323 с.
30. Методи дослідження структури тонких плівок : підручник / Р.В. Зайцев, М.В. Кіріченко, Л.В. Зайцева та ін. – Харків: ФОП Бровін О.В., 2021. – 320 с. ISBN 978-617-8009-16-8.
31. Інтегровані технології обробки матеріалів [Текст]: підручник / Е.С. Геворкян, Л.А. Тимофєєва, В.П. Нерубацький та ін. – Харків: УкрДУЗТ, 2016. – 238 с.