

М. В. ДЕРЕЛОВСЬКИЙ, С. М. ДЯЧЕНКО, В. А. ПРУС

МЕТОДИ АНАЛІЗУ ПОТУЖНИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПУЧКІВ

Останнім часом зросла необхідність у формуванні потужних електронних пучків. При розробці електронно-оптичних систем для цього виникає потреба експериментального дослідження структури пучків і визначення їх основних параметрів.

Найважливішою характеристикою електронного пучка є розподіл густини струму в його поперечному перерізі. Цю залежність звичайно визначають спеціальними приладами — тестерами з відповідним моделюванням електричних і магнітних полів, що дозволяє значно зменшити теплове навантаження вимірювального елемента тестера.

Зменшення теплового навантаження досягається також використанням імпульсного режиму живлення електронної гармати. В цьому випадку амплітуда імпульсу прискорюючої напруги, яка подається на електроди гармати, може дорівнювати робочій напрузі останньої.

В обох випадках відмінність умов дослідження пучка від умов експлуатації зменшує в деякій мірі цінність одержаної інформації. При будь-якому моделюванні режиму електронної гармати подібною зміною електричного та магнітного поля в ній або заміною неперервного режиму на імпульсний не беруться до уваги зміна умов формування об'ємного заряду іонів у пучку, зміна магнітних властивостей екранів, незмінність температури катода та інші фактори, що зрештою обумовлюють зміну розподілу струму в пучку. Тому бажано проводити дослідження на режимах, які мало відрізняються від експлуатаційних.

Є ряд експериментальних методів дослідження пучка. Практично всі вони засновані на введенні в пучок рухомих вимірювальних структур.

При дослідженні тонких пучків (0,1 ÷ 0,5 мм) геометричні розміри вимірювального елемента також малі, що обмежує максимальне значення потужності та густини енергії електронів пучка, який попадає на нього. Запропонований тут метод дослідження пучка по його «рентгенівському зображенню» є одним з варіантів «рентгенівської камери обскури» і відрізняється від інших рентге-

нівських методів тим, що з його допомогою можна вивчати потужні пучки в неперервному та імпульсному режимах, не звертаючись до моделювання. Схема приладу, придатного для дослідження пучків цим методом, вказана на рис. 1.

У цьому приладі електрони досліджуваного пучка 1 з великою швидкістю V_e опромінують вольфрамову мішень 2. «Рентгенівське зображення» плями електронів на мішені 2, що виникає, проектується через отвір D_1 у танталовому екрані 3 на люмінесцентний екран 4. Звідси перетворене люмінофором зображення плями проектується об'єктивом 5 на поверхню діафрагми 6 з малим отвором D_2 . Для переміщення і відліку положення отвору є механізм 7. Світловий потік, який проходить через отвір D_2 , попадає далі на фотокатод фотоелектронного помножувача 8, струм якого, як показано далі, лінійно зв'язаний з струмом пучка на відповідній частині поверхні мішені.

При опромінюванні поверхні вольфраму електронами з енергією до 20—30 кВ виникає гальмівне рентгенівське випромінювання з неперервним спектром. Повна потужність цього випромінювання є лінійною функцією струму і визначається формулою

$$P = KZU^2I,$$

де Z — атомний номер металу, з якого зроблена мішень;

U — прискорююча напруга;

I — струм пучка;

$$K = 0,8 \cdot 10^{-6}.$$

У той же час світловий вихід люмінофора K_b при малому опромінюванні люмінесцентного екрана рентгенівськими променями пропорціональний потужності останніх, а струм на виході фотопомножувача лінійно залежить від світлового потоку, що попадає на фотокатод.

Таким чином, система в цілому лінійна і придатна для визначення густини струму в поперечному перерізі досліджуваного пучка.

Для одного з варіантів приладу, побудованого за розглянутою схемою, були знайдені основні енергетичні співвідношення. При цьому виявилось, що коли густина струму в пучку $i = 0,1 \text{ а/см}^2$, $U_0 = 10 \text{ кВ}$, то струм на виході фотопомножувача ФЭУ-35 $I_\phi = 2 \cdot 10^{-9} \text{ а}$, що на порядок більше темного струму при кімнатній температурі. В цьому випадку розміри основних елементів приладу були такими (рис. 1):

$$f_1 = 10 \text{ мм}; \quad f_3 = 75 \text{ мм}; \quad f_2 = 10 \text{ мм}; \quad f_4 = 750 \text{ мм};$$

$$D_1 = 0,03 \text{ мм}; \quad D_2 = 0,55 \text{ мм}.$$

Об'єктив 5 мав фокусну віддаль $F = 75 \text{ мм}$, відносний отвір 2,8 і роздільну здатність $N = 30 \text{ лін/мм}$. За люмінофор взятий ZnS-Ag з виходом люмінесценції $K_b = 15,5 \text{ ім/ет}$. [2]. Спектр

випромінювання цього люмінофора добре погоджується з спектральною характеристикою чутливості фотокатода ФЭУ-35 [3].

Максимальне значення струму та його максимальна густина, що їх можна виміряти в пучку, визначаються умовами тепловідводу від поверхні вольфрамової мішені без її перегрівання ($T_{\text{макс}} = 2200^{\circ}\text{C}$). Температуру на поверхні мішені можна знайти з диференціального рівняння теплопровідності. Розв'язанням цього

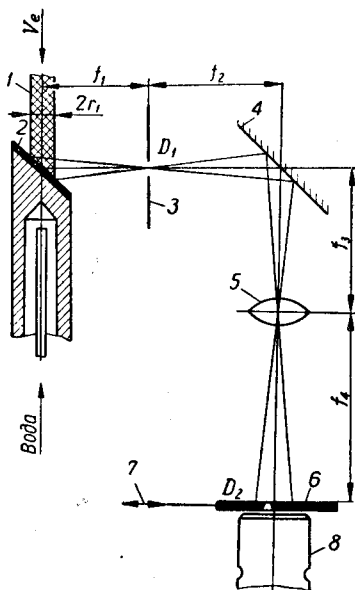


Рис. 1. Принципова схема приладу для дослідження електронних пучків:

1 — пучок електронів; 2 — вольфрамова мішень; 3 — екран; 4 — люмінесцентний екран; 5 — об'єкт; 6 — діафрагма; 7 — механізм переміщення діафрагми; 8 — фотопомножувач.

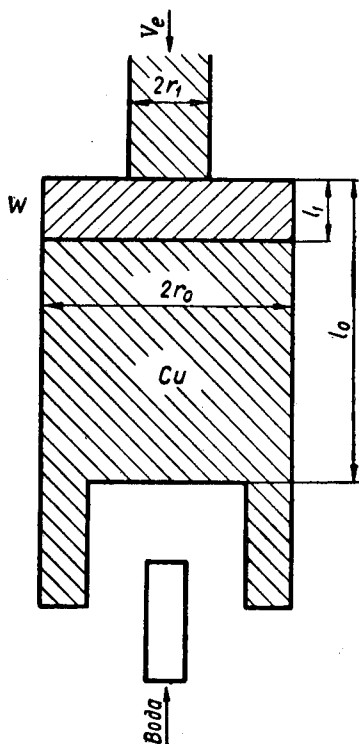


Рис. 2. Ідеалізована конструкція анода:

$2r_1$ — діаметр пучка електронів; $2r_0$ — діаметр мідного анода; l_1 — товщина вольфрамової мішені; l_0 — повна діюча довжина анода.

рівняння з прийняттям спрощувальних умов [4] одержано графіки, на яких вибираються оптимальні розміри елементів анода (товщина мішені, діаметр анода та ін.), якщо задані параметри вимірюваних пучків (U_0 , T_0 , r_1) або граничні параметри пучка по конкретних розмірах наявного приладу.

На рис. 2 наведена розрахункова схема анода, відповідно до якої при $l_0 = 2r_0$ по даних, одержаних внаслідок розв'язання рівняння теплопровідності [4], побудований графік (рис. 3) для

вибору товщини вольфрамової мішені. Оптимальна товщина її залежить від розмірів пучка r_1/r_0 і відношення температур на поверхні вольфраму, оберненої до пучка T_f і до міді T_g . У нашому випадку $T_f = 2200^\circ\text{C}$ обрана для забезпечення малої швидкості випаровування вольфраму ($P_w = 5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст.).

На цьому ж рисунку для наявного приладу з відношенням $l_1/l_0 = 0,2$ показана лінія максимальної потужності досліджуваного пучка [4] $P_{\text{макс}} \left(\frac{r_1}{r_0} \right)$.

Якщо передбачається дослідження пучків з дуже великою густиною енергії, можна перейти до імпульсного режиму роботи.

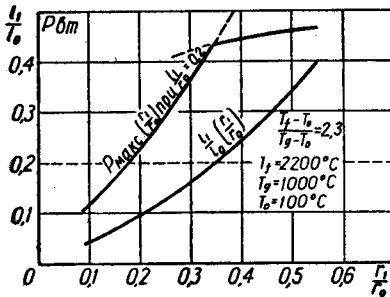


Рис. 3. Графік для вибору оптимальної товщини вольфрамової мішені на мідному аноді:

r_1 — радіус пучка; r_0 — радіус анода; l_1 — товщина мішені; l_0 — діюча довжина анода; T_f — температура вольфраму в центрі мішені; T_g — температура спаю Cu—W під центром мішені; T_0 — температура в місці теплообміну з водою.

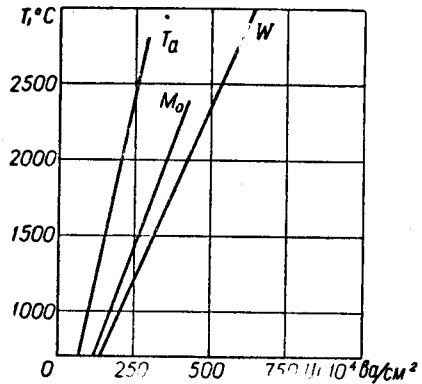


Рис. 4. Графік для визначення температури поверхні мішені при імпульсному опроміюванні її електронами.

При цьому граничне значення навантаження мішені знаходять розв'язанням рівняння теплопровідності для нестационарного режиму [5]. Розв'язання цього рівняння для одного імпульсу тривалістю 1 мксек показано на рис. 4 лінією $T_i = f(ui)$. Тут u — швидкість пучка електронів, v ; i — густина струму, а/см²; T_i — температура поверхні мішені на кінець імпульсу. Оскільки $T_i = \sqrt{\tau}$, де τ — тривалість імпульсу, за цим графіком можна визначити температуру для τ . Вибір частоти повторення неважко зробити, виходячи з того, що

$$T_{\text{макс}} \leq T_f + T_i, \quad (1)$$

де $T_{\text{макс}}$ — максимальна температура поверхні мішені в центрі плями, опроміюваної послідовністю імпульсів;

T_f — температура в центрі плями, яка визначається середньою потужністю пучка;

T_i — добавка температури від дії імпульсу, яка визначається по графіку рис. 4.

Приймаючи $T_{\text{макс}} = 3000^\circ\text{C}$ як максимальну температуру при імпульсному нагріві, $T_f = 2200^\circ\text{C}$ — максимальну допустиму середню температуру мішені, яка залежить від середньої потужності пучка, і користуючись умовою (1), визначаємо частоту повторення імпульсів.

Застосування для люмінесцентного екрана люмінофора $\text{ZnS} - \text{Ag}$, який має час післясвічення значно більший, ніж тривалість імпульсу, приводить до того, що струм на виході фотопомножувача стає пропорціональним інтегральній дії імпульсів рентгеновського випромінювання на люмінофор і, таким чином, середній потужності пучка. З цього видно, що для збільшення відношення сигнал/шум у системі бажано працювати при якомога більшій середній потужності пучка. Похибка у визначенні діаметра електронного пучка Δ тестером по розглянутій схемі (рис. 1) в основному визначається трьома складовими: Δ_1 — похибкою, яка вноситься першою діафрагмою D_1 ; Δ_2 — похибкою, що вноситься об'єктивом; Δ_3 — похибкою, яка вноситься другою діафрагмою D_2 . Звідси

$$\Delta = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2}.$$

Відповідно до рис. 1

$$\Delta_1 = \frac{D_1}{2r_1} \left(1 + \frac{f_1}{f_2} \right);$$

$$\Delta_2 = \frac{f_1}{N \cdot 2r_1 f_2};$$

$$\Delta_3 = \frac{D_2}{2r_1} \cdot \frac{f_1 f_3}{f_2 f_4}.$$

Якщо прийняти $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3$, задаючись величинами Δ , N , f_1 , f_2 , f_3 , f_4 , можна визначити розміри діафрагм $\frac{D_1}{2r_1}$, $\frac{D_2}{2r_1}$.

Крім вказаних похибок, специфічним для приладу є «розповзання» зображення на люмінесцентному екрані (рис. 1) [4] і вплив просторової діаграми рентгеновського випромінювання. Ці помилки можуть бути дуже малими при правильному виборі товщини і властивостей люмінесцентного покриття екрана, а також величин $\frac{f_2}{f_1}$ і $\frac{f_1}{2r_1}$. Похибка у визначенні діаметра пучка за рахунок неперпендикулярності мішені 2 до осі пучка 1 і вплив геометричних спотворень зображення пучка в площині другої діафрагми можуть бути усунені правильним вибором напрямку переміщення цієї діафрагми.

Часто, для кращого розуміння процесів, які відбуваються

в ЕОС, одночасно з одержанням кількісних даних про пучок бажано візуально стежити за загальною картиною розподілу струму в ньому. На рис. 5 показано варіант тестера, в якому можна проводити подібні дослідження пучків з дуже великою густиною енергії. У цьому тестері використовується термовипромінювання розжареної поверхні вольфрамової мішені, яка опромінюється пучком. Розподіл температури в плямі електронів на мішені залежить від густини струму в пучку так [5]:

$$T_i = \frac{0,24iu \sqrt{\tau}}{\sqrt{K \cdot C_p \gamma}}, \quad (2)$$

де T_i — температура поверхні мішені на кінець дії імпульсу, °С;
 i — густина струму в поперечному перерізі пучка, а/см^2 ;
 u — напруга пучка, в;
 K — теплопровідність, $\text{кал/см} \cdot \text{сек}$;
 C_p — теплоємність, $\text{кал/г} \cdot \text{град}$;
 γ — густина, г/см^3 .

Очевидно, якщо виміряти температуру якої-небудь точки на поверхні мішені, можна визначити відповідну їй густину струму. Щоб спростити користування приладом, за формулою (2) побудовані графіки $T_i = f(ui)$ для W, Mo, Ta. Графіки побудовані для $\tau = 1 \text{ мксек}$ і можуть бути легко перераховані для іншої тривалості імпульсу. Частота повторення імпульсів у даному випадку повинна бути настільки малою, щоб можна було нехтувати нагрівом мішені за рахунок середньої потужності пучка. Принципова схема тестера наведена на рис. 5. Електронний пучок 1 опромінює мішень 2, яка являє собою пластинку із тугоплавкого металу (W, Mo, Ta), напаяну на охолоджуваний мідний анод.

Зображення розжареної пучком електронів плями відбивається дзеркалом 3 через об'єтив 4 на поверхню діафрагми з отвором 5, що переміщується механізмом 6. Поверхня діафрагми, обернена до об'єктива, покрита білим дифузно розсіювальним шаром, завдяки чому можна бачити зображення плями на ньому через вимірювальний мікроскоп 9. Частина потоку променистої енергії попадає через малий отвір D в діафрагмі 5 на катод фотопомножувача 8.

Між фотопомножувачем і діафрагмою є вузькосмужний оптичний фільтр 7, необхідний для вимірювання температури поверхні мішені по струму фотопомножувача. Особливістю цього тестера є те, що в ньому зручно досліджувати гранично потужні та тонкі пучки електронів в імпульсному режимі. Похибка, що її дає цей прилад, — «розповзання» температури в плямі. Цю похибку у визначенні краю нагрітої зони Z можна обчислити за формулою

$$Z < 2 \sqrt{\frac{k\tau}{C_p \gamma}} \cdot \sqrt{-\ln \frac{T_i}{T_{i0}}},$$

де T_i — температура поверхні вольфраму, оберненої до пучка;
 T_{i0} — температура поверхні мішені на відстані Z від нагрітої ділянки вздовж поверхні (графіки на рис. 6 побудовані для $T_{i0} = 700^\circ \text{C}$ і $\tau = 1 \text{ мксек}$).

Істотним недоліком цього методу вимірювання розподілу густини струму в пучку є обмежений діапазон вимірюваних значень густини струму без зміни режиму роботи приладу. Так, якщо взяти за нижню межу вимірюваної температури $T_{i\text{мін}} = 700^\circ \text{C}$, то для вольфраму при $T_{i\text{макс}} = 3000^\circ \text{C}$ і $\tau = 1 \text{ мксек}$: $i_{\text{макс}} = 630 \text{ а}$, $i_{\text{мін}} = 145 \text{ а}$. Розширити діапазон вимірюваної густини струму можна, якщо зменшити температуру $T_{i\text{мін}}$ фотопомножувачем чутливого до інфрачервоної частини спектра. Як і в першому варіанті тестера, де використовується рентгенівське випромінювання, тут також не-

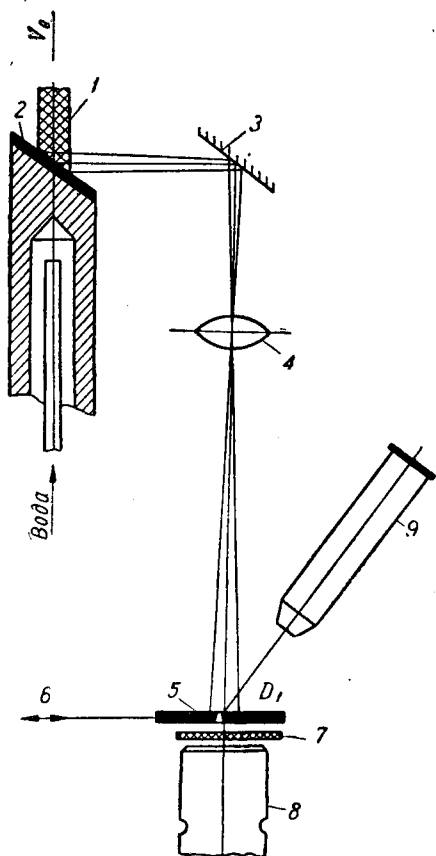


Рис. 5. Принципова схема приладу для дослідження електронних пучків: 1 — пучок електронів; 2 — мішень; 3 — дзеркало; 4 — об'єктив; 5 — діафрагма; 6 — механізм переміщення діафрагми; 7 — оптичний фільтр; 8 — фотопомножувач; 9 — мікроскоп.

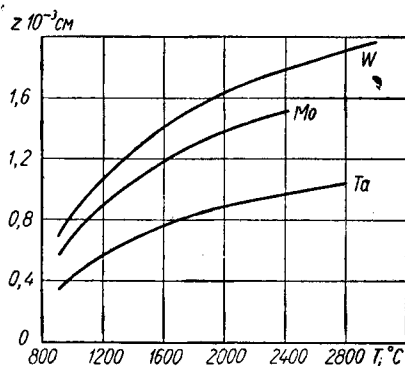


Рис. 6. Графік залежності z у визначенні межі нагрітої ділянки мішені (Mo, Ta, W) від температури ($Z = f(T_i)$).

обхідно правильно вибрати напрям переміщення аналізуючої діафрагми 5 і лінії відліку вимірювального мікроскопа 9 (рис. 5).

ЛИТЕРАТУРА

1. Хараджа Ф. Н. Общий курс рентгенотехники. Госэнергоиздат, 1956.
2. Прингсхейн П. и Фогель М. Люминесценция жидких и твердых тел. ИЛ, 1948.
3. Бутслов М. М. — Изв. АН СССР, Сер. физ. 23, 5, 555, 1959.
4. Раков В. И. Электронные рентгеновские трубки. Госэнергоиздат, 1952.
5. Тиктин С. А. Некоторые вопросы теплотехники электровакуумных приборов. Харьков, Институт радиофизики и электроники Академии наук УССР, 1960.

М. В. ДЕРЕНОВСКИЙ, С. М. ДЬЯЧЕНКО, В. А. ПРУС

МЕТОДЫ АНАЛИЗА МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ

Краткое содержание

В статье рассмотрены два метода исследования распределения плотности тока в поперечном сечении тонких мощных электронных пучков.

В первом методе используется эффект рентгеновского излучения мишени, облучаемой исследуемым пучком.

Второй метод основан на измерении плотности энергии в пучке по термоизлучению накаливаемой исследуемым пучком мишени в импульсном режиме.

Проведена оценка точности и применимости предлагаемых методов.

M. V. DERENOVSKY, S. M. DJATCHENKO, V. A. PRUS

METHODS OF POWER ELECTRON BEAMS INVESTIGATION

Short Contents

Two methods of investigation of transverse current density distribution in power electron beams of small diameter are considered.

The first method uses the X-rays radiation of a target which is under investigated beam bombardment.

The second method deals with measurements of beam energy density using a thermal radiation of a target heated by an investigated beam in pulse operation.

Precision estimation and application range of these methods are given.