

ИЗМЕРЕНИЕ РАДИУСА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА МЕТОДОМ ВИБРИРУЮЩЕГО ЗОНДА

И. К. Овчинников

Определение размеров сечения пучка электронов является одним из основных вопросов исследования электронно-оптических систем. В случае осевой симметрии пучка, при скоростях электронов порядка 1 кэВ и выше, измерение радиуса пучка может производиться методом вибрирующего зонда [1]. Так, при периодическом пересечении пучка зондом в цепи зонда наблюдается импульс тока, начало и конец которого соответствуют размерам поперечного сечения пучка. Ниже рассматривается измерение радиуса пучка при различных значениях плотности тока или амплитуды колебания зонда.

§ 1. Измерение радиуса пучка при малых плотностях тока

Рассмотрим изменение зондового тока за период колебания зонда (рис. 1), которое получается при осциллографировании зондового тока в соответствии со схемой зондовых измерений [1]. Так как зонд совершает периодические колебания с определенной частотой и амплитудой L в плоскости, перпендикулярной к оси пучка, то при линейной развертке осциллографа величина диаметра пучка связана с амплитудой колебания зонда уравнением [2]

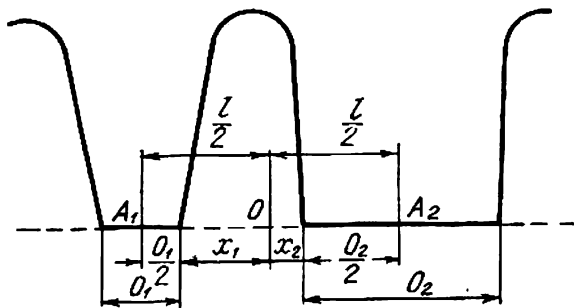


Рис. 1.

$$2R_l = L \left(\sin \pi \frac{|x_1|}{l} + \sin \pi \frac{x_2}{l} \right) - 2\delta, \quad (1)$$

где R_l — радиус пучка, δ — радиус зонда, x_1, x_2, l — размеры, определяемые по осциллограмме (рис. 1).

Для симметричного случая $|x_1| = |x_2| = x$, радиус пучка связан с амплитудой колебания более простым выражением:

$$R_l = L \sin \frac{\pi x}{l} - \delta. \quad (2)$$

Предельная относительная ошибка определения радиуса пучка δ_{R_i} , в соответствии с уравнением (2) и при условии $R_i \gg \delta$, будет равна

$$\delta_{R_i} = \delta_L + \frac{\pi}{l} \left(\varepsilon_x + \varepsilon_l \frac{x}{l} \right) \operatorname{ctg} \frac{\pi x}{l}, \quad (3)$$

где δ_L — относительная ошибка определения величины L , ε_x , ε_l — абсолютные погрешности определения величин x и l .

Можно считать, что порядок величин этих погрешностей соответствует толщине линий на экране осциллографа.

Рассмотрим два предельных случая: $2x \approx l$ и $x \ll l$.

Выполнение условия $2x \approx l$ соответствует случаю, когда амплитуда колебания зонда примерно равна радиусу пучка. При этом относительная ошибка определения радиуса пучка является минимальной и равной относительной ошибке определения амплитуды колебания зонда, т. е. уравнение (3) имеет вид:

$$\delta_{R_i} \approx \delta_L. \quad (4)$$

Условие $x \ll l$ соответствует случаю, когда амплитуда зонда значительно больше радиуса пучка и

$$\delta_{R_i} \approx \delta_L + \frac{\varepsilon_x}{x}. \quad (5)$$

В связи с тем, что определение величины x производится по осциллограмме, где величина l не может превышать размеров экрана осциллографа, то условие $x \ll l$ приводит к тому, что значение x может быть соизмеримо или даже меньше величины абсолютной ошибки ε_x , т. е. δ_{R_i} может достигать относительно больших значений.

С другой стороны, случай $x \ll l$ соответствует кратковременному пребыванию зонда в направленном потоке электронов, а случай $2x \approx l$ — непрерывному пребыванию. Учитывая значения предельно допустимых мощностей рассеяния на электродах [3], можно приближенно оценить максимальные величины плотности тока пучка для случая $2x < l$, т. е. при относительно длительном пребывании зонда в пучке из неравенства:

$$j < \frac{5 \div 10}{u}, \quad (6)$$

где j — плотность тока пучка, a/cm^2 ,

U — ускоряющий потенциал, v .

Неравенство (6) показывает, что определение радиуса пучка в соответствии с уравнением (1) или (2) может производиться при относительно небольших плотностях тока. Измерение больших плотностей тока должно производиться при малом времени нахождения зонда в пучке, что приводит к условию $x \ll l$, а, следовательно, к большим ошибкам при определении радиуса пучка.

2. Определение радиуса пучка по импульсу зондового тока

Рассмотрим импульс зондового тока, который получается при условии $L \gg R_i \gg \delta$, когда потенциал зонда выше потенциала пучка на 50—100 v . При этих условиях толщиной зонда по сравнению с радиусом пучка можно пренебречь, считать, что скорость зонда при пересечении пучка практически остается постоянной, а увеличение потенциала зонда

позволяет принимать величину тока вторичных электронов с зонда равную нулю. На рис. 2 показан участок сечения пучка, ток с которого $I(r_0)$ попадает на зонд при расстоянии r_0 от оси зонда до центра пучка. При этом величина полного тока пучка I определяется выражением:

$$I = 2 \int_0^{R_i} \frac{I(r_0)}{2\delta} dr_0 \quad (7)$$

или

$$I = \frac{1}{\delta} \int_0^{R_i} I(r_0) dr_0. \quad (8)$$

Уравнения (7), (8) при известных величинах I , δ и зависимости $I(r_0)$ позволяют однозначно определить величину радиуса пучка R_i .

Импульс зондового тока можно рассматривать в зависимости от времени, тогда

$$t_i = \frac{R_i}{v}, \quad (9)$$

где v — скорость зонда при пересечении пучка, $2t_i$ — время прохождения зонда через пучок. Уравнение (8) перепишем в виде:

$$I = \frac{v}{\delta} \int_0^{t_i} I(t) dt. \quad (10)$$

Из уравнений (9) и (10) следует:

$$R_i = \frac{\delta t_i}{\int_0^{t_i} I(t) dt}. \quad (11)$$

Уравнение (11) позволяет производить определение радиуса пучка с помощью решения электрическими схемами.

Для оценки величины погрешности определения радиуса пучка введем в уравнение (8) новые переменные $r_0 = xR_i$ и $I(r_0) = ky$, где k — коэффициент градуировки импульса зондового тока на осциллограмме, при этом уравнение (8) можно записать в виде:

$$I = \frac{kR_i}{\delta} \int_0^1 y dx \quad (12)$$

или

$$R_i = \frac{I\delta}{k \int_0^1 y dx}, \quad (13)$$

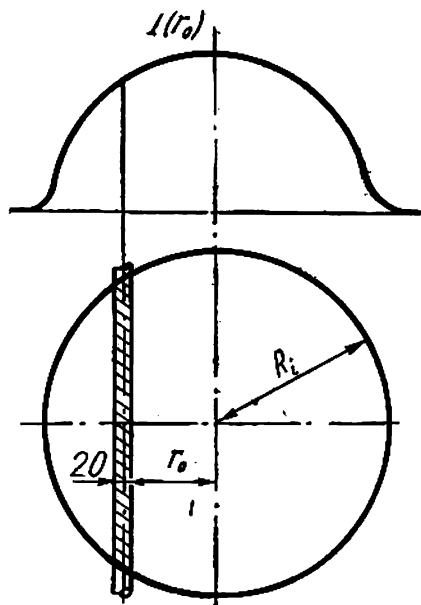


Рис. 2.

где $\int_0^1 y dx$ — площадь осциллограммы, ограниченная осью абсцисс и импульсом тока.

Уравнение (13) позволяет определить величину относительной погрешности при определении радиуса пучка δ_{R_i} , которая равна:

$$\delta_{R_i} = \delta_I + \delta_\delta + \delta_k + \delta_\Sigma, \quad (14)$$

где δ_I , δ_δ , δ_k — относительные ошибки при определении величин I , δ и k , δ_Σ — относительная ошибка при определении величины площади, ограниченной импульсом зондового тока.

Как следует из уравнения (14), величина δ_{R_i} не зависит от амплитуды колебания зонда и может быть достаточно малой при малых значениях величин δ_I , δ_δ , δ_k и δ_Σ .

Следует отметить, что определение зависимости $I = f(R_i)$, т. е. определение радиуса пучка, возможно и в общем случае, когда выполняется условие $L > R_i + \delta$, но не ставится ограничений относительно величин R_i и δ .

3. Определение радиуса пучка при использовании электрической схемы

Для решения уравнения (11) была выполнена электрическая схема, которая показана на рис. 3. Кратко рассмотрим работу этой схемы. Часть тока электронного пучка, попадающего на зонд, создает импульсы

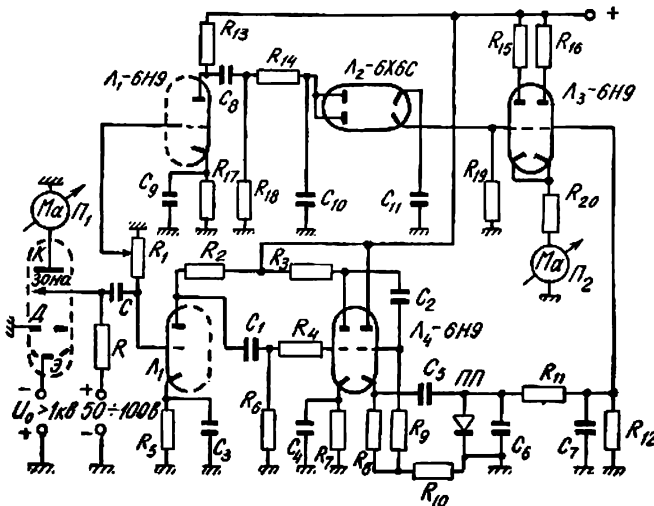


Рис. 3.

напряжения на сопротивлении R , эти импульсы подаются на сетки лампы L_1 . После усиления правым триодом лампы L_1 , интегрирования импульсов цепочкой $R_{14} - C_{10}$, полученное значение подается через пиковый вольтметр (лампа L_2) на сетку левого триода лампы L_3 . Одновременно импульсы зондового тока, после усиления левым триодом лампы L_1 ,

формируются в прямоугольные импульсы (лампа L_4). Полученные импульсы сглаживаются фильтром C_6, C_7, R_{11} и на правый триод лампы L_3 подается напряжение пропорциональное длительности импульса. Лампа L_3 является дифференцирующим усилителем. На сетку левого триода

этой лампы подается напряжение пропорциональное $\rho \int_0^{t_i} I(t) dt$; на сетку

правого триода отрицательное напряжение, пропорциональное длительности импульса t_i . Установка рабочего тока лампы по прибору Π_2 производится путем изменения коэффициента ρ с помощью переменного сопротивления R_1 . При этом:

$$t_i = \rho \int_0^{t_i} I(t) dt$$

и

$$\rho = \frac{R_i}{\delta I} = \frac{t_i}{\int_0^{t_i} I(t) dt}. \quad (15)$$

Величина тока I определяется по прибору Π_1 .

Расчет и подробное описание работы отдельных узлов схемы приведено в дипломной работе А. Т. Ганнус «Измерение радиуса пучка методом электронного интегрирования и деления» (Харьковский государственный университет, радиофизический факультет, 1961). Не останавливаясь на недостатках приведенной схемы, следует отметить, что возможно выполнение ряда других схем, обеспечивающих выполнение решения уравнения (11).

На рис. 4 приведены некоторые результаты определения радиуса пучка при различных значениях величины тока в фокусирующей катушке. Значками

○ — обозначены результаты измерения с помощью электрической схемы при токе пучка 0,2 ма, △ — при токе 0,5 ма. Результаты определения радиуса пучка по сравнению с амплитудой колебания зонда обозначены соответственно ● и ▲.

Как видно из приведенных данных, использование электрической схемы позволяет определять радиус пучка с достаточно малыми погрешностями измерения, которые в проведенных экспериментах не превышают 10—15%, тогда как определение радиуса пучка по формуле (1) дает ошибки измерения 20—30% из-за относительно большой амплитуды колебания зонда ($L = 10 - 15$ мм).

о*

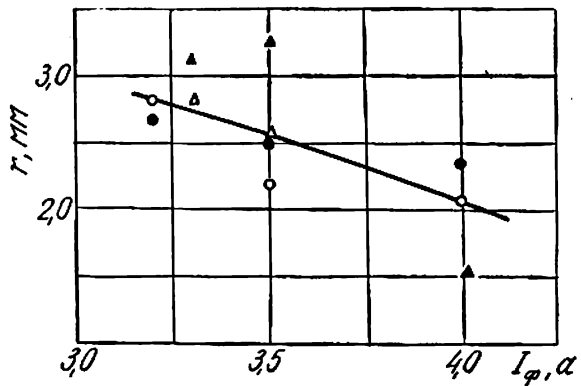


Рис. 4.

ВЫВОДЫ

1. Определение радиуса пучка путем сравнения длительности импульса зондового тока с амплитудой колебания зонда обеспечивает достаточно точную точность измерения при небольших плотностях тока, при относительно малых амплитудах колебания зонда.

2. Использование импульса зондового тока дает возможность определять радиус пучка при различных амплитудах колебаний зонда, т. е. при различных, в том числе и больших, плотностях тока.

3. Использование электрических схем позволяет значительно ускорить и облегчить процесс определения радиуса пучка с достаточно хорошей точностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. К. Овчинников, Н. С. Зинченко. «Український фізичний журнал», IV, 2, 219, 1959.
 2. Н. С. Зинченко. Курс лекций по электронной оптике, изд. 2, Харьков, Изд-во ХГУ, 1961.
 3. Ю. А. Кацман. Основы расчета радиоламп, М. — Л., Госэнергоиздат, 1952.
-