

УДК 621.3.032.269.1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АДИАБАТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУШЕК МЦР

Е. Г. Авдошин, А. Л. Гольденберг

Для изучения потоков электронов, движущихся по винтовым траекториям, использован анализатор, основанный на методе торможения. Показано, что в статических полях с характерным размером неоднородности, существенно превышающим шаг и радиус электронной траектории, относительный разброс поперечных скоростей электронов в соответствии с дрейфовой теорией является адиабатическим инвариантом. Показана возможность минимизации разброса скоростей электронов, обусловленного неоднородностью краевого поля катода, путем подбора режима работы инжектора. Экспериментально подтверждена и уточнена теоретическая оценка зависимости разброса скоростей электронов от тока пучка.

Адиабатические электронные пушки [1] используются в мазерах на циклотронном резонансе (МЦР) для создания в однородном магнитном поле рабочего пространства трубчатых электронных потоков. Если плотность пространственного заряда электронного потока в рабочем пространстве МЦР достаточно мала, то можно считать, что все электроны движутся по винтовым траекториям и обладают одинаковой кинетической энергией. Качество такого пучка можно характеризовать одним параметром — относительным разбросом вращательных скоростей, который для потока электронов, движущихся в плавно меняющихся электрических и магнитных полях, является адиабатическим инвариантом [2]. Уменьшение разброса вращательных и, следовательно, поступательных скоростей позволяет повысить КПД прибора, в частности, благодаря тому, что при этом верхний предел отношения энергии вращения к энергии поступательного движения электронов увеличивается.

Для экспериментального определения разброса вращательных скоростей электронов винтовых пучков можно воспользоваться методом торможения электронов электрическим полем*, который позволяет найти распределение поступательных скоростей, а затем, в силу равенства полных скоростей электронов, найти их осцилляторные скорости. Далее следует описание анализатора, основанного на методе торможения, и выполненных с этим анализатором экспериментов по изучению влияния неоднородности полей адиабатической пушки на разброс скоростей электронов.

1. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ АНАЛИЗАТОРА

Анализатор** и исследуемая электронная пушка изображены на рис. 1. Торможение электронов происходит путем подачи на сетку

* В тех случаях, когда однозначная связь между осцилляторными и поступательными скоростями не имеет места, разброс скоростей можно определить путем непосредственного наблюдения на люминесцирующем экране следов электронов, прошедших сквозь малое отверстие диафрагмы [3], или путем торможения электронов комбинированным электрическим и нарастающим магнитным полем [4].

** Описываемый анализатор был предложен в докладе А. Л. Гольденберга, Т. Б. Панкратовой, М. И. Петелина, В. А. Флягина на V Межвузовской конференции по электронике СВЧ в 1966 г.

отрицательного (относительно корпуса лампы) напряжения. Электроны, обладающие поступательной скоростью, достаточной для преодоления тормозящего поля сетки, создают ток коллектора, по зависимости которого от напряжения сетки определяется распределение скоростей электронов. Следует, однако, иметь в виду, что электроны, отраженные тормозящим полем, могут затем совершать многократные колебания между катодом и сеткой, поскольку попадание электрона на катод, возможное только при вполне определенной фазе вращения, маловероятно.

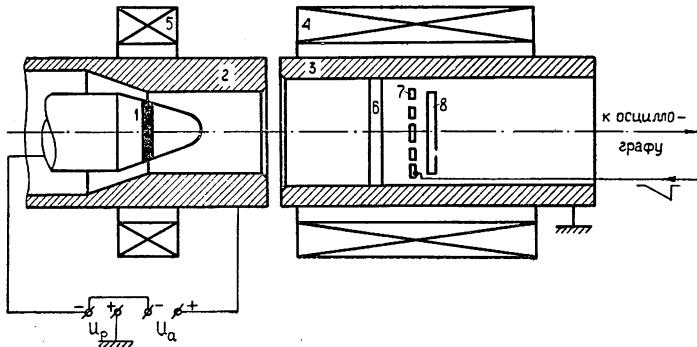


Рис. 1. Схема анализатора:
1—катод, 2—анод, 3—корпус, 4—основной соленоид, 5—вспомогательный соленоид, 6—диафрагма с секторным вырезом, 7—сетка, 8—коллектор.

Если не обеспечить быстрого вывода отраженных электронов, то из-за накопления их в пространстве между катодом и сеткой распределение скоростей электронов может исказиться. Для отбора отраженных электронов перед сеткой помещается диафрагма с одним или несколькими секторными вырезами. Диафрагма пропускает в анализатор лишь часть пучка, но зато позволяет вывести из потока отраженные электроны благодаря тому, что они смещаются по азимуту при движении в скрещенных полях инжектора пушки.

В описываемых далее экспериментах изменение тормозящего напряжения сетки анализатора производилось с помощью генератора пилообразных импульсов. Катод адиабатической пушки работал в режиме температурного ограничения тока эмиссии при всех измерениях, за исключением экспериментов по изучению влияния пространственного заряда в инжекторе на разброс скоростей электронов. Поскольку электроды анализатора не могли рассеивать больших мощностей, измерения проводились с пучками, средняя мощность которых не превышала 50 вт*.

Для относительного разброса осцилляторных скоростей электронов δv_{\perp} было принято следующее определение:

$$\delta v_{\perp} = \frac{U_{c(0,9)} - U_{c(0,1)}}{2 \left[U_p - \frac{U_{c(0,9)} + U_{c(0,1)}}{2} \right]} \quad (1)$$

Здесь U_p — полное напряжение пучка, $U_{c(0,1)}$ и $U_{c(0,9)}$ — напряжения сетки, при которых ток коллектора равен соответственно 0,1 и 0,9 максимальной величины.

* Результаты таких измерений могут быть применены к пушкам МЦР, работающим в режимах с большей мощностью, путем использования соотношений подобия [5].

2. ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЕЙ В ПЕРЕХОДНОЙ ОБЛАСТИ ПУШКИ НА РАЗБРОС СКОРОСТЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ

В переходной области между инжектором и участком однородного магнитного поля движение электронов происходит в неоднородных полях—электрическом (между анодом и корпусом лампы) и нарастающем магнитном. Влияние неоднородностей этих полей на качество пучка может быть значительным, если их характерные размеры недостаточно велики по сравнению с радиусом электронной орбиты и смещением электрона за период вращения.

Эффект влияния неоднородности поля в ускоряющем промежутке на разброс скоростей электронов можно проиллюстрировать на примере экспериментов, проведенных с пушкой, имевшей следующие размеры (обозначения приведены на рис. 2).

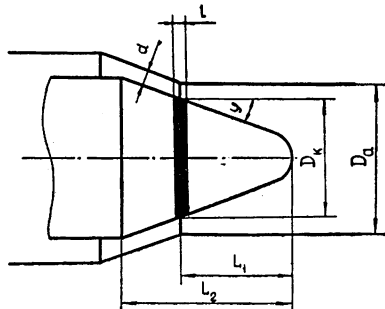


Рис. 2. Обозначения основных размеров адиабатической электронной пушки.

D_k , мм	D_a , мм	l , мм	L_1 , мм	L_2 , мм	d , мм	φ
20	23,3	4	20	30	1,65	5°30'

Пушка работала в режиме с анодным напряжением $U_a = 700$ в и напряженностями магнитных полей в инжекторе $H_k = 250$ э и на однородном участке $H_0 = 1000$ э. Осциллограммы коллекторного тока, полученные при различных ускоряющих напряжениях, показаны на рис. 3. Горизонтальная развертка осциллографа осуществлялась напряжением сетки, которое в паузах между отрицательными пилообразными импульсами имело небольшие положительные значения. Поэтому, кроме спада тока, обусловленного увеличением тормозящего напряжения сетки (в правых частях осциллограмм), на каждом снимке рис. 3 заметно резкое уменьшение тока из-за вторичной эмиссии с коллектора, возникавшей при положительном напряжении на сетке. При небольшом увеличении напряжения корпуса лампы U_p (рис. 3 а и 3 б) крутизна спада коллекторного тока почти не менялась, а при дальнейшем увеличении ускоряющего напряжения (рис. 3 в) кривая торможения становилась более полой, т. е. относительный разброс осцилляторных скоростей увеличивался. В последнем случае, как показали оценки, смещение электрона за период вращения было близко к характерному размеру поля линзы или даже превосходило его, что способствовало увеличению разброса скоростей.

Изучение влияния распределения магнитного поля на разброс скоростей электронов проводилось с пушкой, имевшей размеры

D_k , мм	D_a , мм	l , мм	L_1 , мм	L_2 , мм	d , мм	φ
20	26	1	17	27	3,0	17°

Анодное напряжение пушки было близко к критическому напряжению, при котором электроны касаются поверхности анода. Изменение распределения магнитного поля и одновременно коэффициента перемagnичивания пучка $\alpha = H_0/H_k$ производилось путем изменения магнитного поля в анализаторе при почти постоянном поле H_k на катоде. В этих экспериментах, результаты которых приведены в табл. 1, изменения распределения магнитного поля в переходной области не приводили к скольконибудь значительным изменениям разброса скоростей электронов, что

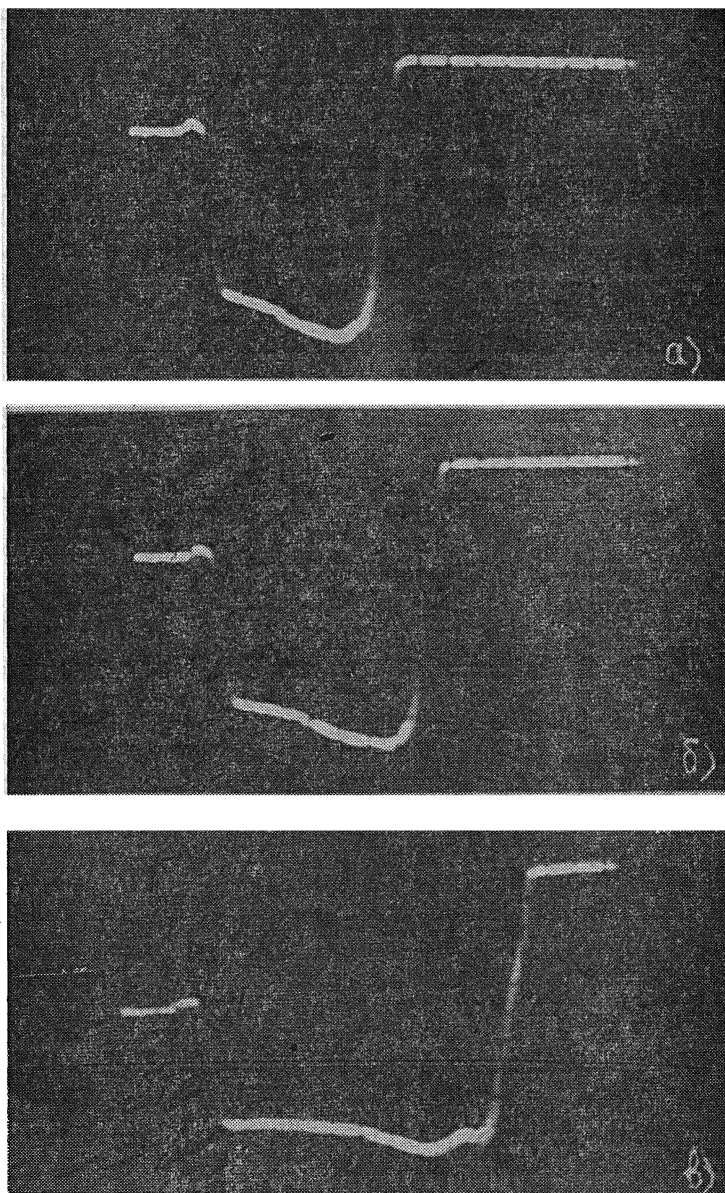


Рис. 3. Осциллограммы тока коллектора:
 а) $U_p = 600$ в, $\delta v_{\perp} = 25\%$; б) $U_p = 700$ в,
 $\delta v_{\perp} = 27\%$; в) $U_p = 1000$ в, $\delta v_{\perp} = 37\%$.

Таблица 1

n	α	$U_a, \text{ в}$	$U_p, \text{ в}$	$\delta v_{\perp}, \%$
1	4	785	800	12
2	4	785	1000	12
3	8	785	1700	11
4	8	785	1900	10
5	12	700	2000	11
6	12	700	2400	10

и следовало ожидать, поскольку существенно нарушить плавность изменения магнитного поля в исследуемой электронно-оптической системе было практически невозможно. Характерный размер неоднородности поля электростатической линзы также был достаточно велик, и при небольших изменениях ускоряющего напряжения, как видно из табл. 1, качество электронного пучка почти не изменялось.

Таким образом, эксперименты подтвердили, что при движении электронов в полях, размер неоднородности которых значительно больше, чем радиус вращения электрона и его смещения за период вращения, относительный разброс осцилляторных скоростей электронов, как и следует из адиабатической теории, остается неизменным.

Во всех последующих экспериментах условия плавности изменения полей в переходной области были выполнены, что подтверждалось контрольными измерениями.

3. ВЛИЯНИЕ КРАЕВОГО ПОЛЯ КАТОДА НА РАЗБРОС ОСЦИЛЛЯТОРНЫХ СКОРОСТЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ

В электронной пушке, имеющей радиус катода порядка радиуса вращения электрона в инжекторе, размеры неоднородности краевого поля катода заведомо невелики и, следовательно, условия адиабатичности не могут быть выполнены достаточно строго. Однако и в этом случае подбор формы электродов инжектора позволяет, в принципе, получить пучок с малым разбросом скоростей электронов. Очевидно, что из многих вариантов решения этой задачи целесообразно выбирать такие, которые обеспечивают наименьшую критичность разброса скоростей по отношению к изменениям режима работы пушки. С этой точки зрения предпочтительны электронно-оптические системы, в которых электроны проходят в краевом поле катода с примерно одинаковыми фазами вращения по траекториям, наиболее удаленным от конца катода.

Эксперимент, показывающий возможность минимизации разброса скоростей электронов при сильно неоднородном краевом поле катода, проводился с двумя пушками, в которых использовались одинаковые катоды со следующими размерами:

$D_k, \text{ мм}$	$l, \text{ мм}$	$L_1, \text{ мм}$	$L_2, \text{ мм}$	φ
20	1	17	27	17°

и аноды разных диаметров D_a — 26 и 42 мм.

Результаты этих измерений представлены на рис. 4 в виде зависимостей разброса скоростей δv_{\perp} от величины

$$r_{\perp k} (\text{мм}) = \frac{17 \sqrt{U_a(\text{в})}}{H_k (\text{э})},$$

равной радиусу вращения электрона в плоском магнетроне и приближенно характеризующей эту величину в аксиально-симметричной пушке; нетрудно показать, что шаг электронной траектории в инжекторе примерно пропорционален величине $r_{\perp k}$. Из рис. 4 видно, что при равных поперечных размерах электронной траектории разброс скоростей в обеих пушках был почти одинаковым, откуда следует, что качество пучка не зависело существенно от формы анода. При увеличении параметра $r_{\perp k}$ в пушке с большим расстоянием между анодом и катодом разброс δv_{\perp} сначала уменьшался, а затем снова возрастал. Приближенные оценки показывают, что минимум δv_{\perp} отмечался в режиме, в котором электроны проходили на большом удалении от конца катода — в области, где краевое поле катода менялось относительно плавно.

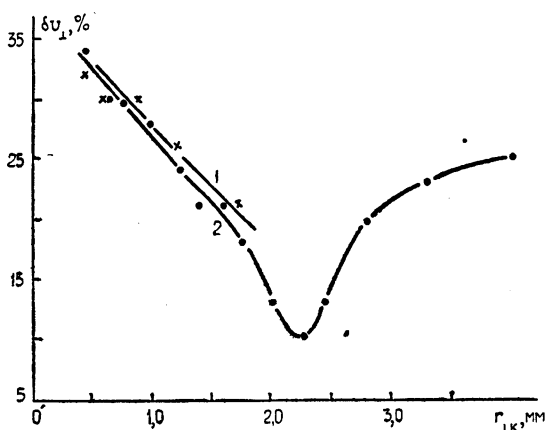


Рис. 4. Зависимости разброса осцилляторных скоростей электронов от радиуса вращения электрона в инжекторе для пушек, отличающихся величиной зазора d между анодом и катодом; 1— $d=3,5$ мм; 2— $d=8$ мм.

4. ИЗМЕНЕНИЕ РАЗБРОСА СКОРОСТЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ПОВЫШЕНИИ ПЛОТНОСТИ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА В ИНЖЕКТОРЕ

Распределение скоростей электронов в адиабатической пушке может изменяться при увеличении тока пучка из-за искажения конфигурации электрического поля полем электронного потока. В наибольшей степени на движение электронов влияет пространственный заряд электронов в инжекторе, где плотность электронного потока имеет наибольшую величину. В приближении малого пространственного заряда изменение относительного разброса скоростей δv_{\perp} , обусловленное зарядом электронов, по порядку величины равно [2]

$$\delta v_{\perp} \approx \frac{10J(a) H_0 (\text{кэ})}{R_k (\text{см}) E_k^2 (\text{кв/см}) a}, \quad (2)$$

где E_k — напряженность электрического поля вблизи эмиттера.

Эксперименты по изучению влияния пространственного заряда электронов на качество электронного пучка проводились с пушкой, имевшей следующие размеры.

$D_k, \text{мм}$	$D_a, \text{мм}$	$l, \text{мм}$	$L_1, \text{мм}$	$L_2, \text{мм}$	$d, \text{мм}$	φ
20	26	1	17	27	30	17°

В этой пушке использовались два катода с различной шероховатостью эмиттирующей поверхности и, соответственно, с различным разбросом скоростей электронов при малых токах эмиссии [6]. Зависимости относительного разброса осцилляторных скоростей от электронного тока, как видно из рис. 5, для обоих катодов имели вид прямых с одинаковым наклоном. На основании результатов этих измерений соотношение (2) для $\delta v_{\perp p}$ может быть написано в виде

$$\delta v_{\perp p} \approx \frac{22 J(a) H_0 (\text{кэ})}{R_k (\text{см}) E_k^2 (\text{кв/см}) \alpha} \quad (2a)$$

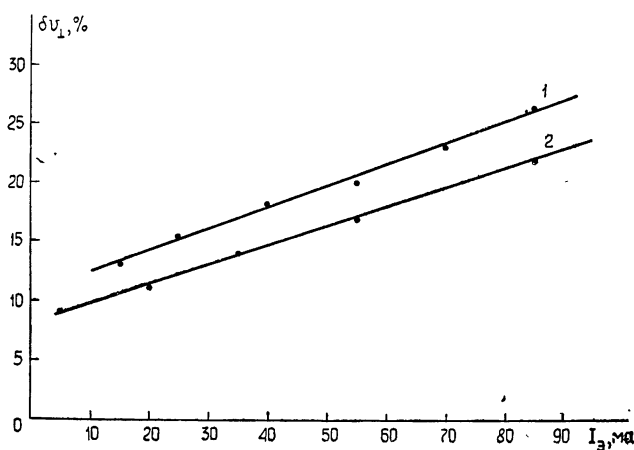


Рис. 5. Зависимости разброса осцилляторных скоростей электронов от тока эмиссии; 1—синтерированный катод; 2—прессованный катод.

Таким образом, непосредственные измерения и теоретические оценки приращения разброса скоростей, обусловленного зарядом электронного потока в инжекторе, дали значения, совпадающие по порядку величины.

Необходимо отметить, что в этих экспериментах предельная плотность пространственного заряда в инжекторе не была достигнута, так как при повышении тока пучка увеличивалась плотность пространственного заряда электронного потока в анализаторе, из-за чего точность измерения электронных скоростей ухудшалась.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Л. Гольденберг, Т. Б. Панкратова, М. И. Петелин, Авт. свидетельство № 226044 с приоритетом от 16 июня 1967 г.
2. А. Л. Гольденберг, М. И. Петелин, Изв. высш. уч. зав.—Радиофизика, 16, № 1, 141 (1973).
3. В. А. Прус, М. В. Дереновский, К. Я. Лиждвой, В. П. Тараненко, Электронная техника, сер. 1, Электроника СВЧ, № 10, 66 (1970).

4. Е. Г. Шустин, И. Ф. Харченко, Изв. высш. уч. зав.—Радиофизика, 13, № 12, 1800 (1970).
5. Д. Ж. Пирс, Теория и расчет электронных пучков, изд. Сов. радио, М., 1956.
6. Ш. Е. Цимринг, Изв. высш. уч. зав.—Радиофизика, 15, № 8, 1247 (1972).

Научно-исследовательский радиофизический институт

Поступила в редакцию
27 октября 1972 г.

EXPERIMENTAL STUDY OF ADIABATIC ELECTRON MCR GUNS

E. G. Avdoshin, A. L. Gol'denberg

An analyser based on the deceleration method is used to study the electron beams moving along screw trajectories. It is shown that in static fields with the characteristic size of an inhomogeneity exceeding essentially a step and radius of the electron trajectory a relative dispersion of transverse electron velocities in accord with the drift theory is an adiabatic invariant. The possibility is shown to minimize the electron velocity dispersion due to the cathode edge field inhomogeneity by choosing the regime of injector operation. A theoretical estimation of the dependence of the electron velocity dispersion on the beam current is experimentally supported and refined.
