

УДК 538.112

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПО СКОРОСТЯМ В ВИНТОВОМ ЭЛЕКТРОННОМ ПОТОКЕ

И. И. Антаков, В. А. Гинцбург, Е. В. Засыпкин, Е. В. Соколов

Приведены результаты экспериментального исследования распределения электронов по скоростям в винтовом пучке, формируемом адиабатической электронной пушкой магнетронного типа. Показана эволюция функции распределения электронов по скоростям в сформированном пучке при изменении режима и геометрии пушки.

В мазерах на циклотронном резонансе (МЦР) [1] обычно используются адиабатические электронные пушки магнетронного типа [2]. Формируемые ими винтовые электронные пучки по ряду причин имеют значительный разброс скоростей электронов [3], который существенно влияет на эффективность работы приборов.

Для расчета МЦР и интерпретации их характеристик необходимо знать функцию распределения электронов по скоростям и характер ее эволюции с изменением режима прибора. В известных работах, касающихся теории формирования винтовых электронных пучков и измерений величины разброса скоростей электронов в таких пучках [4-6], проводимых, как правило, в моделирующих режимах, достаточной информации по этому вопросу не содержится.

Данная работа посвящена исследованию функции распределения электронов по скоростям вращательного движения в винтовых электронных пучках в режимах, близких к рабочим. В экспериментах использовалась аксиально-симметричная двухэлектродная пушка с катодом, имеющим узкий эмиттирующий поясok ($l \ll d$, l — ширина пояса, d — расстояние между анодом и катодом пушки). Катод пушки закреплялся в юстировочном устройстве, что позволило также выяснить влияние положения катода относительно анода (перекосов в радиальной плоскости и смещений его вдоль оси системы) на распределение электронов по скоростям. Измерения проводились методом тормозящего поля [5].

Функция распределения электронов $f(\gamma)$ по скоростям их вращательного движения v_{\perp} (поперечным скоростям) связана с измеряемыми величинами соотношением

$$f(\gamma) = \frac{k_{\perp} \gamma}{\sqrt{1-\gamma^2}} \left[\frac{d}{d\tilde{U}_{\tau}} \left(\frac{I_k}{I_0} \right) \right]_{\tilde{U}_{\perp} = 1-\gamma^2}, \quad (1)$$

в котором k_{\perp} — нормирующий множитель, $\tilde{\gamma} = v_{\tau}/v$ — отношение поперечной и полной скоростей электронов, \tilde{U}_{τ} — отношение тормозящего и анодного напряжений, I_k — ток коллектора, I_0 — полный ток пучка.

На рис. 1 приведены экспериментальные функции распределения электронов по поперечным скоростям при оптимальном положении ка-

тогда*. В области значений величины перемагничивания $\alpha = H_0/H_k < 4,15$ (H_0, H_k — напряженности магнитного поля в пространстве взаимодействия и на катоде), там, где отсутствует отражение электронов от магнитной пробки, функция распределения близка к симметричной относительно своего максимума, и при изменении α ее эволюция достаточно хорошо описывается адиабатической теорией электронных пушек МЦР [4]. Накопление электронов в ловушке между катодом и магнитной пробкой при $\alpha \geq 4,15$ приводит к заметному нарушению адиабатичности преобразования скоростей электронов, функция распределения при этом становится существенно несимметричной — появляются электроны с большими продольными скоростями ($v_{\perp}/v_{\parallel} = g \ll 1$).

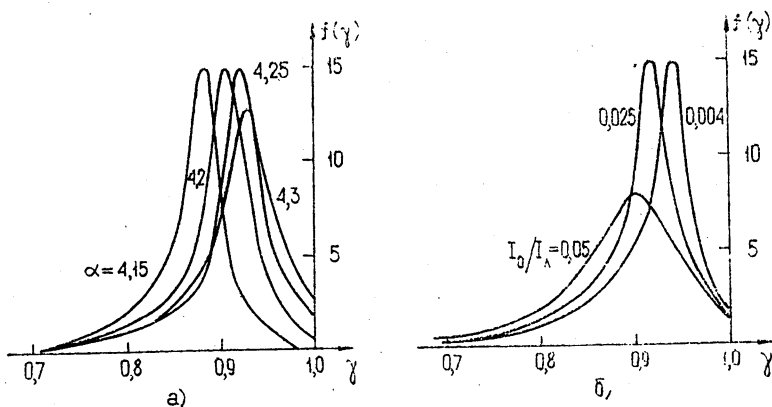


Рис. 1. Эволюция функции распределения электронов по скоростям при изменении:

а) перемагничивания α ($I_0/I_a = 2,5 \cdot 10^{-2}$); б) тока электронного пучка ($\alpha = 4,2$).

Повышение тока пучка (отношения тока пучка к ленгмюровскому току I_{\perp} диода, эквивалентного промежутку катод — анод пушки)**, как видно из рис. 1 б, вызывает расширение функции распределения и сдвиг ее максимума в области меньших поперечных скоростей электронов. Эти эффекты обусловлены, согласно [4, 8], влиянием объемного заряда вблизи катода на начальное формирование пучка.

Поскольку экспериментально найденные распределения электронов по скоростям близки к симметричным (за исключением «хвоста» электронов с относительно большими продольными скоростями, не играющими, как правило [1], существенной роли при взаимодействии пучка с высокочастотным полем), их можно описать двухпараметрической, в частности, гауссовой функцией

$$f(\gamma) = k_{\perp} \exp[-(\gamma - \gamma_0)^2/2\sigma^2]. \quad (2)$$

Параметры γ_0 и σ могут быть определены через экспериментально измеряемые величины: отношение поперечных и продольных скоростей электронов в максимуме функции распределения g_0 и относительный

* Оптимизация электронно-оптической системы (минимизация скоростного разброса) проводилась при помощи численных методов, описанных в [7]. Влияние статического пространственного заряда вблизи катода на начальные условия формирования электронного пучка при этом не учитывалось.

** В исследуемых пушках при анодном напряжении 16 кВ ленгмюровский ток составляет 20 А (поверхность эмиттирующего пояса 2 см², рассеяние анод — катод 0,8 см).

разброс поперечных скоростей δv_{\perp} . Величина δv_{\perp} при этом должна измеряться на том участке $f(\gamma)$, где характер поведения экспериментальной и аппроксимирующей функции одинаков. Необходимо отметить, что определение параметров g_0 и δv_{\perp} в режимах, близких пробочным по отсечке коллекторного тока, методом, описанным в [5], приводит вследствие несимметрии функции $f(\gamma)$ к занижению g_0 и завышению δv_{\perp} . Если определить δv_{\perp} на уровне $f(\gamma)$ в e^2 раз. меньшем $f(\gamma_0)$ и учесть моноэнергетичность электронного потока, что допустимо при относительно малых значениях I_0/I_n , то

$$\gamma_0 = \frac{g_0}{\sqrt{1+g_0^2}}, \quad \sigma = 0,25 \frac{g_0}{\sqrt{1+g_0^2}} \delta v_{\perp}. \quad (3)$$

Примеры такой аппроксимации показаны на рис. 2. Приведенные на рис. 3 зависимости g_0 и δv_{\perp} от тока электронного пучка при различных значениях величины перемангничивания α , построенные по данным эксперимента, позволяют аналитически определить функцию распределения электронов по скоростям в широком диапазоне изменения параметров.

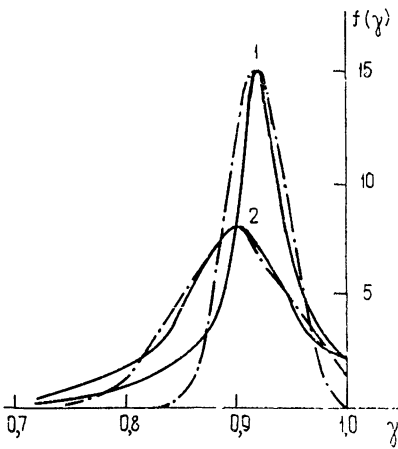


Рис. 2. Сравнение экспериментальных функций распределения по поперечным скоростям (сплошная кривая) с аппроксимирующей гауссовой функцией (штрих-пунктирная) при $\alpha = 4,25$ ($1 - I_0/I_n = 2,5 \cdot 10^{-2}$, $2 - I_0/I_n = 5 \cdot 10^{-2}$).

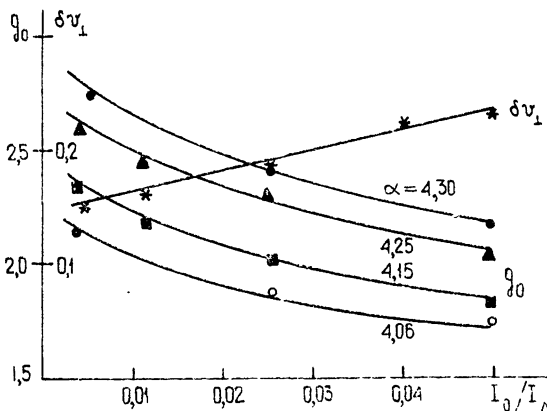


Рис. 3.

Из адиабатической теории электронных пушек МЦР известно [4], что поперечный разброс δv_{\perp} является инвариантом относительно изменения α , а зависимость параметра g_0 от величины перемангничивания имеет вид

$$g_0 = \sqrt{\frac{A\alpha^3}{1-Az^3}}, \quad A = \frac{E_k^2 (\text{кВ/см})}{3,52 U_a (\text{кВ}) H_0^2 (\text{кЭ})},$$

где U_a — анодное напряжение, E_k — напряженность электрического поля на катоде.

Рассчитанная по (4) зависимость отношения поперечных и продольных скоростей в максимуме функции распределения от α достаточно хорошо совпадает с экспериментальной, полученной для малых токов электронного пучка ($I_0/I_a \rightarrow 0$), где отсутствует отражение электронов от магнитной пробки (рис. 4). Накопление пространственного заряда в области нарастающего магнитного поля при $\alpha \gtrsim 4,15$ приводит к заметному уменьшению величины g_0 по сравнению с расчетной. Инвариантность поперечного разброса при этом практически не нарушается (рис. 1 а, 3).

Рис. 4. Сравнение теоретической (штрих-пунктирная) и экспериментальных (сплошная) кривых зависимости g_0 от величины перемagnичивания α . Кривая (штриховая) получена путем экстраполяции экспериментальных данных в область малых токов ($I_0/I_a \rightarrow 0$).

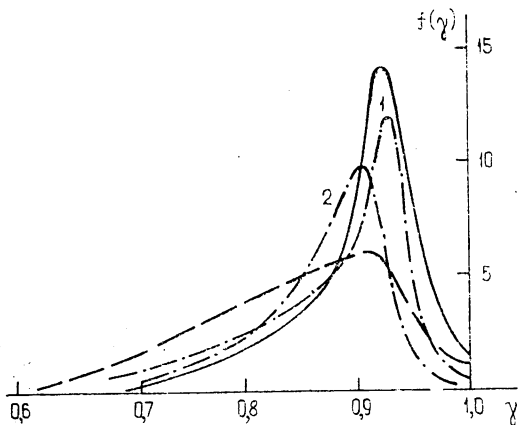
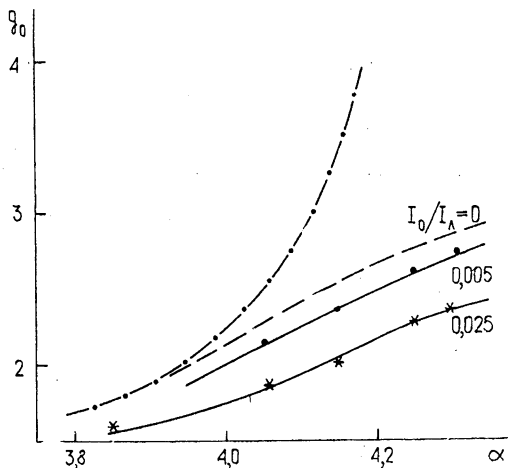


Рис. 5. Распределение электронов по скоростям при различном положении катода ($\alpha=4,25$, $I_0/I_a=2,5 \cdot 10^{-2}$; сплошная кривая—оптимальное положение катода, штриховая—смещение катода в радиальной плоскости на $0,1 d$, штрих-пунктирная—смещение катода вдоль оси пучка; 1 — $\Delta z = 1,5 l$, 2 — $\Delta z = -1,5 l$).

Для иллюстрации влияния на параметры электронного пучка отклонения положения катода от оптимального было измерено распределение электронов по скоростям при сдвиге катода в радиальной плоскости и смещении его вдоль оси на величину $\Delta z = \pm 1,5$ (рис. 5). Отклоне-

ние положения катоды от оптимального приводит, как видно из рис. 5, к несимметричному расплыванию функции $f(\gamma)$, причем особенно критичен вид функции распределения к нарушению аксиальной симметрии пучки.

В заключение отметим, что проведенные исследования показали возможность не только аналитического представления функции распределения электронов по поперечным скоростям в пучке, формируемом адиабатической электронной пушкой магнетронного типа, но и позволили объяснить некоторые результаты экспериментов с мощными МЦР-генераторами — получение, в частности, высокого КПД гиротрона ($\eta \approx 50\%$) в широком интервале значений токов электронного пучка ($I_0/I_{st} = 0,004 \div 0,015$) [9]. Плавная зависимость КПД генератора от тока и высокий максимальный КПД ($\eta = 55\%$) в режиме малых токов обусловлены тем, что при помощи рассмотренной электронно-оптической системы удастся не только формировать электронные пучки с большим отношением средних поперечных и продольных скоростей ($g_0 = 2,5 \div 3$), но и, изменяя это отношение, обеспечить необходимое для достижения максимального КПД соотношение между I_0 и $I_{st \min}$ — минимальным стартовым током резонатора.

Авторы благодарны В. К. Юлпатову за постоянный интерес к работе и ценные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Гапонов, М. И. Петелин, В. К. Юлпатов Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 10, № 9—10, 1414 (1967).
2. А. В. Гапонов, А. Л. Гольденберг, Д. П. Григорьев, Т. Б. Панкратова, М. И. Петелин, В. А. Флягин, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика (в печати).
3. Ш. Е. Цимринг, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 15, № 8, 1247 (1972).
4. А. Л. Гольденберг, М. И. Петелин, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 16, № 1, 141 (1973).
5. Е. Г. Авдошин, А. Л. Гольденберг, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 16, № 10, 1605 (1973).
6. В. А. Прус, В. И. Глущенко, В. Г. Тараненко, Электронная техника, серия 1, Электроника СВЧ, вып. 5 (1972).
7. В. К. Лыгин, Ш. Е. Цимринг, ЖТФ, 13, 1695 (1972).
8. А. Л. Гольденберг, Т. Б. Панкратова, Электронная техника, серия 1 Электроника СВЧ, вып. 9 (1971).
9. И. И. Антаков, С. Н. Власов, В. А. Гинцбург, Л. И. Загрядская, Л. В. Николаев, Электронная техника, серия 1, Электроника СВЧ — (в печати).

Научно-исследовательский радиофизический институт

Поступила в редакцию
11 октября 1974 г

EXPERIMENTAL STUDY OF INVESTIGATION OF VELOCITY ELECTRON DISTRIBUTION IN A SCREW ELECTRON BEAM

I. I. Antakov, V. A. Ginzburg, E. V. Zasyplin, E. V. Sokolov

The results of experimental investigation of the velocity electron distribution in a screw beam formed by the adiabatic electron magnetron-type gun are given. The evolution of the velocity electron distribution function in a formed beam when changing the regime and gun geometry is shown.