

УДК 621.3.032.266

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТНОГО РАЗБРОСА В ВИНТОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКАХ

Е. Г. Авдошин, Л. В. Николаев, И. Н. Платонов, Ш. Е. Цимринг

Экспериментально показано, что шероховатости поверхности эмиттера, начальные скорости электронов и поле пространственного заряда оказывают существенное влияние на разброс осцилляторных скоростей в винтовых пучках, формируемых магнетронно-инжекторными пушками. Измеряемые величины суммарного разброса под действием упомянутых факторов достигают в реальных пучках (10—20)%. Дана краткая характеристика исследованных типов эмиттеров и методики измерения скоростного разброса. Проведено сравнение экспериментальных данных с результатами теоретических оценок.

1. ВВЕДЕНИЕ

Формирование интенсивных винтовых пучков в мазерах на циклотронном резонансе (МЦР) ставит в качестве одной из основных задачу снижения разброса осцилляторных скоростей электронов [1—3]. Причины указанного разброса связаны с влиянием неоднородных полей и начальных скоростей. Их можно классифицировать по происхождению соответствующих факторов и по тому, на каком участке электронной траектории они действуют:

- 1) нерегулярные электростатические поля на поверхности эмиттера, обусловленные неоднородностями структуры эмиссионного слоя;
- 2) регулярные неоднородные поля вблизи эмиттера, которые определяются формой электродов и распределением магнитного поля;
- 3) недостаточная для сохранения поперечного адиабатического инварианта плавность изменения полей в области, удаленной от эмиттера;
- 4) неоднородные поля пространственного заряда;
- 5) начальные скорости электронов;
- 6) флуктуационные поля как результат нестабильности пучка в области формирования.

Некоторые вопросы, касающиеся 1) — 5), теоретически рассмотрены в [1—4]. Ниже приведены результаты экспериментального исследования факторов 1), 4), 5) для магнетронно-инжекторных адиабатических электронных пушек, которые преимущественно используются в МЦР [5—7]. При проведении эксперимента специальное внимание уделялось обеспечению возможностей отдельного изучения влияния указанных факторов на разброс осцилляторных скоростей.

2. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения скоростного разброса проводились методом тормозящего поля по кривой отсечки коллекторного тока. При исследовании распределения осцилляторных скоростей метод тормозящего поля должен быть существенно модифицирован. Подробное описание соответствующей

щей методики содержится в [7]*. Используемая в настоящей работе конструкция анализатора имела дополнительные особенности, которые позволяли проводить измерения скоростного разброса в пучках, образующихся как током всего эмиттера, так и различными участками его поверхности.

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки. Здесь

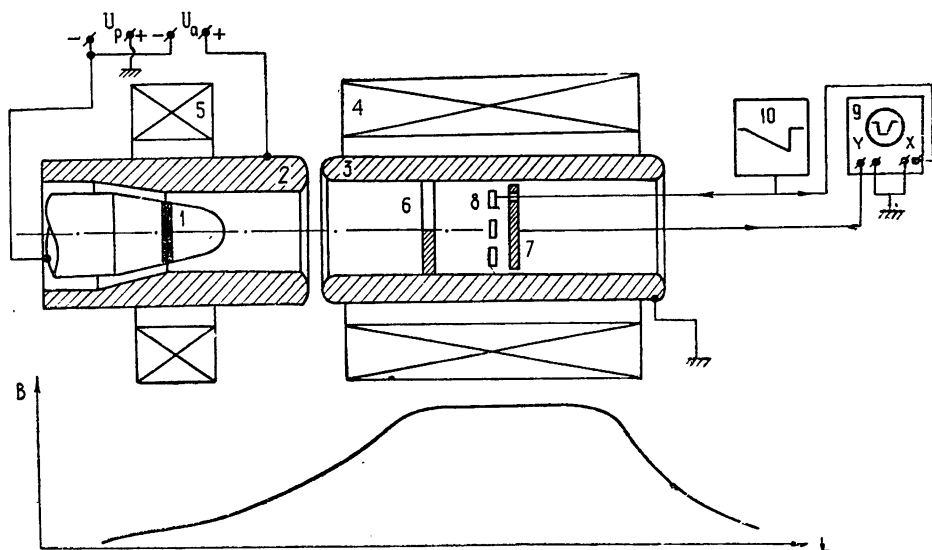


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для измерения скоростного разброса
Внизу — осевое распределение магнитного поля.

1 — катод с эмиттирующим пояском; 2 — первый анод; 3 — второй анод; 4 — основной соленоид, создающий нарастающее магнитное поле в области формирования и однородное магнитное поле в области измерения скоростного разброса (кривая в нижней части рис. 1); 5 — дополнительный соленоид для коррекции распределения магнитного поля вблизи катода; 6 — диафрагма для перехвата отраженных электронов [7] с секторными вырезами (4 выреза по 15° каждый — см. рис. 2); 7 — секционированный коллектор (каждая секция коллектора расположена против соответствующего выреза диафрагмы, — рис. 2); 8 — антидинаatronная сетка; 9 — осциллограф для визуализации кривой отсечки; 10 — генератор пилообразного напряжения, подаваемого на сетку 8 и горизонтальный вход осциллографа. Подключение любой секции коллектора 7 к вертикальному входу осциллографа дает кривую отсечки, относящуюся к той части электронного пучка, которая проходит через соответствующий вырез диафрагмы 6. Кривая отсечки всего пучка получается с достаточной точностью при параллельном соединении всех секций коллектора, если распределение тока пучка по секциям равномерное.

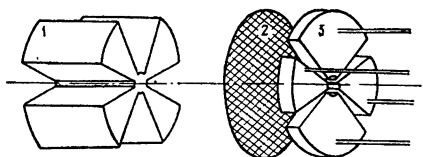


Рис. 2. Элементы анализатора скоростного разброса:

1 — диафрагма с секторными вырезами; 2 — антидинаatronная сетка; 3 — секционированный коллектор.

Кривые отсечки коллекторного тока дают закон распределения осцилля-

* Впервые методика была предложена в докладе А. Л. Гольденберга, Т. Б. Панкратовой, М. И. Петелина, В. А. Флягина на V Межвузовской конференции по электронике СВЧ, г. Саратов, 1966 г.

торных скоростей электронов в исследуемых винтовых пучках. Однако для обеспечения сравнения пучков, формируемых различными пушками, удобно использовать параметр [7]

$$\delta v_{\perp} = \frac{U_{c2} - U_{c1}}{2(U_0 - \bar{U}_c)}, \quad (1)$$

связанный с шириной кривой отсечки. В (1) U_{c1} и U_{c2} — потенциалы сетки δ (рис. 1) относительно катода, при которых коллекторный ток составляет соответственно 0,1 и 0,9 полного тока, $\bar{U}_c = \frac{U_{c1} + U_{c2}}{2}$, U_0 — полное напряжение пучка. Величина δv_{\perp} , которая ниже будет именоваться скоростным разбросом, практически совпадает с $\frac{v_{\perp 2} - v_{\perp 1}}{\bar{v}_{\perp}}$,

где $v_{\perp 1}$, $v_{\perp 2}$ и \bar{v}_{\perp} — максимальные осцилляторные скорости электронов в пучке, проходящем на коллектор, при потенциалах на сетке U_{c1} , U_{c2} и \bar{U}_c соответственно.

Для устранения мешающего действия факторов 2), 3)* использовалась оптимизированная конструкция пушки, одинаковая для всех эмиттеров и рассчитанная в [8] (расчетный скоростной разброс для выбранных геометрии электродов, ширине эмиттирующего пояaska и конфигурации магнитного поля не превышал 1%). Нарушения аксиальной симметрии электронно-оптической системы не влияют на результаты измерений скоростного разброса, если кривая отсечки относится к току одной из секций коллектора. Сопоставление кривых отсечки, соответствующих различным секциям, и распределение тока по секциям позволяют судить о степени нарушения аксиальной симметрии.

3. ЗАВИСИМОСТЬ РАЗБРОСА СКОРОСТЕЙ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ШЕРОХОВАТОСТЕЙ ЭМИТТЕРА

Для проведения экспериментов было изготовлено несколько эмиттеров, отличающихся химическим составом, рабочей температурой, технологией изготовления и состоянием поверхности. Ниже дана краткая характеристика исследованных катодов.

1) *Оксидно-иттриевый катод*. Рабочая температура 1400 — 1600°C. Материалом керна служил молибден. С керном спекалась губка из порошка тантала с размером зерен до 40 мкм. После спекания на губку наносился порошок окиси иттрия Y_2O_3 . Использованные образцы оксидно-иттриевых эмиттеров имели размеры неровностей (табл. 1) 20 ÷ 25 и 10 мкм (в последнем случае применялась специальная механическая обработка).

2) *Прессованный оксидно-иттриевый катод («керит»-катод)*.

Рабочая температура 1600°C. Эмиттер спрессован** в форме шайбы из смеси W (94%) и V_2O_5 (6%). Зернистость W 2 ÷ 3 мкм с последующим спеканием при $t = 2000^\circ\text{C}$. Высота неровностей — 5 мкм.

3) *Синтерированный оксидно-бариевый катод*. Рабочая температура 1000 ÷ 1200°C. Состояние поверхности примерно такое же, как и у оксидно-иттриевого катода.

4) *Прессованный оксидный катод*. Рабочая температура 1100°C. Состав 90% Ni и 10% основного карбоната бария — стронция — кальция. Пластификатором служил поливиниловый спирт; давление прессования

* Напомним, что исследовались факторы 1), 4), 5) — см. Введение.

** Использовалась пресс-форма закрытого типа.

— $6 \div 8 \text{ т/см}^2$. Спекание проводилось при $t = 1200^\circ\text{C}$. Высота неровностей поверхности катода $\sim 5 \text{ мкм}$.

5) **Вольфраматный катод.** Рабочая температура 1300°C . Состав: 90% W, 9% вольфрамата бария — кальция и 1% Al с добавкой парафина в качестве пластификатора. Давление прессования $10 \div 20 \text{ т/см}^2$. Температура спекания $\sim 1800^\circ\text{C}$. Высота неровностей $\sim 5 \text{ мкм}$.

Величина шероховатостей эмиттеров определялась методом светового сечения профиля на двойном микроскопе Линника МИС-11, пригодном для определения чистоты поверхности до 9 класса включительно.

Результаты измерений скоростного разброса для различных типов эмиттеров ($\delta v_{\perp \text{эксп}}$) приведены в табл. 1. Измерения выполнялись при одном и том же режиме работы электронной пушки, близком к критическому*, и при одинаковых значениях тока эмиссии.

Таблица 1

	Тип катода	Высота неровн. r_0 , мкм	$\delta v_{\perp \text{эксп}}$, %	$\delta v_{\perp \text{тн}}$, %	$\delta v_{\perp \text{н}}$, %	Примечание
1а	Оксидно-иттриевый	20	17 ± 2	11	4	Величина зерен губки 20 мкм
1б	Оксидно-иттриевый	25	17 ± 2	12	4	
1в	Оксидно-иттриевый	10	14 ± 2	8	4	Губка заглажена Катод шлифован
2	„Керит“-катод	5	9 ± 1	5,5	4	
3	Оксидный	5	17 ± 2	11	3	
4	Прессованный оксидный	5	9 ± 1	5,5	3	
5	Вольфраматный	5	9 ± 1	5,5	3	

Как видно из табл. 1, имеет место корреляция между величиной скоростного разброса и высотой неровностей эмиттеров. В частности, независимо от химического состава, у всех гладких катодов (размер шероховатостей не превышает 5 мкм) разброс одинаков. Характерно, что у первых двух типов оксидно-иттриевых катодов величина зерен танталовой губки была различной (у катода № 1а величина зерна составляла 20 мкм, а у катода № 1б — 40 мкм), тогда как измерения высоты неровностей дали одинаковые результаты. Это, вероятно, объясняется спеканием зерен губки в конгломераты. Высота неровностей, по-видимому, определяется отдельными выступами этих крупных образований, а не самими зернами. У катода № 1в (табл. 1) высота неровностей была существенно уменьшена (см. стр. 607), что отразилось на величинах скоростного разброса.

Сравнивая указанные выше результаты с теоретическими оценками, следует учитывать, что даже при наиболее благоприятных условиях измеренные величины скоростного разброса определяются не только шероховатостями эмиттеров, но и начальными скоростями электронов. Согласно [2], разброс по скоростям, обусловленный только шероховатостями эмиттеров, определяется выражением

$$\delta v_{\perp \text{тн}} = 1,6 n \left[\frac{r_0}{h} \left(1 + \frac{\pi^2}{4} \text{tg}^2 \varphi \right) \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где r_0 — высота неровностей эмиттера; h — высота первой вершины траектории электрона над поверхностью катода (для критического режима

* Измерения проводились при $p = I_a/I_0 = 0,1$, где I_a — ток 1-го анода, I_0 — ток эмиссии.

эта величина становится равной расстоянию d от катода до 1-го анода (рис. 1)); φ — угол наклона магнитного поля к поверхности катода; n — коэффициент понижения скоростного разброса [2], зависящий от $p = I_a/I_0$. Скоростной разброс, определяемый начальными тепловыми скоростями электронов [2],

$$\delta v_{\perp n} = 3,6 n \sqrt{\frac{kT}{eU_a}} \left[\frac{d}{h} \left(1 + \frac{\pi^2}{4} \operatorname{tg}^2 \varphi \right) \right]^{1/2}, \quad (3)$$

где k — постоянная Больцмана; T — рабочая температура катода °К; U_a — анодное напряжение.

В табл. 1 приведены величины $\delta v_{\perp ш}$ и $\delta v_{\perp н}$, вычисленные по формулам (2) и (3) при $n = 0,87$ [2] ($p = 0,1$ — см. примечание на стр. 608). Значения r_0 брались для соответствующих эмиттеров из табл. 1; рабочие температуры эмиттеров были указаны выше. В использованной пушке $d = 3,5$ мм, $\varphi = 5^\circ$. Для выбранного режима $U_a = 900$ в и $h = d$.

Сопоставление измеренных величин скоростного разброса $\delta v_{\perp \text{эксп}}$ с суммарной величиной $\delta v_{\perp ш} + \delta v_{\perp н}$ показывает, что во всех случаях совпадение теоретических оценок с экспериментальными данными вполне удовлетворительное.

Таким образом, результаты измерений и их соответствие с теоретическими данными подтверждают, что шероховатости поверхности существенно влияют на разброс осцилляторных скоростей. Например, у «керит»-катода разброс, обусловленный шероховатостями, уменьшается по сравнению с оксидно-иттриевым катодом в 2 раза (с 11 до 5,5%). Особенно значительна роль шероховатостей в пушках с малым расстоянием катод — анод или, если режим отличается от критического, — с малой высотой электронной траектории h .

4. ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТНОГО РАЗБРОСА ОТ НАЧАЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ

Из формулы (3) следует, что разброс, обусловленный начальными скоростями, зависит от анодного напряжения. Это дает возможность выделить из измеренных величин $\delta v_{\perp \text{эксп}}$ части, обусловленные влиянием начальных скоростей.

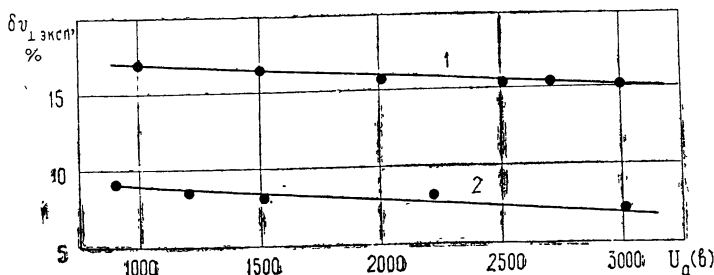


Рис. 3. Зависимость разброса осцилляторных скоростей от анодного напряжения: 1 — оксидно-иттриевый катод; 2 — «керит»-катод.

Соответствующие измерения проводились в режиме, близком к критическому ($h = d$, $p = 0,1$). Для сохранения формы траекторий при различных U_a отношение U_a/B^2 поддерживалось постоянным. Зависимость δv_{\perp} от U_a изображена на рис. 3, согласно которому с увеличением U_a разброс действительно уменьшается. Приведенные экспериментальные

данные позволяют вычислить среднюю начальную энергию электронов. Пусть $\delta v_{\perp i}$ — скоростной разброс, обусловленный одним из факторов; тогда, полагая, что все факторы действуют независимо, получаем, что полный скоростной разброс

$$\delta v_{\perp} = \sum_i \delta v_{\perp i}. \quad (4)$$

Среди величин $\delta v_{\perp i}$ только разброс, обусловленный начальными скоростями — $\delta v_{\perp n}$, зависит от анодного напряжения. Поэтому разность величин полного скоростного разброса при двух значениях анодного напряжения

$$\delta v_{\perp}^{(1)} - \delta v_{\perp}^{(2)} = \delta v_{\perp n}^{(1)} - \delta v_{\perp n}^{(2)}. \quad (5)$$

Используя (3), получаем из (5) при $h = d$

$$\begin{aligned} \delta v_{\perp}^{(1)} - \delta v_{\perp}^{(2)} = 3,6 n \sqrt{kT} \left(1 + \frac{\pi^2}{4} \operatorname{tg}^2 \varphi \right)^{1/2} \times \\ \times \left(\frac{1}{\sqrt{U_{a1}}} - \frac{1}{\sqrt{U_{a2}}} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Формула (6) позволяет по результатам двух измерений вычислить kT (в общем случае — среднюю начальную энергию, если начальные скорости электронов имеют нетепловое происхождение [2]). Соответствующие расчеты с использованием $\delta v_{\perp}^{(i)}$ и $\sqrt{U_{ai}}$ из рис. 3 и $n = 0,87$ дают для оксидно-иттриевых и «керит»-катодов $kT = 0,16 - 0,20$, что соответствует рабочей температуре указанных катодов ($1800 \div 2000^\circ\text{K}$).

В свою очередь, подстановка kT в (3) позволяет определить вклад в суммарный разброс, обусловленный начальными тепловыми скоростями.

5. ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТНОГО РАЗБРОСА ОТ АНОДНОГО ТОКА

Увеличение магнитного поля снижает высоту h электронных траекторий над катодом пропорционально B^2 [2]. Разброс скоростей электронов при этом растет согласно (2) и (3) пропорционально B . Кроме того, повышение B способствует приросту тока пучка за счет электронов с относительно большими осцилляторными скоростями, которые при меньших B перехватываются анодом. Указанная составляющая тока пучка, очевидно, способствует увеличению скоростного разброса, что учитывается коэффициентом n в (2) и (3).

Например, возрастание B на 10% увеличивает разброс за счет h в 1,1 раза и за счет n (при указанном изменении B анодный ток практически падает с $0,1 I_0$ до нуля) в 1,15 раза. Ожидаемое общее возрастание суммарного скоростного разброса составляет 25% от величины, полученной в критическом режиме, т. е. для оксидно-иттриевого катода ($r_0 = 20 \text{ мкм}$) и «керит»-катода соответственно с 17 до 21% и с 9 до 11%. По экспериментальным данным разброс возрос для оксидно-иттриевого катода до 20% и для «керит»-катода — до 13%.

Таким образом, резкое увеличение скоростного разброса при переходе к закритическому режиму объясняется, по-видимому, совместным действием указанных двух факторов. С этой точки зрения представляет интерес зависимость скоростного разброса от магнитного поля (соответственно анодного тока) в области «скачка», т. е. при уменьшении анодного тока от $0,1 I_0$ до 0. На рис. 4 приведены соответствующие кривые для двух типов катодов. Результаты экспериментов свидетельствуют

о целесообразности использования докритических режимов работы пушки, при которых от пучка отсекается часть, приходящаяся на электроны с минимальными продольными скоростями в области однородного магнитного поля.

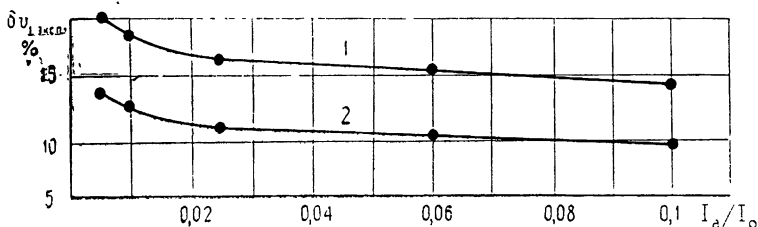


Рис. 4. Зависимость разброса осцилляторных скоростей от анодного тока:

1 — оксидно-итриевый катод; 2 — „керит“-катод.

6. ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТНОГО РАЗБРОСА ОТ ТОКА ЭМИССИИ

Учет пространственного заряда в магнетронно-инжекторных пушках МЦР является сложной задачей. В [1] дана оценка зависимости скоростного разброса от тока пучка на основе расчета искажения электрического поля над поверхностью эмиттеров под действием пространственного заряда пучка. Если распределение полей в области формирования является квазиоднородным, то начальная осцилляторная скорость электрона $v_{\perp к}$ пропорциональна напряженности электрического поля на катоде E_k . Поэтому изменение электрического поля, обусловленное пространственным зарядом, в первом приближении должно вызывать пропорциональное изменение скоростей электронов. Так как исследуемые пушки идентичны по своим геометрическим параметрам и электрическому режиму, то для всех эмиттеров следует ожидать возрастания разброса на одну и ту же величину.

Соответствующие измерения проводились с катодами (табл. 1) при изменении тока эмиссии от $0,005 I_d$ до $0,25 I_d$ (I_d — «ленгмюровский» ток, т. е. величина тока, вычисленная для исследуемой пушки, рассматриваемой как обычный диод, по закону «трех вторых»).

Результаты измерений приведены на рис. 5. Как видно, для всех

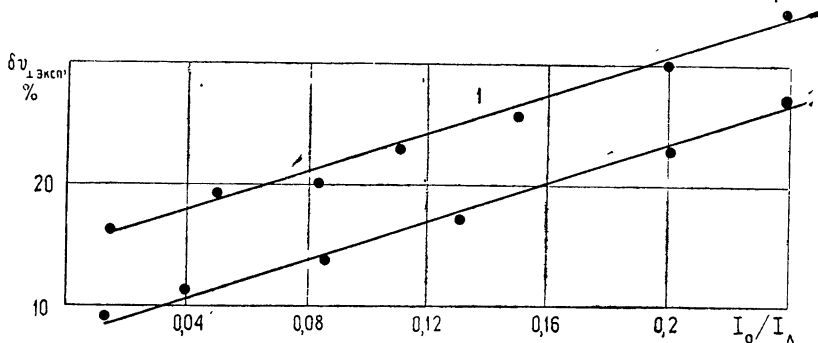


Рис. 5. Зависимость разброса осцилляторных скоростей от тока эмиссии:

1 — оксидно-итриевый катод, 2 — „керит“-катод.

типов катодов скоростной разброс возрастает на 8 ÷ 10% при повышении тока от малых значений ($0,005 \div 0,01 I_d$) до величины ($0,1 \div 0,15 I_d$).

Таким образом, действительно, особенности эмиттеров сказываются лишь на начальных значениях разброса при малых токах, когда скоростной разброс определяется неоднородностями поверхности эмиттера и начальными скоростями. Отметим, что форма электродов пушки рассчитывалась без учета пространственного заряда.

Авторы благодарны А. Л. Гольденбергу, В. К. Юлпатову за полезные советы.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Л. Гольденберг, М. И. Петелин, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 16, № 1, 141 (1973).
2. Ш. Е. Цимринг, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 15, № 8, 1247 (1972).
3. В. К. Лыгин, Ш. Е. Цимринг, ЖТФ, 47, вып. 11 (1971). 7, 41
4. В. К. Лыгин, Ш. Е. Цимринг, Электронная техника, сер. 1, Электроника, ВУ, № 6, 59 (1971).
5. А. В. Гапонов, М. И. Петелин, В. К. Юлпатов, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 10, № 9—10, 1414 (1967).
6. А. Л. Гольденберг, Т. Б. Панкратова, Тезисы доклада на III Всесоюзном семинаре по методам расчета электронно-оптических систем, Ленинград, 1969.
7. Е. Г. Авдошин, А. Л. Гольденберг, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, (в печати).
8. В. К. Лыгин, Ш. Е. Цимринг, ЖТФ. (в печати).
9. И. В. Алямовский, Электронные пучки и электронные пушки, изд. Сов. радио, М., 1966.

Научно-исследовательский радиофизический институт

Поступила в редакцию
17 января 1972 г.

EXPERIMENTAL STUDY OF VELOCITY DISPERSION IN SCREW ELECTRON BEAMS

E. G. Avdoshin, L. V. Nikolaev, I. N. Platonov, Sh. E. Tsimring

It is experimentally shown that roughnesses of the emitter surface, the initial velocity of electrons and the spatial charge field influence essentially on the oscillator velocity dispersion in screw beams formed by magnetron-injection guns. The measured values of the total spread under the action of the above factors reach 10—20% in real beams. The investigated types of emitters are briefly characterized and the methods of measuring the velocity dispersion is given. The experimental data are compared with theoretical estimations.