

УДК 537.52

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИССИОННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ КАТОДОВ ГИРОТРОНОВ ПО ВОЛЬТ-АМПЕРНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

*Н. П. Венедиктов, М. Ю. Глявин, В. Е. Запевалов, А. Н. Куфтин,  
А. С. Постникова, М. В. Юлпатова*

Разработана схема автоматизированного исследования вольт-амперных характеристик гирорезонансных приборов. Исследована эффективная эмиссионная неоднородность катодов мощных гиротронов на основе анализа вольт-амперных характеристик. Приводятся экспериментальные данные о параметре эффективной эмиссионной неоднородности для различных режимов. Приведена оценка допустимой эмиссионной неоднородности катода для мощных гиротронов и зависимость параметров электронного пучка от эмиссионной неоднородности катода. Предложена методика комплексных измерений, позволяющая судить о вкладе в эмиссионную неоднородность катода различных физических механизмов.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В гиротронах — источниках мощного (до 1 МВт и более) когерентного излучения миллиметрового диапазона длин волн электронный пучок формируется магнетронно-инжекторной пушкой, работающей в режиме температурного ограничения тока эмиссии с электрическим полем на катоде, лишь незначительно ослабленным полем пространственного заряда. Задачу оптимизации электронно-оптической системы гиротронов усложняют высокие требования, предъявляемые к однородности винтовых электронных пучков и к малому разбросу по скоростям электронов в пучке. Ухудшение однородности электронного потока приводит к резкому снижению КПД или возникновению различного рода неустойчивостей, приводящих к срыву колебаний. Решение задачи оптимизации параметров пушек гиротронов требует детального анализа многих физических процессов в электронно-оптической системе (ЭОС) гиротронов, использования сложных математических моделей [1, 2]. В то же время, для практики требуются достаточно простые и быстрые способы анализа качества ЭОС, позволяющие оценивать основные параметры катодов. Одним из важных параметров влияющих на однородность винтового электронного пучка, является эмиссионная неоднородность, т. е. распределение эмиссии по

поверхности катода (или же распределение элементарных участков поверхности катода по возможным значениям эмиссии) и реально существующее в катоде отклонение эмиссии от среднего значения. В работах [3–5] развита методика определения эмиссионной неоднородности катода на основе анализа переходного участка его вольт–амперной характеристики для классических маломощных электронных приборов, работающих в режиме пространственного заряда. Катоды гиротронов работают в режиме температурного ограничения тока эмиссии при существенно более высоких напряжениях и токах. Целью данной работы является развитие указанной методики для пушек гироприборов, отладка экспериментальных методов точного измерения вольт–амперных характеристик гиротронов, отработка методики экспресс–анализа качества катодов, предназначенных к установке в гирорезонансные приборы.

Информация о ВАХ необходима и для моделирования динамических процессов в мощных импульсных гиротронах, когда установление колебаний может существенно зависеть от процессов на фронте импульса ускоряющего напряжения. В зависимости от формы переходной характеристики напряжения и тока в гиротронах с резонаторами большого диаметра возможно возбуждение различных мод и возникновение паразитной генерации [6].

## 2. ИСХОДНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Как было принято в работе [5], условимся понимать под эффективной эмиссионной неоднородностью некоторую, проявляющуюся в характеристиках катода, неоднородность, не вникая в микромеханизмы, приводящие к неоднородности катода, а также не ставя задачи исследовать “эмиссионный рельеф” катода по координатам его поверхности.

На вольт–амперной характеристике идеального катода можно выделить два участка: до некоторого значения анодного напряжения  $U_n$  зависимость тока от напряжения определяется уравнением Чайльда–Ленгмюра:

$$j(U) = \hat{g}U^{3/2}, \quad (1)$$

где  $\hat{g}$  — первеанс эквивалентного диода, (т. н. режим пространственного заряда), а при напряжениях  $U \geq U_n$  (область насыщения) уравнением Ричардсона:

$$j = BT^2 \exp\left(-\frac{e\varphi}{kT}\right), \quad (2)$$

где  $B$  — эмиссионная постоянная, зависящая от геометрии катода и материала эмиттера,  $\varphi$  — работа выхода,  $T$  — абсолютная температура,  $k$  — постоянная Больцмана,  $e$  — заряд электрона.

Неоднородность эмиссии проявляется в размытии области перехода катода из режима пространственного заряда в режим насыщения, что связано с переходом различных участков катода в режим насыщения при разных значениях анодного напряжения. С ростом напряжения часть площади катода, работающая в режиме пространственного заряда, уменьшается, а часть площади катода, работающая в режиме насыщения, увеличивается. Напряжение перехода каждого элементарного участка площади катода зависит от его эмиссионных свойств: чем более однороден по эмиссии катод, тем уже будет зона перехода из режима пространственного заряда в режим насыщения. Установим связь между эмиссионной неоднородностью катода и его вольт-амперной характеристикой, а именно — получим выражение описывающее распределение площади катода по току насыщения. Очевидно, что на катоде можно выделить две зоны: участки площади катода, работающие при данном напряжении в режиме пространственного заряда (присвоим всем переменным, относящимся к этому режиму, индекс “ $\rho$ ”), и участки, работающие в режиме насыщения (присвоим индекс “ $n$ ”). При этом всегда выполняются равенства

$$S = S_{\rho} + S_n \quad (3)$$

$$I(U) = I_{\rho}(U) + I_n(U),$$

где  $I_{\rho}(U)$  — часть подного тока катода, которая поступает с участков, работающих при напряжении  $U$  в режиме пространственного заряда

$$I_{\rho}(U) = \int j(U) dS = j(U) \int dS, \quad (4)$$

$j(U)$  — плотность тока пространственного заряда, одинаковая при данном напряжении  $U$  для всех участков, работающих в режиме пространственного заряда,  $I_n(U)$  — часть полного тока катода, которая поступает с участков, работающих при данном  $U$  в режиме насыщения. В работе [5] показано, что плотность распределения эффективной эмиссионной неоднородности, с точностью до постоянного множителя, равна второй производной от вольт-амперной характеристики неоднородного катода:

$$F(j_n) = -\frac{1}{\hat{g}^2} \cdot \frac{d^2 I}{dx^2}, \quad (5)$$

где  $x = U^{3/2}$ , часть площади катода, работающая в режиме пространственного заряда, пропорциональна первой производной вольт-амперной характеристики катода

$$S_{\rho}(x) = \frac{1}{\hat{g}} \cdot \frac{dI}{dx}, \quad (6)$$

а часть площади, катода находящаяся в режиме насыщения, определяется соотношением

$$S_{\text{н}}(x) = S - \frac{1}{\hat{j}} \cdot \frac{dI}{dx}, \quad (7)$$

где  $S$  — полная площадь катода. Как следует из (1) и (2), ширина зоны перехода от режима ограничения тока пространственным зарядом к режиму температурного ограничения тока эмиссии зависит от различия температур отдельных участков катода и различия работы выхода электронов для различных участков поверхности. Так, относительное изменение напряжения перехода  $\frac{dU_{\text{п}}}{U_{\text{п}}}$  при относительном изменении работы выхода  $\frac{d\varphi}{\varphi}$  определяется соотношением

$$\frac{dU_{\text{п}}}{U_{\text{п}}} = \left( -\frac{2e\varphi}{3kT} \right) \frac{d\varphi}{\varphi}, \quad (8)$$

а при относительном изменении температуры  $\frac{dT}{T}$

$$\frac{dU_{\text{п}}}{U_{\text{п}}} = \left( \frac{4}{3} + \frac{2e\varphi}{3kT} \right) \frac{dT}{T}, \quad (9)$$

коэффициент пропорциональности  $\left( \frac{2e\varphi}{3kT} \right)$  для типичных работы выхода электронов  $\varphi = 2,3$  эВ и температуры катода  $T = 1000^\circ \text{C}$  в гиротронах примерно равен 15. Для получения информации о том, какой именно механизм даёт наибольший вклад, необходимо параллельно с измерением вольт-амперной характеристики измерять распределение температур на поверхности катода (например, пирометрическими методами) и неоднородность работы выхода (методами вторичной электронной эмиссии). В катодах, имеющих однородные по поверхности работу выхода и температуру, остаточное размытие зоны перехода связано, по-видимому, с тепловыми уходами размеров катода и вызванными этим перекосами, шероховатостью эмитирующей поверхности и т. д. Если отнормировать ток и напряжение относительно значений  $I_0$  и  $x_0$ , соответствующих максимуму функции плотности распределения, а части площади катода, работающие в режиме пространственного заряда и в режиме насыщения относительно полной площади катода  $S$ , можно получить систему безразмерных переменных

$$\hat{j} = \frac{I}{I_0}, \quad \hat{x} = \frac{x}{x_0}, \quad \hat{S}_\rho = \frac{S_\rho}{S}, \quad \hat{S}_{\text{н}} = \frac{S_{\text{н}}}{S},$$

которую удобно использовать для сравнения между собой различных катодов.

### 3. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для получения достоверных результатов необходимо снимать вольт-амперную характеристику с высокой точностью, поэтому в ходе эксперимента используется автоматизированная система разработанная на основе компьютера HiCom (DEC) и аппаратуры КАМАК [7]. Измерения проводились следующим образом: на катод подавались прямоугольные импульсы отрицательной полярности ( $\tau = 100$  мкс), амплитуда которых плавно уменьшалась во времени. Измерения проводятся через определённый пользователем интервал по ускоряющему напряжению. Значения тока эмиссии и напряжения на катоде за время импульса записываются в соответствующие буферы АЦП с заданной частотой (наименьший интервал между двумя точками 200 нс). Считанные в компьютер данные фильтруются и после усреднения выводятся на экран монитора. Полученные данные записываются на диск для вторичной обработки. Для повышения точности измерений и избавления от шумовых помех в автоматизированной системе применяется переключение диапазонов АЦП в зависимости от уровня сигналов.

Вторичная обработка экспериментальных данных проводилась на IBM PC при помощи специально разработанного пакета программ, включающего многооконный пользовательский интерфейс, дающий возможность визуализации данных в различных координатах, программ для двойного дифференцирования табулированных функций, их сглаживания и экстраполяции.

Измерения проводились в двух режимах — моделирующем и рабочем (индексы “м” и “р” соответственно). Необходимость измерений в моделирующем режиме, т. е. при пониженных напряжениях, связана с тем, что в настоящее время такие важные экспериментальные характеристики ВЭП как скоростной разброс и относительная осцилляционная энергия электронов измеряются в моделирующем режиме, так и для исследования возможности быстрой диагностики катода перед установкой в гиротрон. Для сохранения плотности пространственного заряда и траекторий частиц магнитные поля, токи и напряжения в моделирующих режимах определялись из соотношений подобия [8, 9]

$$U_m = \frac{U_p}{K}, \quad B_m = \frac{B_p}{\sqrt{K}}, \quad I_m = \frac{I_p}{\sqrt{K^3}}. \quad (10)$$

На рис. 1 приведены вольт-амперные характеристики  $LaBa_6$  катода, снятые при различных температурах эмиттера, определяемых мощностью накала, в рабочем режиме катода  $I = 30$  А,  $U = 70$  кВ. Различия при измерении ВАХ в рабочем и моделирующем режимах связаны, в основном, с более высокой температурой и с большей напряжённостью поля на катоде, т. е. в большей роли эффекта Шоттки, при рабочих напряжениях. В моделирующих режимах ВАХ измерялись и в отсутствие

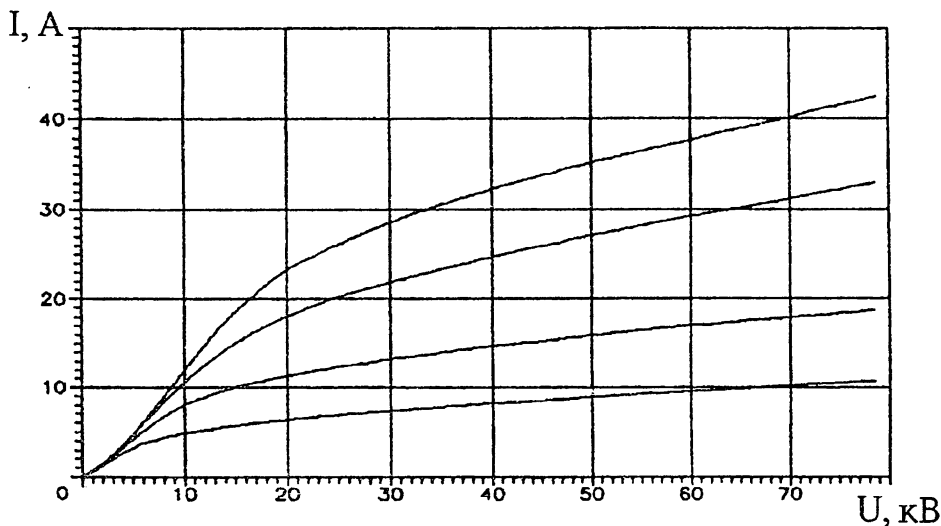


Рис. 1.

магнитного поля. Измерения ВАХ моделирующего режима в отсутствие магнитного поля обусловлено желанием проводить исследование катодов перед установкой в гиротрон. При этом эмиттер проще всего исследовать при пониженных напряжениях в режиме тока на анод в отсутствие прочих элементов электронно-оптической системы и магнитного поля. Для подобной диагностики требовалось проверить существует ли соответствие между величинами эффективной эмиссионной неоднородности измеряемыми в отличных от рабочего режимах.

Измеренные ВАХ рабочих режимов использовались при расчётах многомодовых процессов на фронте импульса ускоряющего напряжения в мощных гиротронах [10]. Полученные результаты расчётов зон возбуждения тех или иных мод гиротрона находятся в хорошем соответствии с экспериментом. В то же время, расчёты показали, что сценарий переходных процессов в гиротроне существенно зависит от формы импульсов ускоряющего напряжения и тока. Таким образом, точное измерение ВАХ гиротрона даёт возможность анализа переходных процессов в гиротронах с резонаторами большого диаметра, когда условия самовозбуждения могут выполняться для нескольких мод.

Нормированная функция плотности распределения во многих случаях хорошо описывается нормальным законом распределения, который в принятых нами координатах записывается в виде:

$$\hat{F}(j_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(1-\hat{x})^2}{2\sigma^2}\right). \quad (11)$$

Вторая производная нормированной вольт-амперной характеристики при переходе к идеально однородному по эмиссии катоду вырождается в

$\delta$ - функцию Дирака. В эту же функцию вырождается и нормальный закон распределения при  $\sigma \rightarrow 0$ , т. е.  $\sigma$  может служить безразмерным параметром эффективной эмиссионной неоднородности. В случае когда нормальным законом не удаётся достичь приемлемой аппроксимации, следует воспользоваться другими функциями и характеристикой будет служить параметр аналогичный  $\sigma$ , но определяемый законом распределения. На рис. 2 приводятся аппроксимации функции распределения эмиссионной неоднородности нормальным законом распределения, параметры которого определялись вариационным методом, для двух различных катодов [11]. Более плавное спадание справа от максимума вызвано влиянием эффекта Шоттки, и данное отклонение от нормального закона распределения снижает качество аппроксимации. В то же время видно, что, благодаря двойному дифференцированию ВАХ, вклад эффекта Шоттки в ширину функции распределения незначителен и им можно пренебречь, без существенного искажения информации о свойствах катода. Проведённые эксперименты показали, что, хотя ширина функции распределения эмиссионной неоднородности зависит от режима (рабочий или моделирующий, с магнитным полем или без), соотношения между шириной функции распределения для различных катодов сохраняются независимо от режима измерений.

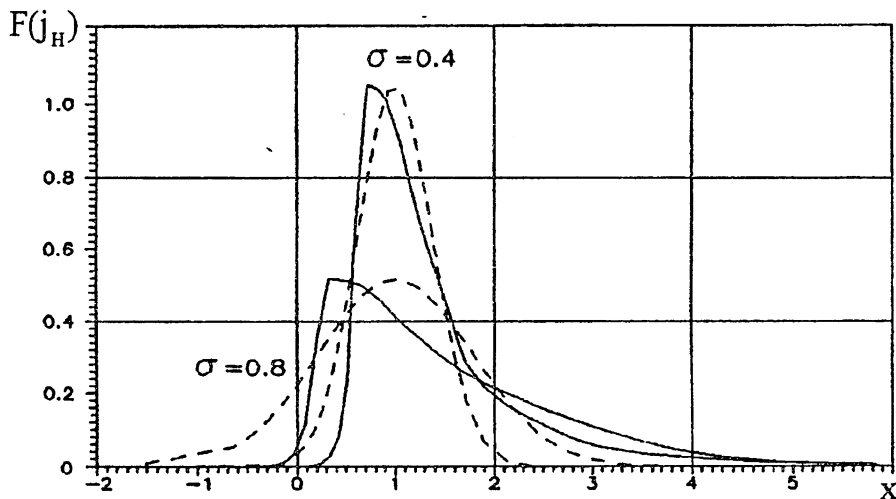


Рис. 2.

Использованная в описанных экспериментах установка позволяла одновременно с измерением вольт-амперных характеристик измерять с высокой точностью разброс скоростей электронов в пучке и относительную осцилляторную энергию методом тормозящего поля [8]. При этом в область резонатора гиротрона устанавливался анализатор, состоящий из сетки, на которую подаётся отрицательное напряжение, и коллектора. Сравнивая результаты измерений разброса поперечных скоростей элек-

тронов  $\delta V_1$  и величину эффективной эмиссионной неоднородности от тока пучка, можно видеть, что катоду с большей эмиссионной неоднородностью соответствует больший разброс скоростей электронов (рис. 3). Это можно объяснить тем, что катод, обладающий большей неоднородностью эмиссии, имеет больший разброс начальных скоростей электронов и/или нарушения аксиальной симметрии, что приводит к увеличению разброса скоростей электронов в рабочем пространстве гиротрона и, как следствие, к снижению КПД прибора. Результаты экспериментов свидетельствуют о существовании связи между величиной эмиссионной неоднородности и разбросом скоростей электронов, однако установить конкретный вид этой зависимости (получить эмпирические формулы для оценки одного параметра по другому) возможно лишь после экспериментального исследования значительного числа катодов.

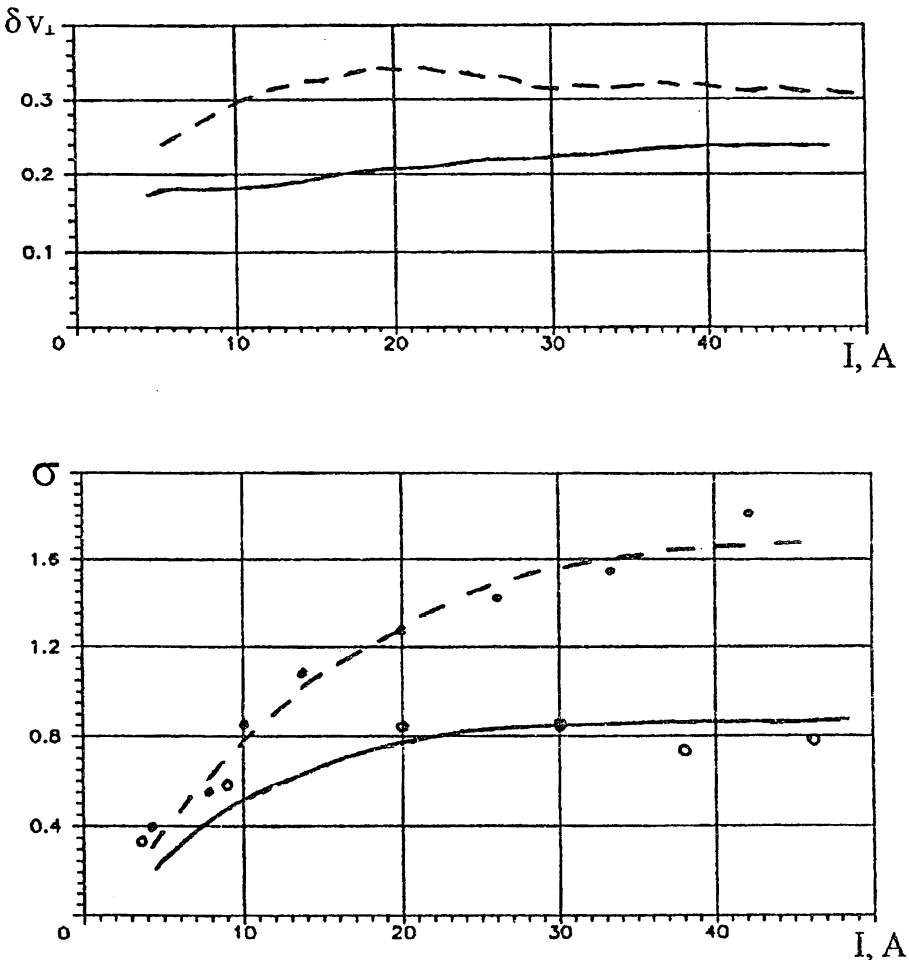


Рис. 3.

Сравнение параметров распределения эмиссионной неоднородности



для реального и моделирующего режимов позволяет сделать вывод о соответствии измерений и перейти для более детального анализа эмиссионной неоднородности катодов к комплексным измерениям характеристик катодов в моделирующем режиме. Для понимания механизмов, вызывающих неоднородность эмиссии, и определения распределения эмиссии по поверхности катода проектируется установка, включающая в себя возможность измерения вольт-амперных характеристик малых участков катода, анализ работы выхода в различных точках катода методом вторично-электронной эмиссии [12, 13] и измерение распределения температур. В настоящее время можно предположить, что катоды с  $\sigma = 0,3 - 0,4$  при рабочей температуре обладают достаточной однородностью для giroприборов, но, как указывалось выше, для более аккуратного анализа требуется накопить больший статистический материал и, возможно, использовать лучшую аппроксимацию для описания эмиссионной неоднородности (например  $\chi^2$  — распределение). Целесообразность предложенной методики для диагностики катодов подтверждается измерениями выходной мощности и КПД гиротрона с различными эмиттерами. Перед измерением КПД гиротрона измерялись его ВАХ в рабочем и моделирующем режимах при различных температурах подогревателя. Результаты экспериментов изображены на рис. 4 для различных эмиттеров в виде зависимости КПД гиротрона от измеренной эффективной эмиссионной неоднородности катода в рабочем режиме. При увеличении эффективной эмиссионной неоднородности соответственно понижается КПД гиротрона, поскольку при прочих равных условиях КПД гиротрона определяется качеством электронного пучка, т. е. однородностью эмиссии и отсутствием неустойчивостей в пучке.

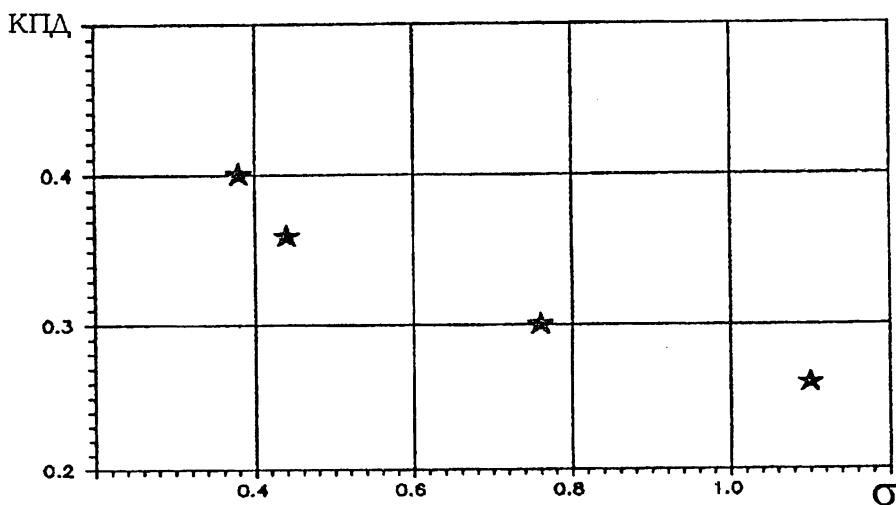


Рис. 4.

Для повышения достоверности оценок желательно учесть в уравнении Ричардсона зависимость работы выхода от электрического поля (эффект Шоттки:  $\varphi_{\text{ш}} = \varphi - \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_0}}$ ), а в уравнении Чайльда-Ленгмюра учесть температурную зависимость первеанса, обусловленную тепловыми уходами размеров катода.

#### 4. В Ы В О Д Ы

Описанная методика исследования катодов giroприборов по анализу переходного участка вольт-амперной характеристики даёт возможность быстрого анализа качества катода. При этом, при наличии достаточно большого статистического материала, возможно спрогнозировать реализуемый КПД прибора. Простота и оперативность метода позволяют использовать его для контроля за изменением качества катода в процессе эксплуатации. При проведении комплекса измерений включающего анализ ВАХ, исследование однородности работы выхода по поверхности катода, контроль за однородностью температуры, возможно дать полную характеристику эмиссионной способности катода. Описанная установка и методика экспериментов дают возможность точного измерения ВАХ катодов giroприборов и делают возможным контроль качества катодов, предназначенных к установке в giroприборы. После исследования данным методом достаточно большого числа катодов, при контроле технологии их изготовления, возможно выработать рекомендации по технологии изготовления и активации катодов giroприборов.

Авторы благодарят А. Л. Гольденберга за обсуждение результатов работы и ценные замечания, сделанные при чтении рукописи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гиротроны: Сб. науч. тр. /Под ред. В. А. Флягина — Горький: ИПФ АН СССР, 1989. — 216 с.
2. Лыгин В. К., Цимринг Ш. Е. //ЖТФ, 1973. Т. 43. № 8. С. 1695.
3. Волков В. Н., Ходневич С. П., Павлов А. С., Третьякова М. Г. //Электронная промышленность, 1984. № 7. С. 27.
4. Grant T. J.. Effective workfunction distributions derived from Miram curves. Triservice Cathode Workshop, 1986.
5. Ходневич С. П. //Электронная техника. Серия 1, 1969. № 4. С. 119.
6. Глявин М. Ю. //СВЧ техника. Серия 1, 1994. Вып. 2. С. 33.
7. Artyuch S. J., Kuftin A. N., Postnikova A. S., Zapevalov V. E. //Int. J. Electron., 1992. V. 72. № 5, 6. P. 1145.

8. Авдошин Е. Г., Гольденберг А. Л. //Изв. вузов. Радиофизика, 1973. Т. 16. № 10. С. 1605.
9. Дж. Пирс. Теория и расчёт электронных пучков. — М.: Сов. Радио, 1956.
10. Glyavin Yu. M. Mode interaction in powerful pulsed gyrotrons. Proc. of Int. Conf. РeН - 95, NPF3/P, Nice, 1995.
11. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справ. по математике. — М.: Наука, 1986. — 287 с.
12. Бронштейн И. М., Фрайман Б. С. Вторичная электронная эмиссия. — М.: Наука, 1969.
13. Черепин В. Т., Васильев М. А.. Методы и приборы для анализа поверхности материалов.: Справ. — Киев: Наук. Думка, 1982.

Институт прикладной физики  
РАН, г. Н. Новгород, Россия

Поступила в редакцию  
3 января 1996 г.

#### EXPERIMENTAL STUDY OF EMISSION SPREAD AT GYROTRONS CATHODES BY VOLT-AMPERE CHARACTERISTICS

*N. P. Venediktov, M. Yu. Glyavin, V. E. Zapevalov, A. N. Kuftin,  
A. S. Postnikova, M. V. Yulpatova*

The rezalts of theoretical and experimental study of emission spread at gyrotrons cathode are presented. The method of volt-ampere characteristics analysis is used. The value of permissible emission spread, dependence of velocity spread on the emission spread and dependence of output efficiency on the emission spread are given. The method is suggested for complex measurements, which permits to estimate a contribution of different physical mechanisms into the emission spread of the cathode.