

## **Исследование влияния неоднородности эмиссии с катода на качество электронного потока в электронно-оптической системе гиротрона**

*Представлены новые расчетные данные о влиянии неоднородности эмиссии на качество электронного потока, формируемого в электронно-оптической системе гиротрона. Распределения плотности тока эмиссии, использованные в расчетах, были экспериментально получены для разных катодов в гиротроне СПбПУ. Экспериментальные и расчетные данные по влиянию эмиссионных неоднородностей на скоростной разброс электронов удовлетворительно согласуются. Показано, что для определения основных параметров электронного пучка – скоростного и энергетического разбросов электронов, пространственной структуры пучка, коэффициента отражения электронов от магнитной пробки – необходимо учитывать реальные распределения плотности тока эмиссии с поверхности катода. Обсуждается пороговый уровень неоднородности эмиссии, допустимый для эффективной работы гиротронов.*

**Ключевые слова:** Вакуумные приборы, гиротрон, винтовые электронные потоки, термокатоды.

Гиротроны на данный момент являются одними из самых мощных СВЧ генераторов, работающих в длиннойимпульсном и квазинепрерывном режимах в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн излучения [1]. Эффективность данных приборов во многом определяется качеством формируемого в них винтового электронного потока (ВЭП), который должен иметь требуемую пространственную структуру и сочетать в себе высокую осцилляторную энергию электронов с малыми значениями скоростного и энергетического разбросов [2].

Качество электронного пучка сильно зависит от неоднородности термоэлектронной эмиссии с катода магнетронно-инжекторной пушки (МИП), используемой в качестве источника электронов в подобных приборах. К неоднородному распределению плотности тока эмиссии могут привести как неравномерность нагрева поверхности катода, так и неоднородность его работы выхода. Неоднородная эмиссия приводит к появлению неоднородных полей пространственного заряда, которые увеличивают разброс электронов в пучке по скоростям и способствуют возбуждению паразитных колебаний пространственного заряда, что приводит к энергетическому разбросу электронов. Неоднородная структура ВЭП, вызванная эмиссионной неоднородностью, может также послужить причиной развития паразитных мод в резонаторе гиротрона и неоднородного нагрева коллектора.

Одним из методов оценки неоднородности эмиссии с катода электронной пушки является расчет интегрального коэффициента неоднородности по измеренной вольтамперной характеристике (ВАХ) (например, [3]). В результате можно получить данные об интегральном коэффициенте эмиссионной неоднородности, усредненном по всей поверхности эмиттера. Однако несомненный интерес представляет также информация о пространственном распределении тока по эмитирующей поверхности катода.

Новые знания о закономерностях влияния эмиссионных неоднородностей на качество ВЭП в гиротроне, которые обсуждаются в данной работе, были получены в результате трехмерного траекторного анализа с использованием распределений плотности эмиссии, измеренных в гиротроне СПБПУ с рабочей частотой 74.2 ГГц и выходной мощностью ~ 100 кВт [4]. Трехмерный анализ был выполнен с использованием программного пакета CST Studio Suite [5].

Расчет траекторий в электронно-оптической системе (ЭОС) гиротрона был произведен с помощью вычислителя Tracking Solver, входящего в программный модуль CST Particle Studio. Регистрация обсуждаемых ниже параметров ВЭП выполнялась при помощи специального монитора, установленного в центральной плоскости резонатора гиротрона, где продольное распределение индукции магнитного поля  $B(z)$  достигает максимального значения. Для моделирования эмиссионных неоднородностей эмитирующий пояснок катода МИП разбивался на 72 сектора, смещенных друг относительно друга в азимутальном направлении на  $\Delta\theta = 5^\circ$ . Каждый сектор испускал 50 частиц, что давало в сумме 3600 электронных траекторий. Величины скоростного и энергетического разбросов в рамках данного исследования определялись как среднеквадратичные отклонения от их средних значений. Размер ячейки расчетной сетки в рамках трехмерного численного моделирования составлял  $l = 0.4$  мм. Общее число ячеек в области моделирования превышало 80 миллионов.

Для формирования ВЭП в гиротроне СПБПУ используется трехэлектродная МИП (рис. 1). Расчеты были проведены для двух конфигураций пушки. В стандартной конфигурации (рис. 1, а) угол наклона образующей конусной части катода к оси был одинаковым вдоль этой образующей и составлял  $35^\circ$ . В модифицированном варианте МИП (рис. 1, б) был установлен управляющий электрод с углом наклона конусной части, равным  $50^\circ$  и изолированный от других элементов катода. Ранее проведенные эксперименты и 2D моделирование [4] продемонстрировали возможность оптимизации распределения электрического поля в прикатодной области путем регулирования потенциала управляющего электрода, что позволило снизить скоростной разброс, повысить среднюю осцилляторную энергию электронов и увеличить КПД гиротрона.

В рамках настоящего исследования были рассчитаны параметры ВЭП для азимутальных распределений плотности тока эмиссии  $j_e(\theta)$  трех катодов, измеренных в гиротроне СПБПУ. Распределения С1 и С2 были получены в экспериментах с  $\text{LaB}_6$

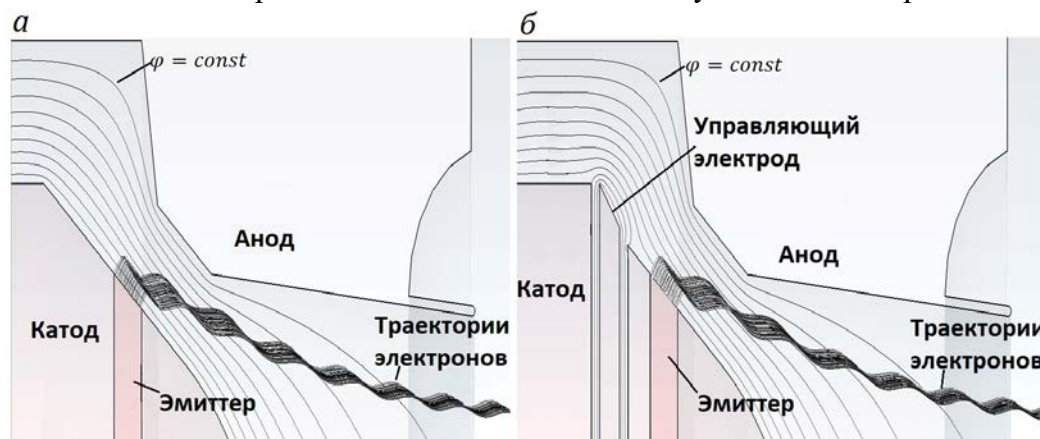


Рис. 1. Модель МИП гиротрона для стандартной геометрии катода (а) и для катода с управляющим электродом (б). Показаны эквипотенциальные линии в области между катодом и анодом и траектории электронов, рассчитанные для рабочего режима гиротрона (для схемы с управляющим электродом (б) напряжение  $U_{cont} = -9$  кВ).

Таблица 1. Параметры ВЭП для катодов с разной эмиссионной неоднородностью

| МИП со стандартной геометрией                               |                  |                |                        |                          |               |
|---|------------------|----------------|------------------------|--------------------------|---------------|
| Катод   | $\delta j_e, \%$ | $\bar{\alpha}$ | $\delta v_{\perp}, \%$ | $\delta \varepsilon, \%$ | $K_{ref}, \%$ |
| C0  | 0                | 1.277          | 6.93                   | 0.26                     | –             |
| C1  | 23               | 1.279          | 7.04                   | 0.50                     | –             |
| C2  | 50               | 1.283          | 7.52                   | 1.33                     | –             |
| C3  | 74               | 1.288          | 8.07                   | 2.10                     | 0.26          |
| C4  | 74               | 1.283          | 8.09                   | 2.63                     | 0.1           |
| МИП с управляющим электродом ( $U_{cont} = -9 \text{ kV}$ ) |                  |                |                        |                          |               |
| Катод   | $\delta j_e, \%$ | $\bar{\alpha}$ | $\delta v_{\perp}, \%$ | $\delta \varepsilon, \%$ | $K_{ref}, \%$ |
| C0  | 0                | 1.288          | 3.05                   | 0.28                     | –             |
| C1  | 23               | 1.288          | 3.29                   | 0.50                     | –             |
| C2  | 50               | 1.290          | 4.26                   | 1.34                     | –             |
| C3  | 74               | 1.294          | 5.35                   | 2.10                     | –             |

катодами, а распределение C3 – с металлопористым W-Ba катодом (например, [6]). Кроме того, были проведены расчеты для катодов с однородной эмиссией (C0) и с плавным моделирующим распределением  $j_e(\theta) \sim \sin(\theta) + 0.3\sin(3\theta)$  (C4). Распределения  $j_e(\theta)$  для исследованных катодов показаны ниже на рис. 2. Каждый из вышеупомянутых катодов характеризовался величиной коэффициента эмиссионной неоднородности  $\delta j_e$  (см. табл. 1), который определялся по зависимости  $j_e(\theta)$  как относительное среднеквадратичное отклонение плотности тока от среднего значения. Кроме  $\delta j_e$  в таблице 1 приведены рассчитанные значения следующих параметров электронного пучка: среднего питч-фактор  $\bar{\alpha}$  ( $\bar{\alpha}$  – отношение поперечной скорости электронов к продольной), разбросов поперечной скорости  $\delta v_{\perp}$  и энергии  $\delta \varepsilon$ , а также коэффициента  $K_{ref}$ , определяющего долю электронного заряда, отраженного от магнитной пробки.

Для моделирования МИП с управляющим электродом был выбран режим с отрицательным напряжением на этом электроде, при котором возможно достижение минимальных значений скоростного разброса [4]. Рассчитанные значения параметров ВЭП для пушки с управляющим электродом при оптимальном напряжении  $U_{cont} = -9 \text{ kV}$  приведены в нижней части таблицы 1. Видно, что для модифицированной МИП уменьшено значение начального позиционного разброса (катод C0) по сравнению со стандартной пушкой. Как следствие, эмиссионные неоднородности влияют на параметры ВЭП для данной МИП в большей степени по сравнению со стандартной МИП (ср. верхнюю и нижнюю части таблицы 1). Переход к МИП с управляющим электродом сопровождается снижением порогового уровня эмиссионных неоднородностей, при котором они заметно

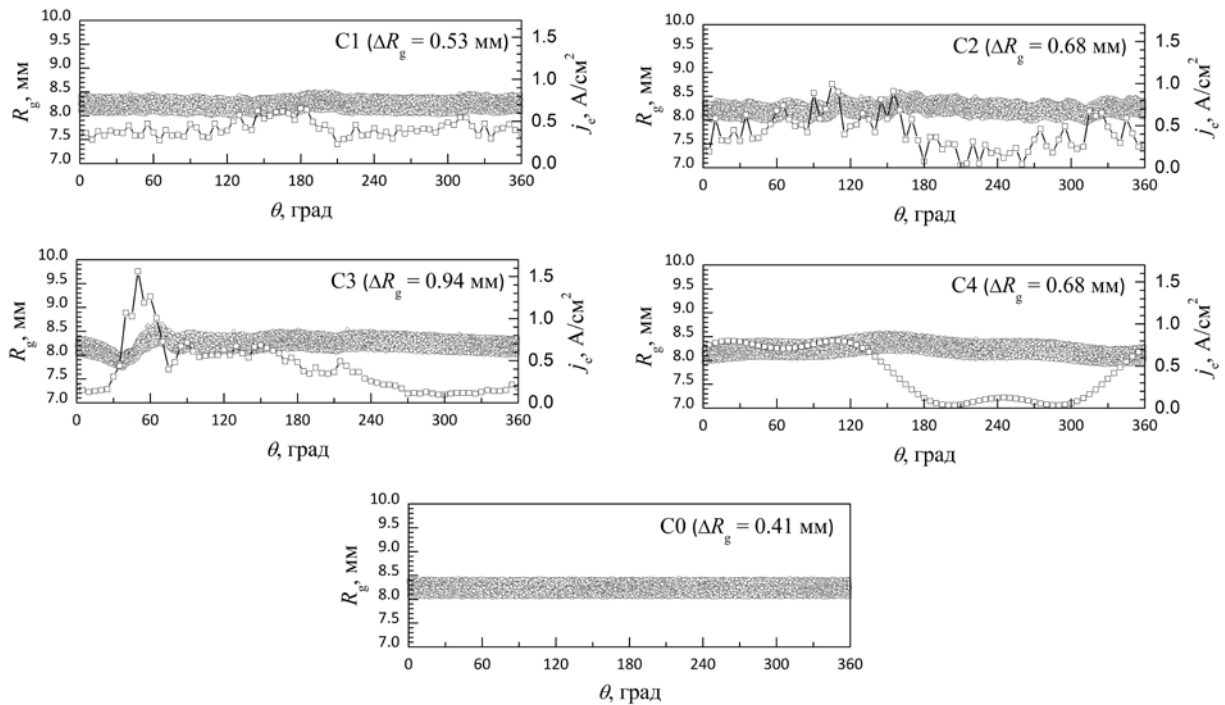


Рис. 2. Азимутальные распределения радиальных координат центров ларморовских орбит электронов в центральной плоскости резонатора  $R_g(\theta)$  и плотности тока эмиссии  $j_e(\theta)$  для катодов с разной эмиссионной неоднородностью.

вливают на суммарное значение разброса. Например, для стандартной версии МИП значение  $\delta v_{\perp}$  для катода С1 ( $\delta j_e = 23\%$ ) лишь на 1.5 % больше по сравнению с катодом С0. Для МИП с управляющим электродом изменение величины  $\delta v_{\perp}$  при переходе от однородного катода к катоду С1 более заметно и составляет  $\sim 8\%$ .

Результаты проведенного моделирования показали, что не только величина интегрального коэффициента эмиссионной неоднородности  $\delta j_e$ , но также и вид распределения плотности тока  $j_e(\theta)$  влияет на параметры ВЭП. Например, катоды С3 и С4 имеют одинаковый интегральный коэффициент эмиссионной неоднородности  $\delta j_e = 74\%$ . При этом разброс скоростей электронов для этих катодов примерно одинаков (табл. 1). Главная причина скоростного разброса – неоднородная экранировка пространственным зарядом внешнего электрического поля в области электронной пушки [4], что определяется коэффициентом  $\delta j_e$ . Однако разброс по энергиям в ВЭП для катодов С3 и С4 заметно различается. Энергетический разброс электронов в расчетах был обусловлен неоднородным “провисанием” потенциала пучка в области резонатора. Важно также отметить, что для обоих катодов присутствуют электроны, которые приобретают достаточно большую поперечную скорость в области пушки и из-за этого впоследствии отражаются от магнитной пробки. Отражение электронов может приводить к ряду негативных последствий, в частности к развитию паразитных низкочастотных колебаний в пространственном заряде, захваченном в ловушку между катодом и магнитной пробкой [4].

В рамках данной работы проводилось исследование влияния неоднородности эмиссии на пространственную структуру пучка, поступающего в область резонатора. На рис. 2 азимутальные распределения плотности тока эмиссии  $j_e(\theta)$  сравниваются с азимутальными распределениями радиальных координат центров ларморовских орбит траекторий электронов  $R_g(\theta)$ . Радиальное смещение электронов, приводящее к уширению

пучка, вызвано действием скрещенных азимутального электрического поля, существующего в неоднородном ВЭП, и продольного магнитного поля. Амплитуда азимутального электрического поля определяется градиентом зависимости  $j_e(\theta)$  в выбранной области. Поэтому распределение электронов в плоскости поперечного ВЭП будет определяться не только перепадом плотности тока эмиссии с разных участков катода, но и пространственным масштабом неоднородной эмиссии. Толщина стенки пучка  $\Delta R_g$ , под которой подразумевается разность между максимальным и минимальным значениями радиальной координаты ларморовской орбиты, максимальна для катода С3. Распределение плотности тока данного катода характеризуется наличием участка с аномально высокой эмиссией. Для эффективной работы гиротрона величина  $\Delta R_g$  не должна превышать  $\lambda/6$ , где  $\lambda$  – длина волны генерируемого излучения, в противном случае снижается эффективность излучения на рабочей моде и возможно возбуждение паразитных мод. Для экспериментального гиротрона СПбПУ длина волны излучения составляет  $\lambda \approx 4$  мм, а соответствующее предельное значение  $\Delta R_g \approx 0,67$  мм. Для катодов С2 и С4 величина  $\Delta R_g$  довольно близка к этому предельному значению, а для катода С3 – заметно его превышает.

Итак, результаты выполненного трехмерного моделирования показывают важность учета реального распределения плотности тока эмиссии по поверхности катода при анализе влияния эмиссионных неоднородностей на качество ВЭП, формируемого в гиротроне. Показано, что для катодов с одинаковым интегральным коэффициентом эмиссионной неоднородности  $\delta j_e$ , но различным видом распределения  $j_e(\theta)$ , могут заметно различаться значения энергетического разброса электронов, толщины стенки пучка и коэффициента отражения от магнитной пробки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант № 16-12-10010). Часть результатов была получена с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (<http://www.scc.spbstu.ru>).

#### Библиографический список

1. Запевалов В.Е. Эволюция гиротронов // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. т. 54. в. 8. с.559-572;
2. Nusinovich G.S. Introduction to the physics of gyrotrons. Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press, 2004. 335;
3. Glyavin M.Yu., Kuftin A.N., Venediktov N.P., et al. Experimental investigation of emission inhomogeneity of gyrotron cathodes basing on their current-voltage characteristics// Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1997. V. 18. No. 11. P. 2137–2146;
4. Лукша О.И., Самсонов Д.Б., Соминский Г.Г., Цапов А.А. Повышение качества винтового электронного потока и кпд гиротрона при регулировании распределения электрического поля в области магнетронно-инжекторной пушки // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 6. С. 101–105;
5. <http://www.cst.com>;
6. Louksha O., Piosczyk B., Sominski G., et al. On potentials of gyrotron efficiency enhancement: measurements and simulations on a 4-mm gyrotron // IEEE Trans. Plasma Sci. 2006. V. 34. No. 3. P. 502–511.