

Влияние шероховатости поверхности катода на характеристики электронного потока в электронно-оптической системе гиротрона

О.И. Лукша, П.А. Трофимов, А.Г. Малкин

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Аннотация: предложена методика учета разброса начальных скоростей электронов, вызванного шероховатостью поверхности катода, при выполнении трехмерного траекторного анализа в электронно-оптической системе гиротрона. В расчетах определено влияние размера шероховатости на скоростные характеристики электронного потока в гиротроне с частотой 74,2 ГГц и выходной мощностью примерно 100 кВт.

Ключевые слова: СВЧ электроника, гиротрон, винтовой электронный поток, катод, шероховатость поверхности

1. Введение

Шероховатость поверхности эмиттера – один из важных факторов, приводящих к ухудшению качества винтового электронного потока (ВЭП) и, как следствие, к снижению эффективности его взаимодействия с электромагнитным полем в гиротронах [1 – 5]. Типичный размер неоднородностей на поверхности термокатодов составляет единицы-десятки микрон. Электрическое поле вблизи этих неоднородностей вызывает разброс начальных скоростей электронов, учет которого приводит к увеличению скоростного разброса в потоке, поступающем в резонатор. Имеются трудности проведения трехмерного траекторного анализа в электронно-оптической системе (ЭОС) с катодом, на поверхности которого имеются неоднородности микронных размеров. При типичной длине ЭОС гиротрона, составляющей сотни миллиметров, наличие такого катода приводит к очень большому числу ячеек сетки, которое не приемлемо для современных вычислительных систем. В принципе, шероховатость поверхности эмиттера может быть косвенно учтена при расчете траекторий электронов в модели ЭОС с катодом, имеющем гладкую поверхность. Для этого нужно задавать начальную скорость каждой частицы, стартующей с катода. В работах [4, 5] были использованы способы задания начальных скоростей, которые основывались на использовании данных предварительных расчетов, отдельно выполняемых для каждого конкретного гиротрона.

В настоящей работе предложен более простой, по сравнению с [4, 5], способ учета шероховатости поверхности катода при трехмерном моделировании траекторий электронов в ЭОС гиротронов. Этот подход предполагает использование средств программного пакета CST Studio Suite [6], которые доступны в нем при задании параметров термоэлектронной эмиссии. С помощью данного пакета были выполнены все описанные ниже расчеты. Влияние шероховатости поверхности катода на параметры ВЭП было исследовано для ЭОС экспериментального гиротрона СПбПУ с рабочей частотой 74,2 ГГц и выходной мощностью ~ 100 кВт [7 – 9].

2. Модель катода с шероховатой поверхностью

В модели плоского диода с регулярно расположенными на поверхности катода полусферами (рис. 1) были рассчитаны распределения начальных скоростей электронов для различных значений радиуса полусферы r_0 и расстояний между

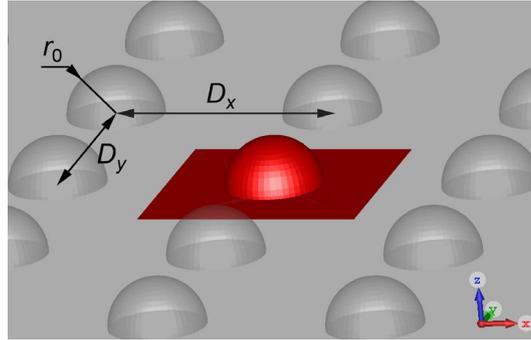


Рисунок 1. Изображение поверхности катода с регулярно расположенными на ней полусферами.

полусферами D_x и D_y при условии, что $D_x = D_y = D_{xy}$. Размеры катода и анода вдоль координат x и y , а также расстояние между катодом и анодом D_{ca} задавались много больше, чем радиус r_0 . Эмиссия частиц осуществлялась с участка катода, показанного на рисунке 1 красным цветом. Центры эмиссии, число которых составляло $(1 - 2) \cdot 10^4$, были равномерно распределены по эмитирующей поверхности. Разность потенциалов между катодом и анодом была равна $D_{ca} \cdot 30$ кВ/см.

Под действием неоднородного электрического поля вблизи полусфер электроны приобретают начальные поперечные скорости v_x и v_y . При $D_x = D_y$ распределения электронов по этим скоростям $f(v_x)$ и $f(v_y)$ совпадают. Они практически не меняются при увеличении расстояния z от плоскости катода, если z превышает $\sim 2 \cdot r_0$. Ниже обсуждаются распределения по скоростям, которые были зафиксированы в плоскости анода при $z = D_{ca}$. На рисунке 2 синим цветом показано распределение $f(v_x)$ при $r_0 = 10$ мкм, которое было получено после усреднения распределений, вычисленных при разных D_{xy} в диапазоне от $2 \cdot r_0$ до $4 \cdot r_0$ с шагом $0,2 \cdot r_0$.

При выполнении траекторного анализа катод с неоднородностями можно заменить на катод с гладкой поверхностью, если тем или иным способом задавать начальные скорости частиц, стартующих с этой поверхности. Это можно сделать, воспользовавшись средствами, доступными с CST Studio Suite при установке параметров термоэлектронной эмиссии. В частности, можно задать максвелловское распределение начальных скоростей с температурой T , а также установить диапазон

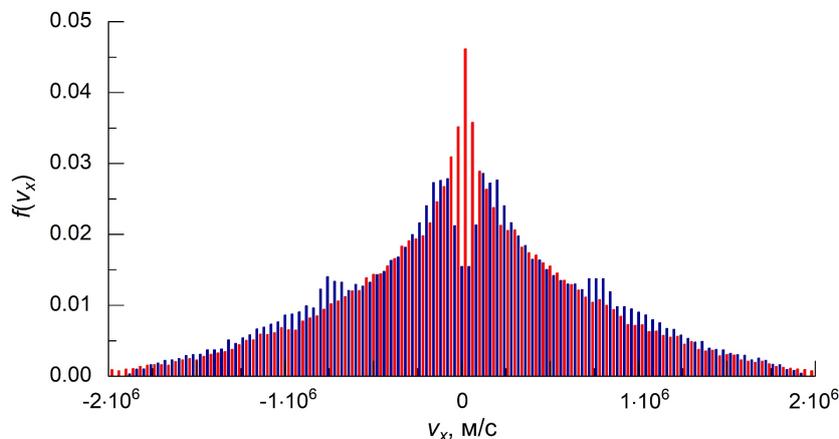


Рисунок 2. Распределения скорости v_x : синий цвет – модель катода с полусферами радиуса $r_0 = 10$ мкм с усреднением для разных значений D_{xy} ; красный цвет – модель гладкого катода при эффективной температуре $T^* = 46000$ К и $\Delta\theta = \pm 90^\circ$.

азимутальных углов $\Delta\theta$ между нормалью к поверхности катода и направлением вектора начальной скорости. Расчеты показали, что спектры начальных скоростей для катода с шероховатой поверхностью удовлетворительно согласуются со спектрами для гладкого катода при эффективной температуре T^* , заметно превышающей реальную температуру катода T_c , и угловым разбросом $\Delta\theta = \pm 90^\circ$. На рисунке 2 красным цветом показан спектр $f(v_x)$, рассчитанный для модели с гладким катодом при $T^* = 46000$ К. Основное отличие между показанными на рисунке 2 распределениями состоит в наличии провала в спектре $f(v_x)$ для шероховатого катода вблизи $v_x = 0$, что обусловлено, по-видимому, формой регулярно расположенных на катоде идеальных полусфер. Можно предположить, что этот провал будет отсутствовать, если провести усреднение спектров, рассчитанных для неоднородностей разной формы [4].

Зависимости абсолютного скоростного разброса Δv_x , определенного как среднее квадратичное (rms) отклонение, от радиуса r_0 для модели с шероховатым катодом и от эффективной температуры T^* для модели с гладким катодом показаны на рисунке 3. Видно, что величина Δv_x изменяется пропорционально $(r_0)^{1/2}$ и $(T^*)^{1/2}$. Это согласуется с аналитическими соотношениями (см., например, [1, 3]), устанавливающими связь между Δv_x и r_0 , а также с выражением для среднего квадратичного отклонения максвелловского распределения:

$$\sigma_v = \sqrt{3 - \frac{8}{\pi}} \sqrt{\frac{kT}{m}},$$

где k – постоянная Больцмана, m – масса электрона. Если положить, что $r_0 = 10$ мкм соответствует $T^* = 46000$ К, то зависимости $\Delta v_x(r_0)$ и $\Delta v_x(T^*)$ практически совпадают.

Следует отметить, что в аксиально-симметричной ЭОС гиротрона катод имеет форму конуса и вблизи него имеется магнитное поле [1]. Как было сказано ранее, изменение скорости v_x происходит на малом расстоянии от катода, не превышающем нескольких радиусов r_0 . На таком расстоянии движение электронов практически не отличается от движения в плоском диоде, рассмотренном выше. Кроме того, влияние магнитного поля на это движение незначительно [1]. Следовательно, рассчитанный разброс скорости Δv_x можно рассматривать, как разброс начальной поперечной скорости Δv_\perp . Поскольку при типичных r_0 температура $T^* \gg T_c$, то разброс начальной скорости Δv_x , рассчитанный по T^* , можно считать вызванным суммарным действием шероховатости поверхности катода и разброса тепловых скоростей.

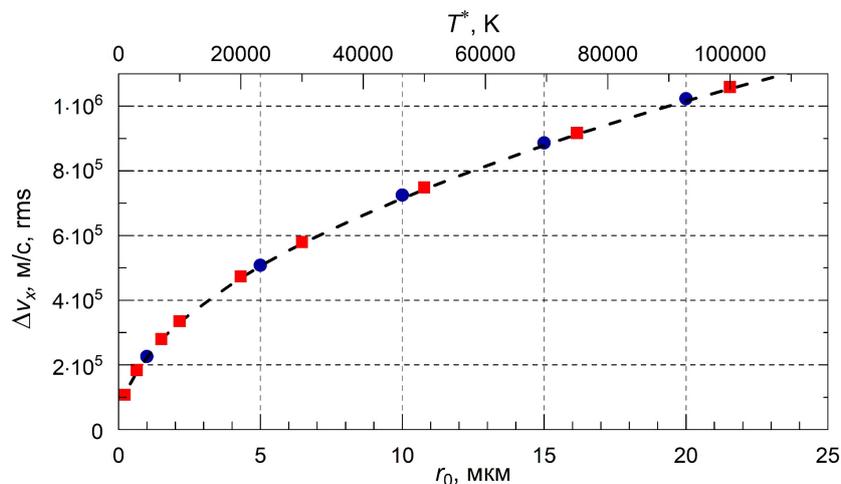


Рисунок 3. Зависимости разброса скоростей Δv_x от радиуса r_0 в модели с шероховатым катодом (—●—) и от эффективной температуры T^* в модели с гладким катодом (—■—).

3. Траекторный анализ в ЭОС гиротрона с учетом шероховатости поверхности катода

Основные расчетные параметры рабочего режима гиротрона СПБПУ представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры рабочего режима гиротрона

Параметр	Значение
Ускоряющее напряжение U_0 , кВ	30
Ток пучка I_p , А	10
Индукция магнитного поля в области резонатора B_0 , Тл	2,75
Индукция магнитного поля у катода B_c , Тл	0,152
Рабочая мода	TE _{12,3}

В расчетах использовались две версии магнетронно-инжекторной пушки (МИП) [10]. В стандартной конфигурации пушки угол наклона образующей конусной части катода был одинаковым вдоль этой образующей. Для такой пушки при значениях U_0 , B_0 и B_c , указанных в таблице 1, реализуется рабочий режим гиротрона со средним питч-фактором $\alpha = v_{\perp}/v_{\parallel}$, равным примерно 1,3. Значения питч-фактора α и скоростного разброса δv_{\perp} , обсуждаемые в данном разделе, были определены в центральной плоскости резонатора в максимуме распределения магнитного поля вдоль продольной координаты. В модифицированной версии пушки был установлен управляющий электрод с увеличенным углом наклона конусной части. Как показали исследования [11], регулированием напряжения между катодом и управляющим электродом $U_{упр}$ можно добиться оптимизации распределения электрического поля в прикатодной области МИП и, как следствие, снижения скоростного разброса в пучке. Это позволяет увеличить рабочий питч-фактор и КПД гиротрона [12].

На основании экспериментальных данных, полученных в гиротроне СПБПУ со стандартной геометрией МИП, ранее была определена зависимость скоростного разброса от коэффициента эмиссионной неоднородности катода [13]. Используя эти данные, можно предположить, что в случае катода с однородной эмиссией разброс поперечных скоростей δv_{\perp} в рабочем режиме гиротрона равен примерно 8,8 %. Такое значение разброса было, в частности, получено в экспериментах с LaV₆ катодом, типичный размер частиц в активном веществе которого равен примерно 10 мкм.

В настоящей работе использовалась модель гиротрона, подробно описанная в [10]. Число центров эмиссии и, соответственно, электронных траекторий было увеличено до $3 \cdot 10^4$, что позволило получить более подробные распределения электронов по скоростям в ВЭП при повышенной температуре T^* . Зависимости скоростного разброса δv_{\perp} и питч-фактора α от величины T^* для двух версий МИП показаны на рисунке 4. Видно, что в стандартной МИП значение $\delta v_{\perp} = 8,8\%$ достигается при $T^* \approx 67000$ К. Следовательно, на основании рисунка 3 можно сделать вывод, что LaV₆ катод, в экспериментах с которым был зафиксирован скоростной разброс 8,8 % характеризовался усредненной шероховатостью с радиусом $r_0 \approx 14$ мкм.

4. Заключение

Новая методика, предложенная в данной работе, может быть использована для учета разброса начальных скоростей электронов, вызванного шероховатостью поверхности катода, при выполнении трехмерного моделирования траекторий электронов в электронно-оптической системе гиротрона. Определено влияние шероховатости катода на скоростной разброс и средний питч-фактор электронов в ЭОС гиротрона средней мощности 4-мм диапазона длин волн. Сопоставление данных, полученных в эксперименте, с результатами траекторного анализа позволило

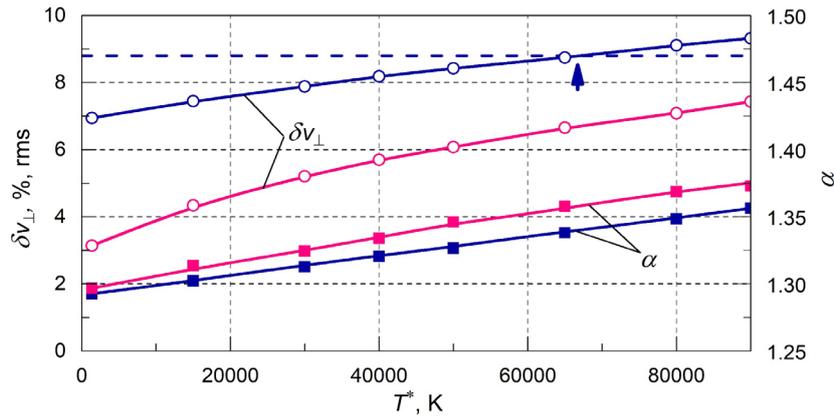


Рисунок 4. Зависимости разброса поперечных скоростей δv_{\perp} и среднего питч-фактора α от эффективной температуры T^* для стандартной (синий цвет) и модифицированной при $U_{\text{упр}} = -9$ кВ (красный цвет) МИП.

определить усредненный размер неоднородностей на поверхности катода, который использовался в этом гиротроне

Исследование выполнено за счет **гранта Российского научного фонда (проект № 22-29-00136)**. Часть результатов была получена с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра СПбПУ (<http://www.scc.spbstu.ru>).

Список литературы

1. Tsimring Sh. E. *Electron beams and microwave vacuum electronics*. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.
2. Авдошин Е. Г. и др. Экспериментальное исследование скоростного разброса в винтовых электронных пучках //Изв. вузов. Радиофизика. – 1973. – Т. 16. – №. 4. – С. 605-612.
3. Цимринг Ш. Е. О разбросе скоростей в винтовых электронных пучках //Изв. вузов. Радиофизика. – 1972. – Т. 15. – №. 8. – С. 1247-1259.
4. Zhang J. et al. Evaluation and influence of gyrotron cathode emission inhomogeneity//IEEE Trans. Electron Dev. – 2017. – Т. 64. – № 3. С. 1315-1322.
5. Лещева К. А., Мануилов В. Н. Численное 3D-моделирование систем формирования винтовых электронных пучков гироприборов с азимутально неоднородным распределением тока эмиссии //Успехи прикладной физики. – 2019. – Т. 7. – № 3. – С. 298–308.
6. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
7. Louksha O. I. et al. Gyrotron research at SPbPU: Diagnostics and quality improvement of electron beam //IEEE Trans. Plasma Sci. – 2016. – Т. 44. №. 8. С. 1310-1319.
8. Kas'yanenko D. V. et al. Low-frequency parasitic space-charge oscillations in the helical electron beam of a gyrotron // Radiophys. Quantum Electron. – 2004. – Т. 47. – №. 5-6. – С. 414-420.
9. Luksha O. I. Simulation of low-frequency collective processes in gyrotron electron beams //Radiophys. Quantum Electron. – 2009. – Т. 52. – №. 5-6. – С. 386-397.
10. Louksha O. I., Trofimov P. A. Simulation of non-uniform electron beams in the gyrotron electron-optical system //Tech. Phys. – 2018. – Т. 63. – №. 4. – С. 598-604.
11. Louksha O. I. et al. Improvement of the helical electron beam quality and the gyrotron efficiency by controlling the electric field distribution near a magnetron injection gun //Tech. Phys. – 2012. – Т. 57. №. 6. – С. 835-839.
12. Louksha O. I., Trofimov P. A. Highly efficient gyrotron with multi-stage recuperation of residual electron energy //Tech. Phys. – 2019. – Т. 64. – №. 12. – С. 1889-1897.
13. Louksha O. I. et al. Dynamic processes in helical electron beams in gyrotrons //Tech. Phys. – 2013. – Т. 58. – №. 5. – С. 751-759.