

Разработка электронно-оптической системы с термоэмиссионным катодом и резонатора для релятивистского гиротрона диапазона 300 ГГц

А.Н. Леонтьев, О.П. Планкин, Р.М. Розенталь, Е.С. Семенов

Институт прикладной физики РАН

Аннотация: Выполнены расчеты трехэлектродной магнетронно-инжекторной пушки с термоэмиссионным катодом для релятивистского гиротрона диапазона 300 ГГц. Показана возможность формирования винтового электронного потока с энергией 250 кэВ, током 100-300 А и питч-фактором 1.1, в условиях сохранения предельных значений напряженности электрического поля на поверхности катода на уровне 10 кВ/мм. В рамках трехмерного PIC-моделирования показана возможность генерации излучения с мощностью более 7 МВт в достаточно широком диапазоне значений магнитного поля.

Ключевые слова: релятивистский гиротрон, магнетронно-инжекторная пушка, терагерцовый диапазон

1. Введение

Генерация мощного излучения терагерцового диапазона представляет значительный интерес для ряда приложений. В настоящее время на базе релятивистских ламп обратной волны с замедляющей структурой в виде гофрированного волновода, запитываемых электронными импульсами наносекундной длительности, созданы источники с выходной мощностью около 600 кВт в диапазоне 340 ГГц [1]. В генераторе поверхностной волны получена мощность около 2 МВт в диапазоне 320-350 ГГц при длительности импульса 2 нс [2]. Излучение в широком частотном интервале от 0.1 до 0.5 ТГц с уровнем мощности в десятки мегаватт получено в экспериментах с замагниченной плазмой при релаксации в ней сильнооточного релятивистского электронного пучка [3]. Перспективными источниками мощного терагерцового излучения являются и гиротроны на основе сильнооточных электронных потоков, где, согласно оценкам, в диапазоне 300 ГГц могут быть достигнуты уровни мощности около 80 МВт [4].

Вместе с тем, сильнооточные электронные потоки, в силу использования для их формирования взрывной эмиссии, не позволяют рассчитывать на получение излучения со стабильными параметрами на протяжении многих импульсов. Поэтому представляет интерес исследование возможности создания мощного гиротрона на базе термоэмиссионного катода, формирующего достаточно стабильный пучок.

В данной работе представлены расчеты электронно-оптической системы, позволяющей формировать винтовой электронный пучок с мощностью до 100 МВт, предназначенный для возбуждения релятивистского гиротрона диапазона 300 ГГц.

2. Методика моделирования ЭОС

Расчеты осуществлялись с помощью программного комплекса ANGEL (ANalyzer of a Gyating Electrons) [5], разработанного в Институте прикладной физики РАН. В его основе лежат традиционные алгоритмы анализа электронно-оптических систем на базе методов трубок тока и дискретных источников. Моделирование электронных пучков с винтовыми траекториями проводится в программе путем численного

решения системы уравнений движения частиц, уравнения Пуассона и уравнения непрерывности. Траекторный анализ потока электронов производится методом трубок тока, традиционно используемым для решения статических задач [6], а решение системы самосогласованных уравнений – методом последовательных итераций. На начальной (нулевой) итерации плотность объемного заряда полагается равной нулю и находится решение уравнения Лапласа при заданных граничных условиях. Поток частиц, вылетающих с эмиттера, разбивается на N трубок тока (каждая из них несёт сохраняющийся при движении ток $I_k, k = 1..N$). Пространственный заряд, вносимый k -й трубкой в одну ячейку сетки равен $Q_{m,k} = I_k \Delta t$, где Δt – время нахождения частицы в пределах ячейки; полный заряд ячейки Q_m получается суммированием зарядов $Q_{m,k}$ по всем трубкам тока, прошедшим через данную ячейку. Интегрирование уравнений движения позволяет определить траектории каждой токовой трубки и распределение плотности пространственного заряда. На следующих итерациях электрическое поле находится из решения уравнения Пуассона с плотностью ρ , вычисленной на предыдущей итерации, и затем вновь рассчитываются электронные траектории.

Магнитное поле полагается внешним, создаваемым системой соленоидов с прямоугольным продольным сечением. Электрическое поле находится методом дискретных источников, применение которого эффективно по причине малого объема, занимаемого электронным потоком относительно полного объема межэлектродного пространства гироприбора [7,8]. Сущность метода дискретных источников сводится к представлению скалярного потенциала U линейной комбинацией дискретных источников – "виртуальных зарядов" Q_i , расположенных вдоль границы и отстоящих от поверхности электродов "вглубь" металла на расстояние порядка шага. Величины вспомогательных зарядов Q_i находятся из системы линейных алгебраических уравнений, полученной проверкой граничного условия в дискретных точках границы, расположенных с некоторым шагом на поверхности электродов и называемых точками коллокации. Следуя [9], для оптимизации времени счёта реализована работа с сеткой "укрупнённых зарядов". Для интегрирования уравнения движения используются методы Рунге–Кутты 4-го порядка (обычный и с модификацией Мерсона, позволяющей вести контроль точности на каждом шаге).

3. Результаты расчетов ЭОС

В качестве исходного варианта для расчета была использована магнетронно-инжекторная пушка (МИП) релятивистского гиротрона диапазона 95 ГГц [10]. Данная МИП построена по трехэлектродной схеме, в которой напряжение на первом аноде формируется из полного ускоряющего напряжения с помощью активного делителя. Пушка рассчитана на формирование винтового электронного потока с энергией 250-300 кэВ, током 80-100 А и питч-фактором (отношение поперечной скорости электронов к продольной) порядка 1.3. На основе этой МИП был реализован гиротрон с выходной мощностью около 5 МВт, что соответствовало КПД около 20%.

Оценки показывают, что при переходе в диапазон 300 ГГц эффективность релятивистского гиротрона будет снижаться до уровня 5% за счет значительного возрастания омических потерь и снижения коэффициента связи с рабочей модой в силу увеличения сверхразмерности системы. В этой связи представляет интерес возможность увеличения рабочего тока пучка до уровня 300-400 А.

Расчеты показали, что основным препятствием на пути повышения тока пучка является высокое значение напряженности электрического поля на участке плавного перехода между цилиндрической и конической частью катода (Рис.1). В существующей конфигурации данный переход сделан в виде дуги окружности с радиусом $R = 10$ мм. В результате при фиксированном питч-факторе пучка $g = 1.1$ с увеличением тока необходимо увеличивать и анодное напряжение, поэтому уже при

токе 100 А напряженность поля достигает значений 11.4 кВ/мм, а при токе 300 А – почти 13 кВ/мм (Рис.1).

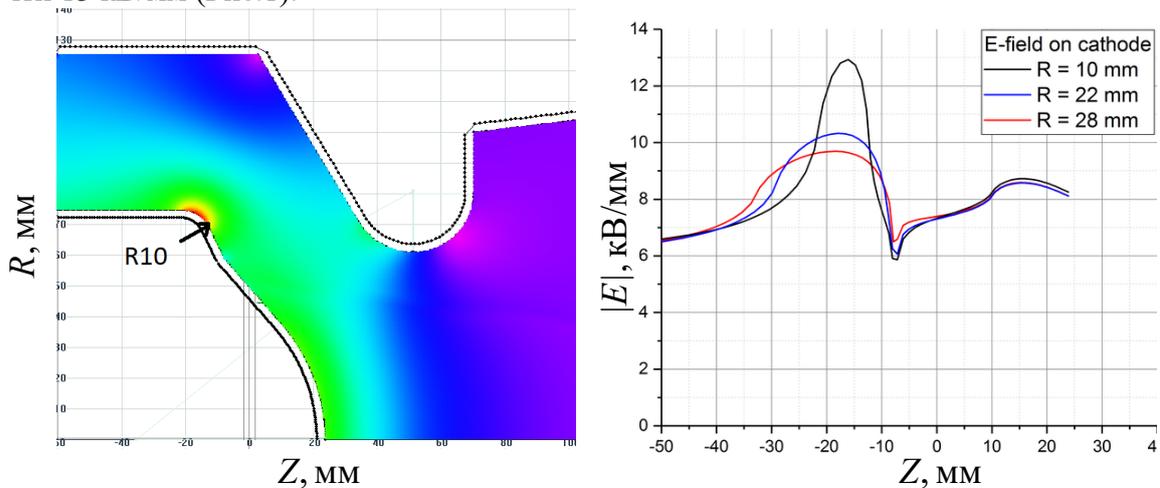


Рисунок 1. Геометрия электродов исходного варианта ЭОС и карта распределения напряженности электрического поля (слева), зависимости напряженности электрического поля при различных радиусах скругления катода для работы с током пучка 300 А (справа).

Вместе с тем, в предшествующих экспериментальных исследованиях было установлено, что предельное значение напряженности поля, выше которого начинается развитие пробойных явлений, составляет величину 9-10 кВ/мм. Снижение величины электрического поля на участке перехода может быть достигнуто путем увеличения радиуса скругления R . Так, выбирая $R = 22$ мм, можно снизить значения электрического поля при токе 100 А и 300 А до уровня 9.3 кВ/мм и 10.3 кВ/мм, соответственно. Значение пичч-фактора пучка при этом составляет около 1.1, значение относительного разброса электронов по поперечным скоростям - порядка 40%.

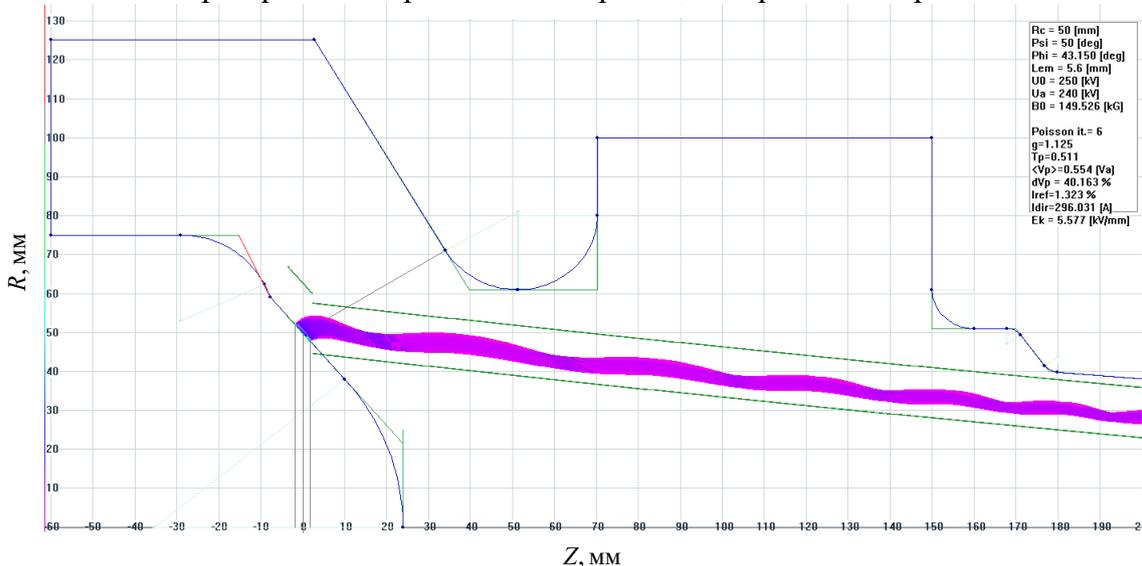


Рисунок 2. Геометрия оптимизированного варианта ЭОС и траектории движения электронов.

При дальнейшем увеличении радиуса до $R = 28$ мм максимальная величина электрического поля снижается до значений 9.3 кВ/мм. Однако при этом происходит некоторое ухудшение качества пучка, заключающееся в возрастании разброса по поперечным скоростям. На рис.2 представлена геометрия оптимизированного варианта и траектории движения электронов.

4. Моделирование релятивистского гиротрона диапазона 300 ГГц

Полученные при расчете ЭОС параметры пучка были использованы в трехмерном моделировании релятивистского гиротрона с использованием PIC-кода KARAT. На рис.3 представлена геометрия пространства взаимодействия и мгновенное положение макрочастиц. Для селективного возбуждения рабочей моды был использован резонатор продольно-щелевого типа, основанный на связи мод с кратными азимутальными индексами [11]. Для снижения поперечных дифракционных потерь использовалась двухслойная конфигурация с числом щелей равным 11.

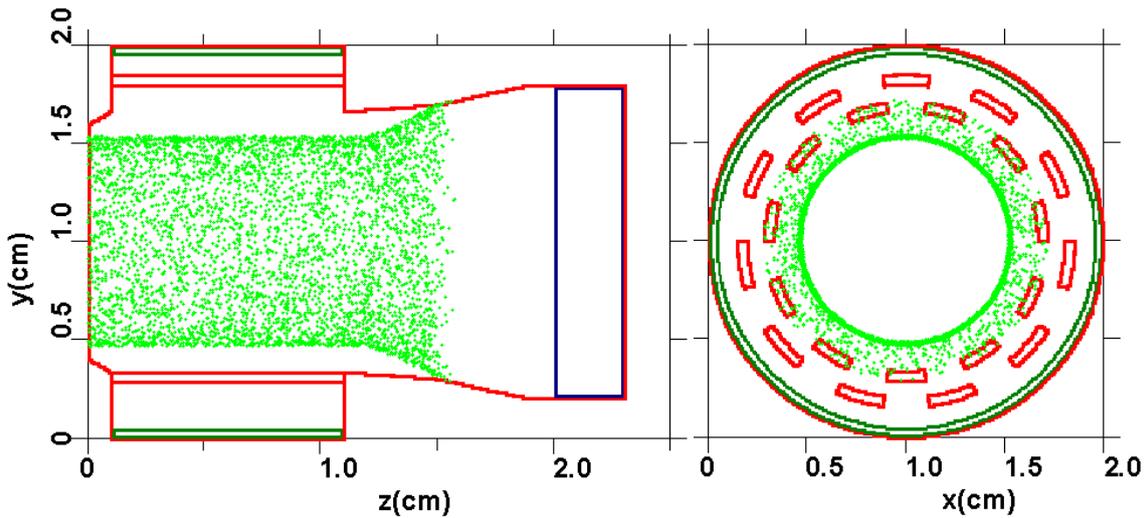


Рисунок 3. Геометрия пространства взаимодействия релятивистского гиротрона и мгновенное положение макрочастиц в PIC-моделировании.

Анализ результатов расчетов показывает, что в достаточно широком диапазоне магнитных полей в данной системе возможно возбуждение одномодовых колебаний на частоте около 300 ГГц (см. Рис.4). Максимальная мощность генерации достигает 1.3 МВт при токе пучка 100 А, 4.2 МВт при токе 200 А, 7.5 МВт при токе 300 А. В свою очередь максимальный КПД гиротрона составляет около 4%, 8.3% и 10% при токах пучка 100, 200 и 300 А, соответственно. Интересно отметить, что дальнейшее увеличение тока пучка приводит не только к повышению выходной мощности, но и к дальнейшему увеличению КПД. Так, при токе 400 А выходная мощность достигала 11.6 МВт, что соответствует КПД 11.6%.

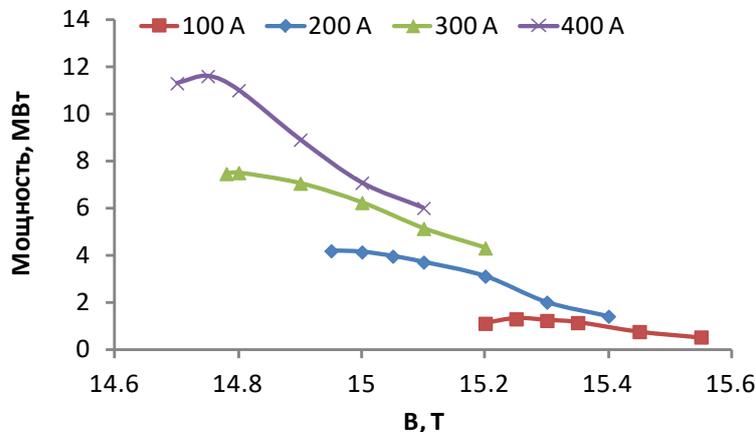


Рисунок 4. Расчетные зависимости выходной мощности гиротрона от магнитного поля при различных токах электронного пучка.

5. Заключение

Расчеты показывают, что при определенной модификации, заключающейся в увеличении плавности сочленения цилиндрической и конической части катодного узла, существующая магнетронно-инжекторная пушка релятивистского гиротрона W-диапазона может быть использована для формирования винтового электронного потока для гиротрона диапазона 300 ГГц. Ожидаемая выходная мощность излучения при токах инжекции 300 А может достигать уровня 7.5 МВт.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проектов ИПФ РАН FFUF-2021-0001, FFUF-2022-0007.

Список литературы

1. Hu L. et al. Experimental Demonstration of a 0.34-THz Backward-Wave Oscillator With a Sinusoidally Corrugated Slow-Wave Structure // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 2018. – V. 65. – No. 6. – P. 2149-2155.
2. Wang J. et al. A megawatt-level surface wave oscillator in Y-band with large oversized structure driven by annular relativistic electron beam // *Scientific Reports*. – 2018. – V. 8. – Art.no. 6978.
3. Arzhannikov A. V. et al. Energy Content and Spectral Composition of a Submillimeter Radiation Flux Generated by a High-Current Electron Beam in a Plasma Column With Density Gradients // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2022. – V. 50. – No. 8. – P. 2348-2363.
4. Rozental R. M. et al. Spatial Synchronization of TE-Modes in a Slit-Type Gyrotron Cavity // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 2022. – V. 69. – No. 3. – P. 1451-1456.
5. Планкин О.П., Семенов Е.С. Траекторный анализ электронно-оптической системы технологического гиротрона // *Вестник НГУ. Серия: Физика*. – 2013. – Т. 8. – Вып. 2. – С. 44-54.
6. Ильин В.П. Численные методы решения задач электрофизики. – М.: Наука, 1985.
7. Пензяков В.В. Расчёт электронных пушек на электронных цифровых машинах // *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ*. – 1966. – № 1. – С. 41.
8. Вашковский А.В., Овчаров В.Т. К нахождению распределения потенциала в области, ограниченной заданными формами с заданными потенциалами // *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ*. – 1971. – № 9. – С. 34.
9. Лыгин В.К., Мануилов В.Н., Цимринг Ш.Е. О методах интегральных уравнений и вспомогательных зарядов в траекторном анализе интенсивных электронных пучков // *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ*. – 1987. – № 7 (401). – С. 36.
10. Abubakirov E. B. et al. W-Band 5 MW Pulse Relativistic Gyrotron // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 2017. – V. 64. – No. 4. – P. 1865-1867.
11. Данилов Ю.Ю. и др. Высокоселективные сверхразмерные щелевые резонаторы для релятивистских гиротронов миллиметрового диапазона // *Доклады академии наук. Физика, технические науки*. – 2022. – Т.504. – С.3-9.