

**Зуев А.С., Железнов И.В., Ошарин И.В.,
Проявин М.Д., Розенталь Р.М.**
Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики РАН

Расчет и экспериментальное исследование частотных характеристик субтерагерцового непрерывного гиротрона

Применительно к реализованному в ИПФ РАН непрерывному гиротрону с рабочей частотой 263 ГГц киловаттного уровня мощности различными методами выполнено моделирование взаимодействия электронного потока с высокочастотным полем резонатора. С использованием системы уравнений для медленно меняющихся амплитуды и фазы поля, а также трехмерного метода крупных частиц (программный код KARAT) получены зависимости частоты генерации от величины ведущего магнитного поля. Наилучшее соответствие расчетов экспериментальным данным наблюдается вблизи максимума выходной мощности, по мере удаления от которого отклонение частоты генерации от расчетных значений достигает величины ~0.1%.

Ключевые слова: гиротрон, субтерагерцовое излучение

Современные тенденции развития гиротронов, представляющих собой наиболее мощные источники излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов [1], диктуют необходимость разработки и создания автоматизированных комплексов, ориентированных на упрощение их эксплуатации конечными потребителями. В настоящее время в ИПФ РАН в рамках этой тенденции создан гиротронный комплекс с рабочей частотой ~263 ГГц с киловаттным уровнем выходной мощности [2]. Вместе с тем актуальной остается задача получения в таком комплексе заданного наперед значения частоты и выходной мощности без применения последовательности действий, требующих глубокого понимания процессов электронно-волнового взаимодействия в гиротроне. В данной ситуации немаловажное значение имеет развитие методов моделирования, имеющее конечной целью получение частотных характеристик гиротрона с заданной точностью.

В данной работе подобное моделирование выполнено на основе двух подходов: системы уравнений для медленно меняющихся амплитуды и фазы поля [3], а также трехмерного метода крупных частиц (программный код KARAT) [4].

Для описания электронно-волнового взаимодействия в гиротроне при взаимодействии на первой гармонике гирочастоты использовались следующие уравнения:

$$\frac{d^2 F}{dz^2} + k_{\parallel}^2 F = k_{\perp} k_{\parallel} J_{m-n} \frac{p_{\perp}}{2p_z} \quad (1)$$

$$\frac{dp_{\perp}}{dz} + i \frac{p_{\perp}}{p_z} \left(k\gamma - \frac{\omega_{Ho}}{c} \right) = k_{\perp} J_{m-1} \frac{i\gamma F}{2p_z}$$

где $p_{\perp} = \frac{mv_{\perp}}{m_0c} e^{i\vartheta}$, $p_z = \frac{mv_z}{m_0c}$ – нормированные поперечный и продольный импульсы электронов в винтовом пучке, $k_{\perp} = \frac{v_{mp}^2}{R_r^2(z)}$, $k_{\parallel} = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - k_{\perp}^2}$ – поперечное и продольное волновые числа для выбранного типа колебаний в слабо нерегулярном резонаторе, v_{mp} – p -й нуль производной функции Бесселя $J'_m(v_{mp}) = 0$, $R_r(z)$ – текущий радиус резонатора,

$$I = \frac{4.693 \cdot 10^{-4} I_0(A)}{J_m^2(v_{mp})(v_{mp}^2 - m^2)}$$

– параметр тока, I_0 – ток пучка в амперах, двойная черта в уравнении (1) означает усреднение по фазам влёта и скоростному разбросу поперечных скоростей. Для амплитуды ВЧ-колебаний гиротрона F на границах резонатора используются условия излучения:

$$\frac{dF}{dz} = ik_{\parallel}F, \quad z = z_{in}, \quad \frac{dF}{dz} = -ik_{\parallel}F, \quad z = z_{out}.$$

Расчеты на основе PIC-кода KARAT проводились для модели гиротрона, исследованной ранее в работе [5]. Основным отличием являлось значительное увеличение времени счета (до значений ~ 100 нс) с целью получения приемлемой точности расчета частоты генерации (~ 10 МГц в абсолютном значении или $\sim 4 \times 10^{-5}$ – в относительном). На рис.1 показаны геометрия системы и пространственная структура возбуждаемого поля, соответствующая рабочей моде TE_{53} .

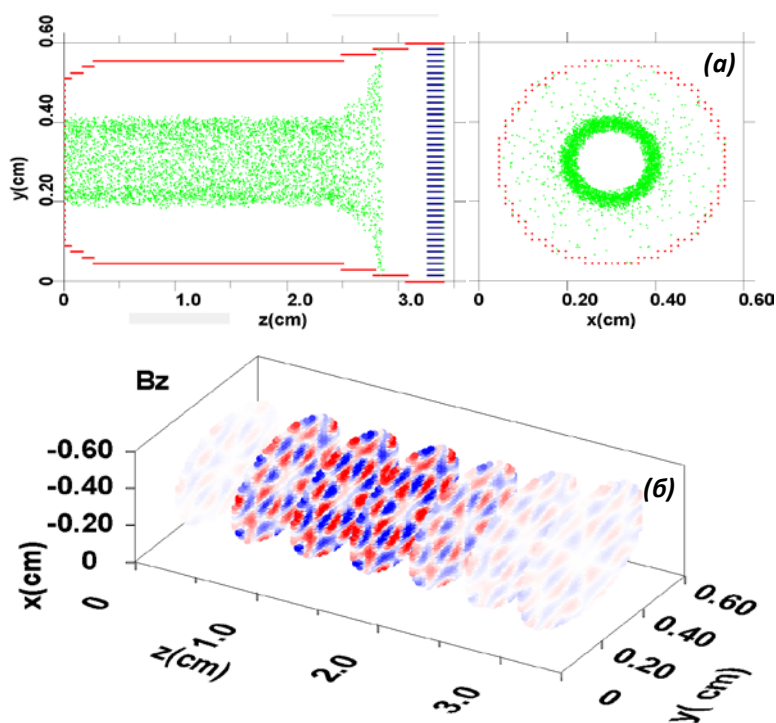


Рис.1. Геометрия пространства взаимодействия и мгновенное положение макрочастиц в PIC-моделировании (а) и пространственная структура продольной компоненты возбуждаемого пучком высокочастотного магнитного поля (б).

Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными позволяет сделать вывод о высокой точности расчетов частоты по уравнениям (1) вблизи максимума выходной мощности при относительном изменении магнитного поля в пределах 0.5% (Рис.2). Относительное отклонение частоты генерации в PIC-моделировании в той же области составляет 0.02-0.03%. Вместе с тем, по мере увеличения магнитного поля, расчетные значения частоты генерации увеличиваются заметно медленнее, чем в

эксперименте, так что результирующее отклонение достигает значений $\sim 0.1\%$. При этом данная тенденция имеет место как при расчетах на основе уравнений (1), так и при расчетах методом крупных частиц. Одно из возможных объяснений состоит в отсутствии учета в моделировании изменений условий формирования электронного пучка в магнетронно-инжекторной пушке при изменении ведущего магнитного поля и, как следствие, изменения его питч-фактора и радиуса встрела. В дальнейшем предполагается провести уточнение используемых моделей для получения лучшего соответствия расчетов экспериментальным данным.

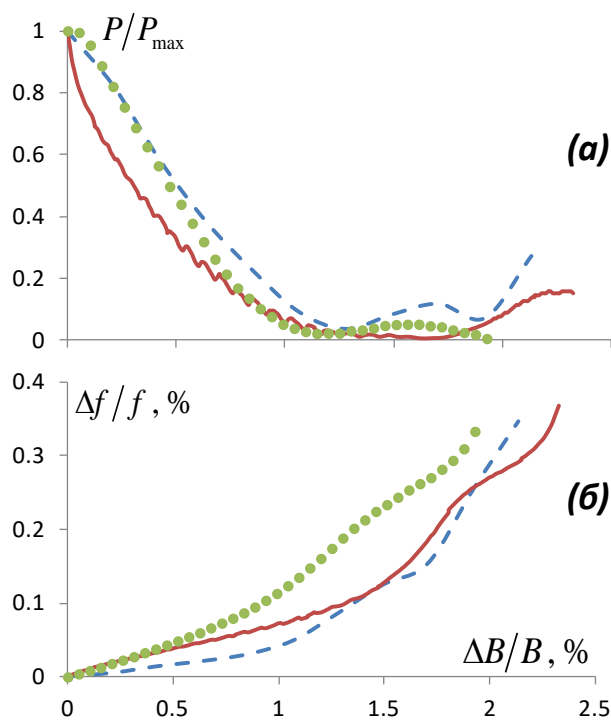


Рис.2. Зависимость нормированной выходной мощности (а) и изменения частоты излучения от относительного изменения магнитного поля: пунктир – трехмерное PIC-моделирование, сплошные линии – расчет по усредненным уравнениям (1), точки – экспериментальные данные.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 18-32-00772 мол_а.

Библиографический список

1. M.Glyavin, G.Denisov, V.Zapevalov, M.Koshelev, M.Tretyakov, A.Tsvetkov High-power terahertz sources for spectroscopy and material diagnostics // PHYSICS-USPEKHI, 59, 6, 595-604 (2016).
2. M.Yu.Glyavin, M.V.Morozkin, A.I.Tsvetkov et al. Automated Microwave Complex on the Basis of a Continuous-Wave Gyrotron with an Operating Frequency of 263 GHz and an Output Power of 1 kW // Radiophysics and Quantum Electronics 58 (9), 639-648 (2016).
3. Н.А. Завольский, В.Е. Запевалов, М.А. Моисеев. О достижении высокого КПД релятивистского гиротрона // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2001. Т.44. №4. С. 345-352.
4. V. P. Tarakanov. Code KARAT in simulations of power microwave sources including Cherenkov plasma devices, vircators, orotron, E-field sensor, calorimeter etc. // EPJ Web of Conferences. 2017. V. 149. Art.no. 04024.
5. М.Ю. Глявин, Н.А. Завольский, В.Е. Запевалов и др. Влияние азимутальной несимметрии электронно-волнового взаимодействия на характеристики излучения гиротронов субтерагерцового диапазона // Изв. ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика. 2015. Т.23. №2. С. 108-118.