

**Фокин А.П., Глявин М.Ю., Седов А.С.,
Мануилов В.Н., Цветков А.И.**
Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики РАН

Исследование селекции колебаний в двухлучевых суб-ТГц гиротронах с поглощающим пучком

Представлены результаты исследования возможностей применения методов электронной селекции рабочего типа колебаний в суб-ТГц и ТГц гиротронах на гармониках циклотронной частоты. Рассмотрен вариант двухлучевого суб-ТГц гиротрона на второй гармонике циклотронной частоты с двухлучевой электронно-оптической системой с поглощающим пучком. Сделаны оценки требуемых параметров электронных пучков и показано влияние поглощающего пучка на зону генерации.

Ключевые слова: Гиротрон, многолучевые системы, гармоники циклотронной частоты, селекция колебаний.

Развитие различных передовых областей науки, медицины и техники требует создания новых источников излучения в терагерцовом диапазоне частот, с большими рабочими частотами и уровнями мощности, чем существующие [1]. Одним из наиболее перспективных вариантов ТГц источников представляются гиротроны, которые сочетают в себе компактность прибора, малую величину рабочих напряжений и относительно невысокую стоимость с высоким уровнем выходной мощности. При этом, повышение частоты излучения гиротрона свыше 0.5 ТГц требует создания приборов, реализующих генерацию на гармониках циклотронной частоты [2]. Это связано с отсутствием или крайней сложностью магнитных систем, позволяющих создавать магнитные поля величиной свыше 15-20 Тл, необходимых для работы в непрерывном режиме на основной циклотронной гармонике. Работа на гармониках влечет за собой возрастание сложности обеспечения устойчивости генерации рабочего типа колебаний в условиях конкуренции с модами на низких гармониках.

Существующие на данный момент методы селекции колебаний можно разделить на электродинамические и электронные [3]. Использование методов *электродинамической* селекции в суб-ТГц области частот существенно затруднено технологическими ограничениями как на размеры элементов электродинамической системы гиротрона (например, современные возможности производства ограничивают минимальный диаметр резонатора на уровне 3 мм), так и на точность изготовления этих элементов. Крайне высокая чувствительность добротности к точности изготовления резонатора [4] заставляет отказаться от электродинамических методов при продвижении в область больших частот. Второе семейство методов – методы *электронной* селекции колебаний. Наряду с использованием приосевых электронных пучков [5], требующих специфических электронно-оптических систем, перспективным методом повышения селективных свойств электронных потоков представляется использование многолучевых систем [6] с несколькими генерирующими или поглощающими электронными пучками.

На данный момент уже создан и успешно испытан двухлучевой гиротрон на второй гармонике циклотронной частоты с частотой излучения 790 ГГц [7], в котором применена схема с двумя генерирующими электронными пучками. В данной работе рассматривается применение системы с одним генерирующим и одним поглощающим электронными пучками как метод селекции колебаний в гиротроне.

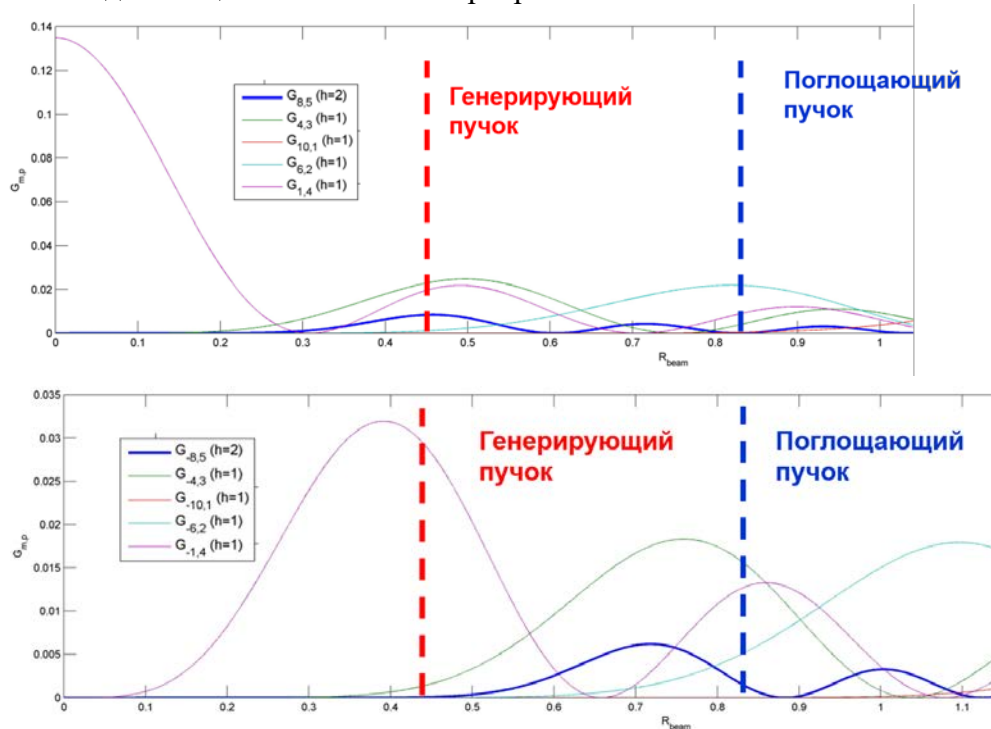


Рис. 1. Факторы связи электронных пучков с рабочей модой резонатора и ближайшими паразитными модами

Для корректного сравнения эффективности селекции мод при помощи поглощающего пучка, параметры резонатора гиротрона и рабочая мода были выбраны совпадающими с уже созданным двухпучковым гиротроном. На рисунке 1 представлен выбор радиусов электронных пучков в резонаторе гиротрона. Внешний пучок предполагается поглощающим, что позволяет обеспечить его связь с максимальным числом паразитных мод, при отсутствии взаимодействия с выбранной рабочей модой. Для обеспечения условий циклотронного поглощения параметры электронного пучка должны удовлетворять условию:

$$\pi^2 g^2 \frac{1}{2} \left(\frac{L}{\lambda} \right)^2 \left[1 - \frac{n\omega_H}{\omega} \right] < n$$

где L – длина резонатора, λ, ω – длина волны и частота излучения, ω_H – циклотронная частота, n – номер гармоники, g – питч-фактор электронного пучка. Присутствие поглощающего электронного пучка в резонаторе гиротрона может быть рассмотрено как наличие дополнительной эффективной электронной добротности:

$$Q_{el} = \left[\frac{5.4 * 10^2 \frac{(v_{m,p}^2 - m^2) J_m^2(v_{m,p})}{n J_{m-s}^2 \left(\frac{v_{m,p} R_b}{R_w} \right) I_{beam}}}{\left(\frac{n^n}{2^n n!} \right)^2 \left[\frac{\beta_{||}^2}{\beta_{\perp}^{2(n-1)}} \right] \frac{\lambda}{L} \exp((\mu\Delta)^2 / 8)} \right]$$

Полная добротность паразитной моды при этом может существенно изменяться: так при токе поглощающего пучка в 0.25 А возможно уменьшение добротности паразитной

моды в 2 раза. Уменьшение добротности паразитных мод увеличивает их стартовые токи и тем самым расширяет зону генерации рабочей моды. На рисунке 2 приведены зависимости стартовых токов рабочей моды гиротрона $TE_{8,5}$ и ближайшего сателлита $TE_{1,4}$ для варианта с одним генерирующим пучком и одним поглощающим пучком.

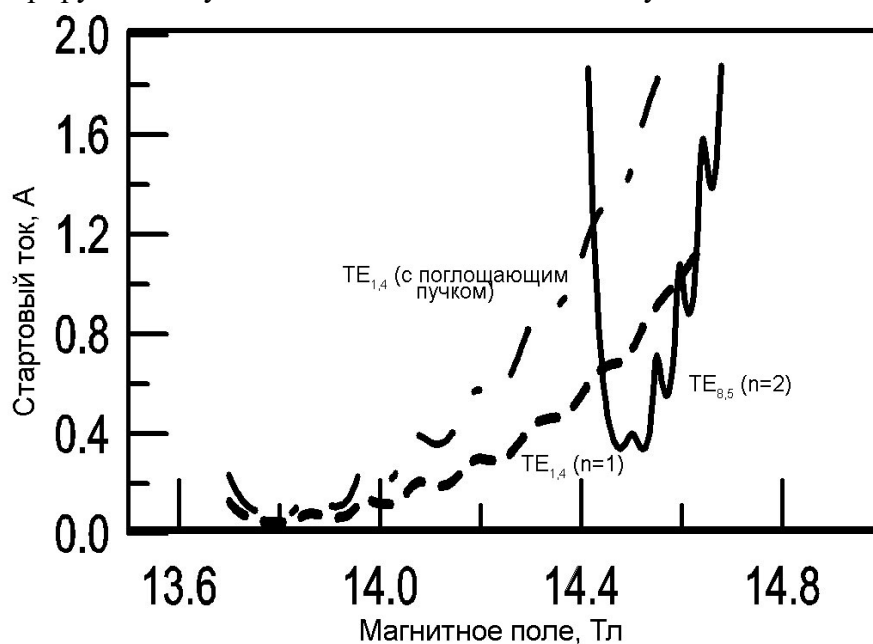


Рис. 2. Кривые стартовых токов рабочей моды $TE_{8,5}$ (сплошная линия) и паразитной моды $TE_{1,4}$ в однопучковой схеме (штриховая линия) и при наличии поглощающего пучка (штрихпунктир)

Известные эксперименты в мощных гиротронах на низких частотах [8] продемонстрировали эффективность метода электронной селекции при помощи поглощающего электронного пучка. Применение этого метода в суб-ТГц гиротронах позволит создать гиротроны с рекордными значениями рабочей частоты и мощности при непрерывном режиме работы, которые будут востребованы для многочисленных научных и практических приложений

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, грант № 18-32-00132

Библиографический список

1. S. S. Dhillon *et al.*, "The 2017 terahertz science and technology roadmap," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 50, no. 4, p. 43001, Feb. 2017.
2. G. S. Nusinovich, *Introduction to the physics of gyrotrons*. The Johns Hopkins University Press, 2004.
3. Ш. Е. Цимринг, *Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков*. Нижний Новгород, ИПФ РАН, 2012.
4. В. Е. Запевалов and О. В. Малыгин, "Дифракционная добротность слабokonических резонаторов гиротронов," *Изв. ВУЗов. Радиофизика*, т. 26, №. 76, с. 903–905, 1983.
5. V. L. Bratman, Y. K. Kalynov, and V. N. Manuilov, "Large-Orbit Gyrotron Operation in the Terahertz Frequency Range," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 102, no. 24, p. 245101, Jun. 2009.
6. В. Е. Запевалов and Ш. Е. Цимринг, "Многолучевые гиротроны," *Изв. ВУЗов. Радиофизика*, т. 33, №.11, с. 1288–1295, 1990.
7. T. Idehara *et al.*, "A novel THz-band double-beam gyrotron for high-field DNP-NMR spectroscopy," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 88, no. 9, p. 94708, Sep. 2017.
8. В. Е. Запевалов, В. Н. Мануилов, О. В. Малыгин, Ш. Е. Цимринг, "Мощный двухлучевой гиротрон на второй гармонике циклотронной частоты," *Изв. ВУЗов. Радиофизика*, т. 37, №. 3, с. 387–392, 1994.