

Источники излучения для двухчастотного ЭЦР нагрева в компактных плазменных системах

М. Ю. Глявин, И. В. Железнов, И. В. Зотова, Д. С. Крупин, В. Н. Мануилов, А. С. Сергеев

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, г. Нижний Новгород

Аннотация: исследована возможность создания мощных источников непрерывного двухчастотного излучения миллиметрового диапазона для плазменных приложений, включая нагрев плазмы в лабораторных ЭЦР источниках многозарядных ионов. Для этой цели предлагается использовать гиротрон с двумя соосными электронными пучками, независимо возбуждающие волноводные моды на 2-ой и 3-ей циклотронных гармониках. Согласно недавним экспериментам, такое соотношение частот является оптимальным с точки зрения подавления кинетических плазменных неустойчивостей. Выполнены расчеты, показывающие возможность практической реализации гиротрона с рабочими частотами 30 и 45 ГГц и мультикиловаттным уровнем мощности на каждой из частот.

Ключевые слова: гиротрон, нагрев плазмы, источники многозарядных ионов, подавление плазменных неустойчивостей

1. Введение

В последнее время в задачах нагрева плазмы в лабораторных магнитных ловушках в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) возник интерес к использованию двухчастотного излучения с сильно разнесенными частотами [1-4]. Наличие двух пространственно разнесенных зон ЭЦР, отвечающих разным частотам, может быть использовано для управления профилем энерговклада и стабилизации плазмы в тороидальных системах. Кроме того, относительно новым эффектом при использовании двухчастотного нагрева при создании источников многозарядных ионов является существенное увеличение эффективности работы за счет подавления кинетических неустойчивостей. В последнем случае экспериментально выяснено, что оптимальным соотношением частот нагревного излучения является соотношение близкое к 3:2. При проведении указанных экспериментов использовались два источника непрерывного излучения, а именно гиротрон и гиро-ЛБВ [3,4]. В то же время, из соображений снижения стоимости за счет использования только одного источника питания и одной магнитной системы, представляет интерес реализация двухчастотных режимов генерации непосредственно в одном приборе. При этом с учетом требуемой высокой мощности (в несколько киловатт и выше) гиротрон является фактически единственным претендентом на роль такого источника.

Следует отметить, что гиротрон обычно формирует монохроматическое (или близкое к такому излучение на одной частоте, которая близка к критической частоте рабочей ТЕ моды слабонерегулярного цилиндрического волновода. При этом для селективного выделения единственно моды используется встrel электронного пучка в максимум коэффициента связи. В работе [5] было показано, что при относительно невысокой сверхразмерности рабочего волновода (определяемого как отношение его диаметра к длине волны) возможны условия, при которых указанные максимум разнесены, и две моды могут независимо возбуждаться двумя соосными электронными пучками на первой и второй циклотронных гармониках (ЦГ). В данной работе рассматривается аналогичная схема, но с возбуждением на второй и третьей циклотронных гармониках, т.е. с оптимальным для указанных выше приложение соотношением частот. Выполнены расчеты, показавшие принципиальную

реализуемость гиротрона с киловаттным уровнем мощности на частотах 30 и 45 ГГц.

2. Модель и основные уравнения

Будем далее рассматривать гиротрон с резонатором в виде слабонеоднородного цилиндрического волновода, который возбуждается двумя соосными цилиндрическими электронными пучками, вращающимися в однородном магнитном поле $H = H_0 \vec{z}$. Расчеты проводились на основе разработанной в [6] модели двухпучкового гиротрона, в которой учитывается конкуренция многих ТЕ мод. Указанная модель основана на системе уравнений, включающей уравнения параболического типа для эволюции амплитуды ВЧ поля каждой из мод и уравнения движения электронов для каждого из пучков:

$$\begin{aligned} i \frac{\partial^2 a_n}{\partial Z^2} + s_n \frac{\partial a_n}{\partial \tau} + \chi a_n &= i \frac{I_n}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} \left(J_{m_n-s_n} \left(v_n \frac{R_1}{R_w} \right) \langle p_1^{s_n} \rangle + k J_{m_n-s_n} \left(v_n \frac{R_2}{R_w} \right) \langle p_2^{s_n} \rangle \right) e^{i(m_n-s_n)\varphi} d\varphi_0, \\ \frac{\partial p_1}{\partial Z} + \frac{g^2}{4} \frac{\partial p_1}{\partial \tau} + i p_1 (|p_1|^2 - 1) &= i \sum_n J_{m_n-s_n} \left(v_n \frac{R_1}{R_w} \right) a_n (p_1^*)^{s_n-1} e^{-i(m_n-s_n)\varphi}, \\ \frac{\partial p_2}{\partial Z} + \frac{g^2}{4} \frac{\partial p_2}{\partial \tau} + i p_2 (|p_2|^2 - 1) &= i \sum_n J_{m_n-s_n} \left(v_n \frac{R_2}{R_w} \right) a_n (p_2^*)^{s_n-1} e^{-i(m_n-s_n)\varphi}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $\tau = \beta_{\perp 0}^4 \omega_H t / 8\beta_{\parallel 0}^2$ и $Z = \beta_{\perp 0}^2 \omega_H z / 2c\beta_{\parallel 0}$ – безразмерные время и продольная координата; p – комплексный поперечный импульс электронов, нормированный на его абсолютное значение на входе в пространство взаимодействия;

$a_n = \frac{eA_n}{m_e c \omega_H} \frac{s_n^{s_n}}{2^{s_n-1} s_n!} \frac{\beta_{\perp 0}^{s_n-4}}{\gamma_0}$ – безразмерная амплитуда n -ой моды TE_{m_n, q_n} с критической частотой $\bar{\omega}_n^c$ в регулярной части резонатора гиротрона с радиусом R ; s_n – номер циклотронной гармоники, на которой возбуждается указанная мода в условиях резонанса $\bar{\omega}_n^c \approx s_n \omega_H$; $\omega_H = eH_0 / m_e c \gamma_0$ – невозмущенная релятивистская гирочастота, $g = \beta_{\perp 0} / \beta_{\parallel 0}$ – питч факторы пучков, которые в данной модели задаются одинаковыми;

$$I_n = 64 \frac{eI_{b1}}{m_e c^3} \frac{\beta_{\parallel 0} \beta_{\perp 0}^{2(s_n-4)}}{\gamma_0} s_n^3 \left(\frac{s_n^{s_n}}{2^{s_n} s_n!} \right)^2 \frac{1}{(v_n^2 - m_n^2) J_{m_n}^2(v_n)}$$

– параметр возбуждения; I_{b1} – рабочий ток внутреннего пучка с радиусом инжекции R_1 ; рабочий ток внешнего пучка с радиусом инжекции R_2 вычисляется как $I_{b2} = kI_{b1}$; v_n – собственное число моды с номером n (q_n -ый корень уравнения $dJ_{m_n}(x)/dx = 0$, где $J_{m_n}(x)$ – функция Бесселя первого рода); $\chi = i\Delta + \varepsilon_n(Z)$, где $\Delta_n = 8\beta_{\parallel 0}^2 s_n^2 (s_n \omega_H - \bar{\omega}_n^c) / \bar{\omega}_n^c \beta_{\perp 0}^4$ – расстройка циклотронного резонанса, $\varepsilon_n(Z) = 8\beta_{\parallel 0}^2 s_n^2 (\bar{\omega}_n^c - \omega_n^c(Z)) / \bar{\omega}_n^c \beta_{\perp 0}^4$ – геометрическая расстройка, описывающая изменение критической частоты n -ой моды $\omega_n^c(Z) = v_n c / R(Z)$ вдоль продольной координаты, задаваемое плавным профилем резонатора гиротрона $R(z)$.

Уравнения (1) должны быть дополнены стандартными для гиротронов граничными условиями, которые для частиц соответствуют равномерному распределению электронов в обоих пучках по фазам циклотронного вращения, а для амплитуд волн – свободной дифракции излучения через границы расчетной области (так называемые безотражательные граничные условия, см. [7])

3. Результаты моделирования гиротрона с рабочими частотами 45/30 ГГц

Для расчетов будем считать, что запитывающие электронные пучки идентичны ($k = 1$) и имеют следующие параметры: энергия пучка 25 кэВ, ток 2 А, питч-фактор 1.2, разброс по поперечным скоростям – 20%. Такие параметры могут быть обеспечены на базе установок технологических гиротронов [8,9] этого же диапазона. При выборе рабочих мод будем учитывать критерии, разработанные в [], а именно:

- критические частоты (или собственные числа) рабочих мод должны относиться как $\omega_1^c / \omega_2^c \approx 3 : 2$;
- радиусы встраля $R_{1,2}$ электронных пучков в резонатор должны быть такими, чтобы обеспечить условия:

$$G_1(R_1) = \max G_1(r), \quad G_1(R_2) = 0; \quad G_2(R_1) = 0, \quad G_2(R_2) = \max G_2(r), \quad (2)$$

где

$$G_n(r) = \frac{J_{m_n - s_n}^2(v_n r / R_w)}{(v_n^2 - m_n^2) J_{m_n}^2(v_n)}, \quad (3)$$

– известный в теории гиротронов параметр связи [7]. При генерации на второй и третьей циклотронных гармониках указанные условия точно не выполняются. Однако возможно подобрать связку мод, для которых (3) выполняется приблизительно и далее решать задачу о конкуренции мод. Согласно Рис.1, такая связка соответствует возбуждению $TE_{3,2}$ моды на 3-ей ЦГ и $TE_{4,1}$ на 2-ой ЦГ. При этом для моды $TE_{3,2}$ оптимальным является центральный встраля. Однако, поскольку для такого встраля невозможно обеспечить закрутку пучка в традиционных системах типа магнетронно-инжекторных пушек, встраля для внутреннего пучка выбран отличным от нуля.

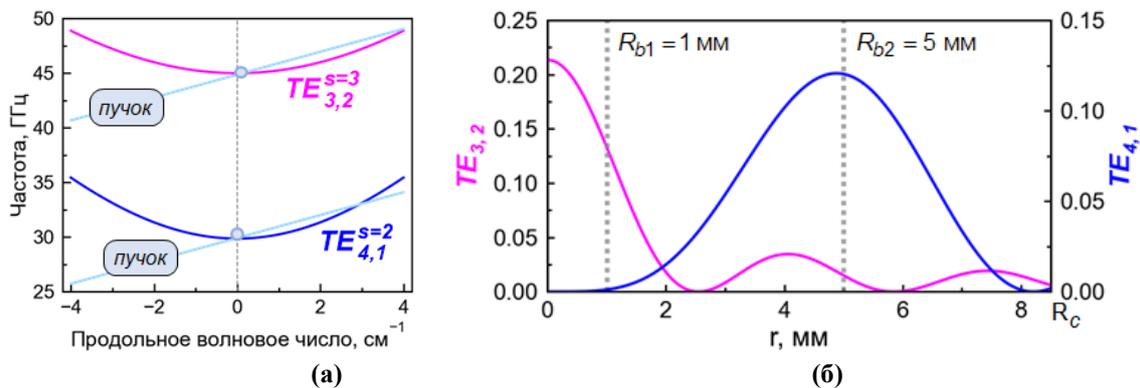


Рисунок 1. Расчет гиротрона с рабочими частотами 45/30 ГГц. (а) Дисперсионная диаграмма и (б) коэффициенты связи рабочих мод. Вертикальными линиями показаны радиусы встраля электронных пучков.

Следует отметить, что при выбранных встралях возникает конкуренция рабочих мод с другими поперечными модами, которые не показаны на Рис.1б. Для внутреннего пучка основным конкурентом является мода $TE_{1,2}$ на второй циклотронной гармонике,

а для внешнего – $TE_{3,1}$ также на второй ЦГ. В то же время подбором длины резонатора удается обеспечить селективное возбуждение рабочих мод в этих условиях. Результаты моделирования для оптимальной длины резонатора 86 мм представлены на Рис.2. На Рис.2а показан выход на стационарный режим генерации с одновременным возбуждением рабочих мод: моды $TE_{3,2}$ на третьей циклотронной гармонике ЦГ и моды $TE_{4,1}$ на 2-ой циклотронной гармонике. На Рис.2б показаны зоны генерации указанных мод в зависимости от магнитного поля. Согласно выполненными оценками на краю зоны в области малых магнитных полей мощность излучения на 3-ей ПГ может достигать 2.5 кВт при мощности на 2-ой ПГ порядка 1.5 кВт.

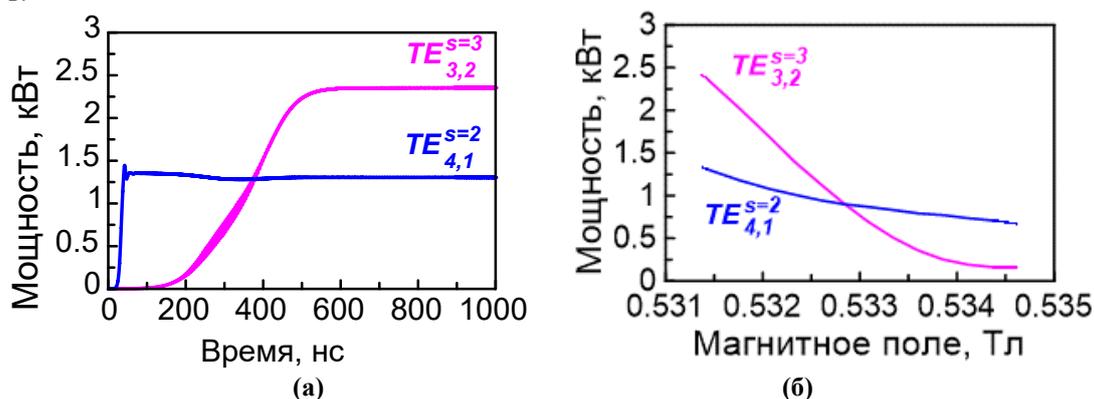


Рисунок 2. Расчеты гиротрона с рабочими частотами 45/30 ГГц. **(а)** Установление стационарной генерации с одновременным возбуждением мод $TE_{3,2}$ и $TE_{4,1}$ на 3-ей и 2-ой циклотронных гармониках. **(б)** Зоны генерации рабочих мод в зависимости от ведущего магнитного поля.

Заключение

Таким образом, результаты расчета показывают возможность достижения киловаттного уровня генерации на двух частотах с соотношением 3:2 в гиротроне, запитываемом двумя независимо генерирующими электронными пучками. Мощность генерации при этом может регулироваться отдельно для каждой моды при изменении параметров электронных пучков, либо магнитного поля. Отметим, что оптимальное соотношение радиусов встрела пучков близко к 5. Согласно предварительному анализу, такое соотношение может быть обеспечено при использовании комбинированной системы формирования, состоящей из прямой и обращенной магнетронно-инжекторных пушек [10,11].

Работа выполнена в рамках проекта ИПФ РАН FFUF–2022–0007 «Создание мощных источников электромагнитного излучения ЭЦР диапазона».

Список литературы

1. Skalyga V. A. et al. Microwave Emission for ECR Plasmas under Conditions of Two-Frequency Heating Induced by Kinetic Instabilities // AIP Conf. Proc. – 2018. – Т. 2011. – № 1. – С. 020015. doi: 10.1063/1.5053257.
2. Skalyga V. A. et al. Suppression of cyclotron instability in Electron Cyclotron Resonance ion sources by two-frequency heating // Physics of Plasmas – 2015. –Т. 22. –№ 8. – С. 083509. doi: 10.1063/1.4928428.
3. Izotov I. V. et al. Broadband microwave emission spectrum associated with kinetic instabilities in minimum-B ECR plasmas // Physics of Plasmas. – 2017. – Т. 24. – № 4. – С. 043515. doi: 10.1063/1.4981387.
4. Izotov I. V. Kinetic instabilities of ECR plasmas in conventional ECRIS and in high-density gasdynamic devices // Symposium on Ion Sources and the Plasmas. Lanzhou. China. – 15-18 октября 2023.
5. Zheleznov I.V. et al. Concept of dual-frequency double-beam gyrotron for plasma applications/ / IEEE Electron Dev. Lett. – 2024. –V.45. – Iss.9. – P.1642-1644/ doi: 10.1109/LED.2024.3424652.

6. Ginzburg N. S. et al. Improvement of Stability of High Cyclotron Harmonic Operation in the Double-Beam THz Gyrotrons // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2016. – Т. 44. – № 8. – С. 1303-1309. doi: 10.1109/TPS.2016.2585307
7. Nusinovich. G. Introduction to the physics of gyrotrons – The Johns Hopkins Univ. Press. 2004.
8. Bykov Yu. et al. 24-84-GHz gyrotron systems for technological microwave applications // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2004. – Т. 32. – № 1. – С. 67–72. doi: 10.1109/TPS.2004.823904.
9. Proyavin M. D. et al. A Magneto-Armored Warm-Solenoid Based System for K-Band Gyrodevices // Instruments and Experimental Techniques. – 2020. – Т. 63. – № 1. – С. 97–100. doi: 10.31857/S0032816220010073.
10. Цимринг Ш. Е. Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков. Пер. с англ. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2012
11. Manuilov V. N. Multibeam gyrotrons // Conference digest of the 20-th International conference on infrared and millimeter waves. Orlando, USA. – 11-14 декабря, 1995.