

Разработка высокоэффективного гиротрона мегаваттного уровня мощности с неадиабатической системой формирования электронного пучка

М.Ю. Глявин¹, А.Л. Гольденберг¹, Д.С. Крупин^{1,2}, К.А. Лешева^{1,2}, В.Н. Мануилов^{1,2}, И.В. Зотова¹, И.В. Железнов¹

¹Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

²ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Аннотация: В данной работе методами численного моделирования исследовалась возможность реализации высокоэффективного мегаваттного гиротрона, предназначенного для нагрева плазмы в перспективных установках УТС. Для повышения КПД предлагается использовать электронный пучок с высокой долей вращательной энергии электронов и низким скоростным разбросом, формируемый неадиабатической электронно-оптической системой. Показано, что КПД гиротрона с рабочей частотой 230 ГГц на моде TE_{25,16} составляет ~40%, а после использования одноступенчатой системы рекуперации остаточной энергии может достигать 70%.

Ключевые слова: гиротрон, мощность, эффективность, рекуперация остаточной энергии, численное моделирование, электронно-волновое взаимодействие

1. Введение

На сегодняшний день гиротроны являются наиболее мощными источниками непрерывного излучения в миллиметровом диапазоне длин волн [1,2], обеспечивая мегаваттный уровень генерации. Важнейшим приложением мощных гиротронов является нагрев плазмы и поддержание тока в установках управляемого термоядерного синтеза (УТС). Частота гиротронов для современных установок УТС, включая международный проект ITER [3], находится в диапазоне 110-170 ГГц. В то же время для установок УТС нового поколения типа DEMO, требуется разработка мегаваттных гиротронов с частотой генерации 230-250 ГГц. Продвижение в указанный диапазон требует решения целого ряда задач, включая обеспечение высокого КПД на уровне 60% и выше.

В современных мощных гиротронах КПД порядка 50% достигается за счет применения систем одноступенчатой рекуперации энергии [4,5]. В этом случае часть энергии электронного пучка возвращается источнику питания. Повышение КПД сверх указанного значения (до 60-65%) может быть обеспечено за счет использования многоступенчатых систем рекуперации [6,7], которые, однако, являются довольно сложными и в настоящее время находятся в стадии разработки.

В то же время, известно, что большие значения КПД в гиротронах могут быть достигнуты при использовании винтовых электронных пучков с увеличенным питч-фактором, который определяется как отношение начальной поперечной скорости электронов к продольной. Электронные пучки для современных мощных гиротронов формируются в так называемых магнетронно-инжекторных пушках (МИП) с адиабатическими электронно-оптическими системами (ЭОС). Достижимый питч-фактор при этом находится на уровне 1.1-1.3. Несмотря на многие преимущества таких систем, недостатком является достаточно большой разброс колебательных скоростей ~20-25% [8]. Это обусловлено множеством различных факторов, среди которых наиболее опасными являются собственные силы пространственного заряда

электронного пучка, шероховатость эмиттера и начальные тепловые скорости электронов. При продвижении в коротковолновые диапазоны влияние этих факторов усиливается. Это приводит к существенному уменьшению достижимого питч-фактора и, таким образом, ограничивает КПД гиротрона и усложняет проблему конкуренции мод.

В то же время устранить или, по крайней мере, существенно уменьшить указанные выше факторы можно, обратившись к неадиабатическим ЭОС [9-11], в которых изначально формируется ламинарный прямолинейный электронный пучок (Рис. 1). Затем такой пучок попадает в область с неадиабатическими электрическими или магнитными полями, где частицы приобретают начальную орбитальную (вращательную) энергию. Наконец, адиабатическое магнитное сжатие используется для увеличения орбитальной энергии до желаемого уровня. В результате, даже в коротковолновых диапазонах, возможно формирование пучков с гораздо бóльшим питч-фактором, чем в случае МИП, и малым разбросом по скоростям. В частности, в настоящий момент в ИПФ РАН выполнен расчет неадиабатической ЭОС для гиротрона с рабочей частотой 230 ГГц, согласно которому возможно формирование пучка с энергией 80 кэВ, током до 30 А, питч-фактором 1.8-2 и начальным разбросом 10%. В данной работе на основе численного моделирования показано, что в этом случае возможно обеспечить КПД гиротрона на уровне 70% с использованием системы одноступенчатой рекуперации.

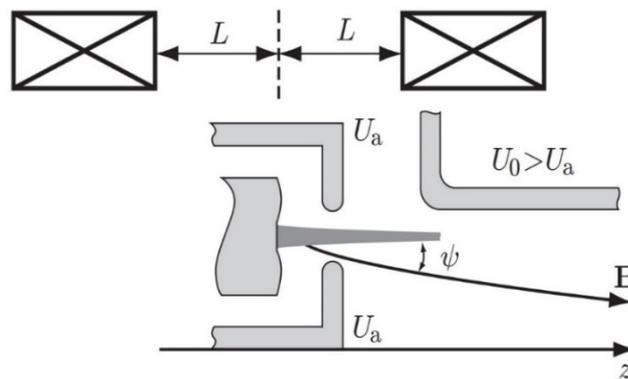


Рисунок 1. Триодная схема неадиабатической осесимметричной электронной пушки. U_a и U_0 — потенциалы первого и второго анодов по отношению к потенциалу катода. Также показаны две встречные симметричные магнитные катушки.

2. Многомодовая нестационарная модель электронно-волнового взаимодействия в гиротронах

Рассмотрим электронно-волновое взаимодействие в гиротроне с резонатором в виде отрезка слабонерегулярного волновода на основе самосогласованной нестационарной модели [12], учитывающей взаимодействие винтового электронного пучка с совокупностью неэквидистантных ТЕ мод. Будем считать, что генерация происходит на основном циклотронном резонансе в условиях $\omega_H \approx \omega_c$, где $\omega_H = eH_0/mc\gamma$ — релятивистская гирочастота, ω_c — критическая частота рабочей моды. В этом случае рабочая система уравнений может быть записана в виде, включающем уравнения параболического типа для эволюции амплитуды ВЧ поля каждой из мод и уравнения движения электронов:

$$i \frac{\partial^2 a_n}{\partial Z^2} + \frac{\partial a_n}{\partial \tau} + (i\delta_n(Z) + i\Delta_n + \sigma_n) a_n = i \frac{I_n}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} p e^{i(m_n - s_n)\varphi} d\theta_0 d\varphi, \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial Z} + \frac{g_0^2}{4} \frac{\partial p}{\partial \tau} + ip(|p|^2 - 1) = i \sum_n a_n e^{-i(m_n - s_n)\varphi}.$$

Здесь использованы следующие обозначения: $\tau = \beta_{\perp 0}^4 \omega_c t / 8\beta_{\parallel 0}^2$ – безразмерное время,

$Z = \beta_{\perp 0}^2 \omega_c z / 2c\beta_{\parallel 0}$ – безразмерная продольная координата;

$p_{\pm} = (p_x + ip_y) e^{-i\omega_c t + i(m-1)\varphi} / p_{\perp 0}$ – комплексный поперечный импульс электронов,

нормированный на его начальное абсолютное значение; $a_n = \frac{eA_n}{m_e c \omega_c} \frac{J_{m_n-1}(v_n R_b)}{\beta_{\perp 0}^3 \gamma_0}$ –

безразмерная амплитуда моды TE_{m_n, q_n} с порядковым номером n , $\beta_{\perp 0} = V_{\perp 0} / c$ и

$\beta_{\parallel 0} = V_{\parallel 0} / c$ – нормированные на скорость света начальные поперечная и продольная

скорости электронов, $g_0 = \beta_{\perp 0} / \beta_{\parallel 0}$ – соответствующий питч фактор,

$$I_n = 16 \frac{eI_b}{mc^3} \frac{\beta_{\parallel 0}}{\beta_{\perp 0}^6 \gamma_0} \frac{J_{m_n-1}^2(\omega_c R_b / c)}{(v_n^2 - m_n^2) J_{m_n}^2(v_n)} -$$

– параметр возбуждения, I_b – рабочий ток поливинтового электронного пучка с радиусом инжекции R_b ; 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),

$\sigma_n = \frac{4\beta_{\parallel 0}^2 d}{\beta_{\perp 0}^4 R} \left(1 - \frac{m_n^2}{v_n^2}\right)^{-1}$ – параметр омических потерь, d – глубина скин-слоя,

$\Delta_n = 8\beta_{\parallel 0}^2 (\omega_H^0 - \omega_c^n) / \omega_c^n \beta_{\perp 0}^4$ – начальная расстройка циклотронного резонанса, ω_H^0 –

невозмущенная гирочастота. Функция $\delta_n(Z) = 8\beta_{\parallel 0}^2 (\omega_c^n - \omega_c^n(Z)) / \omega_c \beta_{\perp 0}^4$ описывает изменение критической частоты n -ой моды вдоль продольной координаты, задаваемое плавным профилем резонатора гиротрона $R(z)$.

3. Результаты расчета гиротрона с неадиабатической ЭОС

Следует отметить, что особенностью разрабатываемой неадиабатической пушки является достаточно малый (по сравнению со случаем стандартной МИП) радиус инжекции электронного пучка в области резонатора гиротрона, что обусловлено конструктивными особенностями новой системы. В то же время, радиус рабочего резонатора гиротрона выбирается из соображений обеспечения приемлемых тепловых нагрузок при мегаваттном уровне генерации. В результате оказывается, что радиус

инъекции пучка R_b составляет примерно одну треть от радиуса волновода R , в то время как для стандартных МИП соотношение обычно находится на уровне 0.5. Такая особенность исключает использование известных «стандартных» рабочих мод гиротрона с максимумом коэффициента связи на уровне $0.5 R$. Это было принято во внимание при выборе рабочей моды $TE_{25,16}$ для которой при критической частоте 230.7 ГГц в резонаторе радиусом 17.37 мм максимум коэффициента связи соответствует радиусу встраиваемого пучка 5.45 мм. На Рис. 2 показано установление в результате конкуренции колебаний на рабочей моде $TE_{25,16}$ в режиме жесткого самовозбуждения гиротрона при оптимальном значении магнитного поля. Согласно расчетам поперечный КПД составляет 50 %, что при питч-факторе 1.8 соответствует выходной мощности 1.1 МВт (полный электронный КПД $\sim 38.5\%$). При учете разброса по поперечным скоростям в 10% электронный КПД снижается незначительно (до 38%). Расчет энергетических спектров показывает, что минимальная остаточная энергия электронов при этом составляет примерно 44% от их начальной энергии. В результате при использовании одноступенчатой рекуперации применительно к исследуемому гиротрону возможно получение КПД до $\sim 70\%$.

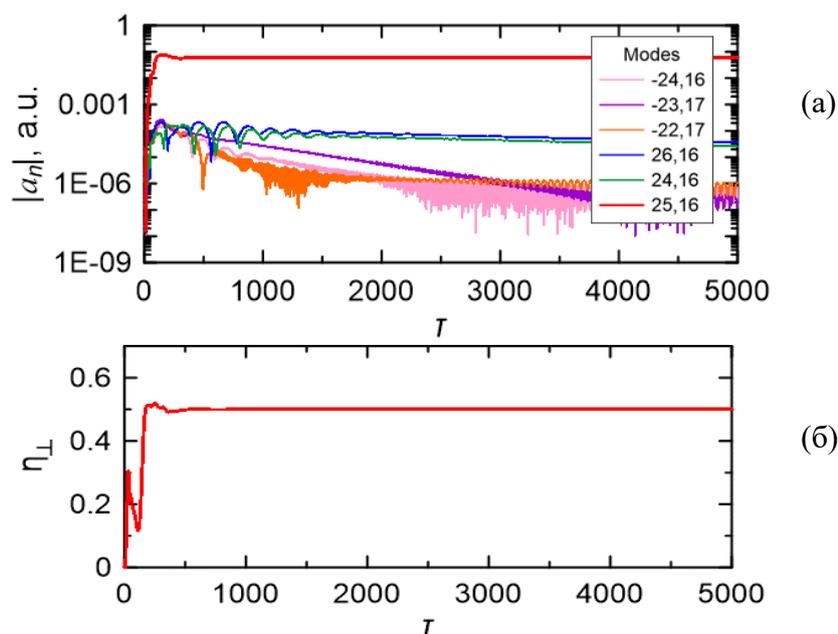


Рисунок 2. Зависимости от времени амплитуд конкурирующих мод (а) и поперечного КПД (б), полученные в результате моделирования гиротрона с неадиабатической ЭОС.

4. Заключение

Таким образом, на основе численного моделирования было показано, что при использовании параметров электронного пучка, формируемого неадиабатической ЭОС, КПД гиротрона с рабочей частотой 230 ГГц и выходной мощностью 1 МВт может составлять $\sim 70\%$ после применения одноступенчатой рекуперации энергии. Указанные параметры более чем соответствуют требованиям к гиротронам, разрабатываемым для установки термоядерного синтеза ДЕМО. Отметим, что для данного гиротрона конкуренция мод не позволяет продвинуться в область оптимального значения КПД, которое в одномодовом приближении составляет порядка 60% (более 80% при одноступенчатой рекуперации). В принципе, продвижение в оптимальную область может быть осуществлено за счет захвата гиротрона слабым внешним сигналом на рабочей моде (см., например, [13]). Однако окончательные выводы в этом вопросе требуют дальнейших исследований.

Работа выполнена за счет проекта ИФФ РАН FFUF-2022-0007 «Создание мощных источников электромагнитного излучения ЭЦР диапазона» программы КП РТН.

Список литературы

1. Thumm M.K.A., Denisov G.G., Sakamoto K., Tran M.Q. High-power gyrotrons for electron cyclotron heating and current drive // Nuclear Fusion. – 2019. – V. 59. – №. 7. – P. 073001.
2. Litvak A., Denisov G., Glyavin M. Russian gyrotrons: achievements and trends // IEEE Journal of Microwaves. – 2021. – V. 1. – №. 1. – P. 260.
3. <https://www.iter.org/newsline/-/3794>
4. Sakamoto K., Tsuneoka M., Kasugai A. et al. Major improvement of gyrotron efficiency with beam energy recovery // Phys. Rev. Lett. – 1994. – V. 75. – P. 3532.
5. Glyavin M., Kuftin A., Venediktov N. et al. Experimental investigation of a 110 GHz/1 MW gyrotron with the one-step depressed collector // Int J Infrared Milli Waves. – 1997. – V. 18. – P. 2129.
6. Ell B. et al. Toward the first continuous wave compatible multistage depressed collector design for high power gyrotrons // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2023. – V. 70. – №. 3. – P. 1299.
7. Louksha O., Trofimov P., Manuilov V. et al. Trajectory analysis in a collector with multistage energy recovery for a DEMO prototype gyrotron. Part II. Toroidal magnetic field //Tech. Phys. – 2021. – V. 66. –P. 992.
8. Kuftin A.N., Lygin V.K., Tsimring Sh.E., Zapevalov V.E. Numerical simulation and experimental study of magnetron-injection guns for powerful short-wave gyrotrons. //Int. J. Electronics, – 1992. – V. 72. –P. 1145.
9. Piosczyk B. Non-adiabatic electron gun for gyrotrons // International Journal of Electronics. – 1989. – V. 67. – №. 3. – P. 447.
10. Goldenberg A., Manuilov V., Glyavin M. Electron-optical system of a high-power gyrotron with nonadiabatic electron gun // Radiophys Quantum Electron. – 2005. – V. 48. – P. 461.
11. Гольденберг А.Л., Глявин М.Ю., Мануилов В.Н., Лещева К. А. Неадиабатическая электронно-оптическая система технологического гиротрона / А. Л. Гольденберг, М // Изв. вузов. Радиофизика. – 2017. – Т. 60. – №. 5. – P. 442.
12. Денисов Г.Г., Глявин М.Ю., Зотова И.В., Железнов И.В., и др. Концепция гиротрона с мегаваттным уровнем мощности на первой и второй циклотронных гармониках для нагрева плазмы в сферических токамаках // Изв. ВУЗов Радиофизика. – 2020. – Т. 63. – №. 5-6. – P. 383.
13. Vakunin V.L., Denisov G.G., Novozhilova Yu.V. Principal enhancement of THz-range gyrotron parameters using injection locking // IEEE Electron Device Letters. – 2020. – V. 41. – №. 5. – P. 777.