

*Абубакиров Э.Б., Вилков М.Н., Гузнов Ю.М.,  
Леонтьев А.Н., Ошарин И.В., Розенталь Р.М.,  
Федотов А.Э.*

*Федеральный исследовательский центр*

*Институт прикладной физики РАН*

## **Новый тип резонатора для сильноточных гиротронов с сильной дискриминацией ТЕ-мод**

*Представлены результаты трехмерного "холодного" моделирования электродинамической системы в виде набора продольных пластин, демонстрирующие возможность эффективного удержания моды типа  $TM_{5,1}$ , и результаты расчета электронно-волновых процессов в таком резонаторе при запитке его сильноточным винтовым электронным пучком.*

**Ключевые слова:** миллиметровые волны, сильноточный гиротрон, селекция мод в резонаторах

В настоящее время для гиротронов, представляющих собой наиболее мощные источники СВЧ излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, активно исследуются новые типы селективных резонаторов, открытых не только в продольном, но и в поперечном направлениях. К ним относятся конфокальные резонаторы [1,2], системы планарной геометрии [3,4], Photonic-Band-Gap структуры [5].

В данной работе предлагается новый тип резонатора гиротрона продольно-щелевого типа, обеспечивающий селективное взаимодействие винтового электронного пучка только с модами ТМ-типа. Ранее работоспособность подобной электродинамической структура была экспериментально продемонстрирована в релятивистской ЛОВ сантиметрового диапазона [6]. Взаимодействие с модами ТМ-типа позволяет рассчитывать на заметное увеличение выходной мощности сильноточных релятивистских гиротронов.

Увеличение эффективности электронно-волнового взаимодействия в гиротроне может быть достигнуто путем снижения параметра тока при одновременном увеличении длины резонатора. В традиционных слабо-релятивистских гиротронах это обычно достигается увеличением нормы волны за счет использования рабочей моды с более высокими индексами. Однако, такой подход ведет к обострению конкуренции мод, что особенно критично для сильноточных релятивистских гиротронов. Одним из вариантов улучшения данной ситуации может быть использование для работы мод ТМ-типа, для которых коэффициент связи пучка с волной в  $\sim\beta_{\parallel}^2$  раз ниже, чем для ТЕ-мод.

Важной проблемой при создании гиротронов на ТМ-моде является возбуждение паразитных ТЕ-мод. Перспективным вариантом её решения является использование резонатора, набранного из продольных пластин. Широкие продольные щели в такой системе не изменяют электродинамических свойств поперечно-магнитной моды, в то время как колебания иных типов будут подвержены дискриминации. Одновременно с этим щели между пластинами могут использоваться для вывода из пространства взаимодействия остаточных газов и пристеночной плазмы.

Первые холодные расчеты показали возможность удержания в такой системе моды вида  $TM_{5,1}$ . (рис.1)

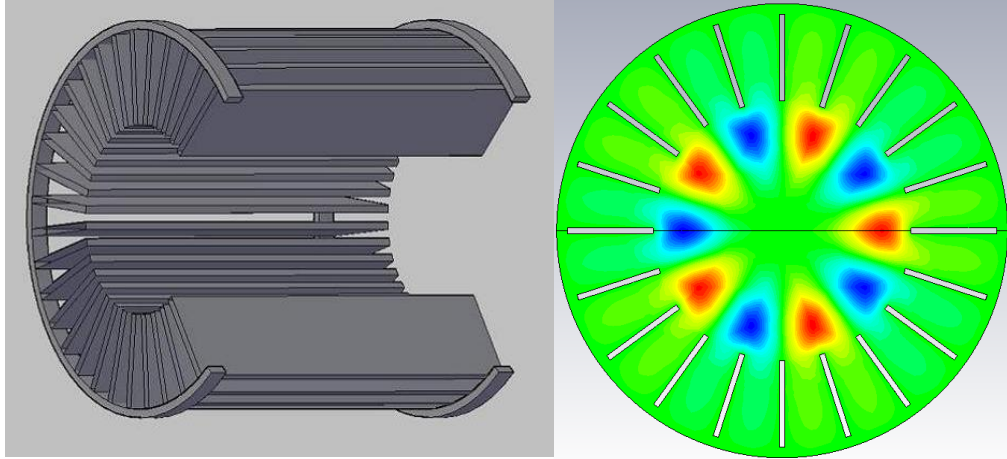


Рис.1 Концепция продольно-щелевого резонатора и поперечная структура волны типа  $TM_{5,1}$  при распространении в продольно-щелевом волноводе.

В качестве первоначальной оценки эффективности предлагаемой схемы были выполнены расчеты сильноточного гиротрона в приближении взаимодействия модой  $TM_{5,1}$  гладкого волновода на основе самосогласованной системы усредненных уравнений:

$$\begin{cases}
 \frac{d\gamma}{d\zeta} = k_{\perp} \cdot K(\zeta) \cdot \frac{p_{\perp}}{p_{\parallel}} J'_n(\xi p_{\perp}) \cdot \Im(a \cdot e^{-i\theta}) \\
 \frac{dp_{\perp}}{d\zeta} = k_{\perp} \cdot K(\zeta) \cdot J'_n(\xi p_{\perp}) \cdot \left[ \frac{\gamma}{p_{\parallel}} \Im(a \cdot e^{-i\theta}) - \Re\left(\frac{\partial a}{\partial \zeta} \cdot e^{-i\theta}\right) \right] + \frac{p_{\perp}}{2b} \frac{\partial b}{\partial \zeta} \\
 \frac{d\theta}{d\zeta} = \frac{nb - \gamma}{p_{\parallel}} + K(\zeta) \frac{nk_{\perp}\gamma}{p_{\parallel}p_{\perp}} \cdot J'_n(\xi p_{\perp}) \cdot \left[ \left( k_{\perp} \frac{p_{\perp}}{\gamma} - \frac{n}{\xi p_{\perp}} \right) \Re(a \cdot e^{-i\theta}) - \frac{np_{\parallel}}{\xi p_{\perp}} \Im\left(\frac{\partial a}{\partial \zeta} e^{-i\theta}\right) \right] \\
 2i \frac{\partial a}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 a}{\partial \zeta^2} + (h^2 - i/Q_{omh}) \cdot a + G(\zeta) K(\zeta) \left\langle \frac{p_{\perp}}{p_{\parallel}} J'_n(\xi p_{\perp}) \cdot e^{i\theta} \right\rangle
 \end{cases} \quad (1)$$

где  $\gamma$  – гамма-фактор электронов,  $p_{\perp}, p_{\parallel}$  – поперечная и продольная компоненты безразмерного импульса электронов,  $\theta$  – фаза вращательного движения электронов,  $a$  – нормированная амплитуда высокочастотного поля,  $\zeta$  – безразмерная продольная координата  $K(\zeta) = J_{m-n}(k_0 R_c R_e(\zeta)/R_w(\zeta))$  – структурный фактор связи пучка с полем,  $k_0 = \mu_{mq}/R_c$  – опорное волновое число, соответствующее критической частоте волновода с радиусом  $R_c$ ,  $\mu_{mq}$  –  $q$ -й нуль функции Бесселя  $J_m(x): J_m(\mu_{mq}) = 0$ , соответствующий рабочей моде  $TM_{mq}$ ,  $R_w(\zeta)$  – профиль резонатора,  $R_e(\zeta)$  – радиус электронного пучка,  $k_{\perp}(\zeta) = R_c/R_w(\zeta)$  – поперечное волновое число, нормированное на опорное,  $\xi = k_{\perp}(\zeta)/b(\zeta)$ ,  $b(\zeta) = 0.587 \cdot B(\zeta/k_0)/k_0$  – нормированный профиль магнитного поля,  $n$  – номер рабочей циклотронной гармоники,  $h(\zeta) = \sqrt{1 - k_{\perp}(\zeta)^2}$  – продольное волновое число, нормированное на опорное,  $Q_{omh}$  – омическая добротность рабочей моды,  $G(\zeta) = (4eI)/(m_e c^3 N_{\perp})$ ,  $I$  – ток электронного пучка в амперах,  $N_{\perp} = J_m'^2(\mu_{mq})/2$  – поперечная норма рабочей моды.

Первые результаты (рис. 2) демонстрируют правильность исходных предположений о преимуществе мод  $TM$ -типа. В частности, относительная эффективность взаимодействия, по сравнению с конфигурацией на моде  $TE$ -типа [7], возросла на 20%. Оптимальная длина

резонатора при этом увеличилась на 40%.

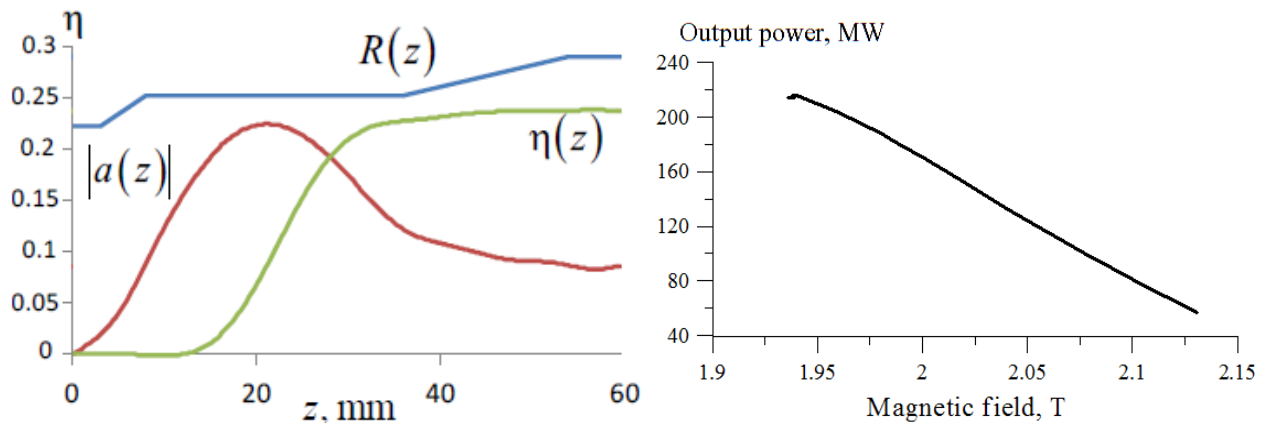


Рис.2 Результаты расчетов гиротрона на моде  $TM_{5,1}$  на основе усредненных уравнений: (слева) оптимизированный профиль резонатора, продольное распределение амплитуды поля и зависимость электронного КПД от продольной координаты; (справа) зависимость мощности генерации от магнитного поля

Для подтверждения и дополнения расчетов по усредненным уравнениям была проведена оценка электронно-волнового взаимодействия путем прямого численного моделирования методом крупных частиц на основе трехмерной версии PIC кода KARAT.

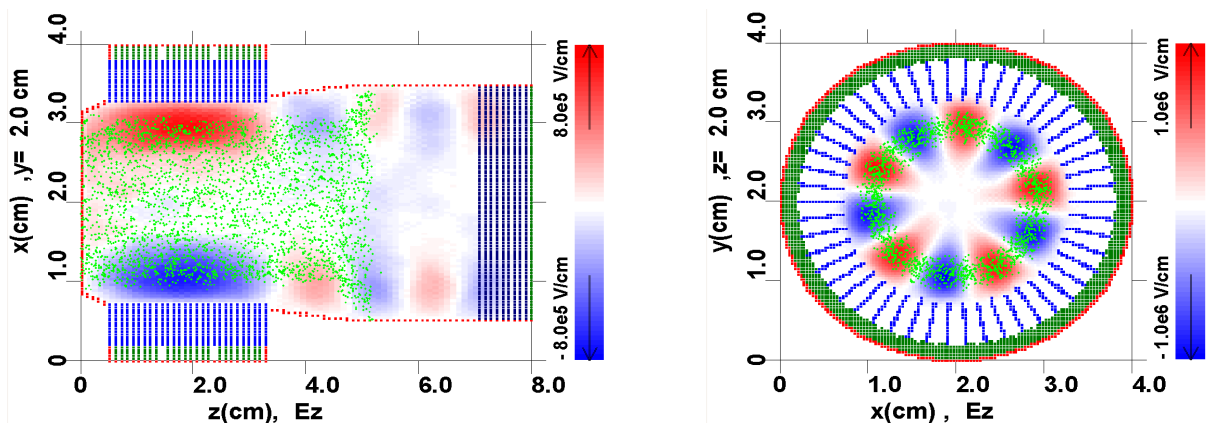


Рис.3 Результаты трехмерного PIC-моделирования релятивистского гиротрона на моде  $TM_{5,1}$ : (слева) продольная структура поля рабочей моды и мгновенное положение макрочастиц, (справа) поперечная структура поля рабочей моды в резонаторе.

PIC моделирование также подтвердило начальные предположения и показало возможность эффективного возбуждения в продольно-щелевом резонаторе моды  $TM_{5,1}$ . Максимальная мощность генерации при этом достигает 250 МВт, что соответствует КПД 25 %.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 18-38-00725.

#### Библиографический список

1. М. А. Хозин и др. // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2010, т.53, №2, с.122.
2. Власов С.Н., Копосова Е.В. // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2013, т.56, №10, с.733.
3. N. S. Ginzburg et al. // Phys. Rev. Lett. 108, 105101 (2012).
4. V. Yu. Zaslavsky et al. // Physics of Plasmas 20, 043103 (2013).
5. J. R. Sirigiri et al. // Phys. Rev. Lett. 86, 5628 (2001).
6. Гойхман М.Б. и др. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. Вып. 2. С. 75.
7. Э.Б. Абубакиров, А.Н. Денисенко, А.П. Конюшков и др. // Изв. РАН. Серия Физическая. 2018. Т. 82. №1. С. 56-60.