

# Двухслойные продольно-щелевые резонаторы для гиротронов с широкополосной перестройкой частоты

Ю.Ю. Данилов, А.Н. Леонтьев, Р.М. Розенталь, Д.Ю. Щегольков

Институт прикладной физики РАН

**Аннотация:** Предложен новый тип резонаторов гиротрона, включающий в себя внутренний и внешний цилиндрические резонаторы с равномерно расположенными по азимутальной координате продольными разрезами. Построена теория такого резонатора и выполнено моделирование методом конечных элементов, подтверждающее его высокую селективность. В рамках трехмерного моделирования методом крупных частиц выполнено сравнение выходных характеристик гиротронов диапазона 0.5 ТГц с уровнем выходной мощности 0.1-1 кВт. Показано, что по сравнению с гиротроном с традиционным резонатором со сплошной стенкой, при использовании резонатора нового типа диапазон плавной частотной перестройки может быть увеличен более чем на порядок.

**Ключевые слова:** гиротрон, терагерцовое излучение, широкополосная перестройка частоты

## 1. Введение

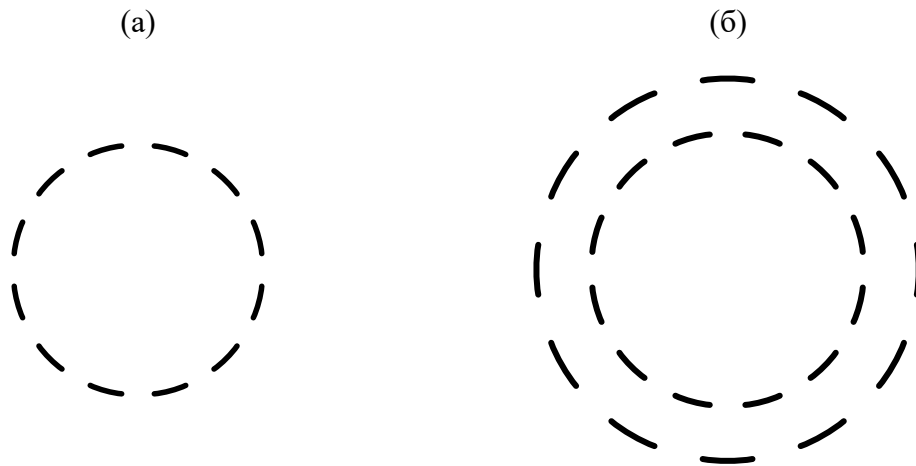
В настоящее время гиротроны являются самыми мощными источниками излучения в диапазоне до 1 ТГц [1,2] и имеют множество областей применения [3]. Среди них можно выделить спектроскопические приложения [4], требующие, в том числе, возможность плавной перестройки частоты генерации в как можно более широком диапазоне частот с большим уровнем выходной мощности. Однако создание подобных источников во многом ограничивается сложностью селекции рабочего колебания. Причина состоит в том, что существует технологический предел минимального поперечного размера резонаторов гиротронов, составляющий единицы миллиметров. В этой связи при увеличении рабочей частоты спектр мод резонатора неизбежно сгущается, что приводит к уменьшению диапазона плавной перестройки частоты. Одним из путей решения этой проблемы является модификации традиционного резонатора гиротрона, представляющего собой отрезок слабонерегулярного волновода. В данной работе предлагается новый тип резонаторов, открытых в поперечном направлении. Принцип работы таких резонаторов основан на одновременном возбуждении мод с кратными азимутальными индексами и близкими значениями собственных чисел.

## 2. Электродинамические свойства продольно-щелевого резонатора

Рассмотрим механизм селекции колебаний в предлагаемом резонаторе. Предположим, что в резонаторе круглого сечения одновременно возбуждается две моды на одной частоте, имеющие  $m$  и  $2m$  вариаций по азимуту, с одинаковой амплитудой полей на границе волновода. Суммарное поле таких мод на границе волновода будет иметь  $m$  вариаций с удвоенной амплитудой и  $m$  вариаций с половинной амплитудой. Если при этом в стенке волновода сделать  $m$  азимутальных разрывов (Рис.1а), то такое сочетание мод будет иметь преимущество по отношению к другим модам, с точки зрения величины дифракционных потерь.

В первом приближении можно положить, что по азимутальной координате боковая поверхность указанного резонатора эквивалентна гофрировке, обеспечивающей селективную связь между двумя  $H$ -модами. Магнитный ток,

создаваемый собственной модой резонатора с азимутальным индексом  $m_1$  на прямоугольном гофре, обладает гармоникой, синхронной собственной моде резонатора с азимутальным индексом  $m_2$  при условии  $m_2 - m_1 = qM$ , где  $q$  – натуральное нечётное число,  $M$  – число заходов гофра (в нашем случае, это число щелей). Селективную связь  $H$ -мод с кратными азимутальными индексами  $m$  и  $2m$  обеспечивает структура с  $M$  щелями. Винтовой электронный пучок со специально подобранным радиусом инжекции возбуждает моду  $H_{2m,n}$  с определённым направлением азимутального вращения. Эта мода возбуждает сонаправленно вращающуюся моду  $H_{m,q}$  посредством связи на 1-й гармонике гофра. Моды  $H_{2m,n}$  и  $H_{m,q}$  противоположного направления вращения возбуждаются посредством связи на 3-ей гармонике гофра. В результате, в резонаторе возбуждается комбинация двух связанных  $H$ -мод с кратными азимутальными индексами  $m$  и  $2m$  и близкими корнями производной функции Бесселя.



**Рисунок 1.** Поперечное сечение резонатора гиротрона с продольными щелями в отсутствие (а) и при наличии (б) дополнительной внешней структуры.

Ограничиваясь анализом продольно-щелевого резонатора в рамках дипольного приближения можно сделать оценки добротности резонаторной  $H$ -моды  $Q_{slit}$ , обусловленной излучением через щели продольной компоненты магнитного поля  $H_z$ . Значение добротности находится посредством решения самосогласованной системы уравнений для резонаторной моды и волноводных мод в щелях и имеет вид:

$$Q_{slit} \approx \frac{2}{f(M)} \frac{a^3 b R_0^2 L}{\lambda \kappa^2} \left( 1 - \frac{m^2}{\mu_{mp}^2} \right) \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda}{2a} \right)^2} \times \frac{1}{L} \int_0^L F^2(z) dz \quad (1)$$

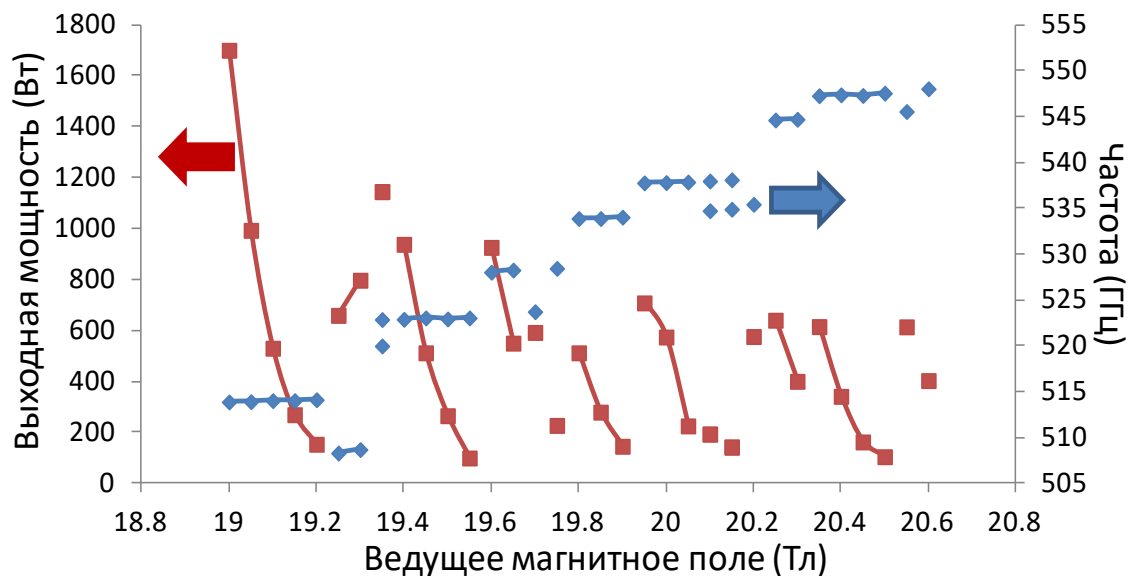
где  $a, b$  – длина и ширина щели,  $R_0$  и  $L$  – радиус и длина цилиндрического участка резонатора,  $\lambda$  – рабочая длина волны,  $m$  – азимутальный индекс рабочей моды резонатора,  $\mu_{mp}$  –  $p$ -ый корень производной функции Бесселя 1-го рода  $m$ -го порядка,  $F(z)$  – нормированное распределение продольной компоненты поля собственной моды регулярного резонатора,  $\kappa = \pi a^3 / 24 (\ln(4a/b) - 1)$  – коэффициент магнитной поляризуемости,  $f(M)$  – множитель, описывающий поляризацию рабочей моды резонатора. Для комбинации двух стоячих мод с кратными азимутальными индексами  $m$  и  $2m$  и близкими по значению корнями производной функции Бесселя данный множитель запишется в следующем виде:

$$f(M) = 2 \sum_{p=1}^M \left( \cos(m\varphi_p) + \cos(2m\varphi_p) \right)^2 = 8 \sum_{p=1}^M \left( \cos\left(\frac{m\varphi_p}{2}\right) \cos\left(\frac{3m\varphi_p}{2}\right) \right)^2, \quad (2)$$

где  $\varphi_j$  – азимутальная координата щели на боковой стенке. При этом при прорезании  $M = m$  продольных щелей  $f(M)$  принимает нулевое значение, т.е.  $Q_{slit}$  устремляется к бесконечности, что означает минимизацию потерь на излучение "супермоды", образованной модами с кратными азимутальными индексами. Среди  $H$ -мод с кратными азимутальными индексами можно выделить следующие комбинации с близкими значениями  $\mu_{\text{нр}}$ :  $H_{6,4}$  и  $H_{12,2}$  (различие значений  $\mu_{\text{нр}}$  составляет 0.6%),  $H_{8,7}$  и  $H_{16,4}$  (0.8%),  $H_{11,9}$  и  $H_{22,5}$  (0.6%) и т.д.

## 2. Трехмерное PIC-моделирование гиротрона диапазона 0.5 ТГц

Исследование возможности возбуждения продольно-щелевого резонатора винтовым электронным пучком проводилось методом "частиц в ячейках" с использованием трехмерной версии кода KARAT. В моделировании винтовой электронный пучок с энергией 20 кэВ, начальным значением отношения поперечной и продольных скоростей 1.1, начальным разбросом по поперечным скоростям 20% и током до 2 А возбуждает резонатор гиротрона с длиной 13 мм и внутренним диаметром 1.7 мм. Возбуждение происходит на основной циклотронной гармонике, расчетная частота генерации составляет около 0.52 ТГц, расчетное значение магнитного поля составляет около 20 Тл.



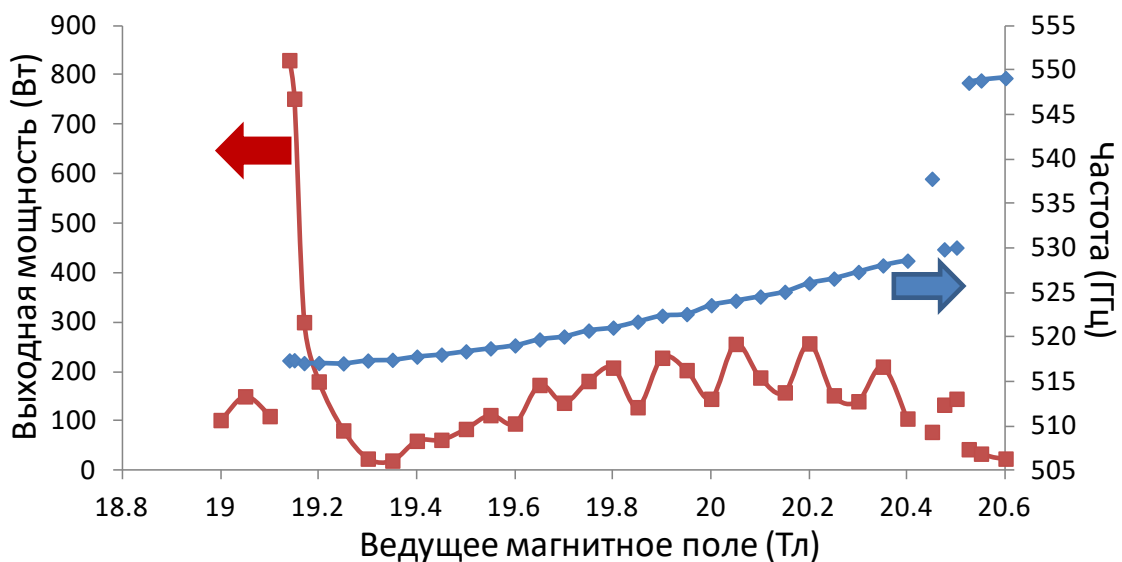
**Рисунок 2.** Зависимость мощности (■) и частоты (◆) генерации от магнитного поля в гиротроне со сплошным резонатором (ток пучка 1 А).

Моделирование показало, что в случае использования традиционного варианта резонатора со сплошной стенкой при токе пучка 2 А в гиротроне отсутствовали стационарные режимы генерации в силу одновременного возбуждения нескольких мод на разных частотах. При снижении тока до 1 А в интервале значений ведущего магнитного поля 19-20.6 Тл в системе присутствует множество областей одномодовой

генерации с частотами 0.5-0.55 ТГц (Рис.8). Максимальная мощность генерации достигала 1.7 кВт, что соответствовало эффективности взаимодействия около 8.5%.

Изменение частоты при переходе между областями стационарной генерации происходит скачкообразным образом, что связано с изменением рабочей моды и соответствующим изменением критической частоты. Максимальный диапазон плавной перестройки частоты составил около 250 МГц, что соответствует относительному диапазону перестройки 0.05%.

Для улучшения селективности резонатора в нем было сделано шесть разрезов, чтобы обеспечить удержание комбинации мод  $TE_{6,4}$  и  $TE_{12,2}$ . Дополнительно вокруг основного резонатора был размещен второй разрезной резонатор, смещенный по угловой координате на 30 градусов. Данный резонатор фактически был рассчитан на удержание комбинации мод  $TE_{6,5}$  и  $TE_{12,3}$ , чтоб обеспечивало существенное увеличение добротности "супермоды". В такой системе при токе 1 А происходило возбуждение единственной "супермоды" в диапазоне магнитных полей 19.2-20.2 Тл, частоты которой плавно менялась от 0.517 до 0.524 ТГц, что соответствовало диапазону относительной перестройки частоты около 1.3 %.



**Рисунок 3.** Зависимость мощности (■) и частоты (◆) генерации от магнитного поля в гиротроне с продольно-щелевым резонатором (ток пучка 2 А).

При увеличении тока пучка до 2 А генерация на одной моде наблюдалась в диапазоне магнитных полей 19.15-20.4 Т (Рис. 3). Диапазон частотной перестройки при этом составил 0.517-0.529 ТГц, что соответствует относительной перестройке частоты около 2.3%. Перестройка частоты была ограничена переходом на взаимодействие с другой "супермодой", частота которой находилась вблизи 0.55 ТГц. Зависимость мощности излучения от магнитного поля имела осциллирующий характер, что соответствовало последовательному возбуждению продольных мод резонатора с индексами от 1 до 9. Максимальная мощность основного рабочего колебания превышала 800 Вт, что соответствовало эффективности взаимодействия около 2%.

### 3. Заключение

В результате проведенных исследований подтверждена высокая селективность нового типа продольно-щелевого резонатора. На примере гиротрона диапазона 0.5 ТГц показана возможность увеличения диапазона плавной перестройки в несколько десятков раз, по сравнению с гиротроном с традиционным резонатором со сплошной стенкой. Дальнейшие направления исследований будут связаны с поиском возможностей селективного возбуждения колебаний на гармониках гирочастоты, что позволило бы кратко уменьшить требуемую величину магнитного поля.

Исследование выполнено в рамках государственного задания №0030-2021-0027 (Программа "Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года").

#### Список литературы

1. Dhillon S. S. et al. The 2017 terahertz science and technology roadmap // J. Phys. D, Appl. Phys. – 2017. – V. 50. – No. 4. – Art. no. 043001.
2. Thumm M. State-of-the-art of high-power gyro-devices and free electron masers // J Infrared Milli Terahz Waves. – 2020. – V. 41. – No. 1. – P. 1–140.
3. Sabchevski S. et al. Novel and Emerging Applications of the Gyrotrons Worldwide: Current Status and Prospects // J Infrared Milli Terahz Waves. – 2021. – V. 42. – No.7. – P. 715-721.
4. Глявин М.Ю. и др. Источники мощного терагерцового излучения для спектроскопии и диагностики различных сред // УФН. – 2016. – Т. 186. – №6. С. 667-677